

# **BFB-kattilan ilmajaon kehittäminen**

Joel Auvinen

Opinnäytetyö

Helmikuu 2021

Tekniikan ala

Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikka

Tekijä(t) Auvinen, Joel	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Helmikuu 2021
	Sivumäärä 78	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi <b>BFB-kattilan ilmajaon kehittäminen</b>		
Tutkinto-ohjelma Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Kari Hytönen & Hannariina Honkanen		
Toimeksiantaja(t) UPM Specialty Papers Jämsänkoski Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Vuosien saatossa muuttuneen höyrytehon peruskuormatason ja kiristyvien päästöraja-arvojen myötä voimalaitoksen pääkattilan sekundääri-ilmajärjestelmän tutkiminen oli tullut ajankohtaiseksi aiheeksi UPM Specialty Papers Jämsänkosken voimalaitoksella. Vuonna 2019 käyttöön otetun SNCR-järjestelmän toiminnan tehostamiseksi oli syytä tutkia voimalaitoksen pääkattilan ilmajakoa ja selvittää onko ilmajärjestelmän toimintaa mahdollista optimoida SNCR-menetelmän käytön tehostamiseksi nykytilanteessa. Tutkimustyön tavoitteena oli selvittää voimalaitoksen pääkattilan sekundääri-ilmajärjestelmän mahdolliset rajoitteet SNCR-lämpötilaikkunan optimoinnin suhteen ja esittää mahdollisia toimenpiteitä ilmajaon kehittämiseksi.</p> <p>Työ toteutettiin empiirisenä kehittämistutkimuksena, jossa hyödynnettiin kvalitatiivisia tutkimusmenetelmiä. Palamisen ja päästöjen hallinnan teoreettinen tarkastelu perustuu kirjallisuuslähteisiin, verkkolähteisiin ja aihetta käsitteleviin tutkimusraportteihin. Kattilan sekundääri-ilmajärjestelmän nykytilanne kartoitettiin kattilan sisäpuolisen tarkastuksen avulla ja eri kuormatasoilla suoritettujen koeajojen sekä tarkastelujaksolta kerätyn mitausdatan perusteella. Koeajojen ajalta keräiltyjen mittaustietojen perusteella pystyttiin osoittamaan ilmajaon kehittämiskohteita ja arvioitiin mahdollisia ratkaisuvaihtoehtoja havaintojen perusteella tehtyihin johtopäätöksiin.</p> <p>Työn tulokset osoittavat, ettei kattilan sekundääri-ilmajärjestelmän toiminta ole optimaalista matalilla kuormatasoilla ja SNCR-järjestelmän toiminnan tehostamiseksi tulipesän lämpötilaprofiilia täytyisi ilmavaiheistuksella muuttaa. Liiallisen ilma-aukkojen määrän vuoksi tämä ei nykytilanteessa ole mahdollista. Työn lopputulokset esittävät ratkaisuehdotuksia tulipesän optimaalisen toiminta-alueen siirtämisestä matalimmille kuormatasoille.</p>		
Avainsanat (asiasanat)		
Ilmajako, SNCR-menetelmä, lämpötilaprofiili, tulipesä, leijupoltto		
Muut tiedot (Salassa pidettävät liitteet)		

Author(s) Auvinen, Joel	Type of publication Bachelor's thesis	Date February 2021 Language of publication: Finnish
	Number of pages 78	Permission for web publication: x
Title of publication <b>Air staging development study of a BFB boiler</b>		
Degree programme Bachelor's Degree Programme in Energy and Environmental Technology		
Supervisor(s) Hytönen, Kari & Honkanen, Hannariina		
Assigned by UPM Specialty Papers Jämsänkoski Oy		
Abstract  <p>Significant decrease in boiler load levels and tightening emission standards for large combustion plants has set new challenges for UPM Specialty Papers' power plant in Jämsänkoski. As the emission standards are tightening, the power plant has invested in emission control equipment and installed an SNCR-method emission reduction equipment to its main boiler in 2019. To increase the efficiency of the SNCR-method, the boiler's secondary air system needed to be studied thoroughly to determine the possibilities of correct measures regarding the optimization of the furnace conditions by air staging. The main goal was to pinpoint the possible restrictions in the boiler's secondary air system in the decreased boiler load levels and assess possible measures to develop the air staging strategy.</p> <p>The development study was an empirical study where qualitative research methods were used. The theoretical framework of reference regarding combustion and emission control was based on literature, online sources and other related scientific study reports. The current state of the boiler's secondary air system was determined by visual inspection of the furnace and by testing the boiler at different load levels. By analyzing the results of the boiler tests and measured process data, several possible targets of development were identified and solutions for air staging optimization were presented.</p> <p>The results of the study conclude that the boiler's secondary air system is not optimized for decreased boiler load levels. In order to increase the efficiency of the SNCR-method, the furnace temperature profile would have to be adjusted with air staging. Adjusting the furnace temperature profile in low load levels is not possible in the present state as the amount of secondary air nozzles to the furnace is excessive. The final result of the study presents proposed solutions to shift the furnace's optimal range to lower boiler loads.</p>		
Keywords/tags (subjects) Air staging, SNCR-method, temperature profile, furnace, fluidized bed combustion		
Miscellaneous (Confidential information)		

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>UPM Kymmene Oyj .....</b>	<b>6</b>
2.1	UPM – The Biofore Company .....	6
2.2	UPM Specialty Papers Jämsänkoski .....	7
2.3	Jämsänkosken voimalaitos .....	8
<b>3</b>	<b>Opinnäytetyön lähtökohdat.....</b>	<b>9</b>
3.1	Opinnäytetyön taustat .....	9
3.2	Opinnäytetyön tavoitteet ja työn rajaus.....	11
3.3	Tutkimusasetelma ja käytettävät menetelmät .....	12
<b>4</b>	<b>Palaminen ja poltto .....</b>	<b>13</b>
4.1	Polttoaineen palaminen .....	13
4.2	Palamisen stökiometria .....	15
<b>5</b>	<b>Leijupolttot.....</b>	<b>16</b>
5.1	Fluidisoinnin teoria.....	17
5.2	BFB-kattila .....	19
5.3	Polttoprosessin hallinta BFB-kattilassa .....	21
5.4	Petilämpötilan hallinta .....	23
<b>6</b>	<b>Päästöt ja niiden ominaisuudet.....</b>	<b>26</b>
6.1	Merkittävimmät päästöt teollisuudessa .....	26
6.2	Päästöjen muodostuminen .....	27
6.2.1	Hiilipäästöt.....	27
6.2.2	Rikin oksidit.....	27
6.2.3	Typen oksidit.....	29
6.2.4	Muut polton päästöt .....	32
<b>7</b>	<b>NO<sub>x</sub>-päästöjen vähentämistekniikat .....</b>	<b>32</b>
7.1	Ilmavaiheistus ja alhainen ilmakerroin.....	32
7.2	Kiertokaasun käyttäminen .....	33
7.3	SCR-menetelmä .....	33

	2
7.4 SNCR-menetelmä .....	35
7.4.1 Reagenssi ja pelkistymisreaktiot .....	35
7.4.2 Lämpötilariippuvuus .....	36
7.4.3 Reagenssin viipymä ja sekoittuminen savukaasuun .....	37
7.4.4 Reagenssin annostelu .....	39
<b>8 Työn toteutus .....</b>	<b>40</b>
8.1 Nykytilanteen kartoittaminen .....	40
8.1.1 Ilma-aukkojen nykytilanne .....	40
8.1.2 Tehoalueet .....	41
8.1.3 Tulipesän lämpötilaprofiili .....	43
8.2 Koeajot .....	45
8.2.1 Koeajojen suunnittelu ja osakuormapisteiden valinta .....	45
8.2.2 50 % MCR koeajo .....	46
8.2.3 36 % MCR koeajo .....	54
8.2.4 20 % MCR koeajo .....	58
8.2.5 Koeajojen tulokset ja havaintojen yhteenveto .....	62
8.3 Ilmajaon kehittäminen .....	63
8.3.1 Sekundääri-ilmajärjestelmä .....	63
8.3.2 Vuotoilman minimointi .....	65
8.3.3 Minimileijutusmäärän alentaminen .....	67
<b>9 Johtopäätökset .....</b>	<b>68</b>
<b>10 Pohdinta .....</b>	<b>69</b>
<b>Lähteet .....</b>	<b>72</b>
<b>Liitteet .....</b>	<b>75</b>
Liite 1. K5 Etuseinä .....	75
Liite 2. K5 Takaseinä .....	76
Liite 3. K5 sivuseinät .....	77
Liite 4. SNCR-lämpötilamittaukset .....	78

## Kuviot

Kuvio 1. Jämsänkosken paperitehtaan ilmakuva.....	8
Kuvio 2. Kattilan K5 sivukuvanto .....	9
Kuvio 3. Kiinteän polttoainepartikkelin palamisen vaiheet.....	14
Kuvio 4. Hapen vaikutus palamishyötysuhteeseen .....	16
Kuvio 5. Fluidisoitunut peti käyttäytyy nesteenomaisesti.....	17
Kuvio 6. Leijutilat .....	19
Kuvio 7. Sivukuvanto tyypillisestä BFB-kattilan rakenteesta.....	20
Kuvio 8. Tyypillinen ilmavaiheistuksen toiminta-alue BFB kattilassa .....	22
Kuvio 9. Ilman epäpuhtaudet Suomessa .....	26
Kuvio 10. Yksinkertaistettu mallikaavio polttoainetyypen muodostumis- ja pelkistymisreaktioista .....	31
Kuvio 11. SCR-katalysaattori .....	34
Kuvio 12. Lämpötilaikkuna.....	36
Kuvio 13. Viipymääjan vaikutus SNCR-menetelmässä .....	38
Kuvio 14. Reagenssimäärän vaikutus vähennyshyötysuhteeseen .....	39
Kuvio 15. Yläsekundäärisuutin kattilan takaseinällä .....	41
Kuvio 16. K5 höyrykuorma vuonna 2020.....	42
Kuvio 17. K5 höyrytehon pysyvyyssäikäyrä.....	43
Kuvio 18. K5 tulipesän lämpötilaprofiili eri kuormapisteissä .....	44
Kuvio 19. Alasekundääri-ilman syöttöpisteiden muutoksen vaikutus tasokohtaiseen lämpötilaan .....	47
Kuvio 20. II-tulistimen pintalämpötilat .....	48
Kuvio 21. Happimittaukset .....	49
Kuvio 22. Urean tasovalinnan vaikutus savukaasun NO <sub>x</sub> -pitoisuuteen .....	50
Kuvio 23. 50 % MCR koeajon lämpötilaprofiili .....	51
Kuvio 24. Vaiheistuskertoimen vaikutus savukaasun O <sub>2</sub> -pitoisuuteen .....	52
Kuvio 25. II-tulistimen erisuuntaiset lämpötilamuutokset .....	53
Kuvio 26. Happijakauman epäsymmetrisyys savukaasuvirrassa.....	53
Kuvio 27. Lämpötilamuutoksen suunta vaiheistuskertoimen muutoksesta.....	55
Kuvio 28. Vaiheistuskertoimen muutos näkyy myös happimittauksissa .....	55
Kuvio 29. Urean ruiskutus tulipesän alatasolle .....	56

Kuvio 30. 36 % MCR koeajon lämpötilaprofiili .....	57
Kuvio 31. Petilämpötilan vaihtelu.....	58
Kuvio 32. Urean käyttö kattilan minimikuormalla 170 mg/Nm <sup>3</sup> -asetusarvolla ...	59
Kuvio 33. Vaiheistusilman poistamisen vaikutus savukaasuhäviöihin .....	60
Kuvio 34. 20 % MCR lämpötilaprofiili .....	61
Kuvio 35. Vaiheistusilman käyttö kuormatason mukaan .....	63
Kuvio 36. Savukaasun O <sub>2</sub> -pitoisuus on keskimäärin melko korkealla.....	65

## Taulukot

Taulukko 1. NO <sub>x</sub> -päästöraja-arvot kiinteää tai nestemäistä polttoainetta käyttävälle, yli 50 MW energiantuotantoyksiköille .....	11
Taulukko 2. Polttoaineiden rikkipitoisuuksia.....	28
Taulukko 3. Koeajon ilmajako 50 % MCR tehoalueella .....	52

# 1 Johdanto

Suurissa polttolaitoksissa palamisprosessissa muodostuvien savukaasujen pitoisuuksiin ja niiden puhdistamiseen on tyypillisesti varauduttu jo laitosten suunnitteluvaiheessa huomioimalla käytettävät polttoaineet, niiden sekoitussuhteet poltossa, kunkin polttoaineen koostumus ja niiden kemialliset ominaisuudet. Lisäksi tulipesässä tapahtuvaa palamista hallitaan muun muassa polttoaineen syötön ja palamisilman vaiheistamisella. Päästörajojen kiristyessä, niin sanotut primääriset päästöjen vähentämistekniikat eivät kuitenkaan aina riitä, vaan niiden rinnalle tarvitaan sekundäärisiä puhdistusmenetelmiä, joiden tarvetta ei suunnitteluvaiheessa voimassa olleiden päästöraja-arvojen myötä ole tiedetty tai koettu tarpeellisiksi, eikä polttolaitetta ole välttämättä optimoitu sekundääristen puhdistusmenetelmien käyttöön.

Kiristyvien päästöraja-arvojen seurauksena teolliset energiantuotantoyksiköt joutuvat kiinnittämään entistä enemmän huomiota prosesseista syntyviin savukaasupäästöihin. Tästä syystä useiden olemassa olevien tuotantolaitosten täytyy investoida savukaasujen puhdistuslaitteistoihin ja modernisoimaan tätä kautta järjestelmiään, jotta toiminta kiristyvien päästöraja-arvojen puitteissa voi jatkua.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi UPM Specialty Papers Jämsänkosken tehtaan voimalaitos, joka on investoinut sekundäärisiin päästöjen vähennysmenetelmiin ja ottanut käyttöönsä SNCR-järjestelmän. Voimalaitoksen poltonoptimointi on toteutettu ylätasoon säädöillä, jotka ovat otettu käyttöön ennen SNCR-järjestelmään investointia. Tämän seurauksena pääkattila K5:n tulipesän tasokohtaisia lämpötiloja ei SNCR-järjestelmän toiminnan kannalta ole optimoitu parhaalla mahdollisella tavalla ylätasoon säädöillä. Lisäksi K5:n sekundääri-ilmajärjestelmän suutinaukkoja on aiemmin poistettu käytöstä, eikä niiden määrästä tai sijainnista tulipesässä ole olemassa luotettavaa kirjanpitoa.

Edellä mainittujen seikkojen lisäksi voimalaitoksen tuottaman höyrytehon peruskuormataso on vuosien saatossa merkittävästi alentunut. Muuttuneiden olosuhteiden ja epäluotettavan kirjanpidon seurauksena toimeksiantajalla ei enää ole riittävän tarkkaa käsitystä K5:n sekundääri-ilmajärjestelmän toiminnasta tätä nykyä ajettavilla



kuormatasoilla. Vaikka tiukentuviin päästöraja-arvoihin on investointien ja ylätason säätöjen myötä varauduttu oli toimeksiantajalla tarve tutkia pääkattilansa sekundaari-ilmajärjestelmää SNCR-menetelmän toiminnan tehostamiseksi ilmavaiheistuksen ja tulipesän lämpötilanhallinnan avulla.

Opinnäytetyössä tutkittiin voimalaitoksen pääkattila K5:n sekundaari-ilmajärjestelmän nykytilannetta kattilalla suoritettujen koeajojen avulla. Koeajoista keräiltyjen mittaustietojen ja havaintojen perusteella arvioitiin nykytilanteessa mahdollisten vaihtoehtojen merkitystä ilmavaiheistuksen muuttamiseen ja tulipesän lämpötilaprofiilin hallintaan sekä esitettiin ratkaisuehdotuksia havaittuihin kehityskohteisiin.

## **2 UPM Kymmene Oyj**

### **2.1 UPM – The Biofore Company**

UPM Kymmene Oyj tai lyhyesti vain UPM, on suomalainen metsäteollisuusyhtiö, joka koostuu seitsemästä liiketoiminta-alueesta, UPM Biorefining, UPM Energy, UPM Rafalac, UPM Specialty Papers, UPM Communication Papers, UPM Plywood ja muista toiminnoista. Muut toiminnot pitävät sisällään puunhankinnan ja metsätalouden sekä UPM Biochemicals, UPM Biomedicals ja UPM Biocomposites -liiketoimintayksiköt. (UPM Vuosikertomus 2019, 35.)

UPM Specialty Papers tuottaa tarramateriaaleja globaaleille markkinoille sekä joustopakkausmateriaaleja ja toimistopaperia Aasian markkinoille. UPM Specialty Papers on toimialallaan markkinajohtaja-asemassa ja sen alla toimivia tehtaita Jämsänkosken lisäksi on Tervasaassa sekä Kiinassa, Changsun kaupungissa. (UPM Specialty papers 2020.)

UPM Specialty Papers Oy:n henkilöstön määrä vuonna 2019 oli 1992 henkilöä. Sen liikevaihto samana vuonna oli 1 412 miljoonaa euroa, josta vertailukelpoinen liikevoitto oli 120 miljoonaa euroa (UPM Vuosikertomus 2019, 35).

## 2.2 UPM Specialty Papers Jämsänkoski

Jämsänkosken paperitehdas sijaitsee Jämsän kunnassa. Tehtaalla on pitkä historia paperi- ja selluteollisuudesta, sillä ensimmäinen sulfiittisellutehdas käynnistyi jo vuonna 1888. Paperintuotanto Jämsänkoskella käynnistyi 11 vuotta myöhemmin, vuonna 1899. Ensimmäinen tarra- ja pakkauspapereita valmistava kone PK3 käynnistyi vuonna 1960 ja se modernisoitiin vuonna 2003. Konepäällystettyä MFC-paperia valmistava PK4 käynnistyi vuonna 1974 ja se modernisoitiin tarrapaperin valmistukseen vuonna 2007. Vuonna 2015 pysäytetty superkalanteroitua SC-paperia tuottava kone PK5 käynnistyi vuonna 1981 yhdessä TMP1-kuumahiertämön kanssa. Nykyäänkin toimiva SC-paperia tuottava kone PK6 ja TMP2 käynnistyi puolestaan vuonna 1992. PK6 modernisoitiin vuonna 2005. (Jokilaakson tehtaiden esittelymateriaali 2017, 78-79.)

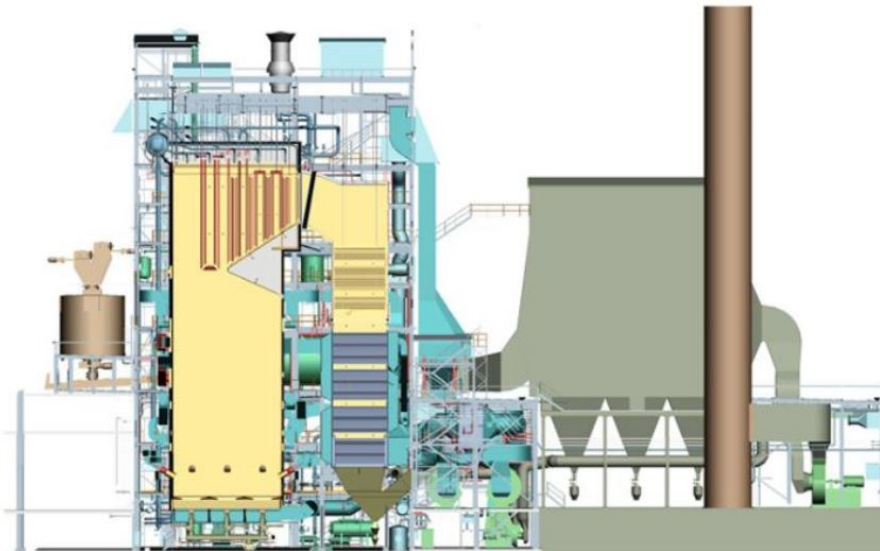
Nykyään tehtaan höyryntuotannosta vastaavat voimalaitos ja kuumahiertämön lämmöntalteenotto. Voimalaitos koostuu pääkattila K5:stä ja siihen kytketystä vastapaineturbiinista T2:sta. K5 on käynnistynyt vuonna 2002 ja vastaa tehtaan höyrykehityksestä noin 60 % osuudella, kuumahiertämön tuottaessa loput 40 %. Voimalaitoksen apukattiloina toimii öljykattilat K3 ja K4, jotka puolestaan otettiin käyttöön jo vuosina 1992 ja 1984 vastaavasti. (Jämsänkosken voimalaitoksen esittelymateriaali 2017, 4-9.) Nykyään Jämsänkosken paperitehtaassa on voimalaitoksen lisäksi kolme paperikonetta; PK3, PK4 ja PK6 (ks. kuvio 1) sekä kuumahiertäjä TMP2, puunkäsittelyosasto ja biologinen puhdistamo.



Kuvio 1. Jämsänkosken paperitehtaan ilmakekuva (Jokilaakson tehtaiden esittelymateriaali 2017, 2)

### 2.3 Jämsänkosken voimalaitos

Jämsänkosken voimalaitoksen pääkattila K5 (ks. kuvio 2) on Foster Wheeler Energian (nykyinen Sumitomo SHI FW) toimittama, porrasarinalla varustettu BFB-kattila. Kattilan maksimi lämpöteho on 185 MW ja sen maksimi höyrykuorma on 70 kg/s, paineessa 10,7 MPa ja lämpötilassa 533 °C. Pääpolttoaineena kattilassa käytetään biomassaa ja jyrshinturvetta. Biopolttoaine koostuu tehtaan omalta kuorimolta saatavasta puunkuoresta, paperiprosessissa syntyvästä prosessilietteestä, metsätähdehakeesta ja puuperäisestä ostobiomassasta. Biopolttoaineen osuus kokonaisseosmäärästä on noin 70 % ja turpeen osuus 30 % vastaavasti. Käynnistys- ja apupolttoaineena käytetään vähärikkistä raskasta polttoöljyä. (Jämsänkosken voimalaitoksen esittelymateriaali 2017, 9-12.)



Kuvio 2. Kattilan K5 sivukuvanto (Jämsänkosken voimalaitoksen esittelymateriaali 2017, 10. Muokattu)

Paperitehtaalle tuottamansa prosessihöyryn lisäksi K5 tuottaa kaukolämpöä Jämsän Aluelämpö Oy:lle ja höyryä tehdasintegraatin välittömässä läheisyydessä sijaitsevalle Genencor Internationalin entsyymitehtaalle. Höyryn- ja lämmöntuotanto varmistetaan vikatilanteissa apukattiloilla K3 ja K4. Voimalaitoksen tuottama sähköenergia tuotetaan Alstomin toimittamalla turbogeneraattorilla. Vastapaineturbiini on varustettu yhdistetyillä väliotoilla, joiden paineet ovat 1 MPa ja 0,35 MPa. Höyryturbiinin nimellisteho on 46,1 MW ja generaattorin teho on 54,2 MVA. (Mts. 22-24.)

### 3 Opinnäytetyön lähtökohdat

#### 3.1 Opinnäytetyön taustat

Opinnäytetyön toimeksiannon taustalla on käytännössä kattilan peruskuormatason merkittävä alentuminen. Nykyisin kattilaa ajetaan keskimäärin melko matalalla kuormatasolla sen huippukapasiteettiin verrattuna ja ilmavaiheistukseen liittyvät ylätason säädöt ovat otettu käyttöön ennen SNCR-järjestelmän käyttöönottoa, eikä SNCR-järjestelmän tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä ole huomioitu riittävästi ylätason

säätöjen optimoinnissa. Tämän ja epäluotettavan ilma-aukkojen määrän seurauksena toimeksiantajalla ei ole riittävän tarkkaa kuvaa sekundääri-ilmajärjestelmän toiminnasta ja optimointimahdollisuuksista nykytilanteessa. Sekundääri-ilmajärjestelmän toimivuus on polton kannalta tärkeimmässä roolissa savukaasupäästöjen hallinnassa ja siksi onkin tärkeää selvittää, vastaako ilmajärjestelmä siltä odotettua toimintatasoa nykytilanteessa. Primäärisenä päästöjen vähentämismenetelmänä ilmavaiheistuksen vaikutus savukaasupäästöjen perustasoon on merkittävä ja sen optimaalinen toiminta luo perustan myös päästöjen sekundääriseen vähentämismenetelmien toimivuudelle.

Vuosien saatossa tehtaan höyryntarpeeseen on tullut muutoksia ja kattilaa ei käytännössä ajeta lainkaan sen huippukapasiteetin rajoissa, vaan osakuormien tuomat haasteet ovat kohdistuneet palamisprosessin hallintaan ilmajaon osalta ja tätä kautta päästöjen muodostumiseen sekä niiden hallintaan. Muuttunut höyryntarve ja kiristyneet päästöraja-arvot ovat johtaneet prosessin parantamiseksi investointeihin ja vuonna 2019 Jämsänkosken voimalaitoksella otettiin käyttöön SNCR-järjestelmä, jonka avulla NO<sub>x</sub>-päästöjen muodostumista saadaan rajoitettua tulipesässä. SNCR-järjestelmän toiminta perustuu käytettävän reagenssin ja typpimonoksidin välisiin kemiallisiin reaktioihin, joita kuvaillaan tarkemmin opinnäytteen luvussa 7.4.

Jämsänkosken voimalaitos on määrittelyn mukaan suuri polttolaitos ja valtioneuvoston asetus suurten polttolaitosten päästöjen rajoittamisesta (A 936/2014, 4 §), määrittää tällaisille polttolaitoksille päästöraja-arvot käytettävän polttoaineen ja polttoainetehon mukaan. Tällä hetkellä voimassa olevat päästörajoitteet voimalaitoksen osalta täyttyvät (ks. taulukko 1.) ja SNCR-järjestelmän myötä myös seuraavaksi voimaan tuleva 180 mg/Nm<sup>3</sup> NO<sub>x</sub>-päästön raja-arvo (Lecomte, Ferrería de la Fuente, Neuwahl, Canova, Pinasseau, Jankov, Brinkmann, Roudie & Delgado Sancho 2017, 764.) on saavutettavissa.

Taulukko 1. NO<sub>x</sub>-päästöraja-arvot kiinteää tai nestemäistä polttoainetta käyttäville, yli 50 MW energiantuotantoyksiköille (A 936/2014, 4 §. Muokattu)

Voimassa olevat NO <sub>x</sub> -päästörajat [mg/Nm <sup>3</sup> ]			
Polttoaineteho P [MW <sub>r</sub> ]	Käytettävät polttoaineet		
	Biomassa ja turve	Kivihiili ja muut kiinteät polttoaineet	Nestemäiset polttoaineet
50 ≤ P ≤ 100	300	300	450
100 ≤ P ≤ 300	250	200	200
P > 300	200	200	150

SNCR-järjestelmä on kuitenkin polton jälkeinen, niin sanotusti sekundäärinen päästönhallintamenetelmä, eikä sillä pystytä vaikuttamaan savukaasupäästön perustaan kuten primäärisillä menetelmillä. Primääristen päästönhallintamenetelmien toimivuus onkin polttolaitteen optimaalisen toiminnan perusedellytys ja niiden toimivuus määrittelee myös sekundääristen menetelmien hyödyn kokonaisuudessa. Esimerkiksi SNCR-menetelmän toimivuus NO<sub>x</sub>-päästöjen hallinnassa on hyvin riippuvainen tulipesän lämpötilasta, jota hallitaan pääsääntöisesti vaiheistamalla sekundääri-ilmaa tulipesän eri tasoille.

### 3.2 Opinnäytetyön tavoitteet ja työn rajaus

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia voimalaitoksen pääkattilan ilmajärjestelmän toimivuutta nykyisessä tilanteessa ja selvittää onko optimaalista SNCR-lämpötilaikkunaa löydettävissä nykyisellä ajomallilla ja mitä kehityskohteita on tunnistettavissa ilma- jaon toiminnan tehostamiseksi. Madaltuneen peruskuormatason myötä tärkeimmiksi kysymyksiksi ilma- jaon toiminnan suhteen muodostuu sekundääri-ilman käyttö eri kuormatasoilla, tulipesän optimaalinen toiminta-alue ja SNCR-järjestelmän optimaalisen lämpötilaikkunan löytäminen tulipesän lämpötilaprofiilista. Tavoitteena näin ollen on selvittää sekundääri-ilmajärjestelmän soveltuvuus madaltuneeseen peruskuormatasoon sen nykytilanteessa ja luoda kuva mahdollisista kehityskohteista ilman käytön suhteen. Työn toteutuksen ulkopuolelle rajattiin säätöpiirien sovellussuunnittelu ja mahdolliset automaatio-sovelluksen muutokset. Työssä keskityttiin vain nykytilanteen tutkimiseen ja sekundääri-ilmajärjestelmän kehityskohteiden tunnistamiseen nykytilanteessa koeajojen ja prosessiarvojen perusteella.

### 3.3 Tutkimusasetelma ja käytettävät menetelmät

Opinnäytetyön tutkimusasetelma on sen käytännönläheisyyden ja teoreettisen tarkastelun osalta helposti tunnistettavissa kehittämistutkimukseksi, sillä sen tavoitteen saavuttamiseksi tarvittiin käytännön tutkimusta, joka toteutettiin höyrykattilalla suoritetuilla koeajoilla, ja prosessin kehittämistä koeajojen tulosten perusteella analyyttisin keinoin. Kehittämistutkimus voidaan määritellä kokonaisuudeksi, joka koostuu kvalitatiivisen ja kvantitatiivisen tutkimuksen yhdistelmästä tai vain kvalitatiivisesta tutkimuksesta koostuvasta kokonaisuudesta (Kananen 2015, 11, 39.), joka yhdessä empiirisen tutkimuksen kanssa valikoitui opinnäytetyön tutkimusmenetelmäksi.

Kvalitatiivisessa tutkimuksessa aineisto kerätään havainnoimalla ja ilmiö sisäistetään ymmärtämällä se (mts. 76-78). Opinnäytetyön osalta aineistonkeruu toteutettiin havainnoimalla ongelmaan sisältyviä ilmiöitä mitatun datan avulla ja suoritettujen koeajojen perusteella. Kvalitatiivisen tutkimuksen tueksi opinnäytetyössä käytetään myös empiiristä eli kokemusperäistä tutkimusta tulosten ja ratkaisujen arvioinnissa. Kun empiiristä tutkimusta käytetään kvalitatiivisen tutkimuksen tukena, pyritään teoreettiset ja käytännössä tapahtuvat ilmiöt sitomaan toisiinsa ongelman ratkaisemiseksi.

Opinnäytetyön aihe on alalla laajalti tutkittua, joten toteuttamisen ja luotettavuuden todentamiseen tarvittava tietoperusta luotiin useista alalla luotettaviksi todettujen kirjallisuuslähteiden ja muiden samankaltaisten tutkimusten avulla, hyödyntämällä suomalaisia ja ulkomaisia kirjallisuus- ja verkkolähteitä. Teoreettisen viitekehyksen luonti pyrittiin laatimaan käyttämällä laajaa lähdekirjoa sekä hyödyntämällä toimeksiantajalta sisäisesti saatavia dokumentteja ja prosessiarvoja.

Työn toteutusta varten suunniteltujen koeajojen suunnittelussa ja toteutuksessa hyödynnettiin laitoksella työskentelevien toimihenkilöiden ja työntekijöiden laajaa tieto- ja ammattitaitoa. Kattilalla suoritettavat koeajot suoritettiin määritellyissä kuormapisteissä siten, että prosessiolosuhteet pidettiin mahdollisimman vakaina. Näin prosessiin vaikuttavien muuttujien määrää saatiin vähennettyä, jonka seurauksena tulosten analysointi oli luotettavampaa.

## 4 Palaminen ja poltto

### 4.1 Polttoaineen palaminen

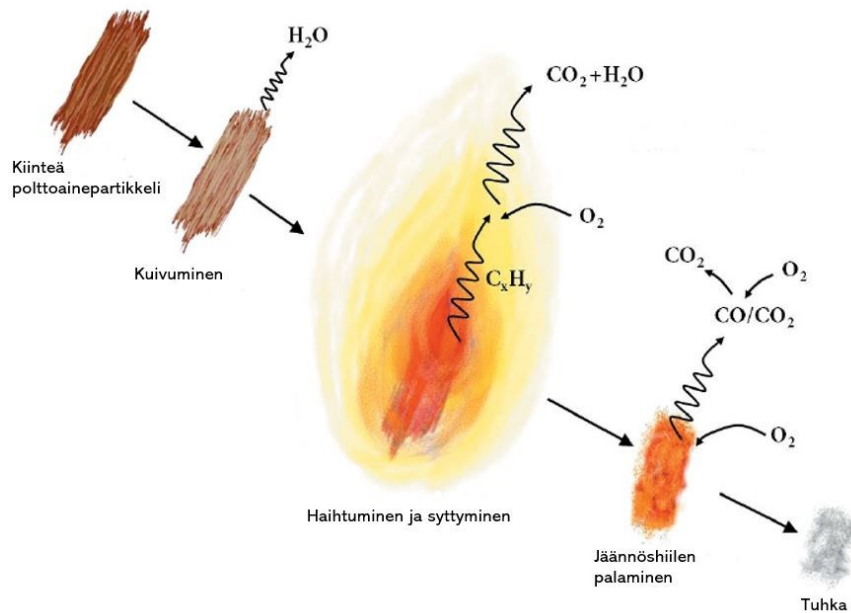
Palamisella tarkoitetaan sellaista hapen ja polttoaineen välistä reaktiota, jossa polttoaineen sisältämät hapettumiskykyiset alkuaineet yhtyvät happimolekyylien kanssa pääsääntöisesti eksotermisesti. Tällöin polttoaineen sisältämä kemiallinen energia muuttuu vallitsevien olosuhteiden vuoksi lämpöenergiaksi. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 79.)

Palamisreaktion muodostumiseksi tarvitaan aina palamiseen käytettävä polttoaine, tarvittava määrä happea sekä riittävän korkea lämpötila. Palamisreaktion ylläpitämiseksi tarvitaan edellä mainitun lisäksi myös katkeamaton ketjureaktio, jossa polttoaine voi yhtyä hapen kanssa. Koska palamisprosessi on riippuvainen myös polttoaineen ja hapen sekoittumisesta ja lämmönsiirtymisestä polttoaineeseen, on myös viipymääjan oltava riittävä. (Mts. 79-90; Honkanen 2020, 2.)

Palamisprosessi voidaan yksinkertaistaa jakamalla se kolmeen vaiheeseen (ks. kuvio 3); kuivumis- ja lämpenemisvaiheeseen, haihtumis- ja syttymisvaiheeseen eli pyrolyysivaiheeseen ja viimeiseksi jäännöshiilen palamiseen. Mikäli polttoainepartikkeli on suuri voi osa tai kaikki palamisen vaiheet tapahtua samanaikaisesti. Tällöin polttoainepartikkelin ulkopinta palaa, vaikka kuivuminen on vielä sen ytimessä käynnissä. (Vainio 2014, 5.)

Kiinteän polttoainepartikkelin palamisnopeuteen ja -prosessiin vaikuttavat oleellisesti sen kemialliset, fysikaaliset ja rakenteelliset ominaisuudet kuten reaktiivisuus, lämmönjohtavuus ja partikkelikoko. Esimerkiksi korkea lämpöarvo ja lämmönjohtavuus ei vielä itsessään viittaa korkeaan palamisnopeuteen, sillä partikkelin rakenteelliset ominaisuudet voivat rajoittaa palamisprosessin etenemistä hitaamman aineensiirron seurauksena. (Raiko, Saastamoinen, Hupa & Kurki-Suonio 2002, 181-188.)





Kuvio 3. Kiinteän polttoainepartikkelin palamisen vaiheet (Vainio 2014, 5. Muokattu)

Palamisprosessin ensimmäisessä vaiheessa polttoainepartikkelin sisältämä vesi höyrystyy ja poistuu partikkelissa olevien mikrohuokoisten kautta. Kun tarpeeksi höyrystymistä on tapahtunut ja partikkeli on tarpeeksi kuiva, lämpenee se syttymislämpötilaansa, jolloin palamisen toinen vaihe voi alkaa. Haihtumisvaiheessa partikkeli alkaa muuntua kaasumaiseen muotoon hiilivety-yhdisteiden vapautuessa sen pinnalta. Kiinteä polttoainepartikkeli voi muuntua myös tervamaiseen muotoon. Kun vapautuneet hiilivety-yhdisteet yhtyvät korkeassa lämpötilassa hapen kanssa, syntyy kaasun syttymisen seurauksena näkyviä liekkejä. Palamisessa näkyvät liekit johtuvatkin juuri tästä syystä, eikä palamisprosessin muissa vaiheissa näkyviä liekkejä ole. (Vakkilainen 2016, 33, 35.) Vapautuvat hiilivedyt reagoivat hapen kanssa reaktioyhtälön R1 mukaisesti:



missä hiili- (C) ja vetyatomit (H) reagoivat yhden happimolekyylin ( $O_2$ ) kanssa muodostaen hiilidioksidia ( $CO_2$ ) ja vesihöyryä ( $H_2O$ ).

Pyrolyysivaiheen jälkeen palamisprosessin viimeisessä vaiheessa on jäljellä enää kiinteää hiiltä, joka palaa liekittömänä ja muodostaen hiilidioksidia reaktioyhtälön R2 mukaisesti:

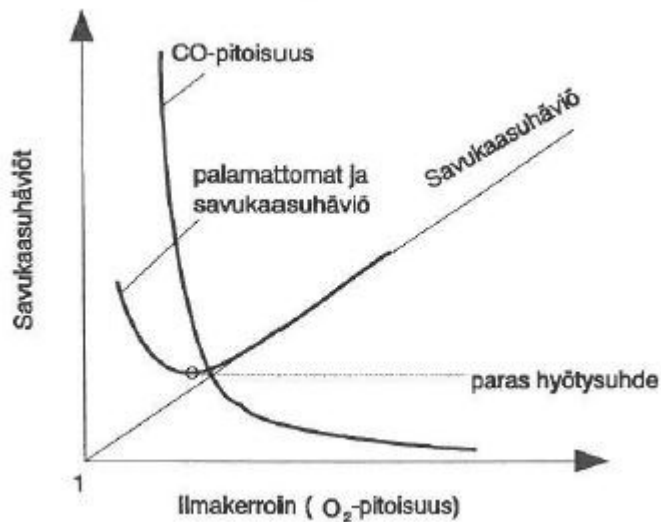


Jäänöshiilen palamisen jälkeen jäljelle jää ainoastaan palamatonta ainesta eli tuhkaa, joka koostuu lähinnä epäorgaanisista materiaaleista ja maa-alkalimetalleista. Tuhkan koostumus riippuu poltettavan materiaalin mineraalikoostumuksesta. Tuhkapitoisuus heikentää polttoaineen lämpöarvoa sekä aiheuttaa likaantumista ja kuo-  
naantumista, jotka voivat esimerkiksi aiheuttaa lämpökorroosiota tulipesän lämmön-  
siirtopintoihin (Turunen 2019, 2-4).

## 4.2 Palamisen stökiometria

Palamisprosessissa saatavilla oleva hapen määrä määrittää palamisen laadun. Palaminen on joko stökiometristä, täydellistä tai epätäydellistä. Stökiometrisessä palamisessa kaikki polttoaineen sisältämät palavat aineet reagoivat täydellisesti kaiken käytössä olevan hapen kanssa, jolloin jäännöshapetta tai palamatonta polttoainetta ei palamisprosessista jää. Palamisen stökiometrisen tarkastelun avulla saadaan selville palamiseen tarvittava teoreettinen minimi-ilmamäärä, joka ei kuitenkaan käytännön-  
tilanteissa ole riittävä, sillä palaminen ei käytännössä tapahdu ideaaliolosuhteiden  
vallitessa ajan, sekoittumisen ja lämpötilojen suhteen. Tällöin osa polttoaineesta jää  
palamattomaksi ja muodostuu muun muassa häkäkaasuja ja muita epätäydellisestä  
palamisesta aiheutuvia päästöjä. Jotta palaminen saataisiin saatettua mahdollisim-  
man pitkälle, mahdollisimman hyvällä palamishyötysuhteella, on olosuhteiden oltava  
käytännössä hapen osalta yli-stökiometriset. (Vakkilainen 2016, 37.)

Ylimääräistä ilmaa ei kuitenkaan saa olla liikaa, sillä liian suuri ilmakerroin lisää pala-  
misprosessiin osallistumattoman ilmavirran määrää tulipesän läpi, jonka vuoksi pala-  
mishyötysuhde huononee heikentyneen sekoittumisen ja savukaasuhäviöiden kasva-  
essa. Kuviossa 4 on esitetty ilmakertoimen vaikutus savukaasuhäviöihin ja palamis-  
hyötysuhteeseen. (Huhtinen ym. 2000, 91.)



Kuvio 4. Hapen vaikutus palamishyötysuhteeseen (Huhtinen ym. 2000, 91.)

Paras palamishyötysuhde saavutetaan silloin, kun savukaasuhäviö on mahdollisimman pieni ja koska käytännössä tapahtuvan hapen ja polttoaineen epätäydellisen sekoittumisen myötä syntyy aina CO-päästöjä, voidaan palamisprosessia optimoida savukaasun CO-pitoisuuden avulla. Tyypillisesti paras palamishyötysuhde saavutetaan leijupoltossa ilmakertoimella 1,1 – 1,4. (Huhtinen ym. 2000, 91, 159; Vakkilainen 2016, 219.)

## 5 Leijupolttu

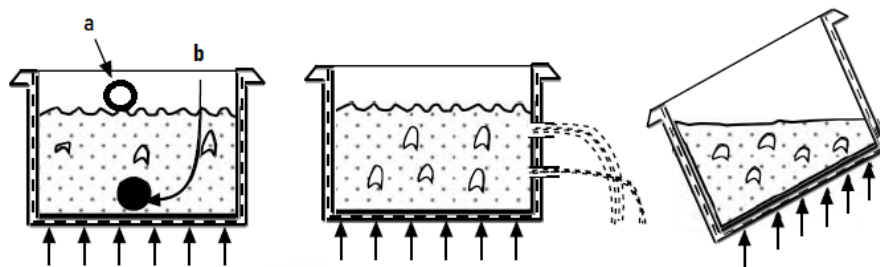
Leijupolttu on yleistynyt polttotekniikkana huomattavasti sen kehittyttyä kaupalliselle tasolle 1970-luvulla ja onkin nykyään yksi tärkeimpiä polttotekniikoita kiinteiden polttoaineiden poltossa. Leijukerrosolttu mahdollistaa huonolaatuisten ja useiden polttoainelaatujen samanaikaisen polton ympäristöystävällisesti matalien polttolämpötilojen ja hyvän sekoittumisen vuoksi. Alhaisella palamislämpötilalla ja ilmavaiheisuksella saavutetaan matalat NO<sub>x</sub>-päästöt ja hyvällä sekoittumisella päästään korke-

aan palamishyötysuhteeseen. Myös rikinpoistomenetelmät ovat leijupoltossa helposti toteutettavissa, sillä petimateriaaliin sekaan voidaan lisätä rikkiä sitovaa sorbenttia. (Raiko ym. 2002, 490; Basu 2006, 10-12; Vakkilainen 2016, 13-15.)

## 5.1 Fluidisoinnin teoria

Fluidisoinnin teoriassa käsitellään rakeisen materiaalikerroksen käyttäytymistä silloin kun sen läpi puhalletaan kaasua eri virtausnopeuksilla. Petimateriaalin partikkelien ominaisuudet kuten niiden koko ja muoto, tiheys ja jakauma petissä, yhdessä kaasun ominaisuuksien kanssa, määrittävät petin leijutilan saavuttamiseksi tarvittavan kaasun virtausnopeuden. Kaasun virtausnopeuden ollessa alle petin minimileijutusnopeuden, eivät petipartikkelit liiku toisiinsa nähden ja peti pysyy näin ollen kiinteässä tilassa. Jos leijutusnopeutta nostetaan tarpeeksi, paine-ero petimateriaalin yli vakiintuu ja peti fluidisoituu jolloin kaasuvirtaus nostaa petin leijumaan staattisesti. (Basu 2006, 25.)

Fluidisoidussa tilassa kaasun virtauksen vastusvoima on yhtä suuri kuin petipartikkeleihin vaikuttavien voimien summa. Tällöin petin paine-ero edellä mainitun mukaan vakiintuu ja muuttuu yhtä suureksi, kuin petipartikkelien paino pinta-alaa kohden, jolloin peti alkaa käyttäytymään nesteenomaisesti. Kuviossa 5 on havainnollistettu petin fluidisoitunutta tilaa minimileijutusnopeudella. Nesteenomaisesti petiä tiheimmät kappaleet (b) vajoavat sen pohjalle ja tiheydeltään pienemmät kappaleet (a) jäävät kellumaan petikerroksen päälle (mts. 22). Kuvassa ylöspäin osoittavat nuolet osoittavat leijutuskaasun virtauksen suuntaisesti.



Kuvio 5. Fluidisoitunut peti käyttäytyy nesteenomaisesti (Basu 2006, 22. Muokattu)

Virtausnopeutta, jolla peti siirtyy kiinteästä tilasta fluidisoituun tilaan, kutsutaan minimileijutusnopeudeksi  $U_{mf}$  ja se voidaan teoreettisesti määrittellä kaavan 1 avulla: (Vakkilainen 2016, 213-214.)

$$U_{mf} = \frac{\mu_s}{d_p \rho_p} \left( \sqrt{33,7^2 + 0,0408 * \frac{d_p \rho_p (\rho_g - \rho_p) g}{\mu_g^2}} - 33,7 \right) \quad (1)$$

missä  $\mu_s$  = kaasun dynaaminen viskositeetti ( )  
 $d_p$  = petipartikkelin halkaisija (m)  
 $\rho_g$  = kaasun tiheys (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\rho_p$  = partikkelin tiheys (kg/m<sup>3</sup>)  
 $g$  = putoamiskiihtyvyys (9,81 m/s<sup>2</sup>).

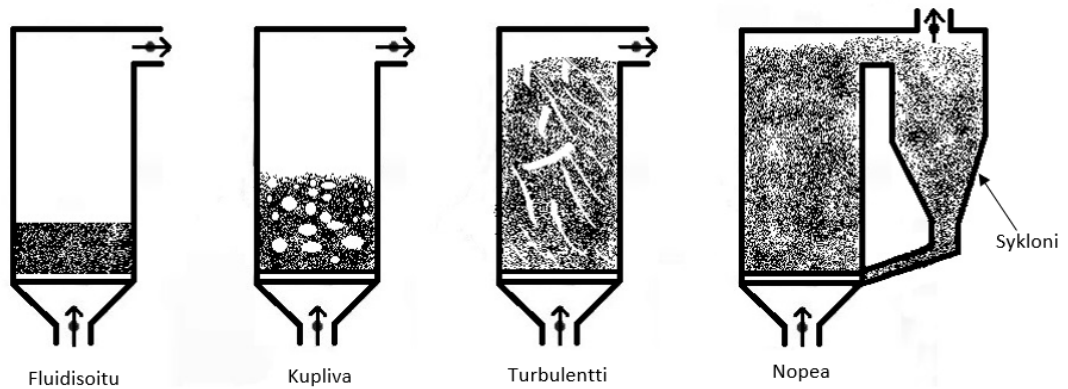
Kun petin fluidisoidun tilan saavuttamiseksi tarvittava kaasumäärä ylitetään, ylimääräinen kaasu läpäisee petikerroksen aiheuttaen petin kuplintaa. Tämän transition lopputuloksena syntyy leijutilaa kutsutaan kuplivaksi tilaksi. Kun leijutuskaasun virtausnopeutta kasvatetaan yli minimikuplitanopeuden, alkaa peti laajentumaan. Leijutusnopeuden kasvaessa peti siirtyy turbulentiin leijutilaan, jossa kuplapetin ja vapaan tilan rajapintaa ei enää selvästi havaita. Tällöin leijutusnopeus on saavuttanut terminaalinopeuden ja petimateriaalihävikkiä sen pinnasta alkaa tapahtumaan. Terminaalinopeus  $U_t$  voidaan määrittellä kaavalla 1.1: (Mts. 216.)

$$U_t = \sqrt{\frac{4}{3} * \frac{d_p (\rho_p - \rho_g)}{\rho_g C_d} * g} \quad (1.1)$$

missä  $C_d$  = virtauksen vastuskerroin.

Terminaalinopeuden ylittyessä alkaa petimateriaalin hävikin määrä kasvamaan ja päästään niin sanottuun nopeaan leijutilaan (Basu 2006, 26-40). Nopean leijutilan hyödynnettäväksi käytännönsovelluksissa tarvitaan kiintoaine-erotin, joka palauttaa

petin päältä karanneen materiaalin takaisin petiin sen alaosan kautta (Raiko ym. 2002, 491). Kuviossa 6 on havainnollistettu leijutilat kattilan tulipesässä.



Kuvio 6. Leijutilat (Raiko ym. 2002, 492. Muokattu)

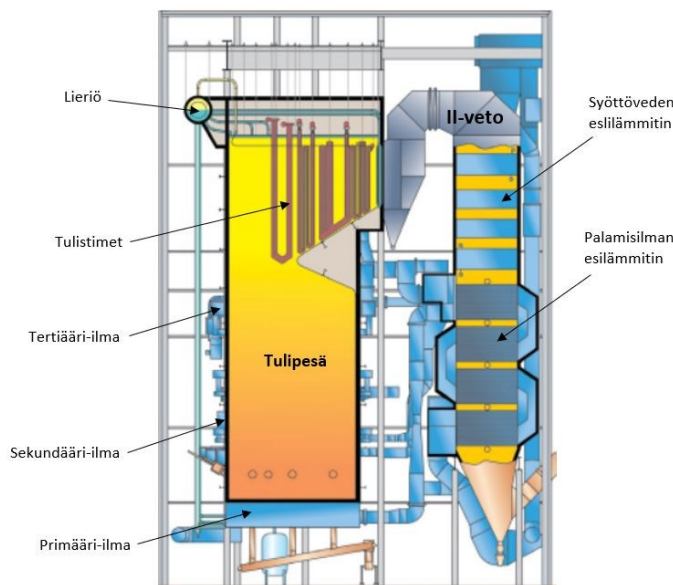
Kuplivassa leijutilassa tapahtuvaa polttoprosessia kutsutaan kuplapetipoltoksi tai kerrosleijupoltoksi. Tätä polttotekniikkaa hyödyntäviä kattiloita kutsutaan yleisesti BFB-kattiloiksi (bubbling fluidized bed). Kattilat, jotka puolestaan hyödyntävät poltossa nopeaa leijutilaa ovat kiertopetikattiloita. Yleisesti nämä kattilat tunnetaan lyhenneellä CFB-kattila (circulating fluidized bed).

## 5.2 BFB-kattila

BFB-kattilassa palamisprosessi saa alkunsa sen tulipesässä kuplivassa leijupetissä, jonka leijutilaa ylläpidetään suutinarinan läpi puhallettavalla leijutuskaasulla. Leijutuskaasun virtausnopeus on BFB-kattilassa tyypillisesti välillä 1 – 3 m/s. Polttoaine annostellaan tulipesän seinässä olevien aukkojen kautta, syöttämällä se mahdollisimman tasaisella jaolla leijupetin päälle. Kuuma petimateriaali siirtää lämpöä polttoaineeseen ja aiheuttaa polttoaineen palamisen. Polttoaineesta vapautunut lämpö siirtyy osittain takaisin petiin, jolloin polttoaineen palamisreaktiota varten tarvittava lämpö saadaan ylläpidettyä petimateriaalissa. (Vakkilainen 2016, 218, 225.)

Painavimpien polttoainepartikkelien palaessa petissä, kevyemmät partikkelit palavat petin päällä tulipesän vapaassa palotilassa, jossa palaminen saatetaan loppuun ilma- vaiheistuksen avulla. BFB-kattilan ilmajako koostuu suutinarinan läpi puhallettavasta primääri-ilmasta, sekä vapaaseen palotilaan syötettävästä palamisilmasta. Tulipesän vapaaseen palotilaan syötettävä vaiheistusilma on jaettu tyypillisesti tulipesän koon mukaan sekundääri- ja tertiääri-ilmaksi. (Mts. 220.)

Tulipesän muotoilun vuoksi BFB-kattilassa siirtyvästä lämmöstä valtaosa siirtyy säteilemällä, eikä savukaasun matalan virtausnopeuden vuoksi konvektiivinen lämmönsiirtyminen tulipesässä ole kovinkaan merkittävässä roolissa. Lämpöä siirtyy tulipesässä sitä ympäröiviin vesijähdytteisiin putkiseiniin (painerunko), joissa vesi lopulta höyrystyy. Riippuen kattilan tyypistä höyry virtaa joko höyrylieriön kautta tai suoraan tulipesän yläosassa sijaitseville tulistimille, joissa kylläinen vesihöyry tulisteetaan tulipesästä säteilevän lämmön ja savukaasujen kuljettaman lämmön avulla. Tulipesän jälkeen alkaa kattilan palotilasta erillinen osa, jossa lämpöä siirtyy lähinnä konvektiivisesti kuumien savukaasujen virtauksen seurauksena. Kattilan konvektioosaan, jota kutsutaan yleisesti taka- tai II-vedoksi, on tyypillisesti sijoitettu syöttöveden ja palamisilman esilämmittimet. (Teir 2002, luku 3, 8.) Hyvin tyypillinen BFB-kattilan rakenne on esitetty kuviossa 7.



Kuvio 7. Sivukuvanto tyypillisestä BFB-kattilan rakenteesta (Sumitomo SHI FW 2020. Muokattu)

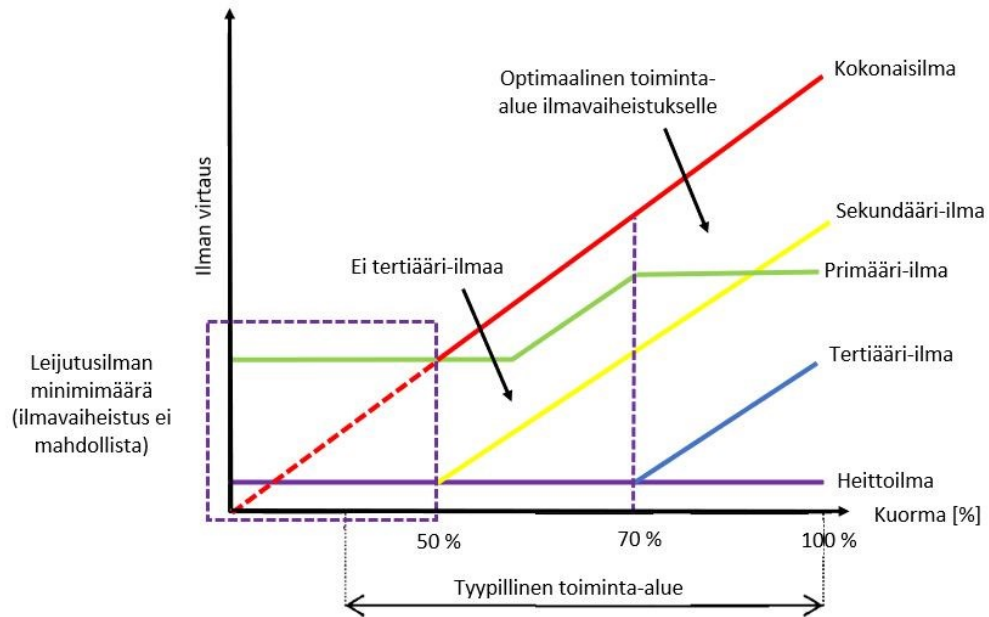
### 5.3 Polttoprosessin hallinta BFB-kattilassa

Jotta polton haitallisten päästöjen määrä voidaan pitää mahdollisimman alhaisena, on tulipesässä tapahtuvaa polttoprosessia hallittava jatkuvasti polttoaineen syötön, petilämpötilan ja tulipesän lämpötilajakauman avulla, siten että tulipesästä poistuva savukaasu on hallitusti halutussa lämpötilassa ja polton päästöt minimaalisia.

BFB-kattilassa tapahtuvaa polttoprosessia tulipesässä hallitaan pääasiassa vaiheistusilmalla siten, että palaminen niin sanotusti pilkkotaan pystysuuntaisesti tulipesän eri alueille. Käytännössä tämä tapahtuu siten, että syötettävä polttoaine palaa petissä vain osittain ja palaminen saatetaan loppuun vaiheistusilman avulla. Ilmavaiheistuksella tulipesän lämpötilajakauma on helposti hallittavissa, tulipesästä poistuvan savukaasun lämpötila pysyy haluttuna lämmönsiirtoa varten ja ilmakerroin pysyy alhaisena. Tästä syystä myös BFB-kattilan päästöt pysyvät alhaisina (Jukola, Huttunen, Dernjatin & Heikkilä 2013, 2-6.)

Mahdollisuudet ilmavaiheistukselle kuitenkin ovat hyvin pitkälti riippuvaisia kattilan polttoainetehosta ja ajettavasta tehoalueesta. Kuviossa 8 on esitetty tyypillinen ilmavaiheistuksen toiminta-alue kattilan kuorman suhteen. Kuvaajasta havaitaan, että mitä pienemmällä kuormalla kattilaa operoidaan, sitä rajoittuneempaa ilmavaiheistaminen on. Suurimmaksi ilmavaiheistuksen rajoitteeksi muodostuu näin ollen primääri-ilman minimimäärä, joka pysyy alhaisilla kuormilla hyvin pitkälle vakiona petin leijutuksen vuoksi. Joissain tilanteissa petissä olevan hapen määrää voidaan rajoittaa korvaamalla osa primääri-ilmasta kiertokaasulla, jolloin ilmavaiheistusta voidaan osittain hyödyntää myös pienemmillä kuorma-alueilla. Osa primääri-ilmasta käytetään heittoilmana, jonka tarkoituksena on varmistaa polttoaineen syöttötorvien jäähdytys ja syötettävän polttoaineen jakautuminen petiin. (NOx emission study 2011, 8-11.)





Kuvio 8. Tyypillinen ilmavaiheistuksen toiminta-alue BFB kattilassa (NO<sub>x</sub> emission study 2011, 11. Muokattu)

Jotta petiin syötettävä polttoaine varmasti palaa, on petilämpötila pidettävä 700 °C - 900 °C välillä. Petilämpötilan noustessa liian korkeaksi, alkaa petimateriaalin sisältämä tuhka pehmenemään, jolloin petimateriaalin liiallista agglomeroitumista alkaa tapahtumaan. Liiallisen agglomeroitumisen seurauksena petipartikkelikoko kasvaa ja petin leijutusominaisuudet heikkenevät merkittävästi. Korkeammissa lämpötiloissa voi tapahtua myös tuhkan sintraantumista, joka voi johtaa koko petimateriaalin solidifointumiseen. Tällaisissa tapauksissa leijutusprosessi estyy ja näin ollen myös poltto-prosessi keskeytyy. Pienillä kuormilla polttoainetta ei välttämättä kuitenkaan saada syötettyä tarpeeksi petilämpötilan ylläpitämiseksi. Vaikutus korostuu esimerkiksi biopolttoaineilla, joiden kosteusprosentti on suuri, sekä hienojakoisilla polttoaineilla, kuten turpeilla ja puuperäisillä sahanpuruilla. Hienojakoiset polttoaineet palavat pääasiassa tulipesän vapaassa palotilassa, eivätkä näin ollen vapautta energiaa leijupetiin. (Huhtinen ym. 2000, 158; Vakkilainen 2016, 219.)

## 5.4 Petilämpötilan hallinta

Petilämpötilan hallinta on yksi tärkeimmistä poltonhallintaan liittyvistä tekijöistä leijukattiloissa. Se määrittää hyvin pitkälle mahdollisuudet ilmavaiheistukseen ja polton päästöjen muodostumiseen. Petin poikkipinta-ala ja korkeus vaikuttavat oleellisesti sen kykyyn varastoida lämpöenergiaa, sillä mitä suurempi on petin tilavuus, sitä enemmän se pystyy ylläpitämään lämpötilaansa polttoaineen laadun vaihdellessa. Sen on kyettävä lämmittämään syötettävä leijutuskaasu tarpeeksi korkeaan lämpötilaan ja syötettävä polttoaine petilämpötilaa vastaavaksi, menettämättä liikaa varastoimaansa energiaa. Primääri-ilma syötetään esilämmitettynä tulipesään tulipesän pohjalla olevan suutinarinan kautta, jonka seurauksena peti leijuu. Riippuen kattilan kuormasta, primääri-ilman osuus tulipesän kokonaisilmamäärästä on normaalisti noin 35 – 70 %, jolloin palamisreaktioiden loppuun saattamiseksi tarvittava ilmamäärä syötetään tulipesään petin yläpuolelta edellisessä luvussa selitetyllä tavalla. (Kitto & Stultz 2004, luku 17-6.)

Biomassaa poltettaessa petin ilmamäärä tulee pitää alle stökiometrisenä, jolloin petissä oleva hapen määrä ei ole riittävä täydelliseen palamiseen ja kaikki saatavilla oleva happi saadaan kulutettua. Tällöin palamista voidaan jakaa tulipesän eri tasoille ilmavaiheistuksen avulla. Primääri-ilman virtausta lisättäessä hapen määrä petiin kasvaa, jonka seurauksena enemmän polttoainetta voi hapettua. Tällöin petilämpötila alkaa nousemaan polttoaineen vapauttaessa enemmän energiaansa pitemmälle toteutuneen palamisen seurauksena. Ilmiö on käänteinen, kun primääri-ilman virtausta vähennetään, mutta tämä ei aina, minimileijutusnopeuden rajoittaessa kattilan minimikuormaa, ole mahdollista. (Mts. 17-6.)

Sellaisissa tapauksissa, joissa petilämpötila nousee, eikä primääri-ilmamäärää voida vähentää, esimerkiksi polttoaineen ollessa liian hyvää kattilan minimikuormalla ajettaessa, voidaan petilämpötilaa laskea kierrättämällä jäähtyneitä savukaasuja primääri-ilman sekaan. Tällöin petimateriaali joutuu luovuttamaan enemmän siihen sitoutunutta lämpöenergiaa leijutuskaasun lämmittämiseen, jolloin petin lämpötilamuutos kääntyy negatiiviseksi ja petin lämpötila laskee niin kauan, kunnes peti on

saavuttanut tasapainotilan lämpötilan suhteen. (Basu 2006, 221; Kitto & Stultz 2004, luku 17-7.)

Petin lämpötasetta voidaan tarkastella huomioimalla kaikki siihen siirtyvät ja siitä poistuvat energiavirrat aukikirjoittamalla taseyhtälö 2: (Basu 2006, 221.)

$$\dot{Q}_{bed,in} = \dot{Q}_{bed,out} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{pa} + \dot{Q}_{1a} + \dot{Q}_{fgr} = \dot{Q}_{fg} + \dot{Q}_{ash} + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{conv}. \quad (2.1)$$

Yhtälössä petiin siirtyvät energiavirrat koostuvat syötettävästä polttoaineesta ( $\dot{Q}_{pa}$ ), primääri-ilmasta ( $\dot{Q}_{1a}$ ) ja kiertokaasusta ( $\dot{Q}_{fgr}$ ). Riittämättömän hapen määrän seurauksena polttoaineen sisältämä energia ei kokonaisuudessaan vapaudu vielä petissä, jonka vuoksi termi  $\dot{Q}_{pa}$  täytyy kirjoittaa seuraavaan muotoon:

$$\dot{Q}_{pa} = \dot{m}_{pa} * X * HHV \quad (2.2)$$

missä,  $\dot{m}_{pa}$  = polttoaineen massavirta (kg/s)

$X$  = polttoaineen petissä tapahtuvan palamisen osuus

$HHV$  = polttoaineen kalorimetrinen lämpöarvo (kJ/kg).

Yhtälössä 2.1 termi  $\dot{Q}_{1a}$  riippuu syötettävän primääri-ilman määrästä ja lämpötilasta. Termi voidaan ratkaista kaavalla 2.3:

$$\dot{Q}_{1a} = \dot{m}_{1a} * h_{@T} \quad (2.3)$$

missä,  $\dot{m}_{1a}$  = primääri-ilman massavirta (kg/s)

$h_{@T}$  = primääri-ilman entalpia (kJ/kg).

Termi  $\dot{Q}_{fgr}$  voidaan ratkaista kaavan 2.3 avulla, korvaamalla termit kiertokaasun massavirralla ja entalpialla.

Yhtälön 2.1 vasemmalla puolella on petistä poistuvat energiavirrat, jotka koostuvat savukaasujen mukana poistuvasta energiasta ( $\dot{Q}_{fg}$ ), poistuvasta tuhkasta ( $\dot{Q}_{ash}$ ) sekä petistä säteilevästä ja konvektiivisesti seiniin siirtyvästä lämmöstä ( $\dot{Q}_{rad}$ ) ja ( $\dot{Q}_{conv}$ ). Petistä säteilevän lämpöenergian määrää tulipesän vapaaseen palotilaan voidaan kuvata yhtälön 2.4 avulla:

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \varepsilon_b A_b * (T_b^4 - T_{vp}^4) \quad (2.4)$$

missä,  $\sigma =$  Stefan-Boltzmannin vakio  $5,67 * 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$

$\varepsilon_b =$  Petin emissiivisyys

$A_b =$  Petin poikkipinta-ala ( $\text{m}^2$ )

$T_b =$  Petin lämpötila (K)

$T_{vp} =$  Vapaan palotilan lämpötila (K).

Petistä konvektiivisesti siirtyvän lämmön määrä riippuu sen kanssa kosketuksissa olevan tulipesän seinän pinta-alasta. Petimateriaalin partikkelikoosta riippumatta johtamalla siirtyvän lämmön osuus on hyvin vähäistä verrattuna kaasun ja tulipesän seinämän väliseen konvektioon. Tämä johtuu pyöreähkön petimateriaalin pienestä kosketuspinta-alasta tulipesän seiniin, jolloin partikkeli luovuttaa lämpöään enemmän sitä ympäröivään kaasuun, joka puolestaan siirtää lämpöä konvektiivisesti seiniin (Basu 2006, 189, 194). Tähän oleellisesti vaikuttaa myös tulipesän seinämän materiaali arinasolla. Tyypillisesti tulipesän alaosa onkin vahvistettu muurauksella, petimateriaalin liikkeen aiheuttaman eroosion ja liiallisen lämmönsiirtymisen ehkäisemiseksi. Konvektiivisesti siirtyvää lämpöenergian määrää voidaan yksinkertaisesti kuvata yhtälöllä 2.5:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s * (T_b - T_w) \quad (2.5)$$

missä,  $h =$  Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin

$A_s =$  Petin kanssa kontaktissa olevan seinämän pinta-ala ( $\text{m}^2$ )

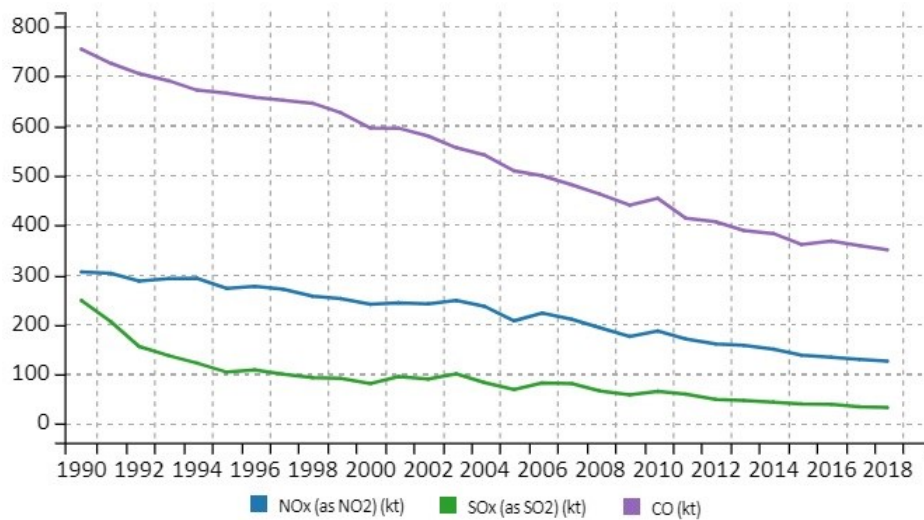
$T_w =$  Seinämän lämpötila (K).

## 6 Päästöt ja niiden ominaisuudet

Tässä luvussa käsitellään kiinteää polttoainetta käyttävien polttolaitosten merkittävimpien päästöjen muodostumista ja niiden vaikutuksia. Haitalliset päästöt aiheuttavat ilmaston saastumista ja sen myötä erilaisia terveyshaittoja ihmisille, eläimille ja luonnolle. Jotta päästöjen vähennyskeinoja voi tehokkaasti hyödyntää, on ymmärrettävä myös päästöjen muodostumismekanismit.

### 6.1 Merkittävimmät päästöt teollisuudessa

Polttolaitosten ja -tekniikoiden kehittyessä päästöjen määrä on merkittävästi laskeutunut ja on yhä laskevan trendin mukainen. Kuviosta 9 nähdään hiilimonoksidin, typen oksidien ja rikkidioksidipäästöjen määrän Suomessa tarkastelujaksolla 1990-2018.



Kuvio 9. Ilman epäpuhtaudet Suomessa (Ilman epäpuhtauksien päästöt Suomessa 2020. Muokattu)

Suomessa energiantuotannon ja teollisuuden osuus typen ja rikin oksidipäästöistä oli vuonna 2018 typen osalta noin 43% ja rikin osalta noin 88%. Hiilimonoksidin osuus puolestaan oli hieman alle 15%. (Suomen ympäristökeskus 2020.)

## 6.2 Päästöjen muodostuminen

### 6.2.1 Hiilipäästöt

Hiilipäästöjä syntyy käytännössä aina, kun polttoaine sisältää hiiltä. Hiilen palamisreaktio on kuvattu kappaleesta 4.1 esitetystä reaktioyhtälöstä R2. Hiilen täydellisen palamisen lopputuotteena muodostuu hiilidioksidia ( $\text{CO}_2$ ), joka on yksi merkittävimmistä kasvihuonekaasuista.  $\text{CO}_2$  kykenee sitomaan itseensä lämpösäteilyä ja myös muuttamaan saamansa energian takaisin lämmöksi, jolloin osa maasta haihtuvasta lämpösäteilystä ei siirry avaruuteen vaan nostaa tämän seurauksena lämpötilaa maapallolla (Hiilidioksidi ja hiilen kiertokulku 2020).

Hiilimonoksidia (CO) syntyy kun täydelliseen palamisreaktioon tarvittava hapen määrä on riittämätön tai polttoaineen ja hapen sekoittuminen on puutteellista. Kaikissa polttolaitteissa ja -tekniikoissa syntyy CO-päästöjä aina jonkin verran ja polttotekniikalla ja olosuhteilla onkin huomattavan suuri merkitys CO:n muodostumisen määrään. (Vakkilainen 2016, 50.)

### 6.2.2 Rikin oksidit

Rikin ollessa yksi maankuoren yleisimmistä alkuaineista, erityisesti fossiiliset polttoaineet sisältävät suuria määriä rikkiä. Valtaosa ihmisen aiheuttamista rikkipäästöistä onkin peräisin fossiilisten polttoaineiden energiakäytöstä. Tulipesässä hapen kanssa reagoiva rikki muodostaa pääasiassa rikkidioksidia ( $\text{SO}_2$ ), mutta kulkeutuessaan muiden savukaasujen mukana ilmakehään, reagoi se edelleen ilmakehässä olevan hapen kanssa muodostaen rikkitrioksidia ( $\text{SO}_3$ ), jonka vuoksi rikkidioksidin ja rikkitrioksidin vaikutukset ympäristön kannalta ovat samat. Maahan sataessaan rikkipäästöt hapattavat maaperää ja aiheuttavat korroosiota metallisilla pinnoilla, kuten talojen katoilla ja autojen teräspinnoilla. (Raiko ym. 2002, 343; Vakkilainen 2016, 49.)

Puupolttoaineet sisältävät tyypillisesti vain hyvin pieniä määriä rikkiä (ks. taulukko 2), mutta esimerkiksi turpeen ja biomassan seospoltossa polttoaineiden rikkipitoisuudet

ovat korkeammat, jolloin veden kanssa reagoiut  $SO_3$  aiheuttaa eritoten savukaasukanavissa korroosiovaurioita, mikäli rikkihapon muodostumiselle on lämpötilan osalta suotuisat olosuhteet. (Huhtinen ym. 2000, 212.)

Taulukko 2. Polttoaineiden rikkipitoisuuksia (Raiko ym. 2002, 344. Muokattu)

Polttoaineiden rikkipitoisuuksia		
Polttoaine	Rikkipitoisuus %	Rikkipäästö (mg/MJ)
Puu	< 0,05	< 130
Turve	0,05 - 0,5	50 - 100
Kivihiili	0,2 - 5	150 - 4000
Polttoöljy, raskas	1 - 5	500 - 2000

Rikin palaminen tapahtuu reaktioyhtälön R3 mukaisesti muodostaen rikkidioksidia: (Raiko ym. 2002, 346.)



Rikkidioksidi hapettuu edelleen rikkitrioksidiksi termisesti korkeissa lämpötiloissa reaktioyhtälön R4 mukaan:



Reagoidessaan veden kanssa rikkitrioksidi muuntuu rikkihapoksi:



Rikkitrioksidia voi muodostua myös katalyyttisesti lämpötilojen ollessa huomattavasti matalampia kuin termisessä reaktiossa. Katalyyttistä rikkitrioksidin muodostumista tapahtuu lähinnä tulipesän tulistinalueella, jossa tulistinputkien pinnoille kerrostuneen kuonan sisältämät vanadiumin ja raudan oksidit toimivat katalyyttinä  $SO_3$ :n muodostumiselle. (Mts. 347.)

### 6.2.3 Typen oksidit

Typen oksidipäästöihin viitattaessa yhteistermillä  $\text{NO}_x$  viitataan yhdessä typpimonoksiidiin (NO) ja typpidioksidiin ( $\text{NO}_2$ ), sillä polton  $\text{NO}_x$ -päästöistä tyypillisesti noin 95 % on typpimonoksidia ja vain alle 5 % typpidioksidia. NO- ja  $\text{NO}_2$ -päästöt ovat ympäristövaikutuksiltaan kuitenkin hyvin samankaltaisia NO:n hapettuessa nopeasti ilmakehässä muodostaen typpidioksidia. Ilmakehässä reagoidessaan yhdessä auringonvalon kanssa  $\text{NO}_2$  muodostaa fotokemiallista saastesumua ja otsonia, jotka ovat ihmisen terveydelle ja ympäristölle haitallisia yhdisteitä. Maatason otsonin ja saastesumun esiintyvyys korostuu tiheästi liikennöidyissä kaupungeissa ajoneuvojen aiheuttamien päästöjen seurauksina. Myös polttolaitokset aiheuttavat päästöillään paikallisia vaikutuksia ilmanlaatuun niiden kaukovaikutusten lisäksi (Raiko ym. 2002, 300; Kitto, Stultz 2004, luku 34-2).  $\text{NO}_x$ -päästöt vaikuttavat myös rikkipäästöjen muodostamiin haposateisiin. (Kitto & Stultz 2004, luku 34-2).

Polton  $\text{NO}_x$ -päästö muodostuu pääasiassa kolmella tavalla; termisen reaktion kautta, palamisilman ja vapaiden hiilivetyradikaalien välisten nopeiden reaktioiden kautta ja polttoaineen sisältämän typen hapettumisen kautta. Termisessä reaktiossa palamisilman sisältämä typpi hapettuu korkean lämpötilan seurauksena, kun taas nk. nopeassa reaktiossa ilman sisältämä typpi reagoi hiilivetyradikaalien kanssa monimutkaisten reaktiomekanismien kautta. Polttoaineen sisältämän typen hapettuessa polttoaineen typpipitoisuudella on oleellinen merkitys  $\text{NO}_x$ -päästön muodostumisessa (mts. luku 34-1).

#### Terminen $\text{NO}_x$

Terminen  $\text{NO}_x$ -päästö muodostuu, kun palamisilman sisältämä molekyylityppi ( $\text{N}_2$ ) ja happi käynnistävät yhdessä kaksivaiheisen reaktioketjun. Reaktioketjua kutsutaan Zeldovichin mekanismiksi ja se tapahtuu, kun reaktiomekanismi R6 + R7 tapahtuu: (Raiko ym. 2002, 305.)





Mikäli palamisilman määrää vähennetään siten, että se on lähes tai alle stökiometrisen, O<sub>2</sub>:n rooli typpiatomien hapettajana vähenee ja reaktioyhtälössä R6 muodostuneet typpiatomit hapettuvat tällöin typpimonoksidiksi reaktioyhtälön R8 mukaisesti:



Reaktiomekanismi R6 + R7 + R8 tunnetaan laajennettuna Zeldovichin mekanismina. Reaktion lähtötilassa saatavilla olevien happiatomien pitoisuus riippuu hyvin pitkälle lämpötilasta ja näin ollen muodostuu se termisen NO-päästön muodostumista rajoittavaksi tekijäksi. Tämän vuoksi päästön muodostuminen onkin merkityksetöntä polttolämpötilan ollessa alle 1400 °C. (Mts. 306.)

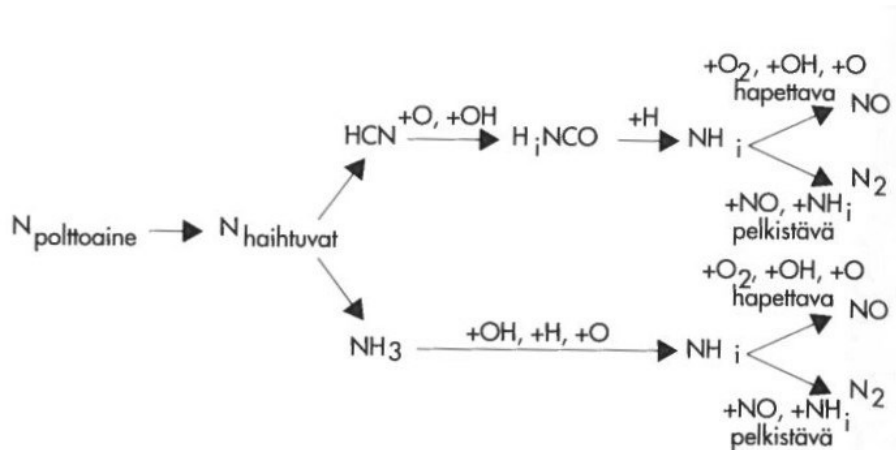
Modernien polttotekniikoiden myötä termisen NO<sub>x</sub>:n muodostuminen on hyvin hallittavissa. Esimerkiksi kierto- tai kuplapetikatiloissa sen muodostuminen on merkityksetöntä tai hyvin vähäistä matalien polttolämpötilojen vuoksi (Vakkilainen 2016, 48).

### **Polttoaine NO<sub>x</sub>**

Termisesti muodostuvan typpimonoksidin lisäksi polttoaineen sisältämän alkuainetyypen reagointi poltossa aiheuttaa typpimonoksidipäästön. Polttoaineesta hapettuvan tyypen määrä onkin riippuvainen polttoaineen kemiallisesta koostumuksesta ja päästöjen määrä on tällöin sitä suurempi mitä enemmän polttoaine sisältää tyyppiä. Verrattuna palamisilmaan, polttoaineen sisältämä tyypen määrä on pienempi, mutta on kuitenkin alkuainetyypenä reaktiivisempaa, kuin ilman sisältämä molekyylytppi. Korkeampi reaktiivisuus johtaa siihen, että polttoaineen sisältämä alkuainetyppi hapettuu huomattavasti helpommin ja tarvitsee reaktion toteutumiseen matalamman lämpötilan. (Raiko ym. 2002, 308-310.)

Pyrolyysivaiheessa osa polttoaineen sisältämästä tyypestä vapautuu ja reagoi haihtuvien hiilivety-yhdisteiden kanssa muodostaen esimerkiksi syaanivetyä ja ammoniakia. Polttoaine NO<sub>x</sub>:ksi kutsutaan typpimonoksidia, joka muodostuu näiden yhdisteiden reagoidessa edelleen hapen kanssa ja tästä syystä polttoaine NO<sub>x</sub>:n muodostumisen rajoittavaksi tekijäksi muodostuu palamisen stökiometria, sillä mikäli happea

ei ole saatavilla, syntyneet yhdisteet pelkistyvät molekyylylitypeksi (mts. 310). Polttoaine NO<sub>x</sub>:n muodostumisreaktiot ovat kuitenkin hyvin monimutkaisia, eikä kaikkia niiden muodostumisreaktioita vielä täysin ymmärretä (Kitto & Stultz 2004, luku 34-1). Kuviossa on 10 on esitetty yksinkertaistettu malli polttoaineen sisältämän typen reagoimisesta typpimonoksidiksi ja molekyylylitypeksi edellä selitetyllä tavalla.



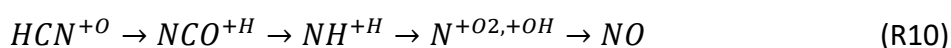
Kuvio 10. Yksinkertaistettu mallikaavio polttoainetyypen muodostumis- ja pelkistymisreaktioista (Raiko ym. 2002, 310)

### Nopea NO<sub>x</sub>

Toisin kuin terminen NO<sub>x</sub>, nopean NO<sub>x</sub>-päästön muodostuminen ei juurikaan riipu vallitsevasta lämpötilasta. Nopea NO<sub>x</sub>-päästö muodostuu sellaisella liekin alueella, jossa palaminen on vielä kesken. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että nopean NO<sub>x</sub>:n muodostuminen edellyttää hiilivetyradikaalien läsnäoloa, joiden kanssa ilman sisältämä molekyylylityppi reagoi muodostaen vetysyanidia (HCN) reaktioyhtälön R9 mukaisesti (Zevenhoven & Kilpinen 2004, luku 4.5.1):



Useiden eri reaktiomekanismien lopputuotteena, vetysyanidi ja typpi-atomit edelleen reagoivat hapen kanssa muodostaen typen oksidin (mts. luku 4.5.1):



Reaktiot tapahtuvat hyvin nopeasti polttoainerikkailla alueilla, joissa on paljon vapaita hiilivetyradikaaleja, kuten esimerkiksi BFB-kattilassa polttoaineen syöttötorvien läheisyydessä. Nopealta NO<sub>x</sub>-päästöltä ei käytännössä voida välttyä nopean reaktion vuoksi, mutta niiden osuus NO<sub>x</sub>-kokonaispäästöstä jää lähes merkityksettömän pieneksi leijupoltossa. (Mts. luku 4.5.1, Vakkilainen 2016, 48.)

#### 6.2.4 Muut polton päästöt

Edellä käsiteltyjen päästöjen lisäksi poltosta muodostuu myös muita päästöjä, kuten polysyklisiä aromaattisia hiilivety-yhdisteitä (PAH-yhdisteet), ei metaania sisältäviä haihtuvia orgaanisia hiilivety-yhdisteitä (NMVOCs) ja hiukkaspäästöjä. Nämä päästöt luokitellaan tässä työssä polton muiksi päästöiksi, eikä niiden ominaisuuksia ja muodostumismekanismia ole tarpeellista tarkastella tässä työssä tarkemmin. On kuitenkin aiheellista mainita, että PAH-yhdisteet ovat karsinogeenisiä ja NMVOCs-päästöt osallistuvat maatasen otsonin muodostumiseen, aiheuttaen näin merkittäviä terveyshaittoja ihmisille ja ympäristölle. Myös metallipitoiset hiukkaspäästöt ovat haitallisia ihmiselle. (Vakkilainen 2016, 51-53.)

## 7 NO<sub>x</sub>-päästöjen vähentämistekniikat

### 7.1 Ilmavaiheistus ja alhainen ilmakerroin

Ilmavaiheistus on yksi tärkeimmistä NO<sub>x</sub>-päästöjen rajoittamiseen vaikuttavista menetelmistä. Ilmavaiheistuksen avulla polttoprosessi jaetaan syöttämällä palamiseen tarvittava ilma eri tulipesän vyöhykkeille. Periaatteena on rajoittaa saatavilla olevaa hapen määrää ja vaiheistaa palaminen, jolloin lämpötila tulipesässä saadaan pidettyä matalana palamisen jokaisessa vaiheessa. Vaiheistetun ilman seurauksena termisen NO<sub>x</sub>-päästön muodostuminen on mitätöntä matalissa lämpötiloissa ja polttoaine NO<sub>x</sub>-päästön muodostuminen on minimaalista tarkasti hallittavan ja minimoidun yliilmamäärän ansiosta. Verrattuna vaiheistamattomaan palamiseen ilmavaiheistuksella voidaan saavuttaa noin 50% NO<sub>x</sub>-päästön vähennys. (Lecomte ym. 2017, 191; Vainio 2014, 6-7).

Ilmavaiheistus ja alhainen ilmakerroin (ks. luku 4.2) onkin osa normaalia polton optimointia lähes kaikissa kehittyneissä polttolaitteissa ja NO<sub>x</sub>-päästöjen muodostumisen lisäksi niillä on myös vaikutusta SO<sub>3</sub>:n muodostumiseen. (Lecomte ym. 2017, 190.)

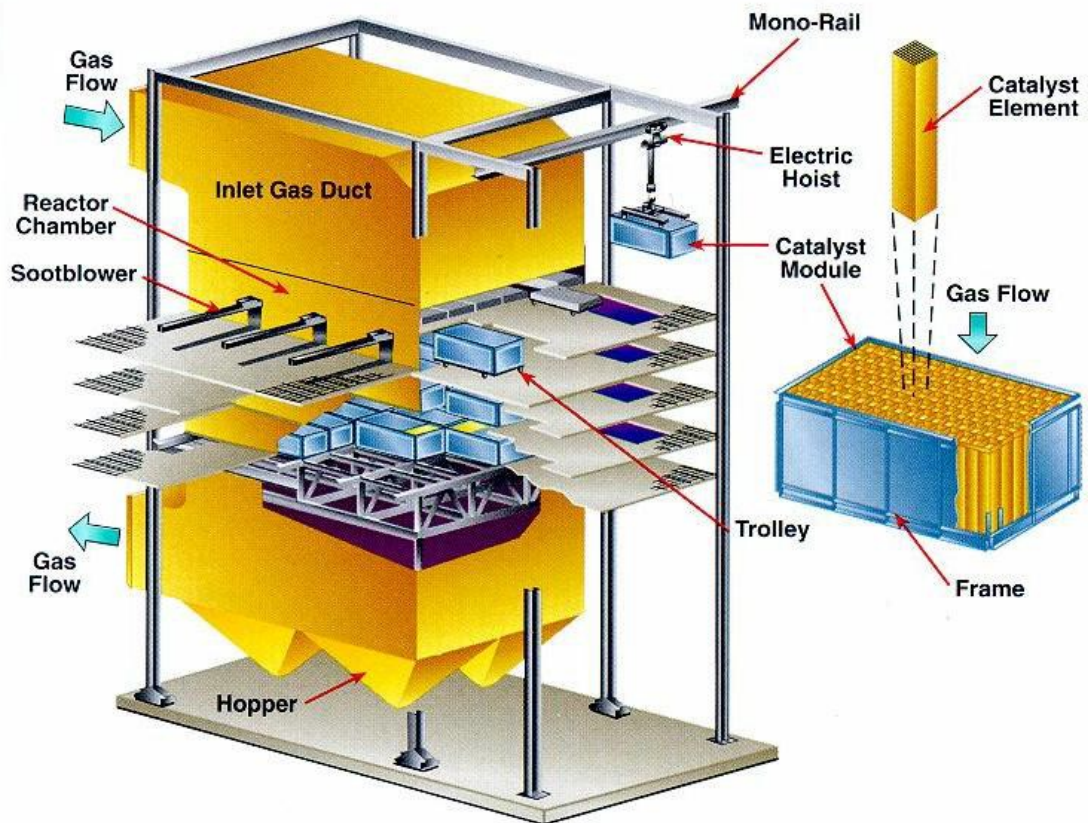
## 7.2 Kiertokaasun käyttäminen

Savukaasun kierrättämisellä (FGR, flue gas recirculation) takaisin tulipesään saavutetaan lämpötilan hallinnan kannalta hyötyä (ks. luku 5.3.1) ja korvatessaan osan palamisilmasta, saatavilla oleva hapen määrä vähenee, joka rajoittaa NO<sub>x</sub>-päästön muodostumista savukaasun happipitoisuuden korreloidessa NO<sub>x</sub>-päästöä. Kiertokaasu otetaan ennen savupiippua savukaasulinjasta erillisellä puhaltimella ja johdetaan tyypillisesti primääri-ilman sekaan. Leijukerrospoltoissa kiertokaasun rooli onkin lähinnä petilämpötilan hallinnassa. (Lecomte ym. 2017, 195; Kitto & Stultz 2004, luku 17-6.)

## 7.3 SCR-menetelmä

Selektiivinen katalyyttinen pelkistäminen (Selective catalytic reduction, SCR) on menetelmä, jossa polton NO<sub>x</sub>-päästöt pelkistetään katalyytin ja reagenssin avulla. Menetelmässä reagenssi, yleensä ammoniakkivesi tai urealiuos, sekoitetaan sumuttamalla se virtaavien savukaasujen sekaan. Reagenssin kanssa sekoittunut savukaasu virtaa edelleen katalysaattorille, joka on tyypillisesti vanadiinioksidista valmistettu kennomainen levyrakente. (Zevenhoven & Kilpinen 2004, luku 4.9.1, Kitto & Stultz 2004, luku 34-3, 34-4.)

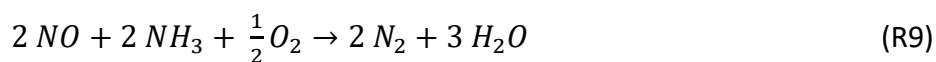
Kuviossa 11 esitetyssä SCR-järjestelmää kuvaavassa esimerkissä katalysaattorikennostot ovat sijoitettu savukaasukanavaan pystysuuntaisesti siten, että savukaasun mukana kulkeutuvan lentotuhkan kerrostuminen on mahdollisimman vähäistä katalysaattorin pinnoille. Savukaasun virtaussuunta on kuvion esimerkissä ylhäältä alas, jolloin lentotuhka pääsee putoamaan kennostojen alapuolella sijaitseviin suppiloihin. Suppiloihin kertynyt lentotuhka on näin ollen helposti poistettavissa savukaasuvirrasta ja sen kertyminen katalysaattorin pinnoille minimaalista.



**Vertical-flow fixed-bed type reactor chamber**

Kuvio 11. SCR-katalysaattori (Zevenhoven & Kilpinen 2004, luku 4.9.1)

Typhen oksidien pelkistymisreaktio tapahtuu katalysaattorin pinnalla, muodostaen vettä ja molekyylityppeä yksinkertaistetun reaktioyhtälön R9 mukaisesti:



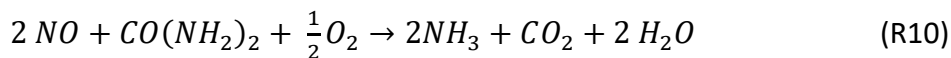
Jotta pelkistymisreaktio voi halutulla tavalla toteutua on savukaasun lämpötilan oltava välillä 250 – 500 °C. SCR-menetelmä on tehokkain NO<sub>x</sub>-päästöjen poltonjälkeisessä vähentämisessä käytettävä tekniikka, sillä se voi parhaillaan pelkistää jopa 90 % syntyneistä typhen oksideista (Zevenhoven & Kilpinen 2004, luku 4.9.1). Järjestelmän mekaaninen katalyytti on kuitenkin altis korroosiolle rikkiä sisältävien polttoaineiden

poltossa ja esimerkiksi biomassojen poltosta syntyvällä savukaasulla on havaittu olevan vaikutusta katalyytin deaktivoitumiseen, joka johtaa katalysointikyvyn merkittävästi heikkenemiseen ja lopulta loppumiseen (Raiko ym. 2002, 332-333).

## 7.4 SNCR-menetelmä

### 7.4.1 Reagenssi ja pelkistymisreaktiot

Toisin kuin SCR-menetelmässä, SNCR-menetelmässä (selective non-catalytic reduction) ei käytetä katalyyttia typen oksidien pelkistämiseen, vaan pelkistämisreaktiot tapahtuvat tulipesässä sinne syötettävän reagenssin reagoiessa poltossa muodostuneiden typen oksidien kanssa. Ammoniakkia käytettäessä reaktio tapahtuu reaktioyhtälön R9 mukaisesti, mutta mikäli käytettävä reagenssi on ureaa, täytyy sen ensin reagoida ammoniakiksi ( $\text{NH}_3$ ), jotta haluttu pelkistysreaktio voi tapahtua: (Kitto & Stultz 2004, luku 34-13; Kohl & Nielsen 1997, 893.)



SNCR-menetelmässä pelkistymisreaktioiden sivutuotteena muodostuu pääasiassa vettä ja ammoniakia, mutta kuten reaktioyhtälöstä R10 havaitaan, syntyy ureareagenssin käytöstä myös  $\text{CO}_2$ -päästö. Menetelmän haittavaikutuksina on usein myös savukaasun kohonnut  $\text{N}_2\text{O}$ -pitoisuus, joka korostuu eritoten ureaa käytettäessä.

Urean reaktioketjun välivaiheessa esiintyvä isosyaanihappo ( $\text{HNCO}$ ) reagoi hydroksyyliiradikaalin kanssa muodostaen vetysyanidia ( $\text{HCN}$ ), joka muodostaa ilokaasua ( $\text{N}_2\text{O}$ ) reagoiessaan savukaasussa läsnä olevan typpimonoksidin kanssa (Mendoza-Covarrubias, Romero, Hernandez-Rosales & Agarwal 2011, luku 3.2). Ilokaasun muodostuminen ureasta noudattaa seuraavia reaktioyhtälöitä:

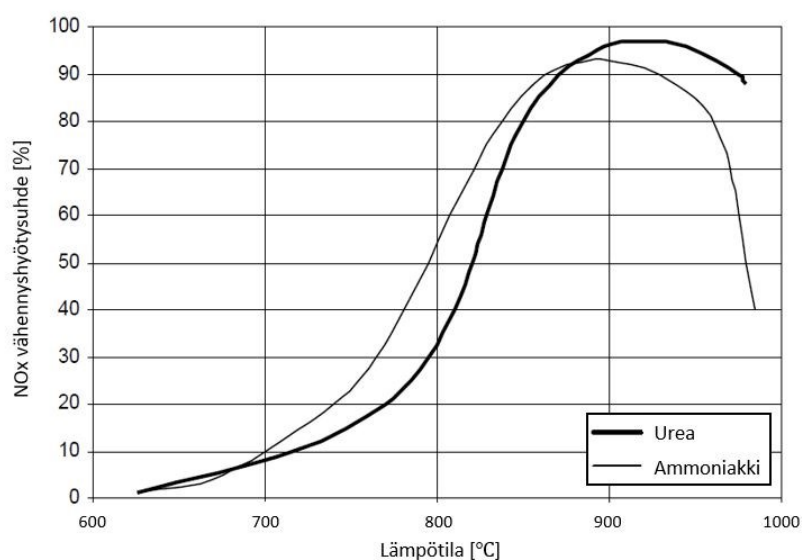


Yli 1000 °C lämpötiloissa ilokaasu kuitenkin reagoi nopeasti hydroksyyliiradikaalien kanssa muodostaen molekyylytympeä ja vettä (mts. luku 3.2). Leijupolton matalien palamislämpötilojen vuoksi urean käyttäminen SNCR-menetelmässä reagenssina aiheuttaa näin ollen väistämättä kohonneen N<sub>2</sub>O-päästön, jota kuitenkin voidaan hallita olosuhteiden ollessa muilta osin optimaaliset NO<sub>x</sub>-päästöjen pelkistämistä varten.

#### 7.4.2 Lämpötilariippuvuus

SNCR-menetelmän toiminnan kannalta yksi merkittävimmistä haasteista on pelkistysreaktioiden lämpötilaherkkyys. Urean ja ammoniakkin reaktiot typen oksidien kanssa tapahtuvat hyvin kapeassa lämpötilaikkunassa. Tämä asettaa haasteita eritoten vaihtelevilla tehoalueilla toimiville polttolaitoksille, joiden tulipesien lämpötilaprofiilissa voi esiintyä huomattavia eroavaisuuksia eri tehoalueiden välillä. Tästä syystä reagenssin syöttöpisteitä onkin tyyppillisesti sijoitettu useammalle tulipesän tasolle. (Kitto & Stultz 2004, luku 32-13.)

Kuviossa 11 on esitetty reagenssien toiminta lämpötilan funktiota. Siitä havaitaan urean optimaalisen lämpötilaikkunan olevan hieman ammoniakkia korkeampi ja reaktiot ovat optimaalisimmat noin 850 – 1050 °C välillä olevassa lämpötilaikkunassa.



Kuvio 12. Lämpötilaikkuna (Sorrels, Randall, Richardson Fry & Schaffner 2019, 14. Muokattu)

Mikäli lämpötila ei ole syötettävällä alueella riittävän korkea, NH<sub>3</sub> ei reagoi tarpeeksi nopeasti aiheuttaen ammoniakkipäästön. Ammoniakkipäästöä kutsutaan myös ammoniakki-slipiksi. Liiallinen ammoniakki-slip voi esimerkiksi aiheuttaa likaantumista ja korroosiovaurioita kattilan savukaasukanavissa ylimääräisen ammoniakkin reagoimissa rikkiatrioksidin kanssa, muodostaen ammoniumsulfaattia, jonka hajoamistuotteena syntyy ammoniumbisulfaattia. Hajoamaton ammoniumsulfaatti absorboituu lentotuhkaan ja suurina määrinä se voi vaikuttaa tuhkan hyötykäyttöön. Lisäksi ammoniakki on hyvin voimakashajuista ja suurina pitoisuuksina se voi aiheuttaa hajuhaittoja polttolaitoksen ympäristössä. (Sorrels ym. 2019, 14 ,19, 27.)

Mikäli savukaasun lämpötila on puolestaan liian korkea, haluttua pelkistysreaktiota ei tapahdu ja NO<sub>x</sub>-päästö voi kasvaa ammoniakkin sisältämän typen reagoimissa hapen kanssa muodostaen typpimonoksidia:



Optimaalista lämpötilaikkunaa voidaan kuitenkin siirtää noin 200 °C syöttämällä reagenssin mukana sopivia lisäaineita tulipesään, kuten vetyperoksidia. Tällöin optimaalinen lämpötila pelkistystä varten on matalampi savukaasun lisääntyneen happi- ja vetypitoisuuden vaikutuksesta. Mikäli lisäaineena käytetään hiilivetyjä, saadaan optimaalista lämpötilaa nostettua vastaavalla tavalla. Lisäaineiden käyttö ei kuitenkaan ole yleistä SNCR-tekniikkaa käyttävissä polttolaitoksissa sen marginaalisten hyötyjen vuoksi useamman urean syöttöpisteen vuoksi. (Blejchař, Heide, Konvička, Maier & Malý 2018, 3-5; Raiko ym. 2002, 315; Kohl & Nielsen 1997, 889-891.)

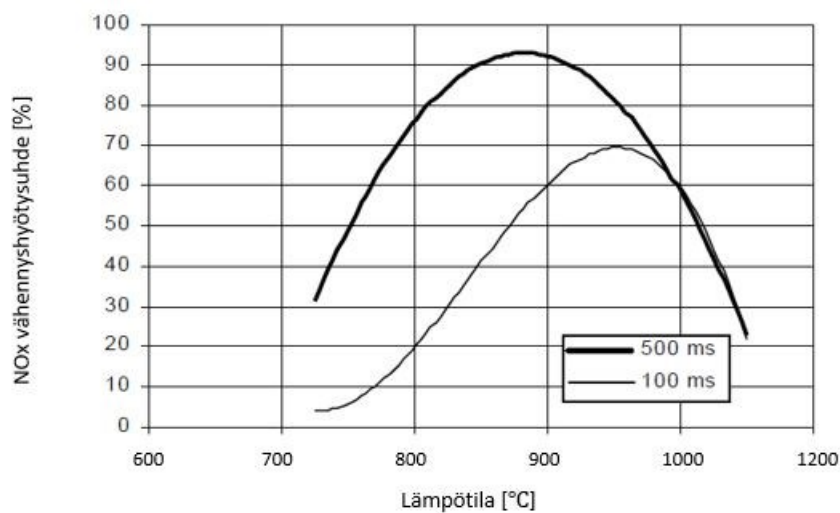
#### 7.4.3 Reagenssin viipymä ja sekoittuminen savukaasuun

Tyypillisesti SNCR-menetelmällä voidaan saavuttaa 30 – 70 % NO<sub>x</sub>-vähennys. Mahdollisimman korkean vähennysasteen saavuttamiseksi on reagenssi annosteltava huolellisesti optimaaliselle lämpötilavyöhykkeelle. Kaikista korkeimpiin vähennyksiin päästään kuitenkin vain teoriassa, sillä tulipesän lämpötilaprofiili ei käytännössä ole koskaan täysin tasainen koko tulipesän poikkipinta-alalta. Tulipesässä vallitsevat olo-



suhteet, kuten savukaasun koostumus ja sen keskimääräinen virtausprofiili injektio-alueella vaikuttavat oleellisesti ureasumun levittymiseen ja savukaasujen kanssa sekoittumiseen. (Kitto & Stultz 2004, luku 34-14.)

Edellä mainitun vuoksi on tärkeää, että injektoidava reagenssi jakautuu tasaisesti tulipesän koko poikkipinta-alalle injektioalueella, sekoittuen hyvin savukaasuun ja viipyen otollisella lämpötilavyöhykkeellä riittävän kauan, jotta kaikki tarvittavat reaktiovaiheet NO<sub>x</sub>-päästön pelkistämiseksi toteutuvat. Tulipesät ovat suunniteltu optimaalisen polttoprosessin kannalta siten, että riittävä savukaasun viipymä ja virtausnopeus on optimaalinen höyrynkehityksen kannalta, joka voi puolestaan aiheuttaa haasteita SNCR-menetelmän vaatiman viipymäajan suhteen. (Sorrels ym. 2019, 14.) Erityisesti BFB-kattiloissa viipymäaika ei yleensä kuitenkaan muodostu ongelmaksi tulipesän matalan savukaasuvirtausnopeuden vuoksi. Kuviossa 13 on esitetty viipymäajan vaikutus NO<sub>x</sub>-vähennykseen eri lämpötila-alueilla. Viipymäaika voi vaihdella 0,001 ja 10 sekunnin välillä, mutta tyypillisesti viipymäajan tulee olla yli 0,5 sekuntia, jotta pelkistysreaktiot ehtivät tapahtua.

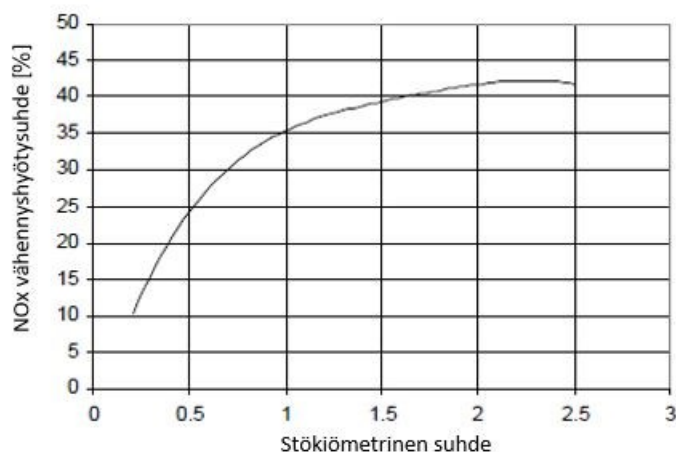


Kuvio 13. Viipymäajan vaikutus SNCR-menetelmässä (Sorrels ym. 2019, 15. Muokattu)

#### 7.4.4 Reagenssin annostelu

Halutun NO<sub>x</sub>-vähennyksen saavuttamiseen tarvittava reagenssimäärä määritellään reagenssin ja typpimonoksidien moolisuhteiden stökiometrian avulla. Kuten aiemmin esitetyistä reaktioyhtälöistä R9 ja R10 havaitaan, yhdellä moolilla ureaa voidaan teoriassa pelkistää kaksi moolia typpimonoksidia molekyylitypeksi, kun taas vastaavan pelkistymisen saavuttamiseksi ammoniakkia tarvitaan kaksi moolia. Samoin kuin palamisen hyötysuhteen maksimoimiseksi, SNCR-menetelmässä käytettävää reagenssia tulee injektoida yli tarvittavan teoreettisen määrän, sillä kuten aiemmin on todettu, pelkistysreaktioiden onnistuminen riippuu monesta eri tekijästä, eikä ideaalista pelkistystä käytännössä voida saavuttaa. Lisäksi reagenssin ja typpimonoksidin väliset kemialliset reaktiot ovat todellisuudessa huomattavan monimutkaisia.

Kuvio 14 esittää reagenssimäärän vaikutuksen NO<sub>x</sub>-päästön vähennyshyötysuhteeseen. Reagenssimäärää kasvattamalla myös pelkistyminen tehostuu, mutta tehostuminen vähentyy eksponentiaalisesti reagenssisuhteen kasvaessa ja liiallinen reagenssimäärä alkaa näkymään savukaasussa kohonneena ammoniakkipitoisuutena. (Sorrels ym. 2019, 18.)



Kuvio 14. Reagenssimäärän vaikutus vähennyshyötysuhteeseen (Sorrels ym. 2019, 18. Muokattu)

Ammoniakki-slipin lisäksi ureaa käytettäessä syntyvä  $N_2O$ -päästö kasvaa reagenssi-määrää lisätessä, jonka vuoksi reagenssisuhdetta ei tyypillisesti kannata nostaa liikaa kasvavien päästöjen ja marginaalisen hyödyn vuoksi. (Mts. 19.)

## 8 Työn toteutus

### 8.1 Nykytilanteen kartoittaminen

#### 8.1.1 Ilma-aukkojen nykytilanne

Jämsänkosken pääkattila K5:n tulipesän ilmajako on toteutettu kolmella sekundääri-ilmarekisterillä, jotka koostuvat alasekundääri-, välisekundääri ja yläsekundääritaasoista. Ala- ja välitasolla ilma-aukkojen alkuperäinen konfiguraatio on samanlainen ja molemmilla tasoilla aukkoja on 24 kappaletta. Aukot ovat jaettu tasan kullekin tulipesän seinälle liitteissä 1, 2 ja 3 esitetyllä tavalla. Yläsekundääriaukkoja on etuseinällä kolme kappaletta ja takaseinällä aukkoja on myös kolme kappaletta. Yläsekundääriaukoissa on kiinteät drallisuuttimet ja ala- ja välisekundääriaukoissa on kiinteät putki-suuttimet.

Toimeksiantajan mukaan osa ilma-aukoista on kattilan käytönaikaisten havaintojen perusteella koettu tarpeelliseksi tulpata ja näin on vuosien saatossa tehtykin, mutta varsinaista kirjanpitoa tulpatuista ilma-aukoista ei löydy. Käytössä olevien ilma-aukkojen määrä ja sijainti tulipesässä on ilmajaon kannalta hyvinkin oleellinen asia, sillä niillä on suuri vaikutus tulipesään syötettävän sekundääri-ilman jakautumisessa ja tunkeumassa palamisvyöhykkeelle. Näin ollen palamisprosessin kehittämisen ja opinäytetyön kannalta oli tärkeää selvittää nykyinen tilanne tunnistamalla käytöstä poistetut ilma-aukot suorittamalla tulipesän sisäpuolinen tarkastus.

Tulipesän sisäpuolinen tarkastus suoritettiin vuoden 2020 vuosihuoltoseisokin yhteydessä. Käytöstä poistetut ilma-aukot olivat helposti tunnistettavissa osittaisen tukkeutumisen sekä korkeiden lämpötilojen aiheuttamien suutinvaurioiden ansiosta. Eri-

tyisesti kuviossa 15 esitetyt yläsekundääritasolla sijaitsevat drallisuuttimet ovat kärsineet pahoja vaurioita jäähdytysilman puuttumisen seurauksena. Mikäli käytöstä poistettujen suuttimien käyttö koetaan joskus tarpeelliseksi, kannattaa vaurioituneet suuttimet ehdottomasti uusia. Myös ala- ja välitasolla olevat ilma-aukot ovat paikoin vaurioituneita.



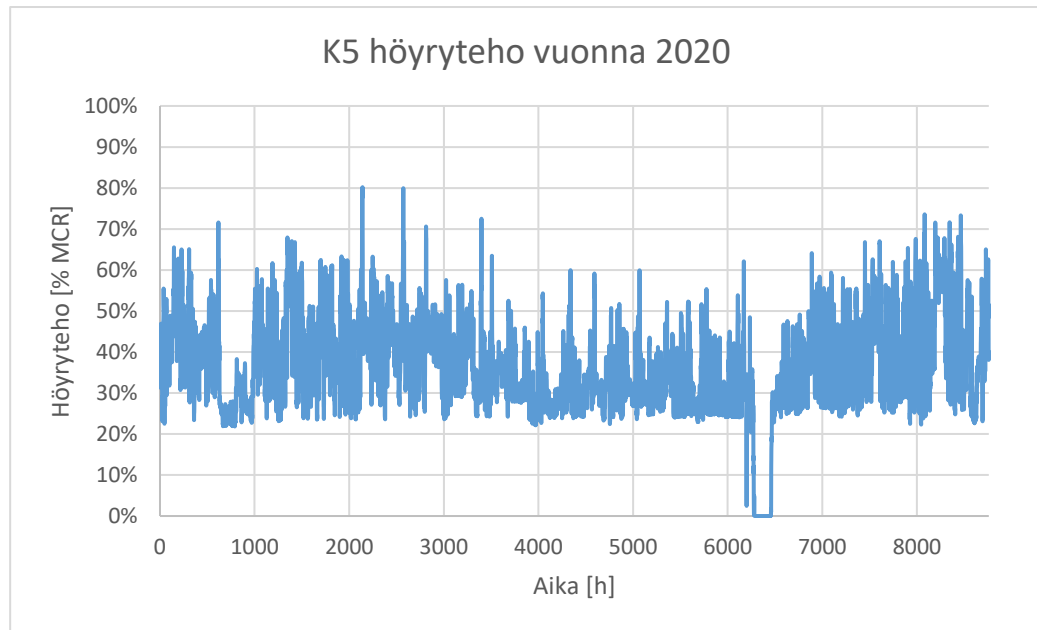
Kuvio 15. Yläsekundäärisuutin kattilan takaseinällä

Tarkastuksen perusteella havaittiin, että joka toinen ilma-aukko kultakin tasolta on poistettu käytöstä, jolloin käytössä olevia aukkoja alatasolla on 12 kappaletta, välitasolla 12 kappaletta ja ylätasolla yhteensä kolme kappaletta.

### 8.1.2 Tehoalueet

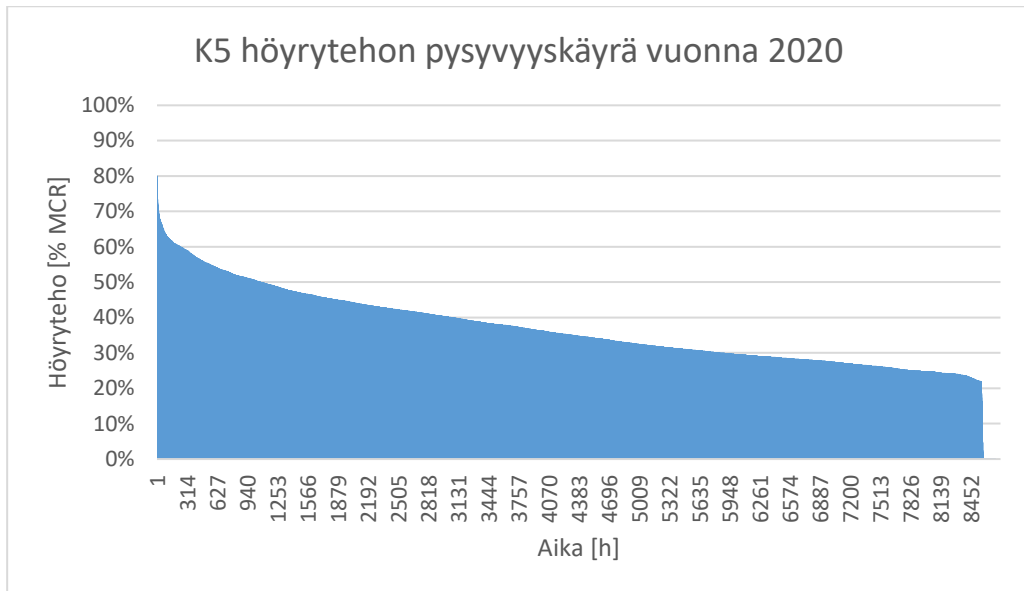
Voimalaitoksen tuottama prosessihöyry tuotetaan normaalitilanteessa kokonaisuudessaan pääkattila K5:llä, jonka seurauksena kattilan kuormatasot voivat vaihdella tuntien sisällä huomattavan paljon. Vaikka BFB-kattilat vastaavatkin tyypillisesti hyvin kuormanmuutoksiin, nopeat muutokset aiheuttavat osaltaan haasteita poltonhallinnassa, sillä tulipesän lämpötilaprofiili ja tätä kautta koko polttoprosessin laatu voi muuttua merkittävästi kuorman muuttuessa.

Kuviossa 16 on esitetty K5 kuormatase höyrytehon tuntikeskiarvona vuoden 2020 ajanjaksolta. Kuvaajasta huomataan, että kuormanmuutoksia on paljon ja kattilaa ajetaan harvoin yli 70 % MCR (osuus nimellistehosta – maximum continuous rating) höyrykuormalla ja tehoalue pysyy pääasiassa melko pienenä kattilan nimellistehoon verrattuna.



Kuvio 16. K5 höyrykuorma vuonna 2020

Kuviossa 17 esitetyn pysyvyyssäyrän perusteella havaitaan kuormataseen olevan keskimäärin noin 36 % MCR tienoilla. Tämän lisäksi kattilaa ajetaan minimikuorma-alueella tai sen läheisyydessä on melko usein. K5 kattilan minimikuorma on hyvinkin alhainen sen ollessa noin 20 % MCR.



Kuvio 17. K5 höyrytehon pysyvyyskäyrä

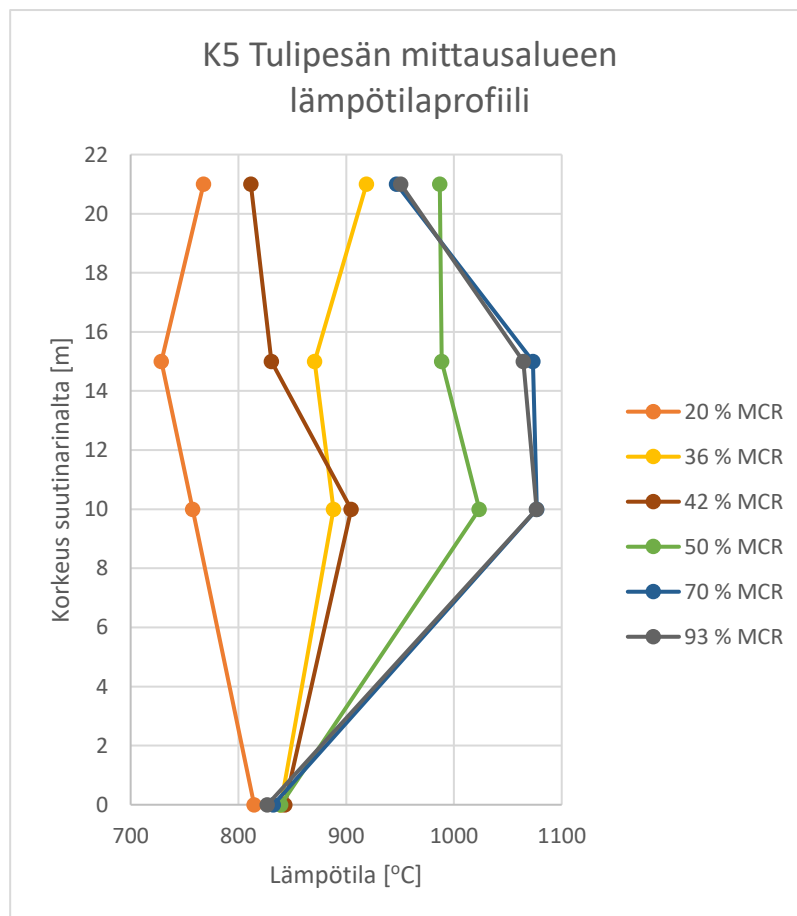
Vaikka kattilaa pääasiassa ajetaan nykyään huipputehohon verrattuna melko pienellä teholla, on tehoalue siitä huolimatta melko laaja, noin 20 – 80 % MCR. Pääasiassa suurin osa ajosta kuitenkin tapahtuu alle 50 % MCR tehoalueilla ja sitä suuremmat tehot näyttävät keskittyvän muutamia poikkeuksia luukunottamatta lähinnä talven kylmiin kuukausiin.

### 8.1.3 Tulipesän lämpötilaprofiili

Tulipesän lämpötilaa mitataan jokaisen sekundääri-ilmatason jälkeisillä lämpötilamittauksilla, jotka ala- ja välitasoilla ovat sijoitettu tulipesän oikealle ja vasemmalle seinälle. Yläsekundääritasolla mittauksia on sivuseiniin sijoitettujen mittauksien lisäksi tulipesän etuseinällä kaksi kappaletta. Mittauspisteet ovat melko lähellä tulipesän vesijäähdytteisiä seiniä, joten lämpötilamittauksien käyttäminen sellaisenaan lämpötilaprofiloinnissa ei ole tulosten kannalta järkevää seinän jäähdyttävän vaikutuksen vuoksi. Lämpötilaprofiloinnin kannalta on tarpeellista selvittää lämpötila kauempana seinästä ja hyödyntää lähempää tulipesän keskiakselia saatavia mittaustuloksia.

Jämsänkosken SNCR-projektin yhteydessä on suoritettu tulipesän mittauksia noin 3 m pituiseen suoja-putkeen asennetulla termoparilla, jonka avulla on pystytty mittaamaan lämpötilaa eri etäisyyksiltä tulipesän seinästä. Kyseisiä mittaustuloksia on käytetty K5 SNCR-järjestelmän suunnitteluperusteina, joten mittauksista saatuja arvoja on perusteltua käyttää myös tulipesän lämpötilaprofiloinnissa tämän työ osalta. Liitteen 4 mittaustulosten mukaan lämpötila 3 m etäisyydellä tulipesän seinästä on keskimäärin 133 °C käytössä olevaa mittausta korkeampi. Tätä tietoa hyödyntämällä saadaan parempi kuva tulipesän keskimääräisistä lämpötiloista tasokohtaisesti.

Tulipesän keskimääräinen lämpötilaprofiili eri kuormapisteissä on esitetty kuviossa 18. Lämpötilaprofiilin havaitaan muuttuvan merkittävästi osakuormapisteiden välillä ja kuorman kasvaessa lämpötilaprofiili ei vaikuta kehittyvän tasaisesti, vaan tasokohtaista hajontaa näyttää tapahtuvan.



Kuvio 18. K5 tulipesän lämpötilaprofiili eri kuormapisteissä

Kuormatason noustessa tulipesän lämpötila kohoaa paikoin merkittävän korkeaksi etenkin alasekundääritasolla ja lämpötila näyttää pysyvän hyvin korkeana myös tulipesän yläosissa, joka on urean annostelun kannalta epäedullista optimaalisen lämpötilaikkunan puuttuessa valtaosalta injektioaluetta. Minimikuormalla ja sitä lähestyttäessä tulipesän lämpötila odotetusti laskee verrattain matalaksi.

## 8.2 Koeajot

### 8.2.1 Koeajojen suunnittelu ja osakuormapisteiden valinta

Kattilan tulipesäprosessien lähempää tarkastelua varten suunniteltiin suoritettavaksi koeajoja eri osakuormapisteissä, jotta mahdolliset kehittämis- ja parannuskohteet olisivat helpommin tunnistettavissa. Aiemmin käsitellyn höyrytehon pysyvyyssäyrän ja 2020 vuoden höyrykuorman perusteella koeajojen osakuormapisteiksi valikoitui 50 % MCR, 36 % MCR ja 20 % MCR tehoalueet. Näiden tehoalueiden valinta koeajoihin on perusteltua, sillä kattilaa on vuoden 2020 aikana ajettu pääasiassa 20 – 50 % MCR höyryteholla ja koeajojen toteuttaminen yleisesti ajossa olevilla tehoalueilla antaa hyvän kokonaiskuvan nykytilanteesta. Tämän lisäksi myös toimeksiantaja on havainnut näiden tehoalueiden olevan SNCR-järjestelmän käytön kannalta haasteellisia.

Koeajojen aikana kattilan kuorman on pysyttävä mahdollisimman vakiona, jotta tulipesässä vallitsevat olosuhteet pysyisivät mahdollisimman tasaisina tulosten luotettavaa analysointia varten. Tämä luonnollisesti vaati erityisjärjestelyjä tehtaan muiden höyryntuottajien ja höyrynkäyttäjien kanssa, joka osaltaan asetti myös ajallisia rajoituksia koeajojen suorittamiseen.

Koeajojen ajan K5 vakiokuorma toteutettiin tuottamalla vakiotehoa turbiinilla (tehonsäätö) ja pitämällä reduktioventtiilit M-moodissa (manual) kiinni, jolloin tehtaan höyryverkon ylätasoon säätö ei pystynyt lisäämään kattilan höyrytehoa avaamalla reduktioventtiileitä. Näillä toimenpiteillä K5 ei osallistu höyryverkon säätämiseen säätävänä kattilana ja höyryverkon painetta säädettiin koeajopisteen mukaan tarvittaessa ulospuhalluksella ja apukattiloilla. Näin pystyttiin turvaamaan tehtaan höyrynsaanti myös kuormien muuttuessa.



Jotta liialliselta höyryn hukkakäytöltä (ulospuhallukselta) ja apukattiloiden öljynkäytöltä vältyttiin mahdollisimman hyvin, koeajot pyrittiin aina järjestämään sellaisina ajanjaksoina, joina tehtaan höyryntarve vastaisi suurimmalta osalta K5:n höyrynkehitystä. Koeajojaksot valittiin paperikoneiden ja TMP:n käyntiennusteiden mukaan ja erityisjärjestelyt höyrynkehityksen suhteen hoidettiin TMP:n käyttöhenkilöstön ja toimihenkilöiden kanssa.

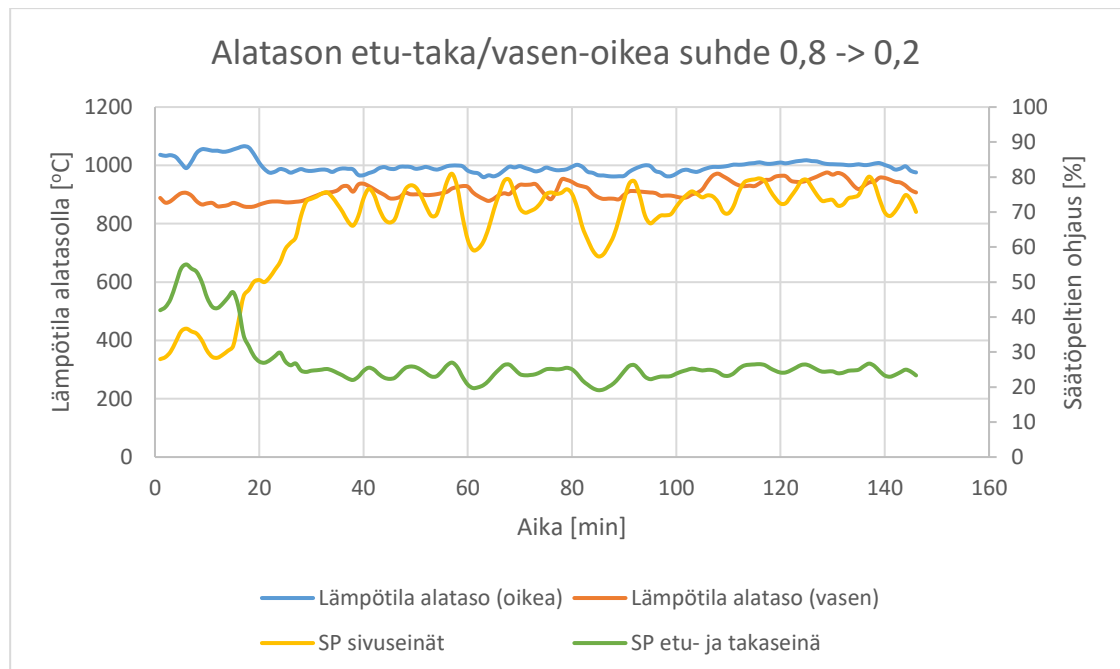
### 8.2.2 50 % MCR koeajo

Ensimmäinen koeajo toteutettiin 50 % MCR osakuormapisteessä 16.12.2020. Koeajo aloitettiin pitämällä polton ylätasoa säädöt (poltto APC, advanced process control) aluksi päällä, jotta saatiin kuva reaaliaikaisesta lähtötilanteesta. Huomattakoon kuitenkin, että poltto APC:n optimointi savukaasun NO<sub>x</sub>-pitoisuudelle oli kytketty pois.

Tarkkailemalla tulipesän seinäkohtaisia lämpötiloja ja savukaasun happipitoisuutta havaittiin tasokohtaisten lämpötilamittausten välillä paikoin noin 150 - 200 °C eroja ja happipitoisuuden olevan keskimäärin melko korkea, noin 3,5 - 4 %. Noin tunnin mittaisen ajojakson jälkeen poltto APC asetettiin pois käytöstä ja poltonhallinta siirrettiin kattilan perusautomaatiolle. Lievästi koholla olevaa happitasoa saatiin pudotettua vähentämällä sekundääri-ilman määrää tulipesään. Tällöin savukaasun CO-pitoisuus hieman nousi, mutta pysyi koeajojen ajan pääsääntöisesti alle 10 mg/Nm<sup>3</sup> tasolla. Luonnollisesti jäännöshapen vähentyessä ja CO-pitoisuuden noustessa myös savukaasun NO<sub>x</sub>-pitoisuus laski noin 295 mg/Nm<sup>3</sup> lähtötasosta alle 250 mg/Nm<sup>3</sup> tasolle. Havaittiin myös, että säätöpeltien asentoa muuttamalla pystyttiin odotetusti vaikuttamaan tasokohtaiseen lämpötilajakaumaan tulipesässä, jolloin suurimmat eroavaisuudet seinien välillä saatiin poistettua.

Sekundääri-ilman tunkeumaa tulipesään pyrittiin testaamaan muuttamalla seinäkohtaisia kertoimia tasokohtaisten suhdessäätöjen asetusarvoja muuttamalla ja tarkkailemalla prosessiin aiheutuvia muutoksia. Alatasoa etu- ja takaseinän sekä sivuseinien ilmapeltien suhde muutettiin siten, että valtaosa alatasoa ilmavirrasta syötettiin sivuseinien kautta tulipesään. Etu- ja takaseinien säätöpeltien asetusarvojen määrääntyessä sekundääri-ilmavirtauksen mukaan, ilmapeltejä ei saatu suljettua kokonaan

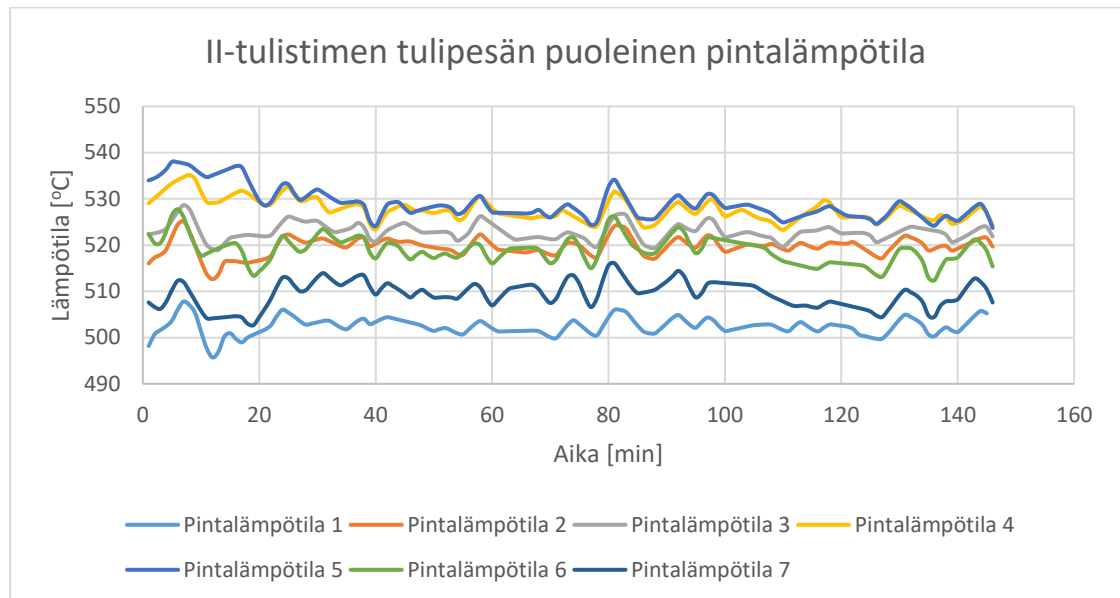
pelkkää suhdekerrointa muuttamalla, jolloin osa ilmapirrasta kulkeutui tulipesään myös niiden kautta. Kuviossa 19 esitetyn kuvaajan perusteella edellä mainitulla ei välttämättä ole tulosten kannalta kuitenkaan merkitystä, sillä ilmapirran kasvaessa sivuseiniltä, ei lämpötilamittauksissa havaittu merkittäviä muutoksia. Väittämään on suhtauduttava kuitenkin varauksella, sillä trendi näyttää ilmapeltien osalta värähtelevältä ja säätöpeltien asennon muuttuessa ilman virtausprofiili muuttuu, jonka vaikutus puolestaan näkyy myös muualla prosessissa. Näyttäisi siltä, että ilmapeltien säätöpiirien viritysparametreja olisi syytä tarkastella ainakin perusautomaation osalta. Peltien asennon muuttamisella ei myöskään näyttänyt olevan merkitystä savukaasupäästöihin. Tämän perusteella viitteitä heikosta ilmapirran tunkeumasta ei havaittu.



Kuvio 19. Alasekundääri-ilman syöttöpisteiden muutoksen vaikutus tasokohtaiseen lämpötilaan

Sekundääri-ilman tunkeumaa voidaan myös arvioida II-tulistimen pinnan lämpötilamittausten perusteella. Mikäli tunkeuma olisi riittämätöntä ja kaasujen sekoittuminen tulipesässä huonoa, palaminen jakautuisi happiköyhien vyöhykkeiden ansiosta epäsymmetrisesti tulipesässä, jolloin tulistuksessa näkyisi epänormaalia haritusta.

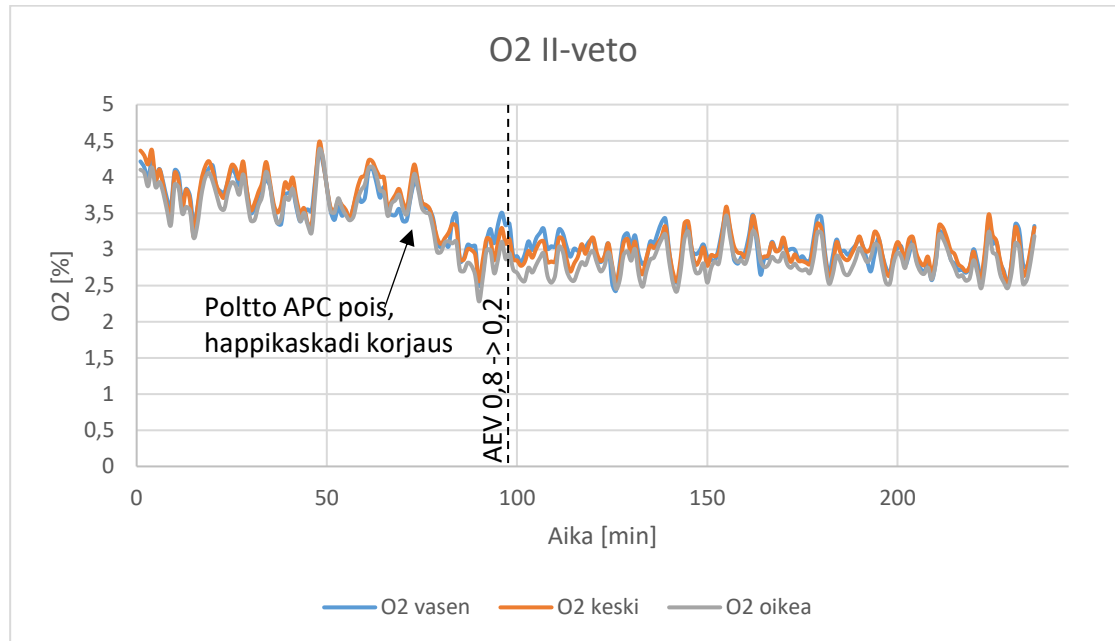
Kuviosta 20 havaitaan, ettei II-tulistimen pinnan lämpötilamittaukset näytä normaalista poikkeavaa jakaumaa, vaan lämpötilamuutokset ovat kussakin mittauspisteessä samansuuntaisia. Korkein lämpötila keskittyy normaalisti tulistimen keskivaiheille kattilan sivuseinien savukaasua jäähdyttävän vaikutuksen seurauksena.



Kuvio 20. II-tulistimen pintalämpötilat

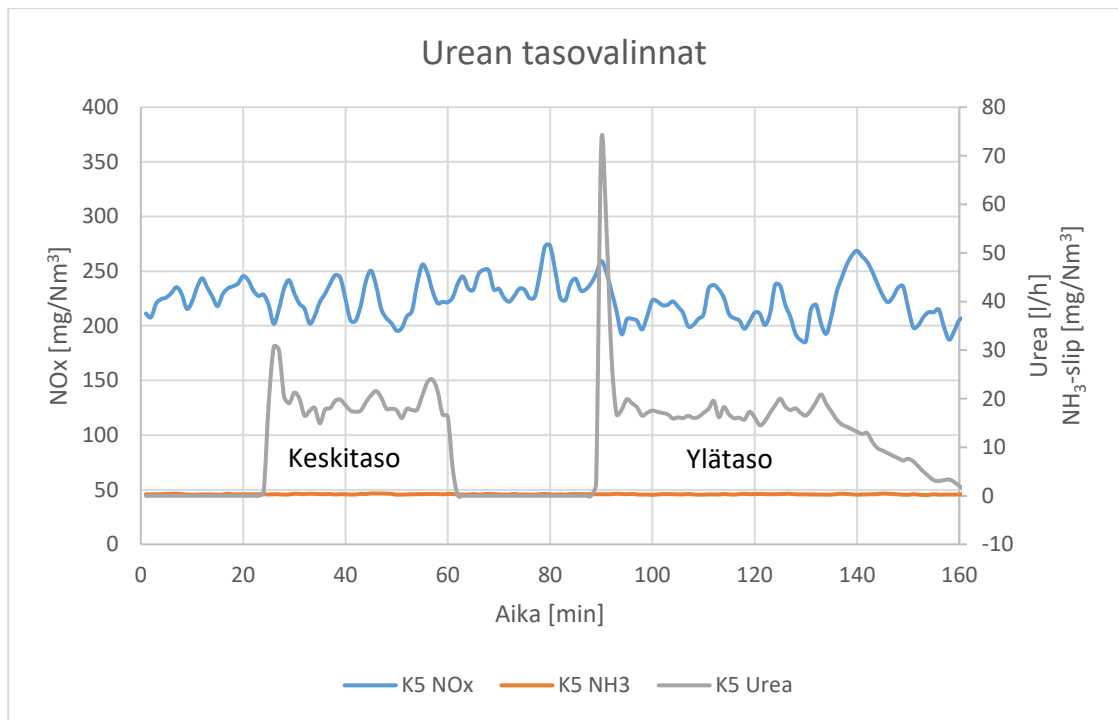
Heti tulistuksen jälkeen kattilan II-vetoon on sijoitettu kolme happimittausanturia, joiden avulla voidaan myös arvioida palamisen symmetriaa happijakauman harituksesta tulipesän jälkeen. Anturit ovat sijoitettu kohtisuorasti savukaasun virtausta kohti siten, että niillä pystytään mittaamaan happijakaumaa savukaasussa koko II-vedon leveydeltä. Sekundääri-ilman tunkeuman tasokohtaisessa arviointitarkoituksessa mittauksia on kuitenkin tulkittava varauksella, sillä savukaasut saattavat sekoittua tulipesän yläosassa savukaasupuhaltimien aiheuttaman vedon ansiosta ja virratessaan tulistinputkien yli, eikä niillä näin ollen pystytä varmaksi toteamaan tasokohtaisen tunkeuman riittävyttä. Mittauksia kuitenkin käytetään tulistuksen symmetrisyyden optimoinnissa, joten epätasainen happijakauma viittaisi mahdollisesti myös huonoon sekundääri-ilman tunkeumaan.

Happijakaumassa (ks. kuvio 21) ei näytä mittausten perusteella olevan tunnistettavasti selvää haritusta, joka viittaisi huonoon sekundääri-ilman tunkeumaan tai kaasujen heikkoon sekoittumiseen tulipesässä. Myöskään ilmapeltien asentojen muutoksilla ei näytä olevan juurikaan merkitystä happimittausten arvoihin. Näin ollen muuttamatta ilmavaiheistusta ei alasekundääritasolla ole havaittavissa riittämätöntä tunkeumaa testatulla ilmavaiheistuksella.



Kuvio 21. Happimittaukset

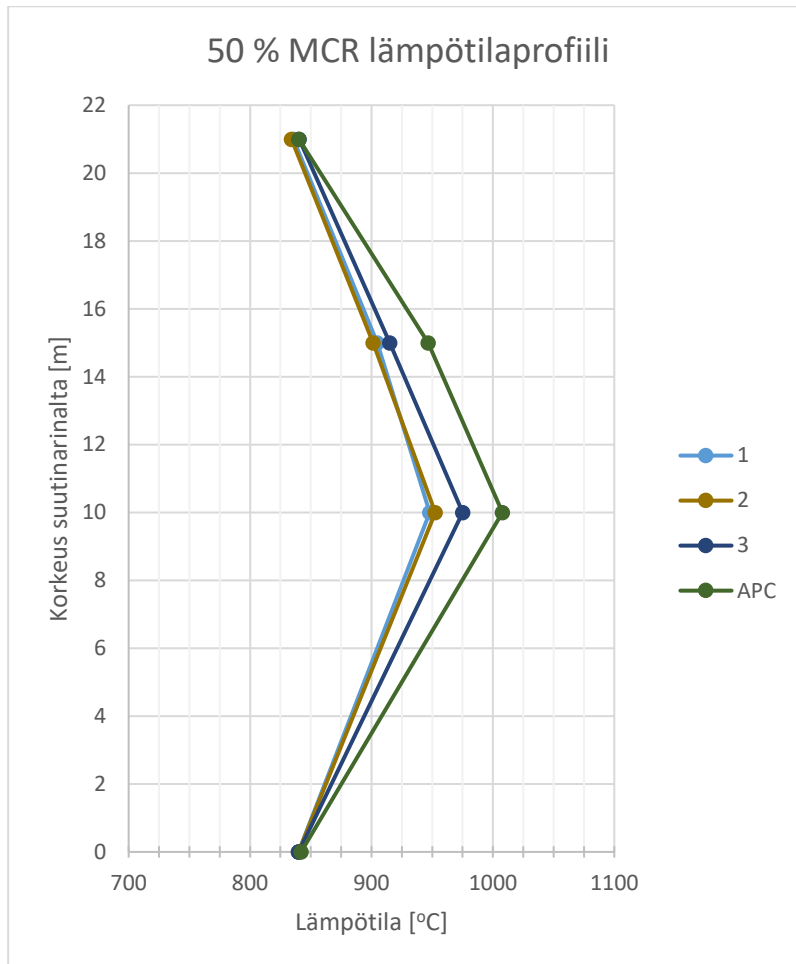
Koejaon aikana testattiin myös SNCR-järjestelmää ja urean vaikutusta NO<sub>x</sub>-tasoon eri injektiojaksoilla. Automaattinen tasovalinta valitsi injektiotasoksi tulipesän keskitason, mutta merkittävää muutosta ei NO<sub>x</sub>-pitoisuudessa urean käytön seurauksena havaittu. Injektiotaso vaihdettiin tulipesän ylätasolle, jonka seurauksena savukaasun NO<sub>x</sub>-pitoisuus laski lähelle NO<sub>x</sub>-asetusarvoa (200 mg/Nm<sup>3</sup>). Tasovalinnan vaikutukset ovat esitetty kuviossa 22, josta myös havaitaan, ettei savukaasun ammoniakkipitoisuudessa tapahtunut minkäänlaista muutosta urean syötön seurauksena.



Kuvio 22. Urean tasovalinnan vaikutus savukaasun NO<sub>x</sub>-pitoisuuteen

Ammoniakki-slipin määrä pysyi koko koeajon ajan merkittävästi alle 1 mg/Nm<sup>3</sup>, eikä urean käytöllä tasovalinnasta riippumatta ollut vaikutusta savukaasun ammoniakkipitoisuuteen. Toisaalta NO<sub>x</sub>-asetusarvon ja sen perustason erotus oli vain noin 40 – 50 mg/Nm<sup>3</sup>, jonka vuoksi SNCR-järjestelmän ei tässä tapauksessa tarvinnut syöttää ureaa kovinkaan paljoa. Tämä luonnollisesti näkyy matalana ammoniakkipitoisuutena savukaasussa.

Koeajon ajalta keräiltyjen tulipesän lämpötilamittausten koonnista luodun keskimääräisen lämpötilaprofiilin perusteella (ks. kuvio 23) havaitaan tulipesän alatasen lämpötilan nousevan paikoin 950 °C lämpötilaan ja laskevan lineaarisesti kohti tulipesän yläosaa. Urean syöttäminen ylätasolle näyttäisi olevan myös lämpötilaprofiilin perusteella otollisempaa NO<sub>x</sub>-pelkistyksen kannalta, sillä välitasolla lämpötila pysyy pääasiassa yli 900 °C ja voi paikallisesti kohota myös korkeammaksi.



Kuvio 23. 50 % MCR koeajon lämpötilaprofiili

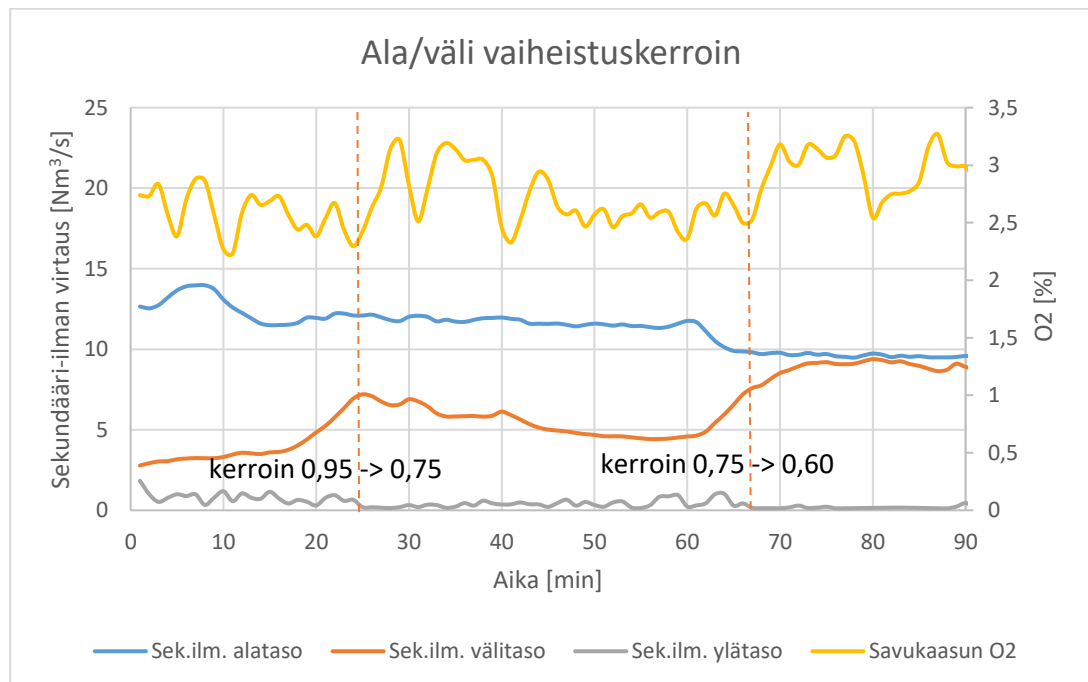
Lähtötilanteen ja koeajojen lämpötiloja vertaillen näyttäisi siltä, että perusauto-  
maatiolla operoidessa tulipesän lämpötila pysyy keskimäärin hieman matalampana  
normaalitilanteeseen verrattuna. Alatasen korkeaa lämpötilaa selittää myös se, että  
sekundääri-ilman syöttö keskittyy tällä kuorma-alueella nähtävästi lähes kokonaan  
alatasolle, eikä ilmaa juurikaan jää vaiheistettavaksi väli- ja ylätasolle (ks. taulukko  
3). 50 % MCR tehoalueella välitasolta syötettävän ilman määrä on hyvin vähäinen  
suhteutettuna ilma-aukkojen määrään kyseisellä tasolla. Ylätasen ilmamäärä on puo-  
lestaan niin pieni, ettei se todennäköisesti osallistu palamiseen, vaan on käytännössä  
kattilaan vuotavaa ilmasuuttimien jäähdytysilmaa. Tämä osaltaan selittää korkea-  
hkoa happipitoisuutta, sillä väli- ja yläsekundääri-ilmaa kuitenkin virtaa tulipesään

noin  $5 \text{ Nm}^3/\text{s}$  ja aukkojen suuren määrän vuoksi ilman virtausnopeus jää huomattavan pieneksi, eikä näin ollen tunkeudu tarpeeksi syväälle tulipesään osallistuakseen kokonaisvaltaisesti palamiseen.

Taulukko 3. Koeajon ilmajako 50 % MCR tehoalueella

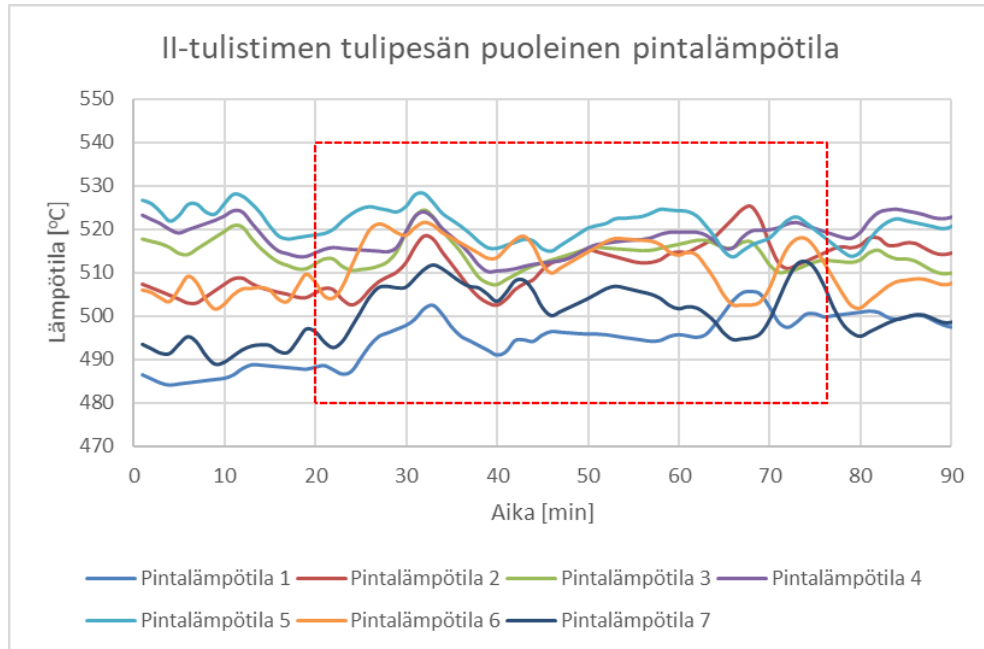
Ilmajako (50 % MCR)	$\text{Nm}^3/\text{s}$
Sekundääri-ilma ylätaso	1,15
Sekundääri-ilma välitaso	3,23
Sekundääri-ilma alataso	11,04
Primääri-ilma	22,14
Kiertokaasu	3,86

Ilman vaiheistuserrointa muuttamalla osa alatasen sekundääri-ilmasta siirrettiin välitasolle muuttamatta sekundääri-ilman kokonaisvirtausta. Kuviosta 24 havaitaan, että vaiheistuskertoimen muutosta seuraa happitason kohoaminen, joka todennäköisesti viittaa huonoon sekoittumiseen muuttumattoman sekundääri-ilman virtauksen jakautuessa useammalle aukolle.

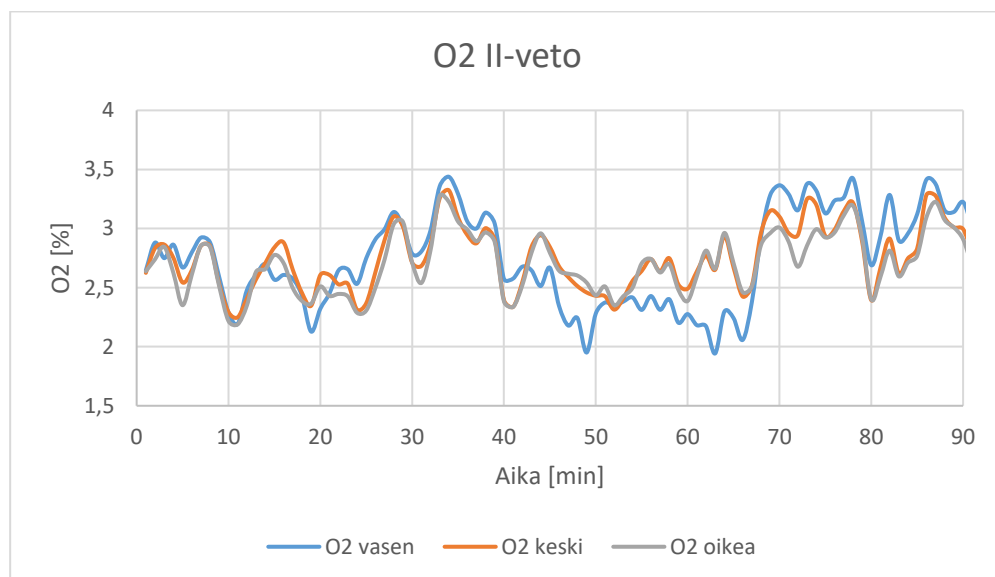


Kuvio 24. Vaiheistuskertoimen vaikutus savukaasun O<sub>2</sub>-pitoisuuteen

Vaiheistuskertoimen muutokset näkyvät myös poikkeamina II-tulistimen pintalämpötilan mittauksissa (kuvio 25) ja II-vedon happimittauksissa harituksena (kuvio 26). Myös CO-pitoisuuden merkittävä nousu ajotilanteen perustasolta indikoi hap-piköyhistä vyöhykkeistä tulipesässä.



Kuvio 25. II-tulistimen erisuuntaiset lämpötilamuutokset



Kuvio 26. Happijakauman epäsymmetrisyys savukaasuvirrassa



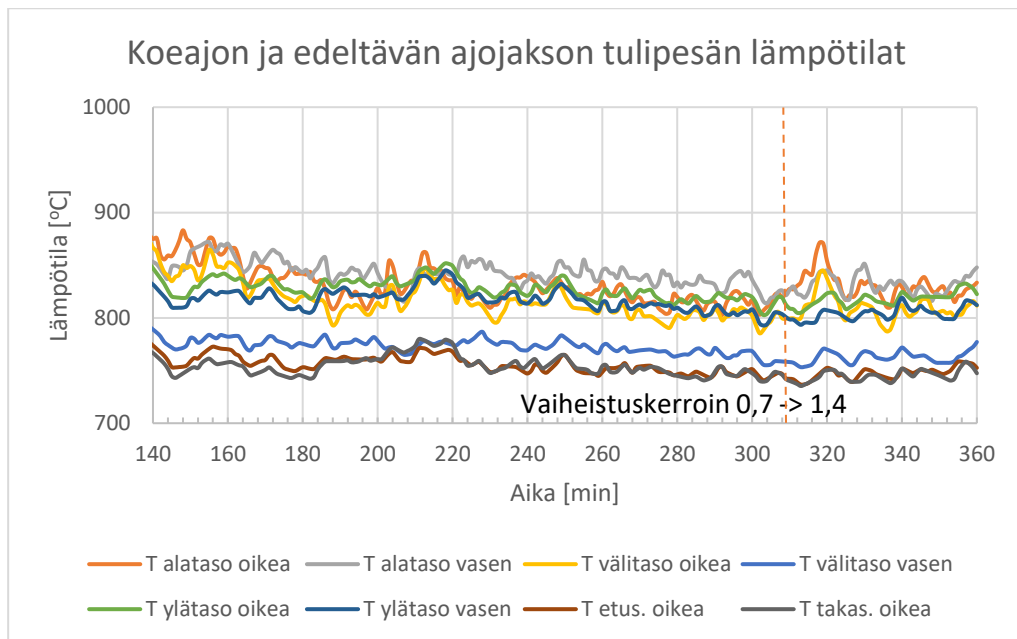
### 8.2.3 36 % MCR koeajo

Seuraavan osakuormapisteen koeajo suoritettiin 20.12.2020, 36 % MCR höyryteholla. Aiemmin suoritettujen koeajon havaintojen perusteella ei koettu poltto APC:n poiskytkemistä kokonaisuudessaan tarpeelliseksi, vaan ainoastaan ilmapeltien ja vaiheistuskertoimen ohjaus siirrettiin tarpeen tullen perusautomaatiolle.

Tulipesän tasokohtaisten lämpötilamittausten välillä ei havaittu merkittäviä eroavaisuuksia ja lämpötilajakauma näytti mittausten perusteella melko tasaiselta. Koeajon alkuvaiheilla kuitenkin ilmeni, ettei ajosuunnitelma ollut täysin onnistunut reduktioventtiilien osalta. Kattilan kuorma ei pysynyt halutulla tasolla nousten hetkellisesti niin merkittävästi, ettei koeajon alkuvaiheen prosessiarvoja kannata kokonaisuudessaan käyttää tulosten arviointiin. Ajotilanteen tasaannuttua saatiin kuitenkin hyvä ja suunnitelman mukainen ajojakso suoritettua.

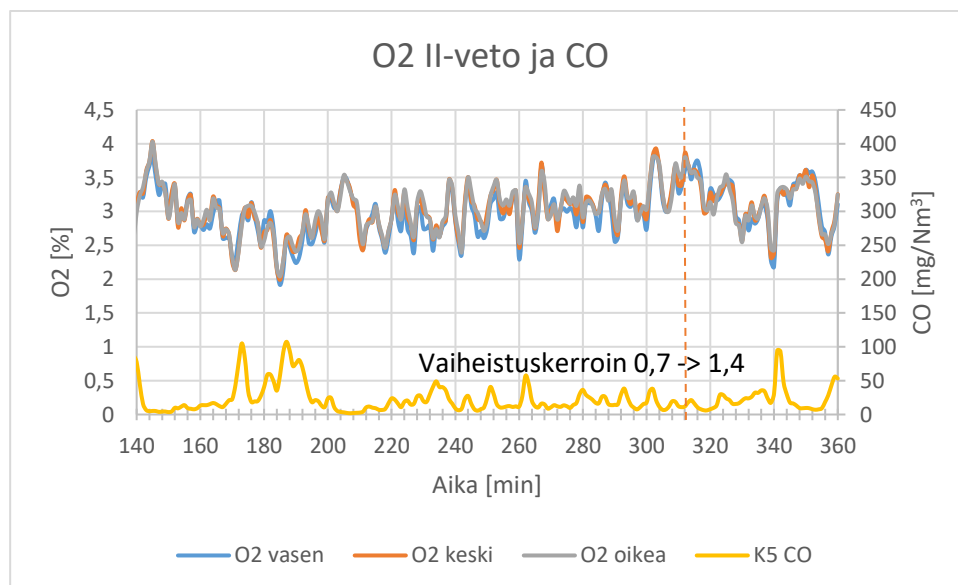
Koeajojakson aikana havaittiin sekundääri-ilman määrän olevan tällä kuormatasolla melko vähäinen, mutta polton optimointi pyrkii siitä huolimatta vaiheistamaan ilmaa ala- ja välisekundääritasojen kesken. Koska sekundääri-ilman virtaus välitasolta oli hyvin vähäistä ja happitaso oli pääosin yli 3%, oli syytä epäillä, ettei kyseinen ilmavirta osallistu juurikaan palamiseen riittämättömän tunkeuman ansiosta. Näillä perusteilla välisekundääri-ilma siirrettiin vaiheistuserrointa muuttamalla kokonaisuudessaan alatasolle.

Vaiheistuskertoimen muutoksesta seuranneet muutokset prosessiarvojen mittauksissa ovat aavistuksenomaisia, mutta kuitenkin tunnistettavissa, sillä välisekundääri-ilman vähennyttyä ja alasekundääri-ilman lisääntyttyä voidaan havaita tulipesän lämpötilan lähtevän hitaaseen nousuun. Kuviossa 27 on esitetty vaiheistuskertoimen muutoksen vaikutus tulipesän lämpötilaan, josta voidaan myös päätellä keskimääräisen lämpötilajakauman hieman tasoittuvan, lisääntyneen ilmavirtauksen aiheuttaman tasokohtaisesti parantuneen sekoittumisen seurauksena. Vaiheistuskertoimen muutosta edeltävä aika on skaalauksen takia jätetty kuvaajaan näkyviin, jotta muutokset olisivat helpommin tunnistettavissa.



Kuvio 27. Lämpötilamuutoksen suunta vaiheistukertoimen muutoksesta

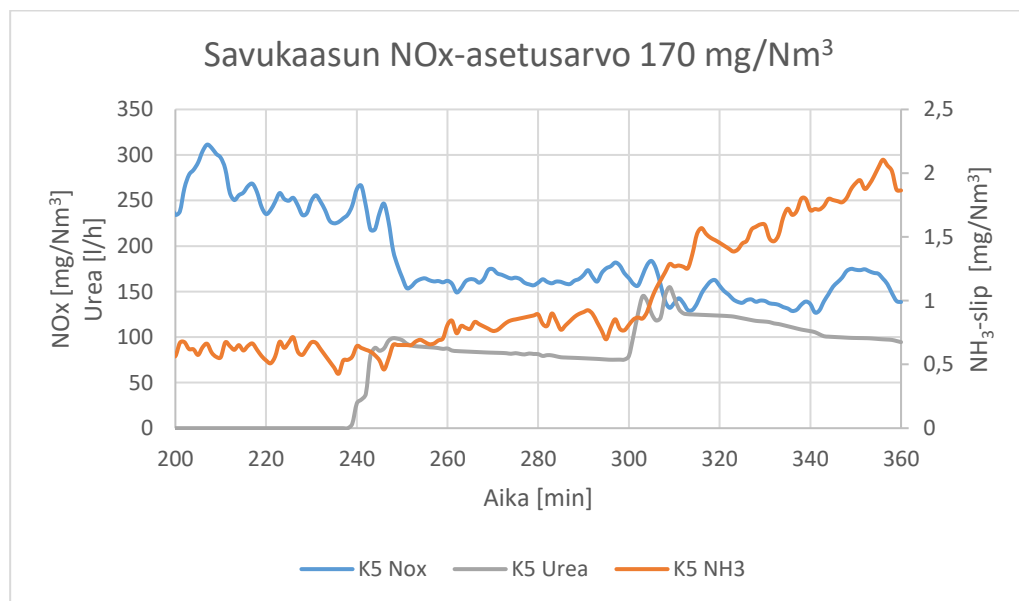
Vaikka tulipesän lämpötilan muuttuminen vaikuttaa ajoaikana yleisesti vallinneen lämpötilan suhteen tulkinnanvaraiselta, on ilmiö kuitenkin vahvistettavissa myös samaan aikaan tapahtuvasta muutoksesta II-tulistimen pintalämpötiloissa. Tämän lisäksi muutos näkyy myös kuviossa 28 esitetystä II-vedon happimittauksissa.



Kuvio 28. Vaiheistukertoimen muutos näkyy myös happimittauksissa

Havainto ei sinänsä ole merkittävä, mutta se asettaa ilmavaiheistamisen hyödyllisyyden hyvin pienillä ilmamäärillä kyseenalaiseksi nykytilanteessa, sillä muutoksella ei ollut osoitettavasti vaikutusta savukaasun CO-pitoisuuteen, mutta happipitoisuuden väheneminen viittaa puolestaan parempaan palamishyötysuhteeseen savukaasuhäviöiden vähentyessä sen seurauksena.

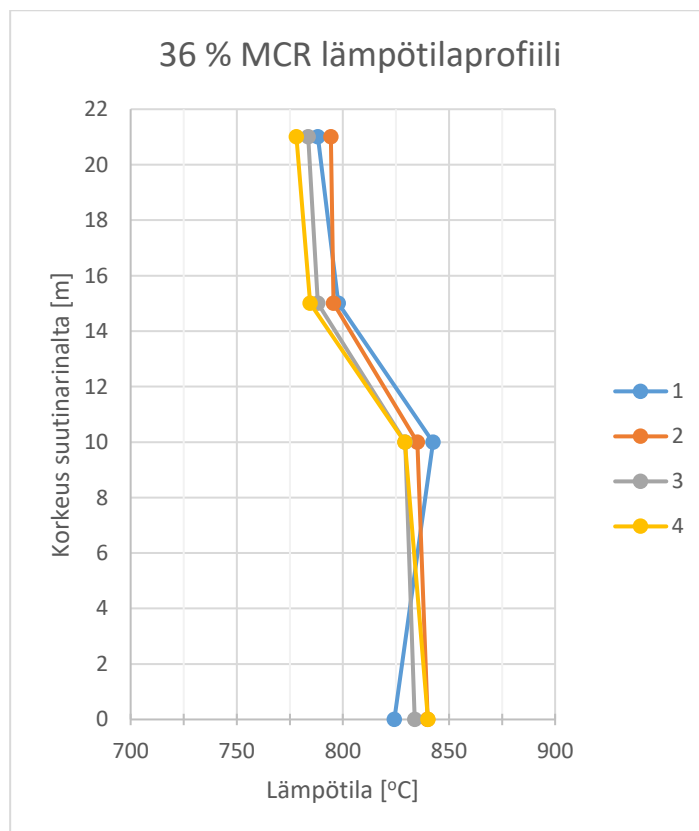
Aiemmin suoritetun koeajon (luku 8.2.2) perusteella haluttiin testata urean syöttöä tulipesään matalammalla NO<sub>x</sub>-asetusarvolla. Matalamman asetusarvon seurauksena luonnollisesti myös syötettävän urean määrä kasvoi, jolloin myös savukaasussa esiintyvän ammoniakkin määrä hieman kasvoi, mutta ei kuitenkaan merkittävästi yli 2 mg/Nm<sup>3</sup>. Vaikka urean vaikutus NO<sub>x</sub>-päästössä näkyy lyhyellä aikaviiveellä, ammoniakki-slip näkyy tuntemattomasta syystä mittauksissa vasta huomattavan viiveen jälkeen. Tällä voi olla urean annostelun kannalta merkitystä, sillä urean pumppauksen säätöpiiri sisältää NH<sub>3</sub>-korjauksen ja slipin kasvaessa urean pumppausteho vähenee. Urean ruiskutus tulipesän alatasolle näytti vaikuttavan savukaasun NO<sub>x</sub>-pitoisuuteen merkittävästi. Vaikutus on esitetty kuviossa 29, josta havaitaan myös edellä käsitellyn vaiheistuskertoimen muutoksen vaikutus savukaasun NO<sub>x</sub>-pitoisuuteen.



Kuvio 29. Urean ruiskutus tulipesän alatasolle

Tulipesän keskimääräinen lämpötila mittausten perusteella näyttää koeajon aikana pysyneen pääasiassa alle 850 °C lämpötilassa. Ilmavaiheistuksen painottuessa tulipesän alasekundääritasolle, myös korkeimmat tasokohtaiset lämpötilat keskittyvät alatasolle. Kuormataso alkaa olemaan jo kattilan kapasiteettiin suhteutettuna lähellä sen minimikuormaa, jolloin ilmavaiheistus on hyvin todennäköisesti jopa mahdollista. Tällä kuormatasolla ilmavaiheistus kuitenkin on vielä mahdollista, mutta matalan sekundääri-ilman virtausmäärän vuoksi nykytilanteessa rajoitettua. Samasta syystä tulipesän lämpötilaprofiilia on vaikeaa merkittävästi muuttaa.

SNCR-järjestelmän käyttämisen kannalta lämpötilaprofiili (ks. kuvio 30) ei kuitenkaan ole ongelmallinen, sillä tulipesästä löytyy testien perusteella urealle optimaalinen lämpötilaikkuna, jota hyödynnettäessä päästään hyvinkin suureen vähennyshyötysuhteeseen todella maltillisella ammoniakki-slipillä. Matala ammoniakki-slip viittaa myös siihen, että NO<sub>x</sub>-pelkistyspotentiaalia on vielä kyseisellä tasolla käyttämättä merkittävästi.

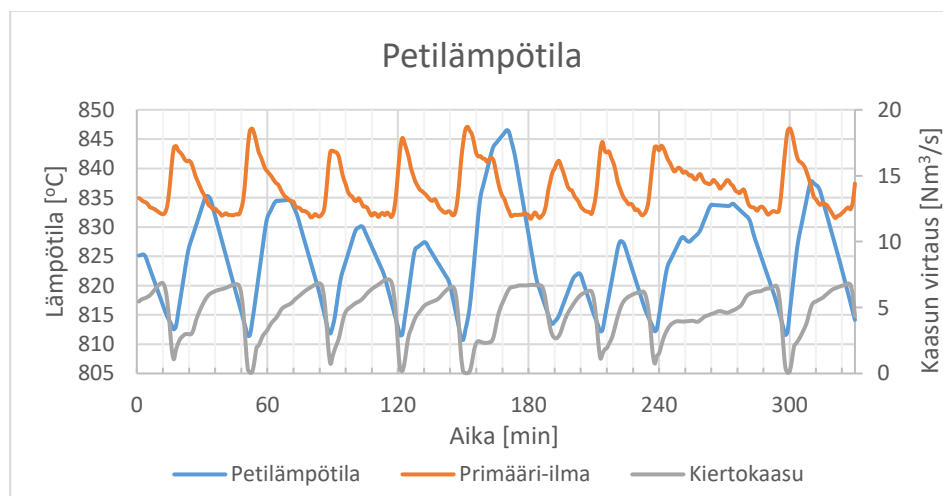


Kuvio 30. 36 % MCR koeajon lämpötilaprofiili

### 8.2.4 20 % MCR koeajo

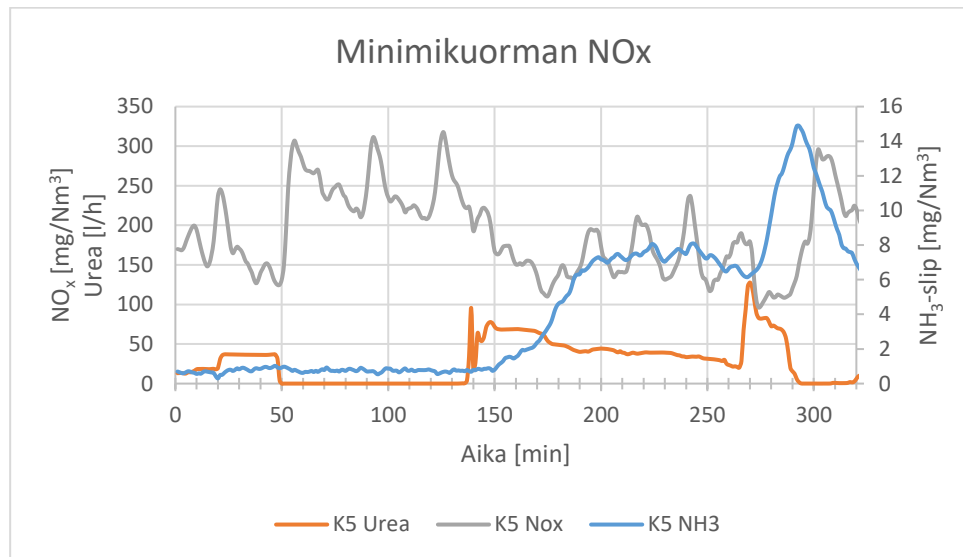
Ilmajaon toimintaa haluttiin testata myös kattilan minimikuormalla, joka BFB-kattiloissa tyypillisesti on varsin haastava toiminta-alue polton optimoinnin kannalta. Tähän syynä pääasiassa on leijupetin lämmönsiirto ja leijutuskaasun minimimäärä, joka pienellä polttoaineteholla tuo useissa tapauksissa kattilaan jo liikaa ilmaa palamisprosessin kannalta, eikä ilmavaiheistus näin ollen ole tyypillisesti mahdollista. K5:n minimikuorma on varsin matala, joka entisestään korostaa edellä mainittuja rajoitteita. Koeajon ensimmäinen osa suoritettiin 24.12.2020.

Ilmavaiheistus toimi odotetulla tavalla ilman säätöpeltien ollessa tulipesään pääosin kokonaan kiinni ja tulipesään syötettävä ilma oli pääasiassa primääri-ilmaa. Havaittiin kuitenkin, että petilämpötilan pitäminen 840 °C asetusarvossaan osoittautui vaikeaksi ja polton optimointi yritti ylläpitää lämpötilaa säätämällä primääri-ilman ja kiertokaasun suhdetta hyvin voimakkaasti. Kuviossa 31 esitettyjen prosessiarvojen perusteella huomataan primääri-ilman ja kiertokaasun osuuksien vaihtelevan todella äkillisesti leijutuskaasussa. Kiertokaasun lisääntyessä peti alkaa jäähtymään ja primääri-ilmaosuuden kasvaessa petilämpötila nousee nopeasti lähelle asetusarvoa. Koska suhteosuuden muutos kaasussa tapahtuu merkittävän nopeasti, ei tasapainotilaa petiin kulkeutuvien energiavirtojen suhteen löydy eikä petilämpötila näin ollen saavuta asetusarvoaan. Vaikka polttoaineen koostumuksella onkin merkitystä petilämpötilan ylläpitämisessä, on seilaavan trendin perusteella syytä epäillä säätöpiirin toimivuutta.



Kuvio 31. Petilämpötilan vaihtelu

Epämääräisesti käyttäytyvän leijutuskaasun seurauksena myös savukaasun koostumuksessa tapahtui merkittäviä muutoksia. Tämä näkyi erityisesti savukaasun happi- ja NO<sub>x</sub>-pitoisuuksien vaihteluna. Näin ollen savukaasun NO<sub>x</sub>-pitoisuuden perustaso on vaikeaa arvioida, mutta asettamalla NO<sub>x</sub>-asetusarvo 170 mg/Nm<sup>3</sup> ja syöttämällä ureaa tulipesän alatasolle, päästiin hetkellisesti alle 150 mg/Nm<sup>3</sup> NO<sub>x</sub>-tasoon leijutuskaasun koostumuksen vaihtelusta huolimatta (ks. kuvio 32).



Kuvio 32. Urean käyttö kattilan minimikuormalla 170 mg/Nm<sup>3</sup>-asetusarvolla

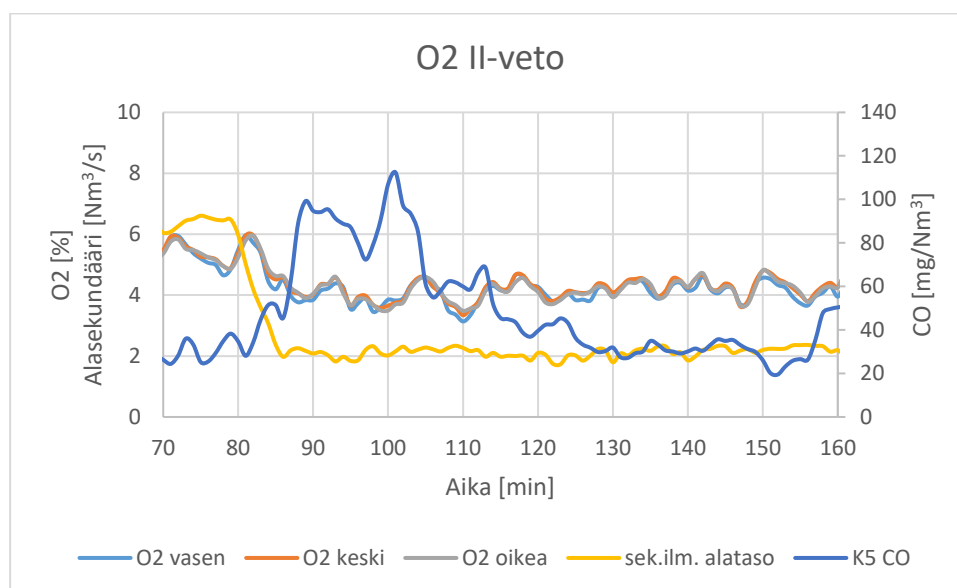
Urean määrä kuitenkin on melko vähäistä verrattuna nopeasti muodostuvaan ammoniakki-sliipiin, joka todennäköisesti viittaa epäsuotuisiin olosuhteisiin injektioalueella. Tällä kuormatasolla ilmavaiheistuksen ollessa käytännössä olematonta, määrittää petilämpötila hyvin pitkälle tulipesän alatasolla vallitsevan lämpötilan. Alatasolla lämpötila oli keskimäärin hieman yli 750 °C, joka ei urean kannalta ole optimaalinen lämpötila. Tästä huolimatta urean käytöllä oli NO<sub>x</sub>-tasoon selkeä pelkistävä vaikutus, joka todennäköisesti johtuu osittain hitaasta savukaasun virtausnopeudesta alhaisen kattilakuorman seurauksena, pidentäen ureareagenssin viipymäaika injektioalueella.

Koeajon aikana havaitun leijutuskaasun koostumuksen voimakkaan vaihtelun vuoksi päätettiin koeajo uusia käyttäen alhaisempaa petilämpötilan asetuservoa ja kiinnittämällä enemmän huomiota primääri-ilman ja kiertokaasun suhteeseen. Tarkoituksena

oli pitää kiertokaasun osuus leijutuskaasusta mahdollisimman vakiona, mutta tämä kuitenkin osoittautui polttoaineen laadun vuoksi melko hankalaksi, eikä kiertokaasun virtausta petiin saatu pysymään tasaisena. Tästä huolimatta tasaisia ajojaksoja saatiin suoritettua.

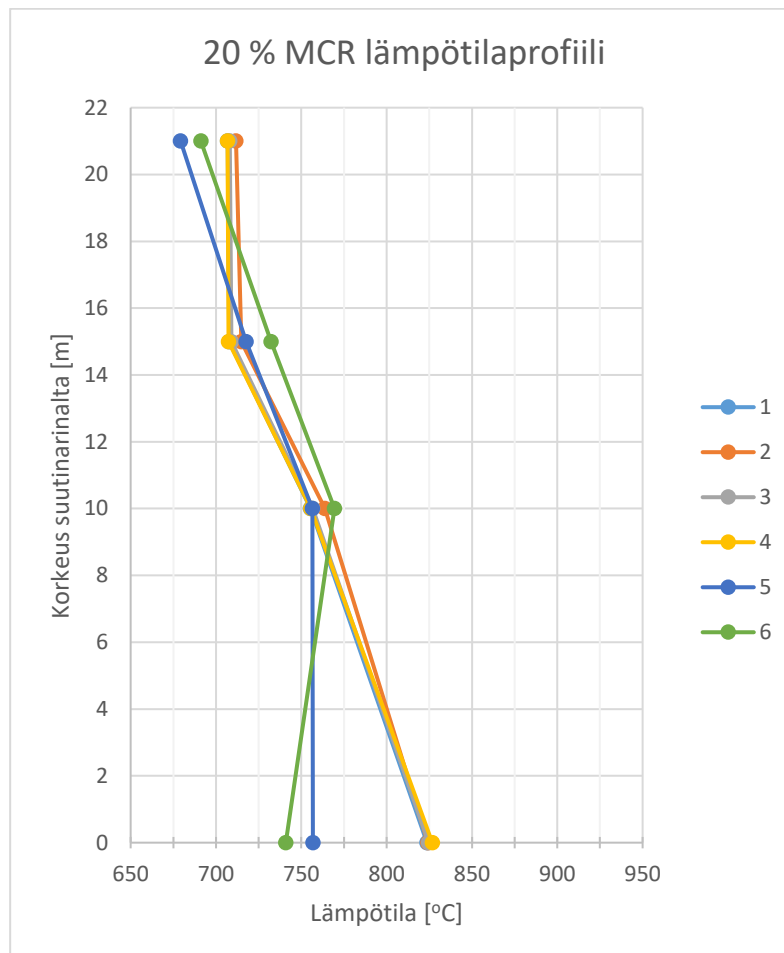
Koeajon alkuvaiheessa happitaso oli korkealla kiertokaasun käytöstä huolimatta, noin 5 - 6 %, ja polton optimointi pyrki vaiheistamaan palamista syöttämällä ilmaa primääri-ilman lisäksi myös alasekundääritasolle. Alatason säätöpeltejä sulkemalla havaittiin happitason putoavan ja taas peltejä avaamalla happitaso nousi korkeaksi. Tämän lisäksi peltien asennolla ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta tulipesässä vallitseviin tasokohtaisiin lämpötiloihin, hetkellisiä muutoksia lukuun ottamatta. Vaikutukset näkyivät pääasiassa hetkellisesti savukaasun pitoisuuksissa.

Edellä mainitun ja vähäisen sekundääri-ilmavirtauksen perusteella voidaan jälleen olettaa, ettei sekundääri-ilma osallistu palamiseen, vaan polttoaineen palamista varten tarvittava happi saadaan kokonaisuudessaan primääri-ilmasta. Näiden havaintojen perusteella alatasolle ohjattu sekundääri-ilman virtaus poistettiin, jolloin myös happipitoisuus laski merkittävästi. Muutoksesta tosin seurasi CO-pitoisuuden nousu, mutta kiertokaasun määrää vähentämällä liiallinen CO:n muodostuminen saatiin poistettua.



Kuvio 33. Vaiheistusilman poistamisen vaikutus savukaasuhäviöihin

Minimikuormien koeajoilla tulipesän lämpötilaprofiilissa ei petilämpötilaa lukuun ottamatta ole juurikaan eroja, mutta lämpötilat näyttävät olevan keskimäärin hieman korkeampia silloin, kun ylimääräistä sekundääri-ilmaa ei ajeta (ks. kuvio 34). Optimaalista lämpötilaikkunaa urean käytölle minimikuormalla ei kuitenkaan löydy, mutta esimerkiksi viipymääjan kasvaessa haluttu NO<sub>x</sub>-vähennystaso on saavutettavissa. Havaittiin myös viitteitä siitä, että sekundääri-ilmaa ajettaessa urean vaikutus NO<sub>x</sub>-tasoon oli hieman tehokkaampaa. Tätä osaltaan voi selittää se, ettei sekundääri-ilma juurikaan osallistu palamiseen ja alasekundäärirekisteri sijaitsee urean alatasen syöttöpisteen alapuolella, jolloin ylimääräinen ilmavirta kasvattaa urean injektioalueella vallitsevaa O<sub>2</sub>-pitoisuutta, siirtäen SNCR:n kannalta optimaalista lämpötilaikkunaa matalimpiin lämpötiloihin.



Kuvio 34. 20 % MCR lämpötilaprofiili



### 8.2.5 Koeajojen tulokset ja havaintojen yhteenveto

Koeajojen tulosten perusteella K5:n sekundääri-ilmajärjestelmää nykytilanteessa rajoittavat puutteellisuudet ovat helposti tunnistettavissa. Vaikka testatuista osakuormapisteistä löytyykin lämpötilavyöhykkeet, joissa ureaa voidaan käyttää, on ilmavaiheistus kuitenkin hyvin rajallista heikon tasokohtaisen sekundääri-ilman tunkeuman vuoksi. Tulipesän lämpötilaprofiilia ei näin ollen pysty merkittävästi muuttamaan urean käytön kannalta optimaalisemmaksi. Lisäksi myös savukaasun happipitoisuus on matalilla kuormatasoilla keskimäärin melko korkealla, joka viittaa tulipesään kulkeutuviin hallitsemattomiin ilmavirtoihin sekä tasokohtaisesti heikkoon sekundääri-ilman tunkeumaan. Tämä on nähtävissä erityisesti pienillä kuormilla, mutta myös 50 % MCR tehoalueella happitaso on normaalitilanteessa melko korkealla.

Testatuilla kuormatasoilla ilmavaiheistus keskittyy käytännössä kokonaan alasekundääritasolle, joka nostaa 50 % MCR kuormalla alatasen lämpötilan kriittisen korkeaksi, eikä väli- ja ylätasen lämpötiloihin voi vähäisen ilmamäärän ja huonon tunkeuman vuoksi juurikaan vaikuttaa. Polttoaineseoksen hienojakoisuuden kasvaessa polttoaine voi palaa pääasiassa tulipesän yläosissa, eikä tasokohtaista palamista pystytä tällaisissa tilanteissa hallitsemaan olemattoman vaiheistusilmamäärän takia. Pienillä kuormatasoilla vaiheistusilmamäärät ovat puolestaan jo niin pieniä, että sekundääri-ilman hyödyntäminen tulipesän lämpötilan hallinnassa on haastavaa, ilman jäädessä pääasiassa tulipesän seinille tai suutinaukkojen läheisyyteen. Sekundääri-ilman hyödyllisyyttä voidaan kuitenkin tehostaa korvaamalla osa primääri-ilmasta kierto kaasulla ja paikkaamalla sen seurauksena vähentynyttä happipitoisuutta lisäämällä sekundääri-ilman virtausta. Pieniä määriä sekundääri-ilmaa ei suuren aukkomäärän vuoksi kuitenkaan kannata jakaa usealle tasolle, vaan ilmavirtaus on pyrittävä käyttämään tehokkaasti.

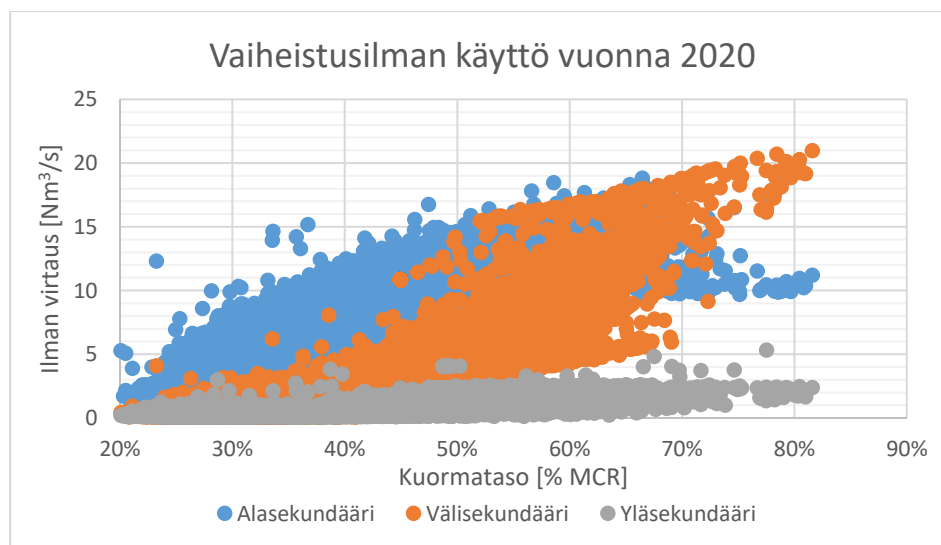
Vertaamalla tulipesän lämpötilaprofiilin kehittymistä tätä nykyä ajettaviin kuormatasoihin, huomataan kattilan optimaalisen toiminta-alueen keskittyvän keskisuurta korkeimpiin kuormatasoihin, jolloin ilmavaiheistus on tehokkaammin hyödynnettävissä.

Tällä on myös oleellisesti merkitystä savukaasupäästöihin, sillä esimerkiksi NO<sub>x</sub>-päästön perustaso on pienillä kuormilla suhteessa reilusti korkeampi, kuin optimaalisella kuormatasolla.

### 8.3 Ilmajaon kehittäminen

#### 8.3.1 Sekundääri-ilmajärjestelmä

Tätä nykyä ajettavien matalien kuormatasojen myötä K5:n ilmavaiheistus rajoittuu keskimäärin vain tulipesän alatasolle, eivätkä väli- ja yläsekundääritason ilmarekisterit juurikaan ole polton kannalta tehokkaasti hyödynnettävissä nykyisessä järjestyksessä. Kuvioista 35 huomataan välisekundääritasolta syötettävän vaiheistusilman virtauksen kasvavan merkittävästi vasta 50 % MCR kuormatason ylityksen jälkeen. Tätä pienemmillä kuormatasoilla virtausmäärä jää välitasolta niin pieneksi, että sen vaikutus polton optimointiin ja lämpötilaprofiilin hallintaan jää suuren aukkomäärän vuoksi marginaaliseksi. Yläsekundääri-ilman osuus palamiseen osallistuvasta ilmasta nousee merkittäväksi vasta yli 80 % MCR tehoalueilla ja onkin sitä alemmilla kuormatasoilla käytössä pääsääntöisesti vain sellaisissa poikkeustapauksissa, joissa poltossa tapahtuva poikkeama aiheuttaisi kattilan alasajon alhaisen happipitoisuuden vuoksi. Tämä asettaa ylätason ilmarekisterin tarpeellisuuden mielestäni kyseenalaiseksi, sillä happipitoisuutta voidaan äkkiä lisätä myös välitason ilmavirtausta kasvattamalla.



Kuvio 35. Vaiheistusilman käyttö kuormatason mukaan

K5:n nykyisen tilanteen suurin rajoite alhaisten kuormatasojen vuoksi on nimenomaan ilmavaiheistuksen rajallisuus ja aukkojen suuresta määrästä johtuva huono sekundääri-ilman tunkeuma. Mikäli vaiheistusilman käyttöä voitaisiin tehostaa tulisi ilmasuihkun tunkeumaa lisätä nostamalla virtaavan fluidin virtausnopeutta tulipesään. Fluidin virtausnopeutta tulipesään voidaan kasvattaa esimerkiksi tukkimalla lisää sekundääri-ilman aukkoja. Tukittavan aukon vaikutusta tai tukittavien aukkojen määrän vaikutusta kokonaisuuteen on kuitenkin lähes mahdotonta arvioida ilman perusteellista tulipesän simulointia.

Tällä hetkellä käytössä olevat käsipellilliset, kiinteät putkisuuttimet eivät osaltaan sovellu rakenteensa vuoksi ilmasuihkun tunkeuman kasvattamiseen, sillä virtausnopeutta ei säädetä tai pystytä ilmapelleillä merkittävästi muuttamaan ilman jakokammiossa vallitsevan muuttuvan paineprofiilin vuoksi. Tämän seurauksena peltien yli vallitseva paine-ero tulipesään ei pysy vakiona. Nykyiseen tilanteeseen sopivampana vaihtoehtona olisi vaihtaa kiinteät putkisuuttimet vakionopeussuuttimiin. Vakionopeussuuttimilla fluidin virtausnopeus pysyy ilmanakanavan ja tulipesän paine-eron vaihdellessa likimain vakiona erillisen vastapainon avulla. Vastapaino kuristaa ja avartaa suuttimen päätä ilmarekisterin jakokammion paineen muuttuessa, jolloin ilmasuihkun tunkeuma olisi mahdollista pitää riittävänä kattilan kuormatasosta riippumatta.

Mikäli vakionopeussuuttimet olisivat käytössä, voitaisiin kattilan toimittajan laatiman ilmakäyrän asettamia ilmajakoon liittyviä rajoitteita muuttaa ja määrittää ilmajaon kuormapisteet vastaamaan nykyistä kuormatasoa ja vakioitua ilman virtausnopeutta. Tällä tavoin ilmavaiheistus olisi käytettävissä huomattavasti laajemmalla kuorma-alueella ja tulipesän optimaalista toiminta-aluetta saataisiin siirrettyä matalammille kuormatasoille.

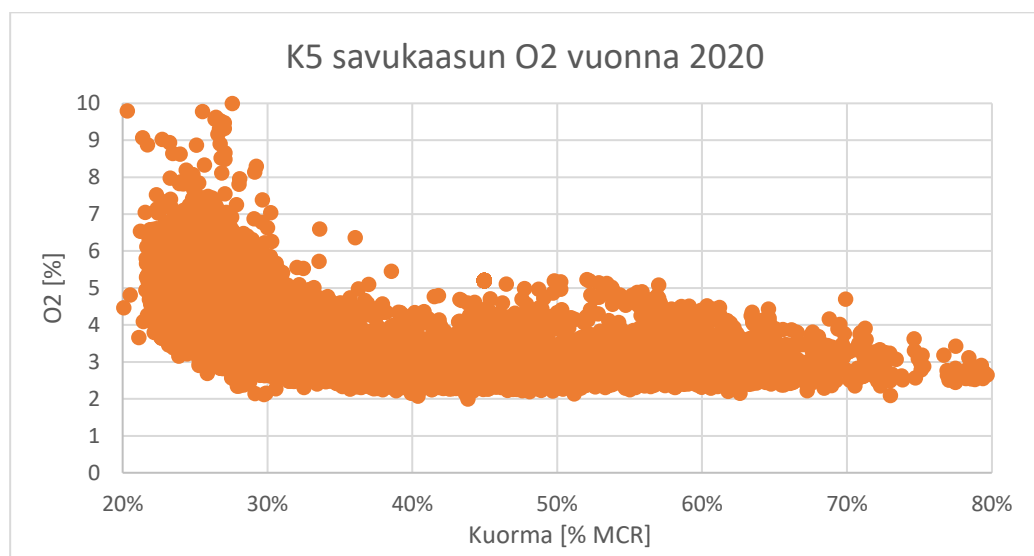
Nykyisten suutinmallien muuttaminen vakionopeussuuttimiksi vaatisi todennäköisesti mittavaa sekundääri-ilmajärjestelmän revisiointia ja uudelleensuunnittelua, sillä suutinmallien ollessa toisistaan täysin erilaisia, tulisi ilmarekisterien jakokammioiden ja sekundääri-ilman kanaviston rakennetta melko varmasti muuttaa. Lisäksi kattilan painerunkoon ja muurauksiin joutuisi mitä todennäköisemmin tekemään mittavia

muutoksia, sillä alasekundääri-taso on hyvin lähellä primääri-ilman suutinarinaa ja ilma-aukot tulipesään tulevat alatason suojamuurauksien läpi.

Lisäksi sekundääri-ilmajärjestelmän revisioinnin vaikutuksia savukaasupäästöihin on hyvin hankalaa arvioida, jonka vuoksi optimaalinen vakionopeussuuttimien sijoittaminen, niiden määrä ja ilmasuihkun tunkeuma tulisikin määritellä perusteellisella CFD-laskennalla (computational fluid dynamics), jossa tulipesän toimintaa simuloitaisiin numeerisesti eri kuormataseilla ja suutinkonfiguraatioilla. On kuitenkin perusteltua olettaa, että NOx-perustason ja SNCR-järjestelmän käytön kannalta saataisiin merkittävä parannus, laajemmalla kuorma-alueella käytettävän ilmavaiheistuksen seurauksena.

### 8.3.2 Vuotoilman minimointi

Koeajojen aikana tehdyt havainnot korkeasta savukaasun happipitoisuudesta viittaavat aiemmin käsitellyn lisäksi myös hallitsemattoman vuotoilman suureen määrään tulipesässä. Vuonna 2020 savukaasun happipitoisuus käytön aikana oli keskimäärin 3,24 %, joka on näkemykseni mukaan varsin korkea (ks. kuvio 36). Savukaasun O<sub>2</sub>-pitoisuus kasvaa merkittävästi kuormatason alittaessa 30 % MCR, joka viittaa huonon tunkeuman lisäksi myös vuotoilman korostuneeseen merkitykseen pienillä kuormataseilla.



Kuvio 36. Savukaasun O<sub>2</sub>-pitoisuus on keskimäärin melko korkealla

Hallitsemattomien ilmavirtojen määrästä saatiin tehtyä merkittäviä havaintoja 20 % MCR kuormapisteessä suoritettuna koeajon aikana, jolloin vaiheistusilman virtaus ja ilmapellit asetettiin M-moodissa asetusarvoon 0. Virtauksen ohjauksen ollessa 0 Nm<sup>3</sup>/s ja peltien ollessa 0 % auki, huomattiin kuitenkin tasokohtaisten mittausten saavan tästä huolimatta arvoja. Yhteenlaskettuna vaiheistusilman määrä edellä mainituilla ehdoilla vaihteli välillä 3 – 5 Nm<sup>3</sup>/s, joka jo itsessään aiheuttaa huomattavan suuren ja hallitsemattoman ilmavirran tulipesään. Tämän lisäksi kattila on varustettu kuudella tulipesän alaosaan sijoitetulla starttipolttimella ja kahdella tulipesän keskivaiheille sijoitetulla kuormapolttimella. Polttimet ovat ilmajäähdytteisiä ja jäähdytykseen käytettävä ilma aiheuttaa myös hallitsemattoman ilmavirran kattilaan. Poltinilmojen aiheuttaman vuotoilman määrään on jo SNCR-laitteiston asennuksen yhteydessä puututtu vuoden 2019 aikana tehdyillä toimenpiteillä. SNCR-laitteiston yhteydessä alkuperäisten kuormapolttimien määrää vähennettiin poistamalla kolme kuormapoltinta.

Laskemalla vuotavan vaiheistusilman ja poltinilmojen virtausmäärät yhteen ja vähentämällä ne sekundääri-ilman kokonaismäärästä, saadaan laskettua vuotoilman osuus tulipesään syötettävästä kokonaisilmasta. 20 % MCR kuormatasolla vuotoilman osuus kokonaisilmasta oli koeajon ajalta laskettujen arvojen perusteella keskimäärin noin 17 %. Suuremmilla kuormatasoilla vuotoilman osuus kokonaisilmasta kuitenkin vähenee huomattavasti ja esimerkiksi 36 % ja 50 % MCR kuormatasoilla vuotoilman osuus kokonaisilmamäärästä oli keskimäärin 9 % ja 3 % vastaavasti.

Näin suurilla hallitsemattomilla ilmavirtauksilla on merkittävästi vaikutusta NO<sub>x</sub>-päästön muodostumiseen ja polton hyötysuhteeseen, jonka vuoksi vuotoilman minimointiin kannattaisi kiinnittää erityistä huomiota ja tarkastaa kaikkien ilmapeltien tiiveys seuraavan huoltoseisokin aikana ja uudelleen arvioida suuttimien jäähdyttämiseen tarvittavaa ilmamäärää.

On kuitenkin huomioitava, että mittaustarkkuus saattaa olla hyvinkin epätarkkaa kanavien virtausmäärien ollessa suunnitellun mittausalueen alarajoilla. Esimerkiksi osassa starttipolttimista jäähdytysilman virtaus näyttää sekundääri-ilman määrästä

riippumatta  $0 \text{ Nm}^3/\text{s}$ . Näin ollen on suositeltavaa tarkastaa mittaukset ja kalibroida lähettimet, jotta todellisesta vuotoilman määrästä saadaan tarkempi käsitys.

### 8.3.3 Minimileijutusmäärän alentaminen

Minimikuormalla suoritettuna koeajon aikana havaittiin, että palamiseen tarvittava ilmamäärä saadaan kokonaisuudessaan leijutukseen käytettävästä primääriilmasta. Mahdollisuuksia petin O<sub>2</sub>-pitoisuuden vähentämiseen pyrittiin testaamaan korvaamalla osa primääriilmasta kiertokaasulla. Tämä ei kuitenkaan säätöpiirin toiminnan ja petilämpötilan romahtamisen myötä onnistunut käytännössä, mutta teoriassa ilmapaiheistusta olisi mahdollista käyttää myös minimikuormalla, mikäli petin O<sub>2</sub>-pitoisuutta saataisiin rajoitettua riittävästi.

Suurimmaksi haasteeksi kuitenkin muodostuu minimileijutusmäärä, jota vähentämällä myös petiin tuotavan hapen määrä vähentyisi. Minimileijutusmäärää ei voi käyttäjän toimesta kuitenkaan muuttaa, eikä testejä näin ollen voi käytännössä etukäteen suorittaa. Minimileijutusmäärä on osa kattilan TLJ:tä (turvallisuuteen liittyvät järjestelmät) ja sen alittuessa tapahtuu turva-automaation laukaisu, josta aiheutuu leijupolton alasajo. Minimileijutusmäärän muuttaminen vaatisi TLJ-järjestelmään tehtävien muutoksia, joka edellyttää erillistä TLJ-järjestelmän muutossuunnitelman ja muutoksen vaikutusanalyysin laatimista. Lisäksi muutosta ei voi tehdä ilman tarkastusviranomaisen hyväksymää, laitoksen käytönvalvojan laatimaa muutoslupahakemusta. Vasta hyväksytyn muutoslupahakemuksen jälkeen, muutos TLJ-järjestelmään olisi mahdollista tehdä ja primäärisesti todennetun turva-automaation toiminnan jälkeen, voitaisiin ilmapaiheistusta testata uudelleen. Tämän lisäksi riittävän leijutusmäärän määrittämiseksi, tulisi myös suorittaa tarkempaa analysointia käytettävän petimateriaalin partikkelikoosta, jotta leijutusnopeus pysyisi kaikissa tilanteissa riittävänä.

Minileijutusmäärän muuttaminen ei kuitenkaan ole ratkaisu kattilan ilmapaiheistuksen rajoittuneisuuteen, mutta siitä voi saada helpotusta minimikuormalla tulipesän lämpötilanhallinnassa ilmapaiheistuksen kautta.

## 9 Johtopäätökset

Jämsänkosken K5:llä tätä nykyä ajettavat tehoalueet ovat selvästi suunnitellun optimatehoalueen ulkopuolella. Tästä saatiin selkeitä viitteitä koeajojen aikana tehdyistä havainnoista. Nykytilanteen suurimmaksi haasteeksi osoittautui ilmajaon käytön rajoittuneisuus lähes kokonaan alasekundääritasolle. Testatuilla kuormatasoilla ilmapaiheistuksen alapainotteisuutta siirrettäessä tulipesän välisekundääri tasolle havaittiin, ettei tasokohtainen ilmasuihkun tunkeuma tällöin ole riittävä. Riittämätön tunkeuma näkyi erityisesti II-tulistuksessa ja II-vedon O<sub>2</sub>-jakaumassa huomattavana epäsymmetrisyytenä. Tämän lisäksi savukaasun O<sub>2</sub>-pitoisuudessa havaittiin merkittäviä muutoksia, jotka myös kielivät tunkeuman riittämättömyydestä.

Tulipesän ollessa kuormatasoon nähden melko kookas, sekundääri-ilmajärjestelmä ei nykyisillä suutinmalleilla pysty jakamaan vaiheistusilmaa tehokkaasi useammalle tasolle suuren aukkomäärän heikentäessä ilmasuihkun tunkeumaa. Tilanteen helpottamiseksi ilmapaiheistuksen osalta on aika vähän tehtävissä, ellei suurempiin toimenpiteisiin ryhdytä muuttamalla suutinmalleja ja ilmarekistereitä. Lisätutkimusta tosin voi ja kannattaa tehdä, esimerkiksi toteuttamalla tulipesän simulointi CFD-laskennalla eri suutinmalleilla tai muutetulla aukkomäärällä nykysuuttimilla. Tämä olisi näkemykseni mukaan paras keino jatkotutkimuksen suhteen, sillä CFD-laskennalla saadaan helposti simuloitua tulipesän toimintaa eri kuormatasoilla, ilmapaiheistuksella ja suutinmalleilla.

Vaikka ilmapaiheistuksen käyttö alkuperäistä laajemmalla kuormatasolla onkin nykytilanteessa aiemmin esitetyin perustein lähes mahdotonta, koeajojen aikana tehtyjen havaintojen perusteella pystyttiin osoittamaan muita seikkoja, joihin huomiota kiinnittämällä voidaan tilanteeseen kuitenkin saada helpotusta. Tarkastamalla ja tarpeen vaatiessa kalibroimalla ilman määramittaukset ja minimoimalla hallitsemattomat ilmapvirrat tulipesään, voidaan ylimääräisen ja palamiseen osallistumattoman hapen määrää saada rajoitettua. Tällöin myös palamishyötysuhde osaltaan paranee savukaasuhäviöiden vähentyessä ja savukaasun NO<sub>x</sub>-perustaso madaltuisi. Lisäksi saatiin viitteitä siitä, että alhaisten vaiheistusilmavirtojen keskittäminen parantaa tasokohtaista sekoittumista ja vähentää jäännöshapen määrää. K5:n savukaasujen CO-

pitoisuus on keskimäärin myös melko alhainen, vuonna 2020 noin  $18 \text{ mg/Nm}^3$ , joka osaltaan selittyy hallitsemattomien ilmavirtausten kautta, mutta polttoa kannattaisi optimoida vakioimalla savukaasun CO-pitoisuus hieman suuremmaksi ja minimoimalla O<sub>2</sub>-pitoisuus. Tällöin palamishyötysuhdetta saadaan parannettua nykyisestä ja alennettua NO<sub>x</sub>-päästön perustasoa. Toisaalta alhaalla pidettävä happipitoisuus voi aiheuttaa useasti muuttuvan kuormatason vuoksi kattilan alasajoja, kuorman äkkinäisten muutosten pudottaessa O<sub>2</sub>-pitoisuuden lukitusrajalle.

SNCR-järjestelmän toiminnan kannalta ilmavaiheistusta koskevat rajoitteet eivät muodostu urean syöttämisen ongelmaksi. Jokaisesta testatusta osakuormapisteestä löytyy lämpötilaikkuna, jossa ureaa voidaan tehokkaasti käyttää. Tästä saatiin hyvää näyttöä NO<sub>x</sub>-pelkistymisen osalta ja myös marginaalisen ammoniakki-slipin määrän osalta. Lämpötilamittausten perusteella tasokohtaiset lämpötilat eivät kuitenkaan ole täysin optimaalisia urean käytön kannalta, eikä ilmavaiheistuksen rajallisuuden vuoksi lämpötilaprofiilia voi juurikaan nykytilanteessa muuttaa. Lämpötilaprofiilin muuttamiseksi pitäisi sekundääri-ilmajärjestelmää muuttaa merkittävästi.

Asiantuntijan (Pakarinen 2021) antaman kustannusarvion mukaan ilmajärjestelmän muuttaminen nykyisestä mallista vakionopeussuuttimilla varustettuun järjestelmään kustantaisi painerunkoon ja ilmakehävistöön tehtävien muutosten vuoksi noin 800 000 € ( $\pm 25 \%$ ). Tulipesän optimaalisen toiminta-alueen ja SNCR-järjestelmän toiminnan kannalta ilmajärjestelmän uudelleensuunnittelu ja muuttaminen olisi kannattavaa, mutta revisioiden todellinen laajuus ja siitä aiheutuvat todelliset investointikustannukset jäävät tämän työn osalta kysymysmerkeiksi kustannusarvioinnissa annetun suuren marginaalin takia.

## 10 Pohdinta

Opinnäytetyön kohteena olleen Jämsänkosken voimalaitoksen BFB-kattilan ilmajaon kehittämistutkimuksessa oli tarkoituksena tutkia tulipesän lämpötilaprofiilia urean optimaalisen syöttövyöhykkeen löytämiseksi. Tutkimus toteutettiin empiirisenä kehittämistutkimuksena, jossa hyödynnettiin kvalitatiivisia tutkimusmenetelmiä. Työ



toteutettiin suorittamalla koeajoja eri osakuormapisteissä, jotta K5:n tulipesän ja ilmajaon toiminnasta saatiin nykytilannetta vastaava kokonaiskuva. Koeajoista keräiltyjen mittaustietojen perusteella pystyttiin tunnistamaan nykytilanteesta useita kehitys- ja ongelmakohtia, joihin puuttumalla K5:n sekundääri-ilmajärjestelmää voitaisiin mahdollisesti optimoida käytettäväksi laajemmalla ja paremmin nykyistä tilannetta vastaavalla kuormatasolla.

Tutkimuksen aihe oli mielestäni erittäin kiinnostava ja ajankohtainen, sillä työn aikana tehtyjen havaintojen perusteella pystyttiin osoittamaan selkeitä ongelmakohtia ja puutteita, joita kattilan sekundääri-ilmajärjestelmässä tällä hetkellä on. Tutkimuksen lopputulokset ovat näiltä osin myös toimeksiantajan mukaan laadukkaita. On kuitenkin huomioitava, että kattilan kuormatason ollessa optimialueen ulkopuolella, prosessimittausten avulla tehdyt havainnot eivät kerro absoluuttisesti prosessin todellista tilaa mahdollisten mittausrvirheiden ja muiden prosessiin vaikuttavien muuttujien vaikutuksesta. Kattilaprosessin ollessa monimuuttujaprosessi, on tämänkaltaisessa tutkimuksessa usein tyydyttävä keskimääräisiin arvoihin mittaustulosten analysoinnissa, jonka vuoksi koeajojaksojen täytyisi olla ajallisesti pitempikkestoisia ja mitausten tulisi olla kalibroituina, jotta tulosten todentaminen olisi luotettavampaa. On myös huomioitava, ettei tulipesän lämpötilamittausten perusteella pystytä toteamaan tulipesän keskialueella vallitsevia lämpötiloja tai niiden hetkellisiä muutoksia mitausten ollessa lähellä tulipesän seiniä. Tulipesän keskialueiden tasokohtaisen lämpötilojen muutoksien tarkastelemiseksi olisi suositeltavaa lisätä lämpötilan pyrometrimittaukset kullekin tulipesän tasolle. Pyrometrimittausten avulla ilmavirran vaikutusta pystyttäisiin arvioimaan paremmin tulipesän keskialueiden lämpötilan muutosten perusteella ja tätä kautta myös ilmasuihkun tunkeuman riittävyyden arviointi olisi luotettavampaa.

Opinnäytetyötä olisi voitu myös vielä laajentaa, mikäli CFD-laskennan suorittamiseen vaadittavat työkalut olisivat olleet resursoituna työn toteutusta varten. Tällä tavoin työn aikana tehtyjä havaintoja olisi voitu havainnollistaa paremmin ja perustella parannusehdotuksia tulipesän simulaatiolla. Tästä huolimatta työn tavoitteet ovat kuitenkin saavutettu ja toimeksiantajalle pystyttiin luomaan kattava selvitys sekundääri-ilmajärjestelmän toiminnasta ja sen puutteista. Ilmajaon kehittämiseksi esitettiin

myös eri vaihtoehtoja, joiden avulla SNCR-menetelmän toimintaa voidaan tehostaa. Lämpötilaprofiloinnin avulla todettiin SNCR-lämpötilaikkunan löytyvän kultakin kuormatasolta, mutta kuorman pienentyessä optimaalinen lämpötilaikkuna kuitenkin häviää, eikä lämpötilaikkunaa voida nykytilanteessa merkittävästi muuttaa ilmajaon avulla.

## Lähteet

A 13.11.2014/936. Valtioneuvoston asetus suurten polttolaitosten päästöjen rajoittamisesta. Finlex. Viitattu 6.11.2020. Ajantasainen lainsäädäntö. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140936#Pidp447339840>.

Basu, P. 2006. Combustion and gasification in fluidized beds. Taylor & Francis group.

Blejchař, T., Heide, B., Konvička, J., Maier, M. & Malý, R. 2018. High Temperature Modification of SNCR Technology and its Impact on NOx Removal Process. EFM17 – Experimental fluid mechanics, 2, 4. Viitattu 16.11.2020. EPJ Web of Conferences. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818002009>.

Hiilidioksidi ja hiilen kiertokulku. 2020. Ilmasto-opas. Viitattu 24.10.2020. <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio/-/artikkeli/1e92115d-8938-48f2-8687-dc4e3068bdbd/hiilidioksidi-ja-hiilen-kiertokulku.html>.

Honkanen, H. 2020. Theory for combustion and flue gas calculations. Opetusmateriaali. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Optima-oppimisyötilä. Viitattu 12.11.2020.

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2000. Höyrykattilatekniikka. 2. p. Edita Opetushallitus.

Ilman epäpuhtauksien päästöt Suomessa. 2020. Suomen ympäristökeskus SYKE. Viitattu 24.10.2020. [https://www.ymparisto.fi/fi-fi/kartat\\_ja\\_tilastot/ilman\\_epapuh-tauksien\\_paastot#Ilman%20ep%C3%A4puhtaudet%20p%C3%A4st%C3%A4st%C3%B6l%C3%A4hteitt%C3%A4in](https://www.ymparisto.fi/fi-fi/kartat_ja_tilastot/ilman_epapuh-tauksien_paastot#Ilman%20ep%C3%A4puhtaudet%20p%C3%A4st%C3%A4st%C3%B6l%C3%A4hteitt%C3%A4in).

Jokilaakson tehtainen esittelymateriaali. 2017. UPM. Sisäinen esittelymateriaali. Viitattu 13.10.2020.

Jukola, P., Huttunen, M., Dernjatin, P. & Heikkilä, J. 2013. Methods for NOx emission reduction in BFB combustion: A CFD study. Viitattu 1.11.2020. International Flame Research Foundation. [http://www.ffrc.fi/FlameDays\\_2013/Papers/Jukola2.pdf](http://www.ffrc.fi/FlameDays_2013/Papers/Jukola2.pdf).

Jämsänkosken voimalaitoksen esittelymateriaali. 2017. UPM. Sisäinen esittelymateriaali. Viitattu 13.10.2020.

Kananen, J. 2015. Kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisuja 212. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kitto, J.B. & Stultz S.C. 2005. Steam: Its generation and use. 41. p. The Babcock & Wilcox Company.

Kohl, A. & Nielsen, R. 1997. Gas Purification. 5. p. Gulf Publishing Company.

Lecomte, T. Ferrería de la Fuente, J.F., Neuwahl, F., Canova, M., Pinasseau, A., Jankov, I., Brinkmann, T., Roudier, S. & Delgado Sancho, L. 2017. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU Integrated Pollution Prevention and Control. Viitattu 16.11.2020, 17.11.2020. European Commission. <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/best-available-techniques-bat-reference-document-large-combustion-plants-industrial>.

Mendoza-Covarrubias, C., Romero, C., Hernandez-Rosales, F. & Agarwal, H. 2011. N<sub>2</sub>O Formation in Selective Non-Catalytic NO<sub>x</sub> Reduction Processes. Viitattu 2.1.2021. Journal of Environmental Protection. Scientific Research. <https://www.researchgate.net/publication/276489119>.

NO<sub>x</sub> emission study – theory and experiences of selected fluidized bed boilers. 2011. Viitattu 4.11.2020.

Pakarinen, T. 2021. Product Engineer, Boiler Services. Valmet Technologies Oy. Haastattelu 25.1.2021.

Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. Uud. p. Helsinki: Teknillistieteelliset akatemit. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino.

Sorrels, J., Randall, D., Richardson Fry, C. & Schaffner, K. 2019. Selective Noncatalytic Reduction. Viitattu 28.12.2020. Air Economics Group. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-12/documents/sncrcost-manualchapter7thedition20162017revisions.pdf>.

Sumitomo SHI FW verkkosivun esittelymateriaali. N.d. Kuva lainattu 17.11.2020. <https://www.shi-fw.com/clean-energy-solutions/bfb-boilers/>

Teir, S. 2002. Steam Boiler Technology. ISBN 951-22-6197-9. Helsinki University of Technology Department of Mechanical Engineering. Energy Engineering and Environmental Protection Publications. Espoo.

Tuomivaara, T. 2005. Kvantitatiivinen ja kvalitatiivinen tutkimus. Tieteellisen tutkimuksen perusteet. Viitattu 15.10.2020. <https://www.mv.helsinki.fi/home/ttuomiva/Y125luku6.pdf>.

Turunen, L. 2019. Ash content of the solid biofuel. Opetusmateriaali. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Optima-oppimisyötilä. Viitattu 20.10.2020.

UPM Vuosikertomus 2019. 2020. UPM:n toimintakertomus ja tilinpäätös tilikaudelta 1.1.-31.12.2019. Viitattu 10.10.2020. <https://ml-eu.globenewswire.com/Source/Download/d874fbc0-0565-47a9-bac5-47943fe6be9d>.

Vainio, E. 2014. Fate of Fuel-Bound Nitrogen and Sulfur in Biomass-Fired Industrial Boilers. Doctoral Thesis. Laboratory of Inorganic Chemistry, Åbo Akademi. ISBN 978-952-12-3010-3. Turku: Painosalama.

Vakkilainen, E. 2016. Steam generation from biomass. Construction and Design of Large Boilers. Butterworth-Heinemann.

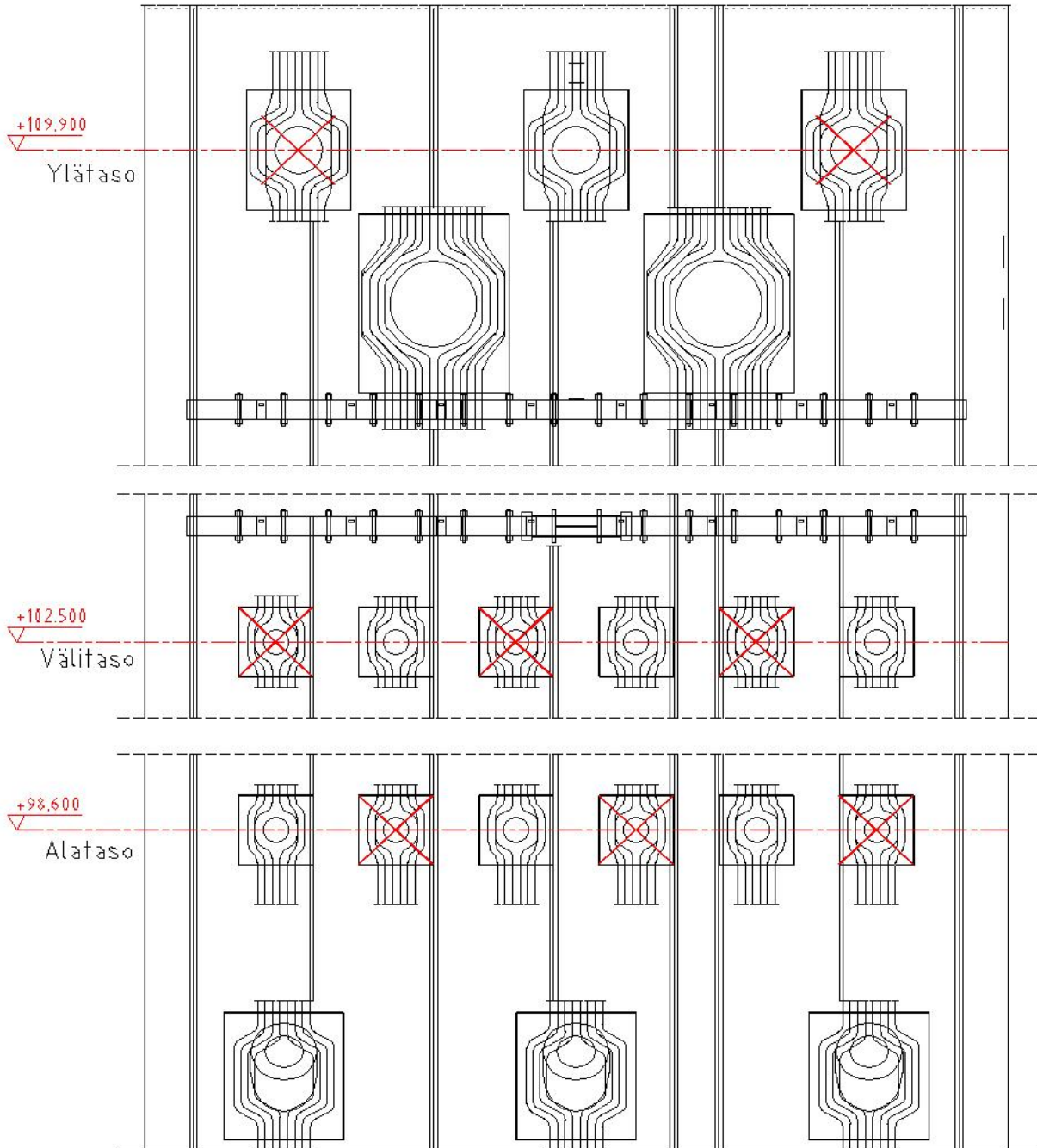
Yritysesittely. N.d. UPM Specialty Papers verkkosivut. Viitattu 10.10.2020.  
<https://www.upmspecialtypapers.com/about-upm-specialty-papers/>.

Zevenhoven, R. & Kilpinen, P. 2004. Control of Pollutants in Flue Gases and Fuel Gases ISBN 951-22-5527-8. Helsinki University of Technology.

# Liitteet

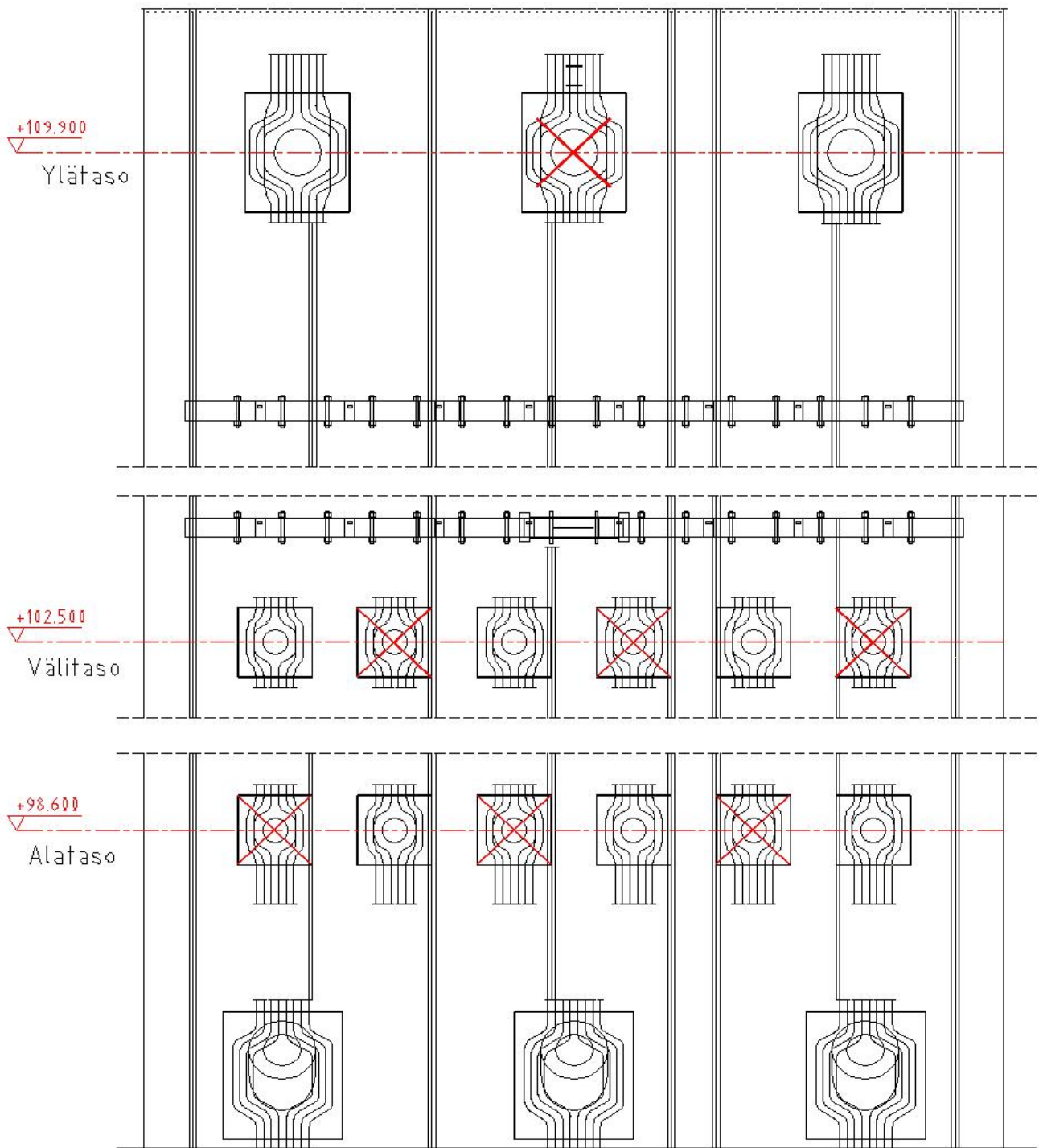
## Liite 1. K5 Etuseinä

### Etuseinä



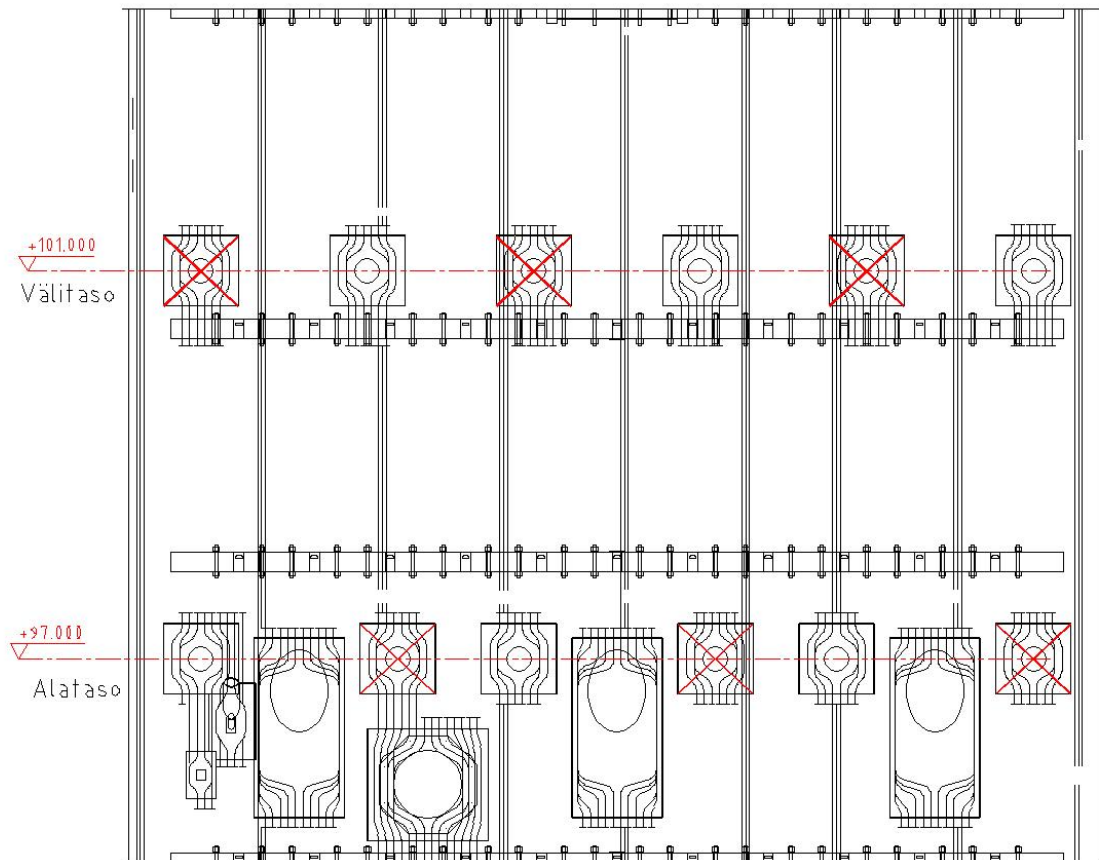
## Liite 2. K5 Takaseinä

### Takaseinä

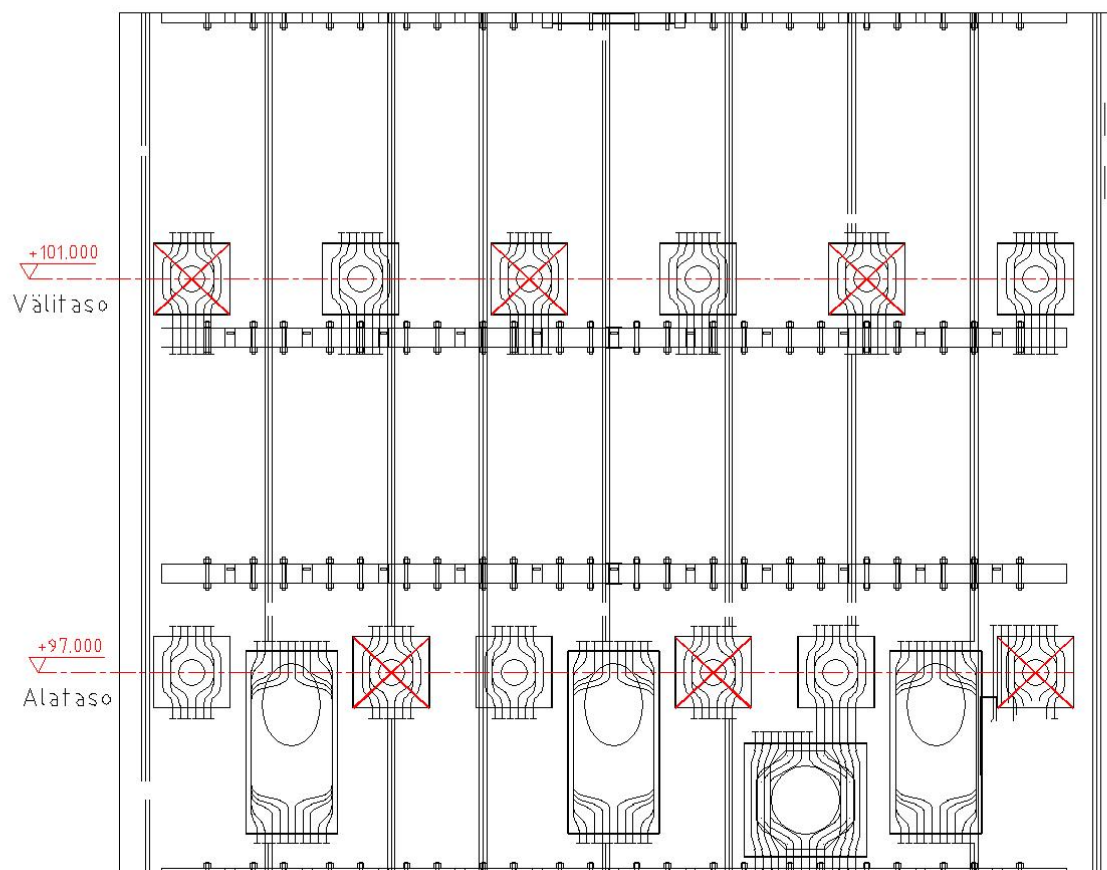


## Liite 3. K5 sivuseinät

Sivuseinä, oikea



Sivuseinä, vasen





Liite 4. SNCR-lämpötilamittaukset

