

Tapani Pakarinen

**BIOVOIMALAITOKSEN JOUSTAVUUS  
MINIMI- JA  
OSAKUORMITUSTILANTEISSA**

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Helmikuu 2024

# TIIVISTELMÄ

Tapani Pakarinen: Biovoimalaitoksen joustavuus minimi- ja osakuormitustilanteissa  
Kandidaatin tutkinto  
Tampereen yliopisto  
Ympäristö- ja Energiatekniikka  
Kandidaatintyö  
Helmikuu 2024

---

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on perehdyttää lukija biopolttoainetta käyttävien leijupetikattiloiden minimi- ja osakuormatilanteisiin sekä tällä alueella tapahtuvista kuormanmuutostilanteista aiheutuneisiin haasteisiin ja mahdollisiin ratkaisuihin. Energiasektorin muuttuvat olosuhteet ja tiukentuvat päästövaatimukset luovat lisääntyviä vaatimuksia biovoimalaitoksien joustavuudelle ja palamisprosessin hallinnalle.

Tässä työssä perehdytään ensiksi leijupetiteknologian teoriaan ja tärkeimpiin ominaisuuksiin. Tarkastelun kohteena ovat tekijät, joiden vuoksi kyseinen kattilatyypin ja polttotapa ovat erinomainen vaihtoehto biopolttoaineiden polttamiseen. Yhtenä oleellisena näkökulmana ovat biopolttoaineen poltosta syntyneiden päästöjen syntymekanismit.

Työn kokeellinen vaihe koostuu tapaustutkimuksen periaattein tehdyn, erään paperitehtaan yhteydessä olevan kuplapetikattilan käytännön mittauksista ja voimalaitoksen käyttöhenkilökunnan teemahaastatteluista. Käytännön mittausten tarkastellut suureet koostuivat oleellisista kattilan suorituskykyarvoista, kuten tuorehöyryn määrästä, primääri- ja sekundääri-ilman määrästä sekä tulipesän keskiarvoistetusta petilämpötilasta. Lisäksi analysoinnin kohteena olivat savukaasun oleellisten komponenttien ja päästöjen pitoisuudet, kuten esimerkiksi rikki- ja typpioksidit sekä jäännöshapen määrä. Voimalaitoskäytien yhteydessä suoritettiin kolme teemahaastattelua tapaustutkitun kattilan erityispiirteistä ja haasteista, jotka aiheuttavat minimi- ja osakuormatilanteita, sekä niistä aiheutuvia seuraamuksia.

Kyseisen voimalaitoksen tähän työhön liittyvä suurin haaste oli tulevaisuudessa kiristyvät NO<sub>x</sub>-päästörajat, joiden saavuttamiseksi oliin ryhdytty useisiin toimenpiteisiin. Näitä olivat muun muassa niin kutsutun ylätasonaädön käyttöönotto ja virittäminen kattilan polttoprosessin optimoituun hallintaan, sekä koeluontoiset ajojaksot tavanomaista pienemmällä savukaasun jäännöshapen pitoisuudella. Tämän tutkimuksen puitteissa useampana mittausajankohtana savukaasun jäännöshapen määrä korreloi vahvasti NO<sub>x</sub>-päästöjen kanssa.

Avainsanat: Leijupetipoltto, leijupetikattila, minimikuorma, osakuorma, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, BFB, CFB

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Tapani Pakarinen: Biopower plant flexibility in minimum and partial load situations  
Bachelor's thesis  
Tampere University  
Environmental and Energy Engineering  
Bachelor thesis  
February 2024

---

The goal of this bachelor's thesis work is to familiarize the reader to biofuel utilizing fluidized bed boiler operation in minimum- and partial load scenarios. Under investigation are also load change situations and resulting consequences from these specific combustion environments. New political attitude and tightening emission standards in energy sector causes incremental challenges towards the flexibility of biopower plant.

In this thesis the first part is consisted of the fundamental basics and theoretical background of fluidized bed combustion. Under examination are the inherent qualities of fluidized bed boiler technology viability for biofuel combustion, and main mechanisms in which the relevant emissions are generated.

The practical phase of this thesis consists of single case study of bubbling fluidized bed boiler which is integrated to paper mill. Essential boiler measurement data was gathered during minimum- and partial load situations where desired boiler load levels and changes were observed. These measurements were for example related emissions, particularly SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> and flue gas oxygen content. Other crucial measurements were the amount of generated fresh steam, amounts of primary- and secondary air and average fluidized bed temperature. Additional to boiler measurement data, in three different occasions a semi structured interview was carried out with power plant operators to discover crucial factors and consequences of related combustion challenges within the scope of this thesis.

The most significant challenge for this case studied power plant was the NO<sub>x</sub>-emissions in minimum boiler load. In near future the Finnish ministry of environment is imposing stricter limits for NO<sub>x</sub>- emissions for several power plants, including case studied plant. Several corrective measures were proactively being made to counter this challenge, for example the utilization of advanced process control (ACP) for optimized combustions control and boiler test runs with lowered flue gas oxygen content at specific boiler loads.

Keywords: fluidized bed boiler, minimum load, partial load, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, BFB, CFB

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check program.

# ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty Tampereen yliopiston ympäristö- ja energiatekniikan tiedekuntaan. Oleellisena tiedonlähteenä oli haastattelujen ja mittausdatan osalta erään paperitehtaan yhteydessä oleva, prosessihöyryä tuottava voimalaitos ja sen käyttöhenkilökunta.

Työn valvojana toimi Tampereen yliopiston Industry Professor Tero Joronen. Haluan kiittää Teroa ehtymättömästä avusta, laajasta teknisestä ja akateemisestä näkemyksestä sekä kannustavasta asenteesta tähän työhön sekä opintoihin liittyvissä asioissa.

Haluan myöskin esittää kiitokset tapaustutkitun voimalaitoksen energiapäällikölle sekä käyttömestarille mahdollisuudesta mittausdatan keräämiseen ja haastatteluiden suorittamiseen. Erityinen kiitos kakkosvuoron ammattilaisille, olitte aina valmiina auttamaan ja vastaamaan laajasti kysymyksiini sekä pohtimaan avoimesti esiin nousseita seikkoja tämän työn sekä ylipäätään voimalaitostekniikan sovellusten saralta.

Tampereella, 19.02.2024

# SISÄLLYSLUETTELO

<u>1.</u> JOHDANTO .....	1
<u>1.1</u> Tutkimuksen aihe ja tavoite .....	1
<u>2.</u> LEIJUPOLTON TEORIA .....	3
<u>2.1</u> Kupliva leijukerroskattila .....	5
<u>2.2</u> Kiertoleijukattila.....	6
<u>2.3</u> Polttoprosessin päästöt ja niiden syntymekanismit .....	7
<u>3.</u> VOIMALAITOSKATTILAN TOIMINTA OSAKUORMITUSTILANTEESSA.....	9
<u>4.</u> TUTKIMUKSEN KOKEELLINEN VAIHE.....	12
<u>4.1</u> Tutkitun BFB-kattilan mittauksien kulku .....	12
<u>4.2</u> Tutkitun voimalaitoksen höyrypiiri.....	13
<u>4.3</u> Mittaustulokset.....	14
<u>4.4</u> Yleiset havainnot ja haastattelulöydökset .....	20
<u>5.</u> YHTEENVETO .....	23
LÄHTEET .....	24

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

APC	engl. Advanced Process Control
BFB	engl. Bubbling Fluidized Bed, kuplaleijupetikattila
CFB	engl. Circulating Fluidized Bed, kierteleijupetikattila
CFD	engl. Computation Fluid Dynamics, fluidien numeerinen virtaussimulaatio
CHP	engl. Combined heat and Power, sähkön ja lämmön yhteistuotanto
CO	Hiilimonoksidi, häkä
ESP	engl. Electrostatic Precipitator, sähkösuodatin
HCL	Suolahappo
kPa	Kilopascal, paineen yksikkö, $10^3$ Pascal
N <sub>2</sub>	Typpikaasu
NO	Typpioksidi
NO <sub>x</sub>	Typpenoksidit
Nm <sup>3</sup>	Kuutiometriä ilmaa normaalipaineessa 0°C lämpötilassa
mg/Nm <sup>3</sup>	Milligrammaa per normaalikuutiometri, savukaasupäästön mittayksikkö
MPa	Megapascal, paineen yksikkö, $10^6$ Pascal
MW	Megawatti, tehon yksikkö, $10^6$ W
O <sub>2</sub>	Happikaasu
PAH	Polysykliset aromaattiset hiilivedyt
SO <sub>2</sub>	Rikkidioksidi
SO <sub>x</sub>	Rikinoksidit

# 1. JOHDANTO

Nykypäivän ja tulevaisuuden haasteet ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi, fossiilisten polttoaineiden vähentämiseksi sekä maa- ja metsätalouden sivutuotteiden tehokkaammaksi hyödyntämiseksi biopolttoaineiden käyttäminen lämmön ja sähkön tuotannossa on ensiarvoisen tärkeää. Kestävästi tuotetun, erityisesti metsäperäisen biomassan käyttö energiantuotannossa on oleellinen osa EU:n määrittämien kasviuonekaasujen päästörajojen saavuttamiseksi. Suomen suuret puuvarannot ja sen ympärille rakentunut mittava metsäteollisuus takaa vakaan perustan tehokkaalle biomassan energiakäytölle. Esimerkiksi vuonna 2016 Suomen koko sähköntuotannosta 16,3% oli peräisin biomassaperäisistä lähteistä [1]. Tämän lisäksi nykyluokittelun mukaisesti ei biomassaksi luokitellun turpeen osuus sähköntuotannosta oli 4,4%. Suomessa sähköenergiasta noin kolmannes sekä kaukolämmöstä noin kolme neljäsosaa on peräisin sähkön ja lämmön yhteistuotannosta CHP-laitoksissa (combined heat & power) [2].

CHP-laitokset nivoutuvat tiivisti kotimaiseen metsäteollisuuteen ja sen tarpeisiin. Tyypillisesti paperitehtaan yhteyteen on rakennettu CHP-voimalaitos, joka tuottaa prosessihöyryä paperitehtaan tarpeisiin, sähköä valtakunnan verkkoon sekä mahdollisesti paperitehtaan tarpeisiin ja kaukolämpöä lähialueiden kiinteistöjen lämmittämiseksi.

Energiantuotannon joustavuuden vaatimukset ovat kasvaneet nykypäivänä muunmuassa lisääntyneen aurinko- ja tuulivoimakapasiteetin vuoksi. Sääolosuhteista riippuvaisten energian tuotantomuotojen hyödyntäminen aiheuttavaa sen, että polttoreaktioon perustuvien energian tuotantomuotojen tulee olla entistä joustavampia kuorma-alueen ja säätönopeuden suhteen. Sähkö- ja lämmöntuotannon rakennemuutokset, tuotantolaitosten kiristyvät päästöraajat sekä sähkömarkkinoiden volatiliteetti tuovat uusia haasteita biovoimalaitoksen joustavuudelle. Tämän työn kontekstissa kaikki edellä mainitut tekijät aiheuttavat teollisuuslaitosten yhteydessä oleville höyryvoimalaitoksille kasvavasti muuttuvia ajotilanteita ja uusia vaatimuksia.

## 1.1 Tutkimuksen aihe ja tavoite

Tutkimuksen aihe valikoitui ennalta laaditun listan yhtenä esiin nousseena ja mielenkiintoisena ehdotuksena. Työn sisältö tarkentui työn ohjaajan ja kirjoittajan välisissä myöhemmissä keskusteluissa. Oleellisena ja työn kulkua ohjaavana tekijänä oli myös eteen tullut mahdollisuus kerätä erään CHP-biovoimalaitoksen mittausdataa minimi- ja osakuormitustilanteissa.

Työn kappaleessa 2. Leijupolton teoria esitellään leijukerrospolttoa hyödyntävien voimalaituskattiloiden perusjaottelu ja niiden erityispiirteet sekä polttoteknisiä ominaisuuksia ja vaatimuksia. Kappaleessa 3. Voimalaituskattilan toiminta osakuormitustilanteessa perehdytään tutkimus- ja simulointituloksiin tulipesän ilmiöiden osalta.

Kappaleessa 4. Tutkimuksen kokeellinen vaihe tarkastellaan tapaustutkimuksen keinoin erään paperitehtaan yhteydessä olevan biopolttoainekäyttöisen kuplapetikattilan käytännön ajotilanteita. Tarkemman tutkimuksen kohteena on kyseisen voimakattilan joustavuus tilanteissa, jolloin voimalaituskattilan kuormitus lähestyy kattilavalmistajan takaamia minimisuoritusarvoja.

Lähtökohtaisesti biovoimalaitoksen joustavuus voidaan jakaa lähtökohtaisesti kolmeen alakategoriaan seuraavanlaisesti:

1. Polttoainejoustavuus: käytettävissä olevien biopolttoaineiden ominaisuudet polttotilanteessa ja tietyille polttoaineelle tyypillisten ominaisuuksien hyödyntäminen erilaisissa kattilan kuormitustilanteissa.
2. Kuormajoustavuus: voimalaituskattilan joustavuus vaadittuihin kuormanmuutostilanteisiin. Ongelmina voi tyypillisesti esiintyä kattilalle tyypilliset minimikuormat ja sen mukanaan tuomat ongelmat esimerkiksi petilämpötiloissa, kasvaneissa päästöissä ja kokonaisvaltaisen polttoprosessin hallinnassa. Tärkeänä muuttujana on myös

kuormanmuutosnopeus – kuinka nopeasti kattila pystyy mukautumaan vaadittuihin kuormanmuutoksiin.

3. Sovellusjoustavuus: biovoimalaitoksen sivutoiminnot korkeamman jalostusasteen tuotteisiin, esimerkiksi puun pyrolyysilaitos integroituna tavallisen voimalaitoksen yhteyteen, josta saadaan tuotteena pyrolyysiöljyä, jota voidaan jatkojalostaa liikennekäyttöön soveltuvaksi biodieseliksi.

Tässä työssä tarkastellaan kategorian kaksi alle sijoittuvia tilanteita rajoittuen leijupetipolttoa käyttäviin voimalaituskattiloihin. Kokeellisen vaiheen mittausdatan analysoinnin ja sen pohjalta tehtyjän havaintojen on tarkoitus osoittaa ne oleelliset haasteet, joita syntyy leijupetikattilan minimi- ja osakuormatilanteissa sekä nopeissa kuormanmuutoksissa.

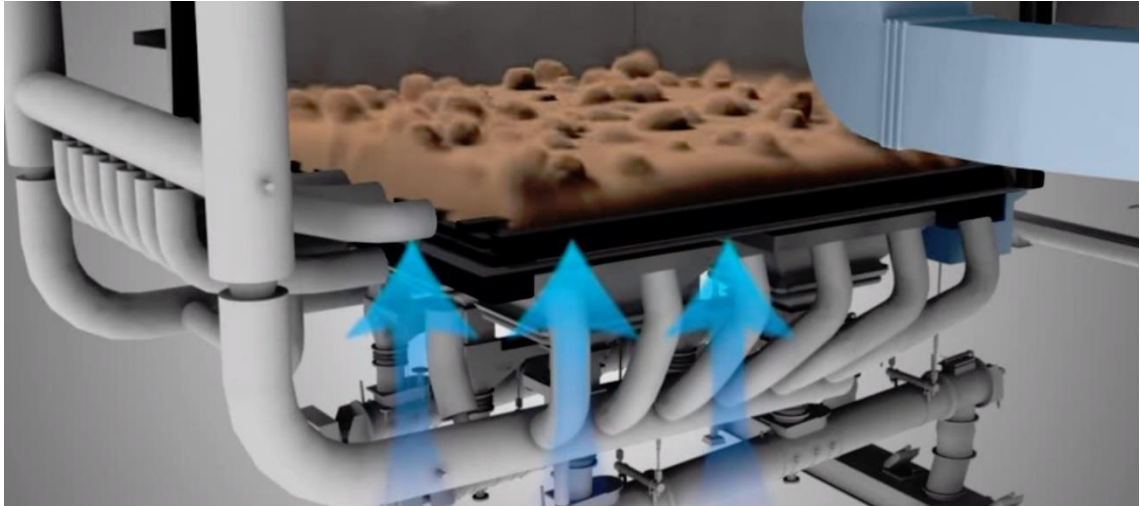
## 2. LEIJUPOLTON TEORIA

Leijupetipolttu on polttotekninen ratkaisu, jossa höyrykattilaan syötetty polttoaine palaa 'leijukeroksessa', joka muodostuu palamattomasta sopivan raekoon omaavasta kiinteästä materiaalista, arinan pohjasta syötetystä palamisilmasta sekä itse polttoaineesta Leijupolttua hyödyntävät voimalaituskattilat voidaan jakaa kahteen pääkategoriaan: kupliva leijukerros ja kiertävä leijukerros. Konkreettinen ero näillä kahdella on seuraava: kiertoleijukattilassa kiintoainehiukkaset kulkeutuvat palotilasta pois, ja ne on erotettava savukaasusta sekä palautettava takaisin polttoprosessiin, kun taas kuplivassa leijupetissä polttoaine ja leijupetihiukkaset pysyvät leijukeroksessa.[4]

Bioperäisen materiaalin poltossa leijukeroksen petimateriaali on tavanomaisimmin siihen sopivaa hiekkaa, mutta myös muitakin materiaaleja voidaan käyttää sovelluksesta riippuen, esimerkiksi hiiltä polttavissa kiertoleijukattiloissa voidaan petimateriaalina hyödyntää kalkkikiveä.

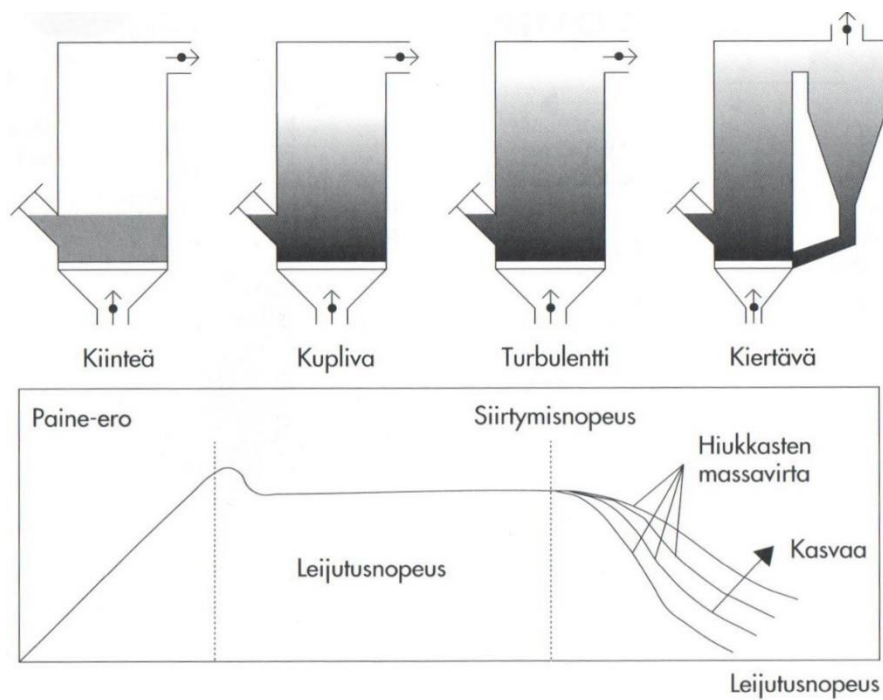
Leijukerrospolttolle ominaisia hyviä puolia ovat esimerkiksi polttoprosessin ja lämmönsiirron tehokkuus, vähäisiä NOx- ja palamattomien päästöjä, edullista rikinpoistoa sekä kostean polttoaineen käyttömahdollisuutta. Myöskin useamman eri polttoaineen samanaikainen ja joustava käyttö on mahdollista. Palamislämpötila on pidettävä tuhkan pehmenemislämpötilan alapuolella korrosiovaurioiden sekä pedin sintraantumisen johtuvien leijutushäiriöiden ehkäisemiseksi. Tuhkan pehmenemislämpötila on polttoaineesta riippuen tyypillisesti 750 – 950°C.[4] Leijukerrosolton huonoja puolia tai haasteita ovat esimerkiksi voimalaitoksen suuri omakäyttöteho, kattilan säätö- ja valvontajärjestelmien ehdottoman tarkkuusvaatimuksen aiheuttava monimutkaisuus sekä minimi- ja osakuormilla polttoprosessin hallinnan haasteellisuus.

Kuten aikaisemmin todettua, kattilan leijutila aikaansaadaan puhaltamalla palamisilmaa arinan pohjasta petimateriaalin läpi nopeudella, jolla petimateriaalin partikkelit alkavat liikkua toisiinsa nähden. Pienintä primääri-ilman nopeutta, jolla leijutila käynnistyy ja on ylläpidettävissä, kutsutaan minimileijutusnopeudeksi. [4] Ilmiötä voisi verrata voimakkaasti kiehuvaan vesipataan, jossa vesihöyrykuplat nousevat näkyvästi vesipatsaan läpi. Kuvassa 1 on havainnollistettu leijupetikattilan alaosa. Kuvassa palotilaan syötetään primääri-ilmaa aikaansaaden petimateriaalin leijutilan. Jos kyseessä olisi 'kylmän' kattilan käynnistys, seuraavana vaiheena olisi petimateriaalin lämmitys starttipolttimoiden avulla aikaansaaden palotilan ja petimateriaalin halutun lämpötilan, jonka saavutettaessa polttoaineen – tässä tapauksessa biomassan syöttö kattilaan olisi mahdollista.



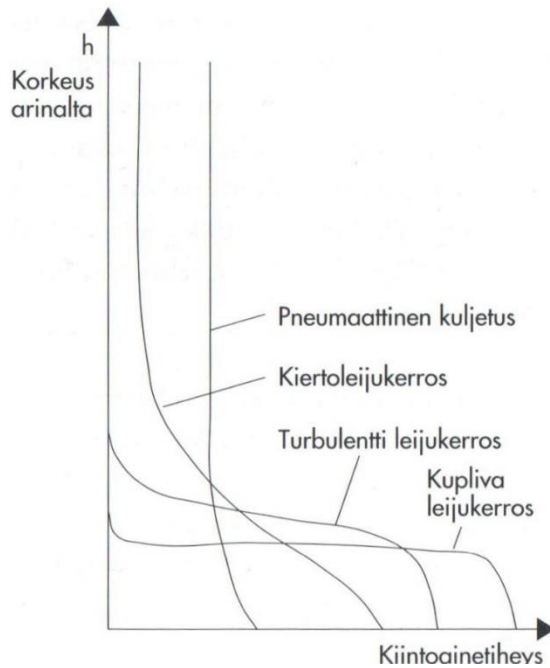
**Kuva 1.** Primääri-ilman syöttö kattilan pohjasta aikaansa petimateriaalin leijutilan [4]

Toinen olennainen termi leijupetipolton teoriassa on petipartikkelin terminaalinopeus eli sen vapaa putoamisnopeus. Primääri-ilmaa syötettäessä tätä lähestyvällä nopeudella siirrytään kuplaleijutuksesta turbulentille alueelle, jolloin tulipesässä oleva selkeä leijukerroksen pinta häviää ja kiintoainetta alkaa kulkeutua korkeammalle tulipesään. Leijutusilman nopeuden ylittäessä terminaalinopeuden, puhutaan kiertoleijupedistä eli kiintoainesta alkaa kulkeutua pois palotilasta ja kiintoaine-erotin on välttämätön jatkuvatoimisen prosessin takaamiseksi. [4]



**Kuva 2.** Leijutusnopeuden vaikutus kattilan virtaustyyppiin ja paine-eroon [5].

Yllä olevasta kuvasta 2 nähdään havainnollisesti leijutusnopeuden kasvattamisen vaikutus pedin paine-eroon sekä eri leijutus tiloihin. Petimateriaalinen ylä- ja alapuolisen paine-eron saavuttaessa riittävän eron alkaa petimateriaalin partikkelit liikehtiä toistensa suhteen, joka tarkoittaa kuplivan leijupetin tilannetta. Edellä mainittu tilanne on kuvassa kattiloiden 'kiinteä' ja 'kupliva' välillä. Tämän jälkeen leijutusnopeutta lisää kasvatettaessa saavutetaan turbulentti ja lopulta kiertävän leijupetikattilan tilanne, jolloin kattilan yläosassa on myös huomattava kiintoaineen pitoisuus. Kuvassa 3 on havainnollistettu leijupedin suhteellisia kiintoainepitoisuuksia kattilan korkeuden suhteen eri kattilan virtaustyypeillä.



**Kuva 3.** Eri leijutustilojen kiintoainepitoisuuksia kattilan korkeuden suhteen [4].

## 2.1 Kupliva leijukerroskattila

Otsikon mukainen kattilatyyppeä tunnetaan useilla nimillä kuten kuplapetikattila, kerrosleijukattila tai BFB (Bubbling Fluidized Bed). Kuvan 2 ja 3 mukaisten leijuttilojen 'kupliva' ja 'turbulentti' väliin jäävä alue sisältää kuplivan leijukerroksen ominaisuudet. Kuplapetikattilan leijutusmateriaalin tyypillinen raekoko on keskimäärin halkaisijaltaan 1 mm, sekä käytetty leijutusnopeus 1-3 m/s välillä. Ilmakehän paineisella kuplakattilalla biopolttoainetta käytettäessä voidaan parhaimmillaan saavuttaa 3 MW/m<sup>2</sup> polttoaineen lämpöteho arinan pinta-alan suhteen. [5]

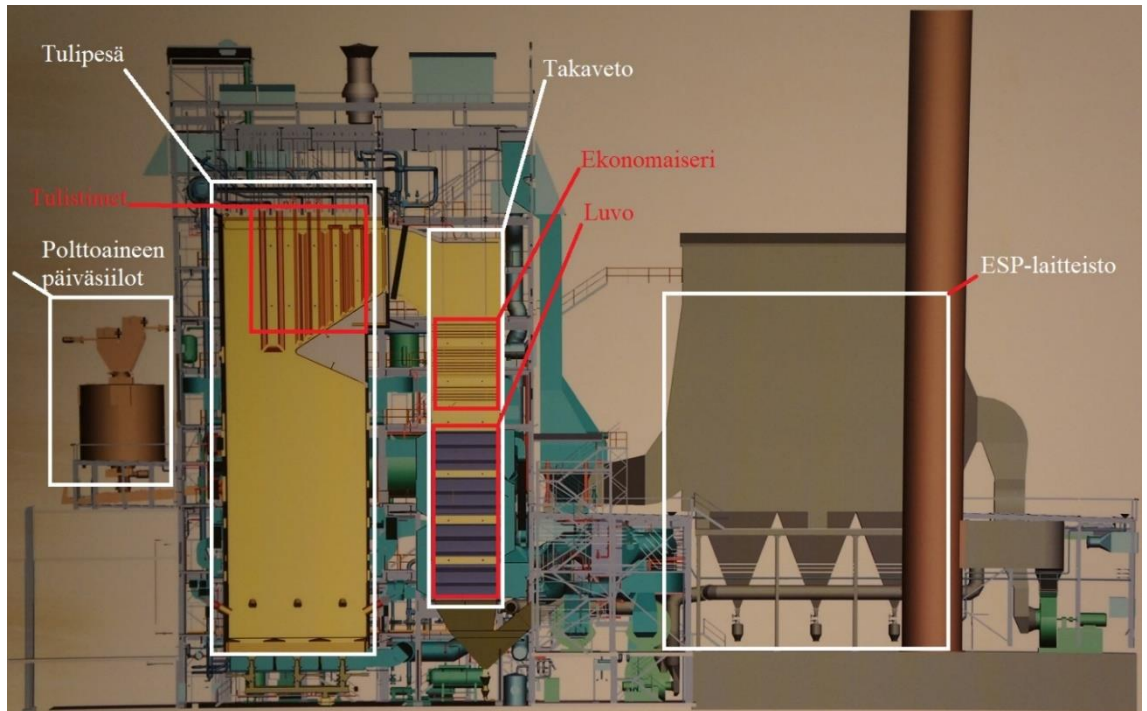
Kuplapetikattilan toiminnan mahdollistaa useat erillisjärjestelmät, jotka voidaan kategorisoida seuraavalla tavalla:

1. Polttoaineen käsittelyjärjestelmä, joka voi pitää sisällään muun muassa vastaanotto- ja murskauslaitteiston, polttoaineen varasto- ja kattilasiilot, kuljetinlaitteistot edellä mainittujen välillä sekä polttoaineen syöttölaitteisto kattilaan (syöttötapoja esimerkiksi pneumaattinen syöttö, ruuvipurkain tai sulkusyötin riippuen polttoainelaadusta)
2. Palamistila
3. Ilmansyöttö- ja savukaasukanavajärjestelmät
4. Tuhkankäsittelylaitteisto sekä mahdolliset päästöjen kontrollointikeinot kuten kalkkikiven tai ammoniakkin syöttö
5. Syöttöveden ja höyryn kierto [6]

Kuplapetikattilan hyviä puolia ovat esimerkiksi yksinkertainen rakenne, joka mahdollistaa edulliset investointi- ja ylläpitokustannukset sekä soveltuvuuden heikompilaatusille polttoaineille joiden kosteus- tai tuhkapitoisuus voi olla korkea. Vastaavasti huonoja puolia ovat osakuormajon haasteellisuus sekä arinan suuri pinta-ala verrattuna saatavaan polttoainetehoon (polttoainetehon ja sitä kautta laitokseen rajoittuminen useimmiten pieniin ja keskikokoisiin yksiköihin). [5] [6]

Kuvassa 4 nähdään tyypillisen BFB-kattilan läpileikkaus, joka oli tämän työn kokeellisen osion ja datankeruun kohteena oleva voimalaitos. Tulipesän alaosaan syötetty polttoaine palaessaan

vapauttaa siihen sitoutunutta energiaa lämpönä joka aiheuttaa kattilan putkiston seiniin johdetun veden höyrystymisen – prosessi joka on höyryvoimaproessin perusta. Muodostunut höyry johdetaan tulistinkierron läpi, joka edelleen nostaa höyryn lämpötilaa ja energiasisältöä. Kuvassa näkyvä ekonomaiseri tarkoittaa syöttöveden esilämmitinjärjestelmää, jossa savukaasuista kerätään lämpöä syöttöveden esilämmittämiseksi, joka parantaa kattilan hyötysuhteen nostamiseksi. Ekonomaiserin alla sijaitsee luvo, joka on palamisilman esilämmitinjärjestelmä ja se toimii periaatteellisesti ekonomaiserin tavoin. Tyypillisesti jäähtyneen savukaasun puhdistaminen tapahtuu ESP-järjestelmällä (Electrostatic Precipitator) tai pussisuodatinlaitteistolla. ESP poistaa savukaasuista lentotuhkan ja muun kiintomateriaalin sähkövarauksiin perustuvat vetovoiman avulla. Pussisuodatinlaitteiston teho perustuu mekaaniseen suodatukseen, eli savukaasu johdetaan suodatinmateriaalin läpi, jolloin kiintomateriaali ja osa kaasumaisista päästöistä voidaan erottaa savukaasuista.

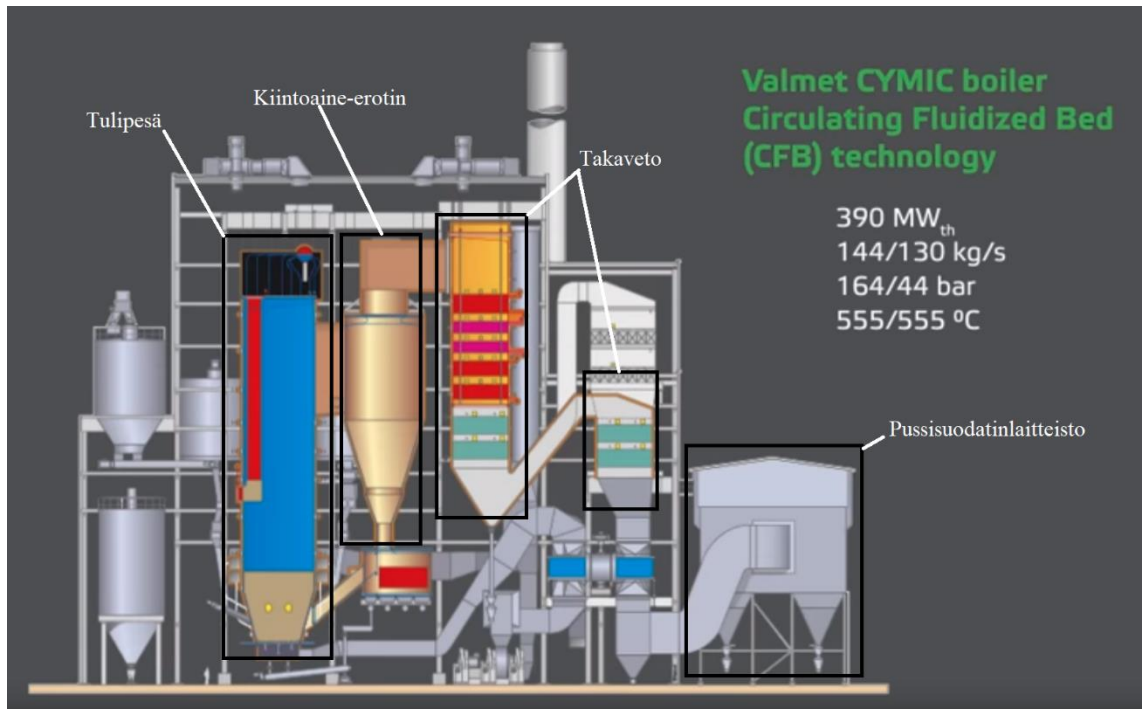


*Kuva 4. Tapaustutkimuksen kohteena olleen voimalaitoksen läpyleikkäys.*

## 2.2 Kiertoleijukattila

Kiertoleijukattilan eli CFB-kattilan (Circulating Fluidized Bed) konkreettisin ero kuplapetikattilaan verrattuna on leijutusnopeus ja siitä seuraavan lisälaitteiston vaatimukset jatkuvat polttoprosessin ylläpitämiseksi. Kiertoleijukattilassa leijutusnopeudet ovat suurimmillaan luokkaa 8-10 m/s ja reaktorin polttoaineteho suurimmillaan noin 6 MW/m<sup>2</sup> hiilen ollessa polttoaineena [5]. Korkea leijutusnopeus aiheuttaa merkittävän kiintoainepitoisuuden kasvun kattilan yläosissa, koska petimateriaali, lentotuhka ja palamaton polttoaine kulkeutuu tehokkaasti kohti kattilan takavetoa. Tämän vuoksi kattilaan on lisättävä erillisjärjestelmäksi yksi tai useampi sykloni eli kiintoaineiden erotin. Sykloni erottaa palamistilasta kulkeutuneen kiintomateriaalin savukaasuista, jonka jälkeen kiintomateriaali kierrätetään takaisin palamistilaan ja savukaasu savukaasukanavaan.

Kuvassa 5 nähdään tunnetun kattilanvalmistaja Valmetin erään toimitusprojektin kiertoleijukattila ja kattilalaitoksen pääkomponentit. Kuvasta myös ilmenee tuorehöyryn eli tulistuksen jälkeisen höyryn ominaisuudet ja kattilan polttoaineteho. Huomattavana erona kuvan 4 kuplapetikattilaan verrattuna on tulipesän jälkeiset kiintoaine-erottimet, joita tässä kattilassa on kaksi kappaletta, sekä useampivaiheinen takavedon rakenne.



**Kuva 5.** Erään kiertoleijulaitoksen läpileikkaus ja pääkomponentit [7].

Kuplapetikattilaan verrattuna kiertoleijukattilan hyviä ominaisuuksia ovat esimerkiksi mahdollisuus hiilen käyttöön polttoaineena, jonka vuoksi erityisesti korkeamman lämpötehon saavuttaminen suhteessa tulipesän pinta-alaan on mahdollista. Tyypillisiä muita eroja ovat myöskin matalammat typpi- ja rikkidioksidipäästöt sekä laajempi käytettävissä oleva polttoainevalikoima [5]. Lähtökohtaisesti kiertoleijukattiloiden polttoainetehot ja laitoskoot ovat suurempia verrattuna kuplapetikattiloihin, josta seuraakin rajoitettu käytettävyys ainoastaan suuriin kohteisiin sekä suuremmat investointikustannukset kattilan monimutkaisemman rakenteen vuoksi.

### 2.3 Polttoprosessin päästöt ja niiden syntymekanismit

Palamisprosessin hallinta, kattilan ja oheislaitteiden mitoitus sekä käytetty polttoaine ovat ensisijaisia päästöjen laatuun ja määrään vaikuttavia tekijöitä. Tarkemmin jaoteltuna poltosta syntyvät päästöt voidaan jakaa kahteen pääkategoriaan seuraavanlaisesti:

1. Puutteellisesta palamisesta syntyneet päästöt
2. Palamisesta syntyneet päästöt

Ensimmäisen kategorian päästöt syntyvät tyypillisimmin puutteellisen palamisen seurauksena, jolloin syntyy muun muassa häkää (CO), tuhkaa, hiilivetyjä (HC, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>), tervaa ja PAH-päästöjä (polyaromaattiset hiilivedyt). Puutteellinen palaminen johtuu tyypillisimmin liian matalasta palamislämpötilasta, liian lyhyestä palavien kaasujen viipymääjasta palamistilassa sekä riittämättömästä polttoaineen ja palamisilman sekoittumisesta. Yksi toimintatapa palamisprosessin parempaan hallintaan on palamisilman vaiheistus, jolla tarkoitetaan palamisilman syöttämistä eri korkeuksilta tulipesään. Käytännössä tämä tarkoittaa vähintään primääri- ja sekundääri-ilman syöttöä, tertiääri-ilman syötön ollessa myös mahdollista, jos kattilarakenteen sen vain mahdollistavat. Vaiheistetun polttoilman hyödyntäminen parantaa palamisprosessin tehokkuutta ja vähentää havaittuja päästöjä.[8] Primääri-ilma syötetään kattilan pohjasta tulipesään, jonka tarkoitus on ylläpitää leijutilaa ja palamista. Sekundääri-ilma syötetään kattilan alaosiin yhdeltä tai useammalta korkeudelta sekä viimeisenä mahdollinen tertiääri-ilma, joka on ylin palamisilman syöttökohta kattilan korkeuden suhteen.

Toiseen kategoriaan kuuluvat päästöt syntyvät palamisen seurauksena, jolloin syntyy esimerkiksi typenoksidit ( $\text{NO}_x$ , erityisesti  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  ja  $\text{N}_2\text{O}$ ), rikinoksidit ( $\text{SO}_x$ , erityisesti  $\text{SO}_2$ ). Myöskin kaasumaisten raskasmetallien ja suolahapon ( $\text{HCl}$ ) muodostuminen on joissain tapauksissa mahdollista. Polttoaineen kemiallisella koostumuksella, palamisen lämpötilalla ja palamisilman määrällä sekä vaiheistuksella on suuri merkitys toisen kategorian päästöjen syntyyn.[8]

Tässä työssä keskitytään esimerkkilaitoksen mitattavissa olevien päästöjen tarkkailuun, jotka siis ovat  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  sekä  $\text{CO}$ - päästöt.  $\text{CO}$ -päästöjen tarkempi syntymekanismi on esimerkiksi liian vähäisen yli-ilman syöttö tulipesä alaosiin, rajallinen palamiskaasujen viipymäaika, epäoptimaalinen palamislämpötila tai polttoaineen korkea tuhkapitoisuus [8].  $\text{NO}_x$ -päästöjen syntymekanismi voidaan jaotella ainakin kolmeen alakategoriaan seuraavanlaisesti:

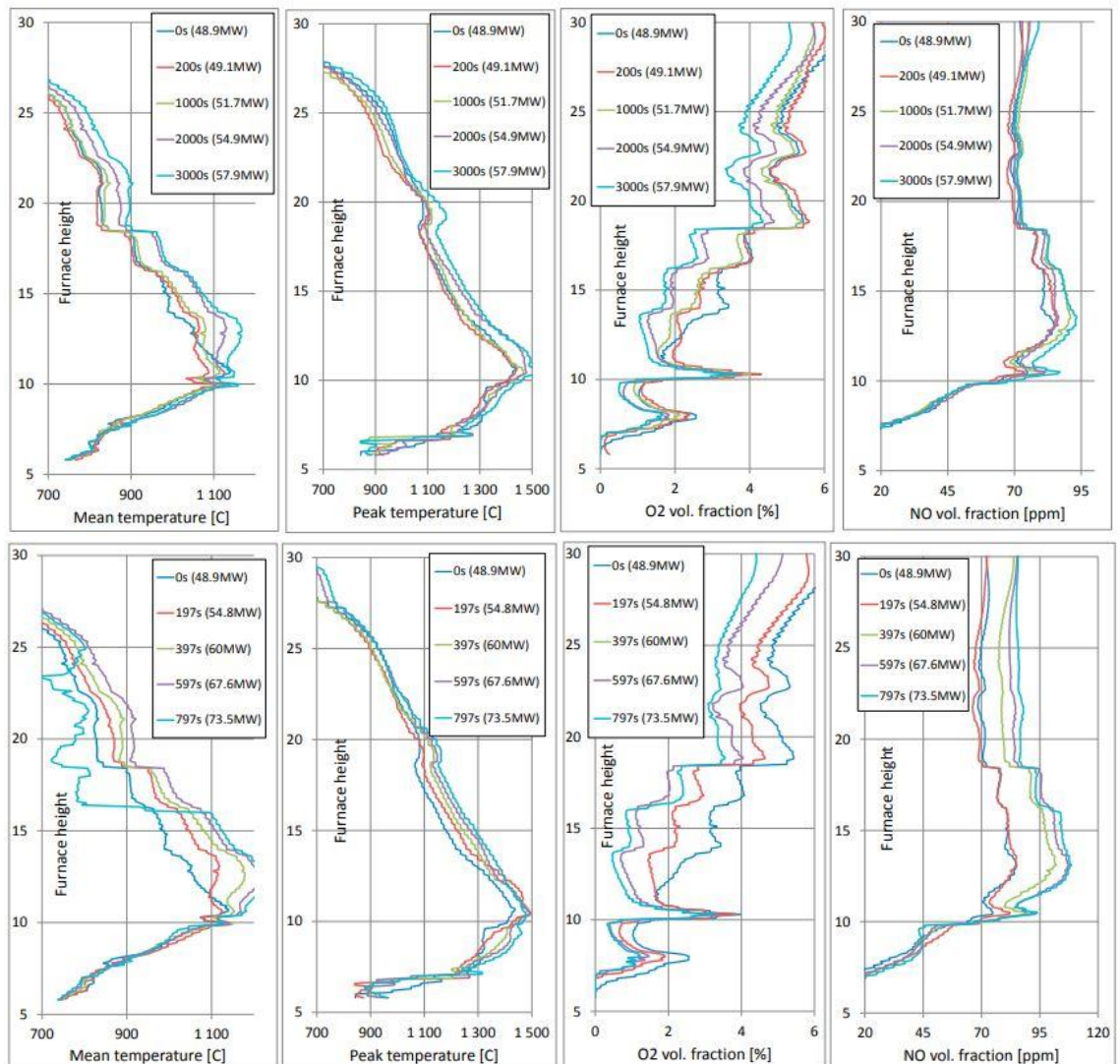
1. Terminen  $\text{NO}_x$ , joka on seurausta liian korkeasta palamislämpötilasta
2. Polttoaineen sisältämän typen muuntuminen  $\text{NO}_x$ -yhdisteiksi palamisen seurauksena
3. 'Nopea'  $\text{NO}_x$ , syntymekanismina kemialliset reaktiot liekkirintaman läheisyydessä  $\text{N}_2$  ja polttoaineen sisältämien hiilivetyradiaalien välillä

Leijupetikattiloiden palamislämpötiloissa selkeästi merkittävimmän osuuden  $\text{NO}_x$ -päästöistä aiheuttaa polttoaineen sisältämä typpi, eli toisena listattu syntymekanismi.  $\text{SO}_x$ -päästöt syntyvät polttoaineeseen sitoutuneen rikin vapautuessa palamisen seurauksena [8].

### 3. VOIMALAITOSKATTILAN TOIMINTA OSAKUORMITUSTILANTEESSA

Puhuttaessa leijupetikattiloiden kuormanmuutoksesta, kaikki palamistilanteen vaihtelut perustuvat lähtökohtaisesti kattilaan sisään syötetyn palamisilman ja polttoaineen määrän muutokseen. Kattilaan syötetyn polttoaineen määrä korreloi suoraan kattilasta saatavaan lämpötehoon, kattilan automatiikan huolehtiessa syöttöveden määrästä, joka vaikuttaa suoraan kattilan höyrystämän veden määrään. Muutostilanteessa palamistilan lämpötila sekä syötetyn palamisilman jakautuminen tulipesässä muuttuvat, jotka vaikuttavat palamisprosessin nopeuteen, palamattomien kaasujen koostumukseen sekä päästöihin. Leijupetikattiloiden kuormanmuutosnopeutta rajoittavat lähtökohtaisesti palamattoman tulipesässä olevan polttoaineen, petimateriaaliin sekä tulipesän höyrystinputkissa virtaavaan syöttövedeen sitoutuneen lämmön toimiminen muutostilanteiden puskurina. Leijupetikattilan polttoaineen partikkelikoko on tyypillisesti varsin suuri ja partikkelin paloaika voi olla kymmenistä sekunneista jopa minuutteihin [9]. Van Loo ja Koppejan toteavat usein suositellut polttoaineen partikkelikoot kattilatyypin mukaan seuraavanlaisesti: BFB-kattiloille alle 80mm ja CFB-kattiloille alle 40mm [10]. Polttoaineen partikkelikoko tarkoittaa tässä tapauksessa yksittäisen polttoainejakeen halkaisijaa.

Kallio et. al [9] analysoi BFB- ja CFB-kattiloiden kuorman muutoksesta aiheutuvia seurauksia polttoprosessiin ja sen hallintaan. Tässä tutkimuksessa molemmista kattilamalleista muodostettiin simulaatiomalli, josta saamia tuloksia verrattiin todellisten, vastaavien kattiloiden mittaustuloksiin. Tämän jälkeen kattilamalleilla tehtiin eri ajotilanteiden simuloiteja. BFB-kattilan tapauksessa kahta olemassa olevan kattilan mittaustuloksia verrattiin ja sovitettiin CFD-mallinnuksesta (Computational Fluid Dynamic) saatuihin tuloksiin, jotka perustuivat muodostettuun kattilamalliin. Simulaatiomallin perusteena olleet kattilat olivat polttoaineteholtaan 76 MW. Muodostetulla kattilamallilla suoritettiin simuloiteja kahdella eri kuormanmuutosnopeudella ja tutkinnan alla oli eri tilanteiden vaikutukset ja keskinäiset poikkeavuudet palotilan keskiarvo- ja huippulämpötilaan, jäännöshapteen sekä typpioksidien määrään. Esimerkkikattiloiden käytetyt kuormanmuutosnopeudet olivat +0,2 MW/min tarkoittaen sitä, että kattilan polttoaineesta saatu lämpöteho kasvoi 0,2 MW minuuttivauhdilla, mittauksen keston ollessa 3000 sekuntia. Lisääntynyt lämpöteho luonnollisesti vaikuttaa palamistilaan ja lopulta höyrystetyt veden määrään. Vastaavasti muodostetulla kattilamallilla simulointi suoritettiin samoilla parametreillä sekä +0,2 MW/min, että +2 MW/min kuormanmuutosnopeuksilla (tällöin simuloinnin kesto 797 sekuntia). Kuvaajasta 6 voi nähdä simulointien tulokset kattilan kuorman muutoksen vaikutuksista mittausparametreihin tulipesän eri korkeuksilla. Ylemmät neljä kuvaa vasemmalta oikealle edustavat +0,2 MW/min kuormanmuutostilannetta järjestyksessä: kattilan keskiarvolämpötila, kattilan palotilan korkein lämpötila, jäännöshapen määrä sekä typpioksidin (NO) määrä. Alemmat neljä kuvaa edustavat +2 MW/min kuormanmuutostilannetta, mitattujen parametrien ollessa samat kuin edellä mainittu. Jokaisessa pienessä kuvassa käyrän väri ilmaisee simuloinnin senhetkisen ajanhetken ja muodostuneen kokonaispolttolämpötehon.

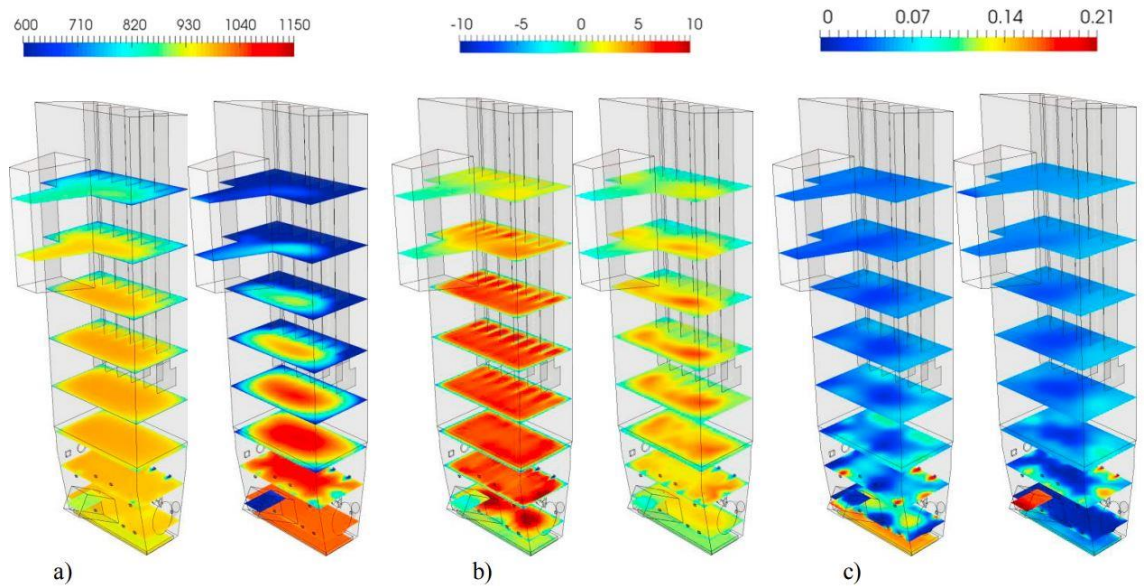


**Kuva 6.** BFB-kattilan polttoprosessin muutokset simuloituna tulipesän korkeuden mukaan, ylemmät kuvaajat esittävät tapahtumia kuorman muutosnopeudella 0,2 MW/min, alemmat kuvaajat kuorman muutosnopeudella 2 MW/min [9].

Huomattavaa tässä tutkimuksessa oli kuorman muutosnopeus kattilan kokonaiskapasiteettiin nähden: 0,2 MW/min joka tarkoittaa 0,263 % kasvua kattilan polttoainetehossa minuuttia kohden, 2 MW/min tarkoittaa 2,63 % kasvua polttoainetehossa minuuttia kohden. Kattilakuormat näissä simuloitintapauksissa välillä 64,3 – 76,18 % sekä 64,3 – 96,71 % kokonaiskapasiteetista. Suuremmalla kuorman muutosnopeudella erityisesti tulipesän keskiarvolämpötiloissa sekä NO:n pitoisuuksissa on kasvaneita eroja verrattuna pienemmän muutosnopeuden tilanteeseen. Näihin perustuen voi päätellä kuormanmuutosnopeuden kasvamisen aiheuttavan haasteita vähintäänkin kyseisille mittaustuloksille.

Samassa analyysissä Kallio et al. [9] myöskin vertasi 90 MW polttoaineteholtaan olevan CFB-kattilan käytännön mittaustuloksia sovitettuihin simuloituihin tuloksiin 100%, 70 % sekä 40% polttoainetehoilla. Huomioitavaa on, että kahdessa ensimmäisessä tapauksessa polttoaineena oli hiili, 40% osakuorman tapauksessa polttoaineena oli 76% kokonaislämpöarvosta hiiltä ja loput puuta. Eri kuormitustilanteissa simuloitiin kattilan paine-eroa, kiintoainepitoisuutta, tulipesän

lämpötilaa, kaasujen vertikaalista nopeutta sekä jäännöshapen jakautumista eri tulipesän korkeuksilla. Kuvassa 7 on esitetty järjestyksessä vasemmalta oikealle: CFB-kattilan tulipesän lämpötilajakauma, kaasujen nopeus ja jäännöshapen jakautuminen 100% sekä 40% kuormitustilanteessa.



**Kuva 7.** Kuvapareista aina vasemmalla 100% polttoaineteho, oikealla 40% - a) tulipesän lämpötilajakauma, b) kaasujen vertikaaliset nopeudet, c) jäännöshapen jakautuminen tulipesässä [9].

Huomattavaa on a-kuvan kohdalla CFB-kattilan noussut ja kattilan alaosaan painottunut lämpötilajakauma 40% osakuormatilanteessa. Ilmiö perustuukin siihen, että palamisilman syötön ja siitä aiheutuvan leijutusilman nopeuden hidastumisen vuoksi kattilan yläosien kiintoainepitoisuus putoaa sekä palamisprosessi tapahtuu keskitetysti kattilan alaosissa muistuttaen BFB-kattilan toimintaa. Simuloinnissa tutkimuksen alla oli myös sykloniin päätyvän kiintoaineksen määrä kuormitustilanteissa 100% / 70% / 40%. Saadut tulokset olivat vastaavasti 182 / 59 / 6 kg/s. CFB-kattilan joustavuus kuorman muutoksille ja mahdollisimman alhaisille minikuormille on heikempi BFB-kattilaan verrattuna johtuen suuremmasta petimateriaalin, polttoaineen ja tuhkan muodostamasta lämpökapasiteetista, joka lämpöpuskurin tavoin toimien ei ole niin altis kuormamuutoksille. Tutkimuksessa myös todettiin, että CFB-kattilan tapauksessa ei simuloitu alle 40% kuormitustilanteita, mutta tulevaisuudessa niidenkin analysointi olisi tarpeen. Tästä päätellen voikin todeta BFB-teknologian soveltuvan paremmin prosentuaalisesti pienempiin kattilan osakuormiin verrattuna CFB-kattiloihin.

## 4. TUTKIMUKSEN KOKEELLINEN VAIHE

Tämän työn kokeellisen vaiheen tapaustutkittu laitostyyppi on BFB-kattila, joka on integroitu paperitehtaan yhteyteen. Voimalaitosprosessin höyryn käyttökohteet ovat paperinvalmistusprosessin tarpeet, sähkön tuotanto ja kaukolämmön tarve. On huomattava ero mekanismeissa, joka luo vaatimuksen biovoimakattilan kuorman tasolle: paperitehtaan yhteydessä olevan voimalaitoksen tarvittavan kuorman määrittää paperintuotannon prosessihöyryn tarve, kun taas tyypillisen biovoimalaitoksen kuorman voi määrittää muun muassa sähkö- tai lämpöverkon vaatimukset. Ensiksi mainitusta puhutaankin yleisemmin teollisuuden yhteistuotannosta. Esimerkiksi Suomessa vuonna 2011 teollisuuden yhteistuotannon osuus sähkön kokonaistuotannosta oli 15% [11].

Sähköä tuottavat voimalaitokset voidaan jakaa yleisesti eri kategorioihin energian saatavuuden vaatimuksien mukaisesti:

- Perusvoima
- Huippuvoima
- Varavoima
- Säättövoima

Perusvoimalla tarkoitetaan energian tuotantoperiaatetta, jossa laitoksen vuotuinen huipunkäyttöaika pyritään maksimoimaan. Tämän tuotantotavan esimerkkejä ovat muun muassa ydinvoima sekä osa vesivoimasta ja CHP-tuotannosta. Huippuvoimaa tuottavien voimalaitoksen vuotuinen käyttöaika on tyypillisesti varsin pieni, jolla katetaan kuormahuippujen tarpeet. Tyypillisiä huippuvoiman tuotantolaitoksia ovat muun muassa hiili- ja kaasuturbiinilaitokset. Varavoimaa tuottavat laitokset ovat tyypillisesti valmiustilassa ja otetaan käyttöön vain yllättävän vikatilanteen tai suunnitellun perusvoimalaitoksen huollon ajaksi. Sama voimalaitos voi myöskin olla kategorisoitu vara- ja huippuvoimalaitokseksi. Säättövoimalla taas tarkoitetaan tuotantolaitokselle asetettuja vaatimuksia sähköverkon vakauden ylläpitämiseksi sekä joustavuuden mahdollistamiseksi, sillä sähköä on tuotettava kokonaisuudessaan verkkoon kulutetun määrän. Lisääntynyt tuuli- ja aurinkoenergian käyttö lisää säättövoiman tarvetta, sillä nämä sähkön tuotantomuodot ja niiden suorituskyky on riippuvainen vallitsevista sääolosuhteista eli toisin sanoen tekevät sähköntuotannon ennakoinnin haastavammaksi. [11]

Kattilamittauksien tueksi kokeellisessa vaiheessa suoritettiin käyttöhenkilökunnan haastatteluita kolmella käyntikerralla marras- ja joulukuussa 2017 sekä huhtikuussa 2018. Haastattelun kohteena oli voimalaitoksen kolme operaattoria, joiden vastuualueena on varmistaa voimalaitoksen kaikkien osakokonaisuuksien jatkuva moitteeton toiminta. Haastattelut noudattivat teemahaastattelun periaatteita, joka on puolistrukturoidun haastattelun alakategoria. Teemahaastattelussa valmiiksi luodun kysymyslistan pohjalta pyrkimys oli selvittämään mahdollisia haasteita ja ratkaisuja, joita ilmenee nimenomaisen kuplapetikattilan osa- ja minimikuormatilanteessa. Haastattelujen kulku oli vapaan keskustelun tyyppistä, jolloin oleellisimpien ennalta määritettyjen aiheiden lisäksi uusien seikkojen ja havaintojen käsittely olisi mahdollista. Teemahaastattelun lukumäärää sekä kestoa samojen haastateltavien kesken ei ole rajoitettu.[3] Teemahaastattelujen sujuvuutta ja avoimuutta auttoi tutkimuksen tekijän aikaisempi työhistoria haastateltavien käyttöhenkilöiden kanssa.

### 4.1 Tutkitun BFB-kattilan mittauksien kulku

Tämän työn käytännön osuuden mittausdata koostui kattilamittauksista neljältä eri ajankohdalta syksyllä 2017. Mittauksien kokonaiskesto vaihteli 10 ja 32 tunnin välillä mittausfrekvenssin ollessa 1 minuutti. Mittausajankohdat valikoituivat hetkiltä, jolloin esiintyi sopivia kattilan kuormanmuutostilanteita. Mitatut kattila- ja päästösuureet olivat seuraavat:

- höyryvirtaus
- laskennallinen polttoaineteho
- polttilan petilämpötila (monipistemittauksen keskiarvo tulosten yksinkertaistamiseksi)
- primääri-ilman virtaus
- sekundääri-ilman virtaus (kattilan alataso, välitaso sekä ylätaso eli tertiääri-ilma) sekä sekundääri-ilman kokonaisvirtaus (pitäen sisällään edellä mainitun ja muunmuassa poltinten jäähdytysilmat)
- savukaasun mitatut päästöt: NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO
- savukaasun jäännoshappi O<sub>2</sub>

Mittausten kannalta oleellisia tutkitun kattilan suoritusarvoja ovat:

- polttoaineteho 185 MW
- tuorehöyryn suurin määrä 70 kg/s
- tuorehöyryn paine 107 bar eli 10,7 MPa
- tuorehöyryn lämpötila 535 °C

Kohdevoimalaitoksella oli mittausajankohtien ajan käynnissä kattilan perustavanlaatuisen säätötekninen muutos. Juurisyytä tähän muutokseen olivat muun muassa:

- Höyrykuormien lisääntyneet muutostilanteet johtuen paperitehtaaseen liitetyn sähkö- ja lämpöintensiivisen prosessin eli hiertämön ajotavan muutoksesta – yösähköllä tuotettu ylenmääräinen hierre lisäsi prosessista saatavan lauhdehöyryn määrää, jota hyödynnetään paperinvalmistusprosessissa. Voimalaitoskattilan tälle aikavälille sijoittuva höyrykuorma siis on vastaavasti pienempi.
- Aikaisempi yhden paperikonelinjan lopettaminen on vähentänyt paperivalmistusprosessin höyryn tarvetta
- Mahdollinen sopimus, jolla voimalaitoksen generaattorin tuottaman sähkö myyminen taajuustuotantosähköinä eli säätövoimana. Tämä tarkoittaa tilannetta, jossa tietyllä vasteajalla voimalaitoksen sähköntuotannon on oltava vaaditulla tasolla sähköverkon taajuuden ylläpitämiseksi.
- Voimalaitoksen hyötysuhteen parantaminen.
- Vuonna 2019 voimaan tulevat tiukentuvat päästörajoitukset, jotka on esitetty taulukossa 1.

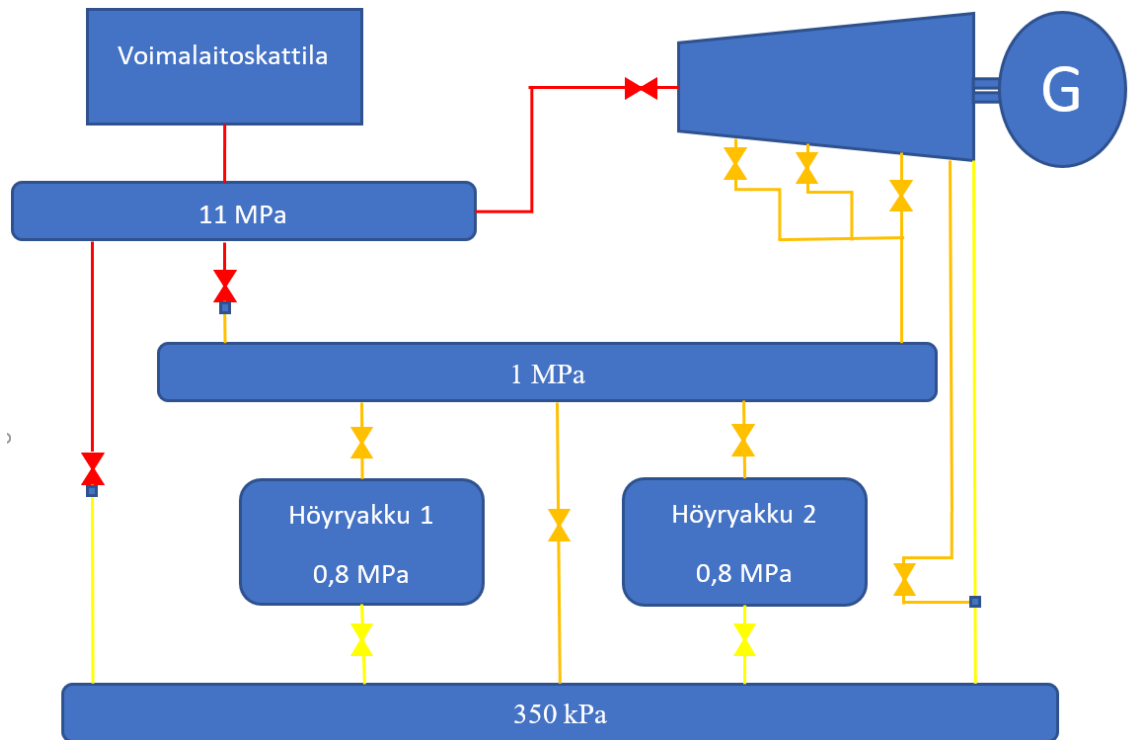
Taulukko 1. *Tutkitun voimalaitoksen NO<sub>x</sub>-päästörajat kiristyvät vuonna 2019 [12].*

Hapen vertailupitoisuus (%)	NO <sub>x</sub> raja-arvo (mg/Nm <sup>3</sup> ) 2016	Laitoksen osuus 2016 NO <sub>x</sub> enimmäismäärästä (tpa)	NO <sub>x</sub> raja-arvo (mg/Nm <sup>3</sup> ) 2019	Laitoksen osuus 2019 NO <sub>x</sub> enimmäismäärästä (tpa)
6,0	599	759	250	316

## 4.2 Tutkitun voimalaitoksen höyrypiiri

Aikaisemman kattila- ja höyrypiirin säätöperiaatteen mukaisesti kuvassa 8 nähtävä 350 kilopascalin höyrylinjan paine ohjasi suoraan voimalaitoskattilaan menevän polttoaineen määrää, kattilan muun säätöjärjestelmän pitäessä huolta polttoprosessin hallinnasta. Äskettäin käyttöönotetun uuden, säädöiltään vielä keskeneräisen säätöjärjestelmän periaatteena on kehittynyt ylätasonsäätö eli APC-säätö, (Advanced Process Control) jota sovellettiin kattilan ja höyryverkon hallintaan. APC-säätö tarkoittaa monimutkaista, prosessin eri parametrien ennakoitiin perustuvaa säätömallia.

Kuvassa 8 on havainnollistettu 11 megapascalin päänhöyrylinja, josta otettu höyryvirta pyörittää turbiinia ja generaattori aikaansaaden sähköntuotannon. Paperinvalmistuksessa käytettävä prosessihöyry on otettu 350 kilopascalin höyrylinjasta – johon viitattiin ammattisanallisesti toiselta nimeltään matalan puolen höyrylinjana, johon höyry tulee ensisijaisesti turbiinin viimeisestä välitotosta. Muut vaihtoehdot 350 kPa höyrylinjan paineen ylläpitoon ovat suora yhteys 10 MPa höyrylinjasta reduktioventtiiliin kautta (näkyvyy kuvan vasemmassa laidassa), 1 MPa höyrylinjasta reduktioventtiiliin kautta tai höyryakuista 1 ja 2. Jokainen reduktio- eli paineenalennusventtiili on merkitty kuvaan pienellä sinisellä neliöllä.



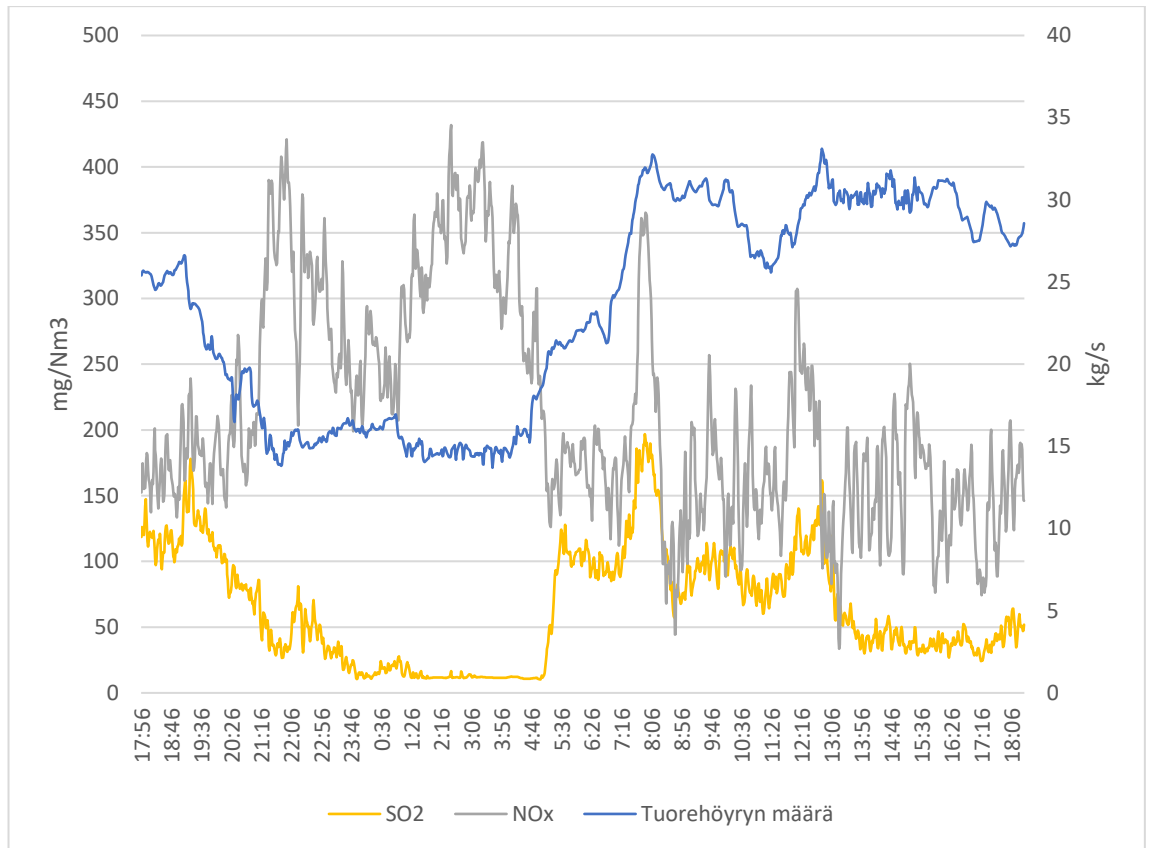
**Kuva 8.** Yksinkertaistettu höyryverkon prosessikaavio tutkitussa voimalaitoksessa.

Höyryakkujen esittely tässä yhteydessä on oleellista, sillä toteutusvaiheessa olevan APC-säädön yhtenä edesauttavana mekanismina oli tarkoituksellisesti vähentää kattilalle aiheutuvia kuormanmuutostilanteita hyödyntämällä molempia höyryakkuja eräänlaisena puskurina matalan puolen höyrylinjan paineen ylläpitämiseksi. Toisin sanoen paperintuotannosta johtuvien matalan puolen höyrylinjan paineen muutokset eivät aiheuttaisi vastaavan suuruisia muutoksia kattilan höyrykuormassa edesauttaen tasaisempaa ja mahdollistaen polttoprosessin helpomman hallittavuuden.

### 4.3 Mittaustulokset

Tässä kappaleessa esitellään tutkitun voimalaitoskattilan käytännön mittauksia ja havaintoja tuloksista. Esimerkkitapauksena käytetään ainoastaan yhtä mittausajankohtaa toiston välttämiseksi ja tulkintojen yksinkertaistamiseksi.

Alla olevassa kuvaajassa 9 on esitetty 24 tunnin mittausväillä ilmenneet muutokset voimalaitoksen höyryntuotannossa sekä  $\text{NO}_x$ - ja  $\text{SO}_2$ -päästöissä. Kuvaajan sininen käyrä esittää tuorehöyryn määrää ja käyrän asteikko on esitetty oikeanpuoleiselle pystyakselille. Harmaa käyrä esittää  $\text{NO}_x$ -päästöjä ja keltainen käyrä  $\text{SO}_2$ -päästöjä, vasemmanpuoleisen pystyakselin osoittaessa päästökäyrien asteikon. Tuorehöyryn määrä on annettu yksikössä kg/s ja typpi- ja rikkipäästöt yksikössä  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  ( $0^\circ\text{C}$  lämpötilassa ja  $101,3$  kPa paineessa).

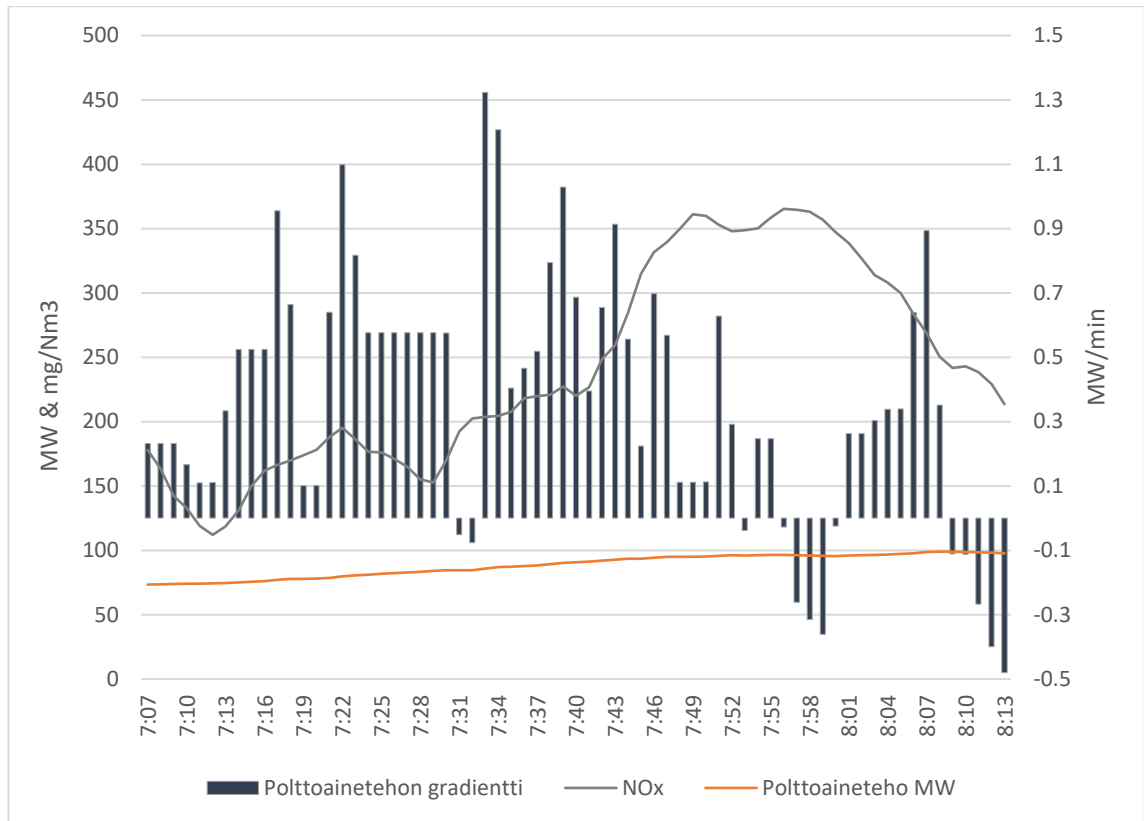


**Kuva 9.** Tutkitun voimalaitoksen rikki- ja typpipäästöt suhteessa tuorehöyryn määrään. Vasemmalla pystyakselilla päästöjen vastaavat lukemat, oikealla pystyakselilla tuorehöyryn määrä.

Alimmillaan höyryntuotanto oli kyseisellä mittausvälillä 13,85 kg/s, joka on hieman kattilanvalmistajan lupaamaa minikuormaa eli 15 kg/s pienempi. Mittausvälin rikkipäästöt vaihtelivat välillä 10-197 mg/Nm<sup>3</sup>, joka on aikaisemmin todetusti varsin riippuvainen suure kyseisen hetken polttoaineseoksen koostumuksesta. Valtaosa savukaasujen rikkipäästöistä aiheutuu turpeen sisältämästä rikistä.

Kuvaajasta 9 voidaan tulkita NO<sub>x</sub>-päästöjen selkeän nousun höyryntuotannon alittaessa noin 18 kg/s rajan. Tällä höyryntuotannon määrällä NO<sub>x</sub>-päästöt vaihtelevat välillä 203-431 mg/Nm<sup>3</sup>, selkeän osan aikaa ollen korkeammalla kuin vuoden 2019 typen päästörajat. Sama löydös toistui myös muilla mittausajankohdilla.

Toinen oleellinen havainto on mittausvälin noin kello 7.13 alkaen tapahtunut nopea NO<sub>x</sub>-päästöjen hetkellinen nousu. Kuvaajassa 10 on tarkemmin esitetty kyseisen aikavälin tapahtumat. Harmaa käyrä osoittaa aikavälin NO<sub>x</sub>-päästöt, oranssi käyrä laskennallisen polttoainetehon megawatteina sekä tummat palkit kuvaavat polttoainetehon muutosnopeutta minuuttia kohden. Kuvaajan vasen pystyakseli on asteikko polttoaineteholle ja NO<sub>x</sub>-päästöille, oikean pystyakselin ollessa polttoainetehon gradientin asteikko. Polttoainetehon gradientti tarkoittaa polttoainetehon muutosnopeutta, jonka hetkittäinen arvo on esitetty tummanharmain palkein.



**Kuva 10.** Lyhyemmän tarkasteluvälin NO<sub>x</sub>-päästöjen kasvu suhteessa polttoainetehon muutoksen nopeuteen.

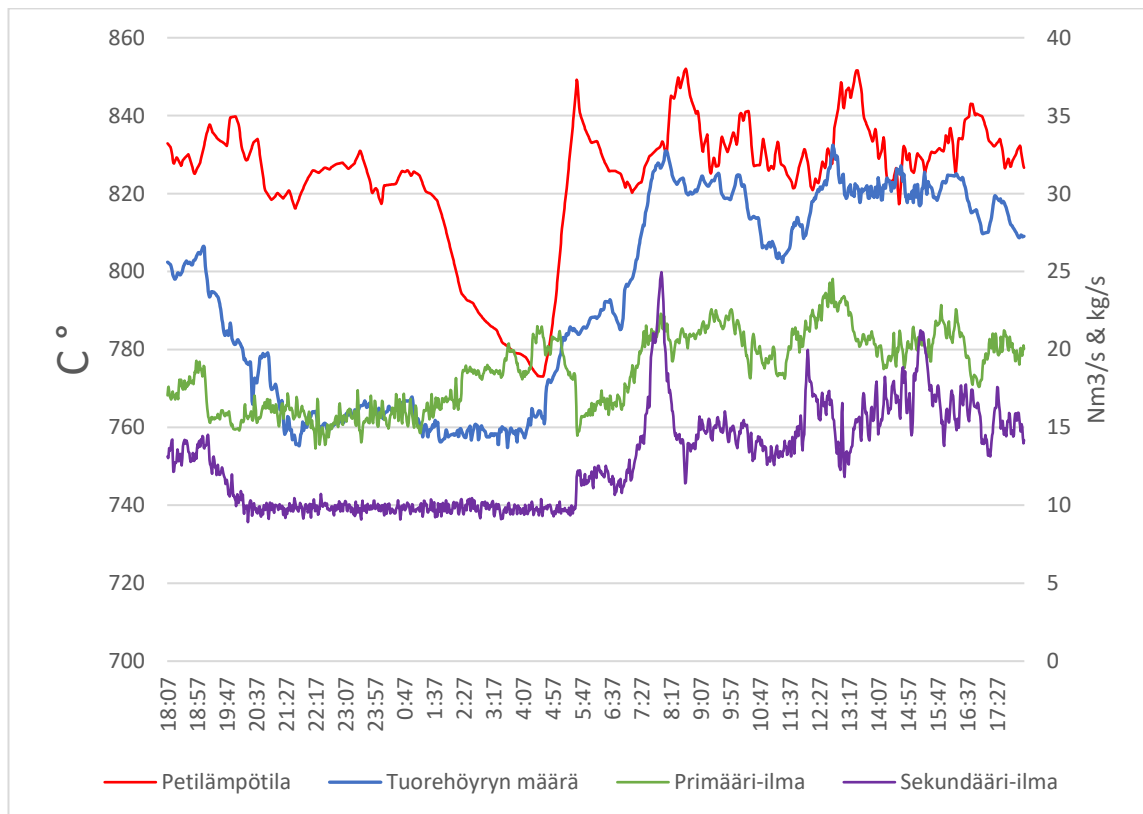
Yksi mahdollinen tekijä nopealle NO<sub>x</sub>-päästöjen kasvulle voi olla polttoainetehon kasvuvauhti, joka on noin 20 minuutin ajan keskiarvoisesti yli 0,5 MW/min. Polttoprosessin hallinta joka tapauksessa vaikeutuu nopean ja pidempikestoisen kuormanmuutoksen aikana. Useammalla mittausajankohdalla oli havaittavissa toistuvia, polttoainetehon gradienttiltaan suurempia muutoksia, jotka olivat kuitenkin kestoiltaan selkeästi edellä mainittua esimerkkiä lyhyempi – tyypillisesti muutaman minuutin mittaisia. Näistä kuormanmuutoksista ei aiheutunut mittauksien mukaan huomattavaa NO<sub>x</sub>-päästöjen hallintaongelmia.

Taulukossa 2 on havainnollistettu tietyn ajankohdan polttoainesekoituksen koostumus. Kattilaan menevän, tietyllä hetkellä syötetyn polttoainesekoituksen tarkka analysointi on haasteellista johtuen syöttölaitteiston viiveestä. Alla olevan taulukon lukemat ovat eri polttoaineiden massavirtoja varastosiiiloilta voimalaitoksen kahdelle päiväsiiilolle, joiden kapasiteetti on voimalaitoksen kuormituksesta riippuen muutaman tunnin luokkaa. Kaikki polttoaineet siis johdetaan päiväsiiiloihin, josta sekoitus lopulta syötetään kattilaan. Päiväsiiiloilta polttoon syötetyn polttoaineen massavirta on tiedossa, mutta kyseisen tilanteen tarkempi polttoaineen koostumuksen ja energiasisällön selvittäminen on ilman erillistä näytettä mahdotonta.

Taulukko 2. **Päiväsiiloille syötetyn polttoaineseokituksen koostumus.**

Aika	Liete (kg/s)	Kuori (kg/s)	Biopolttoaine (kg/s)	Turve (kg/s)
16:00	1,14	3,71	8,35	3,45
17:00	0,90	3,71	9,64	3,42
18:00	1,01	3,71	11,47	4,31
19:00	1,11	3,71	11,58	3,92
20:00	1,16	3,71	11,48	3,60
21:00	1,20	3,71	8,30	2,62
22:00	1,22	3,71	6,70	2,12
23:00	1,22	3,71	8,20	2,41

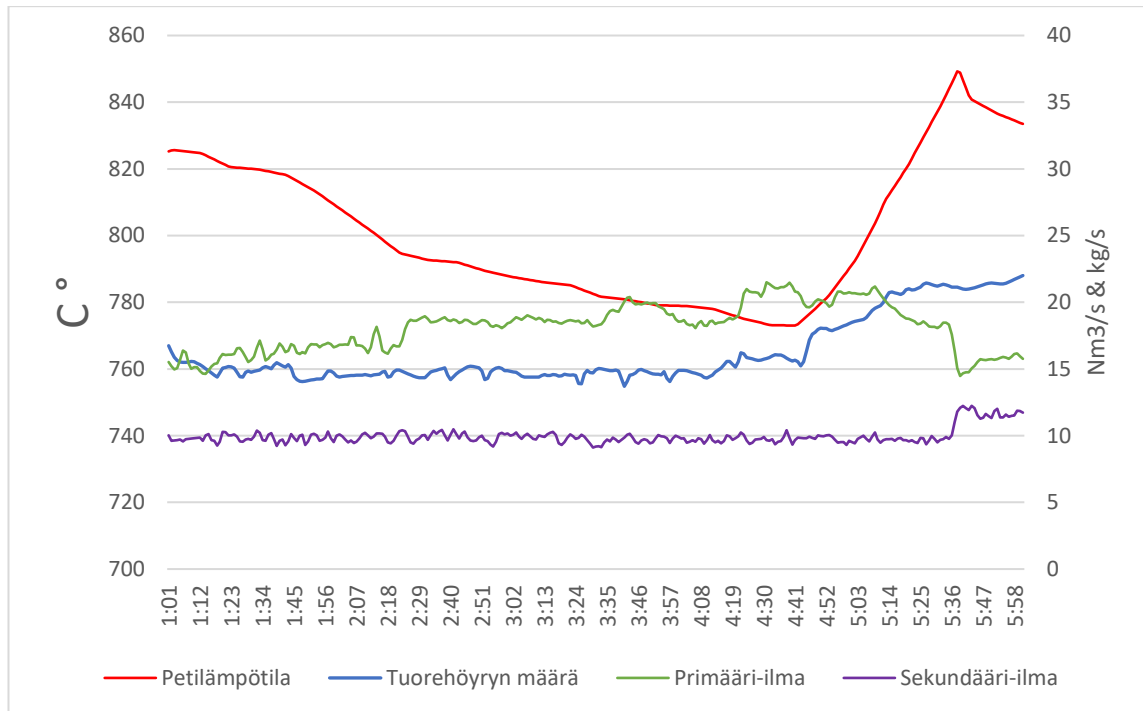
Kuvaajassa 11 on esitetty alkuperäisen, noin 24 tunnin pituisen mittausvälin tulokset keskiarvoistetun petilämpötilan, tuorehöyryn määrän, primääri-ilman ja sekundääri-ilman osalta. Huomattavaa on, että mittausajankohta alku- ja loppuhetket eivät ole aivan identtiset kuvaajan 9 kanssa, mutta tulokset ovat muuten täysin yhtäläiset molemmissa kuvaajissa olevan tuorehöyryn määrän osalta, sillä mittausväli on sama. Kuvaajan vasemmanpuoleisella pystyakselilla on petilämpötilan asteikko. Oikeanpuoleisella pystyakselilla primääri- ja sekundääri-ilman määrä normalisoituna [Nm<sup>3</sup>/s] sekä tuorehöyryn määrä [kg/s]. Muuten kuvaajan periaatteet ovat vastaavat kuvaajan 9 kanssa.



**Kuva 11.** Petilämpötilan, tuorehöyryn määrän, primääri- ja sekundääri-ilman syötön määrät mittausväliltä.

Olennaista kuvaajasta 11 on havaita sekundääri-ilman syötön määrän suhteessa höyryn tuotantoon: sekundääri-ilman syöttö pysyy minimiarvossaan eli noin 10 Nm<sup>3</sup>/s kun höyryn määrä alittaa 18-19 kg/s rajan. Mittausvälillä primääri-ilman syöttö oli pienimmillään 13,8 Nm<sup>3</sup>/s ja kattilan minimikuormalla tyypillisesti hieman yli 15 Nm<sup>3</sup>/s. Kuvaajassa 12 on esitetty rajoitettu, 5

tunnin ajanjakso alkuperäisellä mittausvälillä ja kuvaajan mittaustulosten selitykset ovat identtiset kuvaajan 11 kanssa.



**Kuva 12.** Tarkennettu 5 tunnin otos alkuperäiseltä mittausväliltä.

Tällä rajoitetun välin ensimmäisen 3 tunnin ja 40 minuutin aikana primääri-ilman syöttö nousi jatkuvasti, mutta petilämpötilat käänteisesti putosivat. On mahdollista, että tuntemattomasta syystä johtunutta ja samanaikaista petilämpötilan laskua on yritetty kompensoida primääri-ilman syöttöä lisäämällä, koska sillä on tiettyyn pisteeseen asti petilämpötiloja nostava vaikutus. Havainnollinen esimerkki ilmiöstä on kuumaan hiilokseen puhaltaminen, mikä lisää hiilokseen menevän palamisilman määrää lisäten palamisprosessin intensiteettiä. Tehdyistä toimenpiteistä huolimatta petilämpötilat ovat kuitenkin käänteisesti laskeneet, johon voi olla ainakin kaksi ensisijaista mekanismia:

- Huonolaatuisen eli korkean kosteusprosentin ja matalan lämpöarvon omaavan polttoaineseoksen käyttö on aiheuttanut petilämpötilan laskua, sillä palamislämpöä on kulunut suhteessa suurempi määrä polttoaineen veden höyrystämiseen. Polttoaineseoksen matalampi lämpöarvo ei ole tuottanut riittävästi lämpöä prosessiin petilämpötilan ylläpitämiseksi.
- Lisääntynyt yli-ilman syöttö onkin toiminut käänteisesti jäähdyttäen petilämpötilaa. Näin käy tilanteissa, jolloin palamisilman syötön lisääminen ei enää toimikaan petilämpötiloja nostavana mekanismina vaan ilmansyöttö siirtyy jäähdyttävälle alueelle. [13] Ilmiö voi liittyä mittausajankohdan alhaiseen kattilakuormaan, jolloin pedissä olevan polttoaineen ja sen sisältämän hiilen määrän vähäisyyden vuoksi primääri-ilma ei aiheuta lämpötilan nousua vaan päinvastoin kiihdyttäen pedin jäähtymistä.

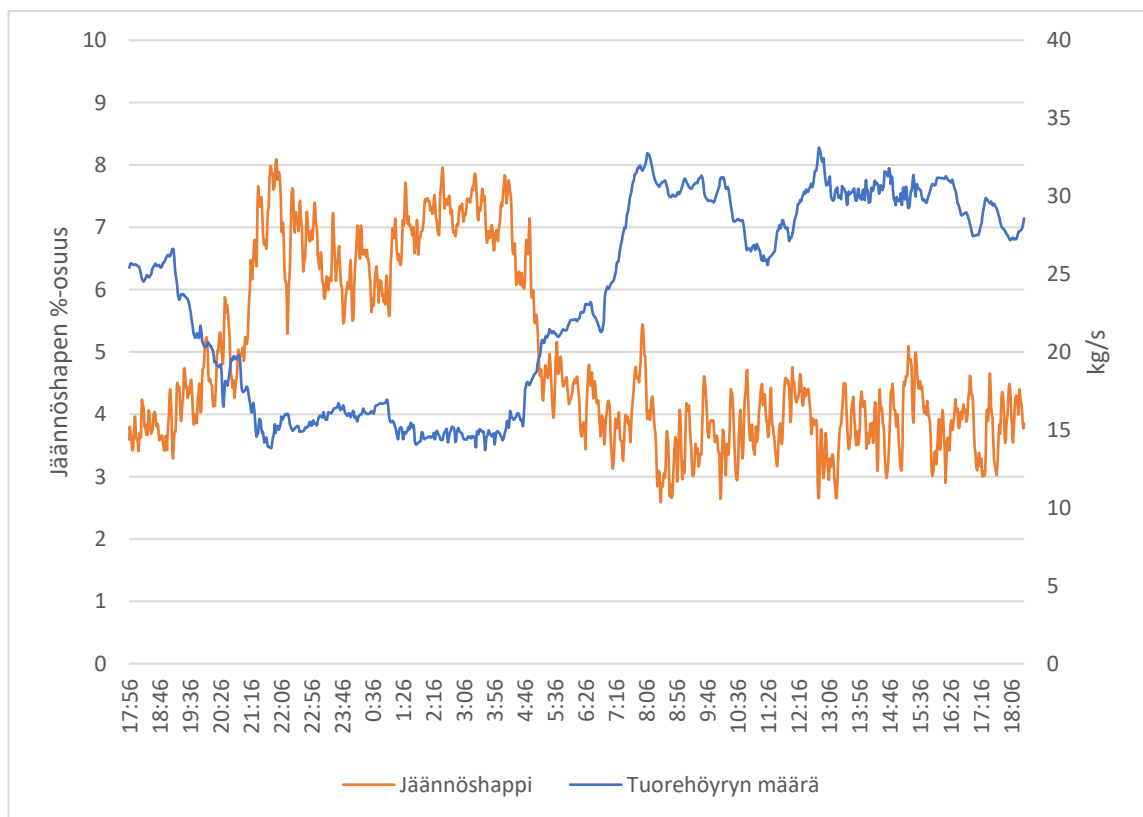
Mittausvälillä alkaen noin kello 4.40 alkaen höyrykuormassa on havaittavissa selkeä ja jatkuva nousu. Samanaikaisesti alkaa korreloiva petilämpötilan nousu, joka on tulkittavissa polttoaineseokituksen ominaisuuksien muuttumisesta johtuvaksi. Petilämpötilaa on aluksi yritetty hallita vähentämällä primääri-ilman syöttöä vähitellen. Noin kello 5.36 primääri-ilman syöttöä on vähennetty huomattavasti ja samanaikaisesti sekundääri-ilman syöttöä lisätty vastaamaan tarvittavaa palamisilman kokonaismäärää. Vasta tämä toimenpide mitä ilmeisimmin käänsi petilämpötilan laskuun ja parempaan kontrolliin.

Eräs mielenkiintoinen löydös esiintyi sekundääri-ilman mittauksia tutkittaessa: kuten aiemmin todettua, sekundääri-ilman tarkempi jaottelu ja mittaukset olivat alataso, välitaso ja ylätaso. Tuntemattomasta syystä kuitenkin kolmen edellä mainitun yhteenlaskettu summa ei täsmännyt suoritettujen mittauksien sekundääri-ilman kokonaismäärän kanssa. Taulukossa 3 on havainnollistettu löydökset tältä osin.

Taulukko 3. **Primääri- ja sekundääri-ilman tarkemmat syöttömäärät**

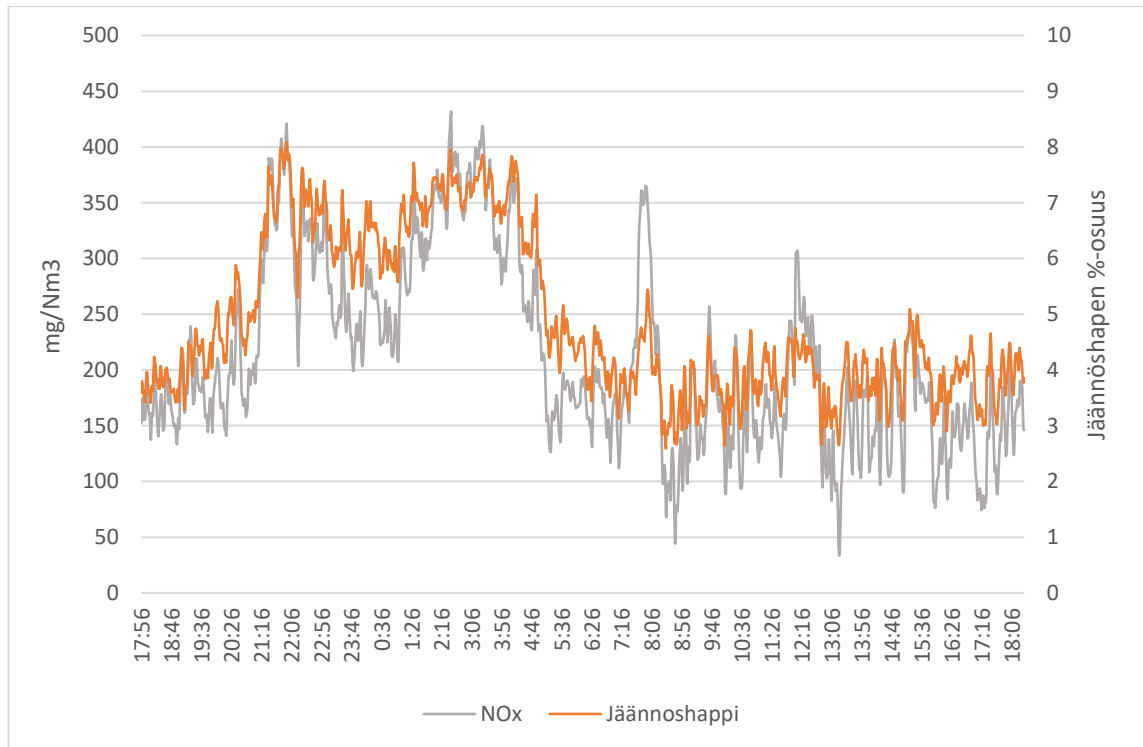
Aika	Höyry kg/s	Primääri-ilma Nm <sup>3</sup> /s	Sek.ilma alataso Nm <sup>3</sup> /s	Sek. ilma välitaso Nm <sup>3</sup> /s	Sek. ilma ylätaso Nm <sup>3</sup> /s	Sekundääri-ilma Nm <sup>3</sup> /s
19:20	23,59	15,46	4,76	0,39	0,11	12,56
19:40	21,71	16,08	4,74	0,73	0,11	12,30
20:20	19,14	15,71	1,25	0,14	0,11	9,78

Kysyttäessä sekundääri-ilman kokonaismäärän poikkeavuudesta voimalaitoksen käyttöhenkilökunnalta, lopullista vastausta ei löytynyt. Epäilykset mittauksen oikeellisuudesta ja sekundääri-ilman vuotoista esimerkiksi kattilan polttoaineen sulkusyöttimien lokerikoille sekä tulistimien nuohojen ilmalaatikoille olivat pohdinnanalaisia selityksiä. Käyttöhenkilökunnan vahva näkemys oli, että kaksi viimeksi mainittua ilmavuotoa eivät kuitenkaan havaitun suuruista mittauseroa voi aiheuttaa [13]. Aikaisempia toimenpiteitä kattilan tulipesään menevien ilmavuotojen estämiseksi oli suoritettu, sillä erityisesti minimikuormalla liiallinen palamisilman määrä aiheuttaa kasvaneita NO<sub>x</sub>-päästöjä. Tästä esimerkkinä on kuvaaja 13, jossa sininen käyrä kuvaa tuorehöyryn määrää oikean pysty akselin ollessa asteikkona. Oranssi käyrä havainnollistaa savukaasujen jäännöshapen tilavuusosuutta prosenttiosuutena koko savukaasuvirrasta, vasemman pysty akselin ollessa asteikkona.



**Kuva 13.** Mittausvälin höyrykuorma ja savukaasun jäännöshapen prosentuaalinen määrä.

Voimalaitoksen käyttöhenkilökunnan mukaan ideaali savukaasun jäännöshapen pitoisuus olisi 2,5-3 prosenttiyksikön luokkaa, mutta nyt mittausvälin minimikuormatilanteessa jäännöshapen osuus liikkui 5-8 % välillä. Palamisilman ja NO<sub>x</sub>-päästöjen välistä korrelaatiota on havainnollistettu kuvaajassa 14, jossa oranssi käyrä kuvaa jäännöshapen prosentuaalisen määrän savukaasussa, sekä harmaa käyrä osoittaa tietyn hetken mitattuja NO<sub>x</sub>-päästöjä.



**Kuva 14.** Savukaasun jäännöshapen ja typpipäästöjen välinen korrelaatio.

Löydös osoittaa selkeän yhtäläisyyden mitattujen NO<sub>x</sub>-päästöjen ja savukaasun jäännöshapen pitoisuuden suhteen. Johtopäätöksenä ja parannuskeinona tilanteeseen on jäännöshapen pitäminen aikaisemmin mainitulla ideaalisella välillä kattilan kuormasta riippumatta. Tämän tulisi tapahtua rajoittamalla palamisilman määrää minimikuormatilanteissa, kuitenkin alittamatta primääri-ilman minimileijutusnopeutta. Palamisilman määrään vaikuttaa kaksi tekijää: palamisilman nopeus ja paine primääri- tai sekundääri-ilmakanavassa. Yhtä tai molempia suureita alentamalla kattilaan menevän palamisilman määrä putoaa. Tärkeänä tekijänä on myös paikantamattomien ilmavuojojen löytäminen ja estäminen tulipesään.

#### 4.4 Yleiset havainnot ja haastattelulöydökset

Kappaleessa 4.1. mainitut, APC-säätömuutoksen juurisytyt ovat lisänneet tutkitun voimalaitoksen haasteellisia minimi- ja osakuormatilanteita. Teemahaastattelun keinoin tavoitteena oli saada selville käyttöhenkilöstölle vuosien saatossa tulleita haasteita kyseisen voimalaitoksen minimi- ja osakuormatilanteista.

Käyttöhenkilöstön mukaan ensisijainen ongelma minimikuorman (tuorehöyryn määrä noin 15 kg/s) ajotilanteessa oli ennen APC-säädön käyttöönottoa liiallinen palamisilman syöttö. Sekundääri-ilman vuodot tulipesään, sekä liiallinen primääri-ilman syöttö aiheuttivat NO<sub>x</sub>-päästöjen nousua, joka kiristyvien päästörajojen vuoksi ei tulevaisuudessa olisi enää mahdollista. Mittaushetkellä kattilan primääri-ilman mahdollinen minimimäärä oli yhteensä 12 m<sup>3</sup>/s, jotka syötetään arinan pohjaan kahta kanavaa pitkin. Yhtenä ajatuksen voimalaitoksen henkilökunnan kesken oli kokeilla primääri-ilman minimimääränä yhteensä 10,4 m<sup>3</sup>/s. Myöskin sekundääri-ilman vuotoja oli jo pyritty paikantamaan ja estämään palotilaan. Haastattelujen aikaan primääri-ilman alalukituksen arvo oli 10,4 m<sup>3</sup>/s, alahälytyksen ollessa 10,8 m<sup>3</sup>/s. Tässä yhteydessä ei kuitenkaan

selvinnyt tutkitun kattilan minimileijutusnopeuden takaavan primääri-ilman määrää tai onko minkäänlaisia koeajoja suoritettu kyseisen raja-arvon löytymiseksi.

CO-päästöjen nähtiin ensisijaisesti aiheutuvan kostean polttoaineen käytön ja primääri-ilman *epäsopivasta* suhteesta, jolloin kattila toimii osittain kaasuttimen tavoin aiheuttaen suuremmat häkäpitoisuudet. Tällöin polttoaineen sisältämän veden vaatima lisääntynyt höyrystymislämpö hidastaa palamista ja pyrolyysivaiheen alkamista, aiheuttaen haihtuvien aineosien aktiivisempaa palamisprosessia tulipesän yläosissa. Haastattelujen ajankohtana CO-päästöjen ylähälytysraja oli 160 mg/Nm<sup>3</sup>. SO<sub>2</sub>-päästöjen syntymekanismina todettiin olevan ensisijaisesti polttoaineen, erityisesti turpeen sisältämä rikki. Turpeella on kuitenkin muita hyviä polttoteknisiä ominaisuuksia biopolttoainekattilassa, kuten korkea lämpöarvo ja sopiva kemiallinen koostumus poltettaessa puuperäisten polttoaineiden kanssa ehkäisten kattilapintojen likaantumista. Puuperäisen ja turveperäisen polttoaineen alkalien 'ristikkäisyys' edesauttaa kattilan puhtaana pysymistä. [13]

Yhtenä havaintoja haastatteluissa nousi esiin minimikuorman vaikutukset tulistimien putkien pintalämpötiloihin: pienillä kattilakuormilla tulistimien poikittaiset *lämpötilaprofiilit* poikkesivat huomattavasti verrattuna suurempiin kattilakuormiin. Poikittaisella lämpötilaprofiililla tarkoitetaan tässä tapauksessa tulistimen putkien pintalämpötilaa tarkasteltuna horisontaalisesti kattilan sivuseinien suuntaisesti. Tällöin minimikuormalla ja sitä lähestyvillä kuormapisteillä tulistimien putkien pintalämpötila oli matalampi lähempänä kattilan vasenta ja oikeata sivuseinää, ollen korkeampi tulistimen keskellä. Kyseisessä kattilassa tulistimien järjestys savukaasun kulkusuuntaan nähden on 2-3-1 ja tulistettava höyry kulkee tulistimien läpi järjestyksessä 1-2-3. Pieni kattilakuorma aiheutti tilanteita, joissa tulistimien reunat olivat alhaisemmassa lämpötilassa verrattuna tulistimien keskiosiin aiheuttaen hankaluuksia yksittäisen tulistinpinnan lämpötilansäädön suhteen. Tulistimien pintalämpötilat ovat oleellisia johtuen valittujen materiaalien rajoitetusta lämpötilan kestosta. Lämpötilaprofiilin poikkeavuus voi viitata palotapahtumaan, jossa tulipesän keskellä oleva aktiivisempi liekkiintama kuumentaa savukaasuja epätasaisesti tulipesän poikkipintaan nähden – kattilan keskustan pysyessä kuumana ja reunustojen lämpötilaltaan alemmalla tasolla.

Toinen haasteellinen, tulistimien ja höyryn lämpötilaa koskeva viimeaikainen havainto liittyi polttoaineen laatuun, joka koski myös muitakin kuin minimikuormitustilanteita. Kostean ja heikon lämpöarvon omaavan polttoaineen poltto aiheutti 1-tulistimen jälkeisen höyryn lämpötilan hälytysrajan ylityksiä. Edellä mainitun tyyppisen polttoaineen käyttö lähtökohtaisesti laskee petilämpötiloja, johtuen polttoaineen veden höyrystämiseen kuluva suuremmasta lämpömäärästä, sekä polttoaineen pienemmästä energiasällöstä. Myöskin palamistapahtuma on hitaampi ja jossain määrin verrattavissa kaasuttimen toimintaan, jolloin lopullinen polttoaineen ja sen haihtuvien osuuksien *palaminen* tapahtuu vasta tulipesän yläosissa. Kostea polttoaine aiheuttaa suuremman savukaasun kosteuspitoisuuden ja määrän, joka aiheuttaa tehokkaamman lämmönsiirron tulistinputkiin. Tutkitussa kattilassa ainoastaan ennen 2- ja 3-tulistimia on ruiskutusveden syöttö, jolla säädetään tulistetun höyryn lämpötilaa eri tulistuksen vaiheissa. Tästä syystä kyseinen tilanne aiheutti ainoastaan 1-tulistimen jälkeisen höyryn lämpötilan hälytysrajan ylityksiä. Höyryn lämpötila tulistuksen eri vaiheissa on oleellinen suure kattilan mekaanisen keston kannalta, sillä tulistimien ja niiden välisten höyrylinjojen materiaalit on mitoitettu ja valittu tietyille höyryn maksimilämpötilalle.

Nykytilanteessa polttoaineen syöttö tulipesään sujui minimikuormitustilanteissa *ongelmitta*, sillä jo aikaisemmin oli toteutettu polttoaineen päiväsiilojen purkuruuvien välityksien pienentämien, sekä 'ryöstöruuvien' ohjauksien muutos mahdollistaen pienemmät polttoainevirrat kattilaan. 'Ryöstöruuveilla' tarkoitetaan purkuruuveja, jotka ottavat päiväsiiloilta tulevilta kuljettimilta polttoaineen sulkusyöttimille, jotka lopulta sysäävät polttoaineen tulipesään. Tutkitussa kattilassa on yhteensä 6 sulkusyöttintä asennettuna kahdelle, vastakkaisille kattilan seinille. Ennen edellä mainittuja muutoksia kattilan polttoaineen syöttö minimikuormatilanteissa tapahtui vastakkaisilla seinillä olevien yhteensä 4 reunimmaisen sulkusyöttimen avulla riittävän vähäisen polttoainemäärän ja sitä kautta kattilakuorman mahdollistamiseksi. Nykytilanteessa vielä 14 kg/s höyrykuormakaan ei aiheuta ongelmia polttoaineen syötön osalta.

Tutkitun kattilan lämpötehon muutosnopeus oli ohjelmallisesti rajoitettu lukemaan 15 MW/min, joka tarkoittaa noin 3 kg/s höyrykuorman muutosta. Näihin yltäneitä lukemia ei havaittu mittausajankohtina. APC-säädön yhtenä tärkeänä periaatteena olikin vähentää kattilalle

aiheutuvaa polttoainetehon muutosnopeutta. Käyttöhenkilökunnan mukaan ennen APC-säädön käyttöön ottoa kyseinen kattila oli mukautuvampi kuormanmuutostilanteisiin, ja niiden toteuttaminen tapahtui ongelmitta pois lukien hetkelliset päästökasvut.

Tutkitulla voimalaitoksella oli jo käynnissä sekä aikaisemmin toteutettu useita toimenpiteitä minimi- ja osakuormatilanteiden parempaan hallintaan. Yleinen näkemys haastateltavien kesken oli, että minimikuorman laskeminen huomattavasti alemmaksi ei olisi enää mahdollista. Kattilavalmistajan määrittämä ehdoton alaraja höyrykuormalle oli haastateltavien mukaan 12-13 kg/s tasolla. Tämä raja oli heille perusteltu määriteltynä syöttöveden virtaaman määränä, jolla kattilavalmistaja vielä pystyy takaamaan höyrystävien lämpöpintojen riittävän jäähtymisen, jolloin nopeutunutta *kulumista* tai *puhki palamista* ei pääse syntymään. Tärkeänä toteutusvaiheessa olevana muutoksena oli APC-säädön käyttöönotto, jonka hyötyjä oli ennakoida ja ehkäistä haastavia kuormanmuutostilanteita täten mahdollistaen paremman palamisprosessin, höyryverkon ja päästöjen hallinnan.

## 5. YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli esitellä biovoimalaitoksen haasteita minimi- ja osakuormatilanteiden osalta nyt ja tulevaisuudessa. Poliittiset sekä energian tuotantomuotojen kehittymisestä johtuvat muutokset luovat haasteita energiantuotantolaitosten joustavuudelle.

Tämän työn kannalta eräs oleellisimmista havainnoista oli, että edellä mainittuihin vaatimuksiin oli tutkitulla voimalaitoksella konkreettisin toimenpitein reagoitu. APC-säätöön perustuva kattilan ja höyryverkon ajomallin muutos aiheutti haasteita käyttöhenkilökunnan päivittäisissä työtehtävissä, mutta kyseinen askel nähtiin välttämättömänä tiukentuvien päästörajojen saavuttamiseksi. Taustalla oli myös muita merkittäviä motivaation lähteitä, kuten operointitehokkuuden kasvattaminen, voimalaitoksen hyötysuhteen tavoitteellinen parantaminen sekä mahdollinen sopimuksellinen vastuu taajustuotantosähkön tuottamisesta. Edellä mainituista vaatimuksista muodostuva monimuuttujayhtälö on erittäin haasteellinen ratkaistava, jonka kaikilta osin tyydyttävä onnistuminen on huomattavia resursseja vaativa toimenpide.

Valitun mittausajankohdan suurin haaste tämän tutkimuksen puitteissa oli NO<sub>x</sub>-päästöjen kasvu lähestyttäessä kattilan minimikuormaa. Kehitysehdotuksena tähän ongelmaan tulisi pureutua pyrkien oikeaan jäännöshapen määrään riippumatta kattilan kuormitustilanteesta. Ratkaisu tilanteeseen voi löytyä palamisilman ja vuotoilmojen määrän vähentämisestä. Huhtikuussa 2018 suoritettuna viimeisen haastattelukerran aikana yhtenä typpipäästöjen kontrollointitapana oli ideaalitasoa (2,5 %) pienemmän savukaasun jäännöshapen tavoitetaso. APC-säätö oli erillisinä ja toisistaan eroteltuina piireinä höyryverkolle ja voimalaitoskattilalle. Siihen mennessä voimalaitoskattilan säätöjärjestelmä oli käyttöhenkilökunnan mukaan suorituskykyinen. Haasteita aiheutti höyryverkon ja kattilan samanaikainen APC-säätö ja yhteinen moitteeton toiminta pidemmällä aikavälillä.

# LÄHTEET

- [1] Sähköntuotanto energialähteittäin 2016, Energiateollisuus ry, web page. Available (accessed 3.9.2018): [https://energia.fi/perustietoa\\_energia-alasta/energiantuotanto/sahkon-tuotanto](https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkon-tuotanto).
- [2] Lämmön ja sähkön yhteistuotanto on energiatehokasta, Energiateollisuus ry, web page. Available (accessed 6.9.2018): [https://energia.fi/perustietoa\\_energia-alasta/energiantuo-tanto/yhteistuotanto](https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuo-tanto/yhteistuotanto).
- [3] S. Hirsjärvi, H. Hurme, Tutkimushaastattelu: teemahaastattelun teoria ja käytäntö, Gaudeamus Helsinki University Press, Helsinki, 2008, 213 p.
- [4] HYBEX boiler, Valmet Oyj, web page. Available (accessed 23.3.2023): [https://www.youtube.com/watch?v=yE6UmW9HVUU&ab\\_channel=Valmet](https://www.youtube.com/watch?v=yE6UmW9HVUU&ab_channel=Valmet)
- [5] R. Raiko, J. Saatamoinen, M. Hupa, I. Kurki-Suonio, Poltto ja palaminen, 2nd ed. Teknillistieteelliset akatemit, Helsinki, 2002, 750 s p.
- [6] P. Basu, Combustion and Gasification in Fluidized Beds, CRC Press, Baton Rouge, 2006, 496 p.
- [7] Valmet supplies a large-scale boiler plant to Turun Seudun Energiantuotanto Oy in Finland, Valmet Oyj, web page. Available (accessed 16.5.2018): <https://www.youtube.com/watch?v=s9SgM-e9D90>.
- [8] A.A. Khan, W. de Jong, P.J. Jansens, H. Spliethoff, Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies, Fuel Processing Technology, Vol. 90, Iss. 1, 2009, pp. 21-50. Available (accessed 17.5.2018): <http://www.sciencedirect.com.lib-proxy.tut.fi/science/article/pii/S0378382008001963>.
- [9] M. Huttunen, J. Peltola, S. Kallio, L. Karvonen, T. Niemi, V. Ylä-Outinen, Analysis of the processes in fluidized bed boiler furnaces during load changes, Energy Procedia, Albufeira, Portugal, April 18, 2017, VTT Finland, Valmet Technologies Oy, Espoo, Tampere, pp. 580-587.
- [10] J. Koppejan, S. Van Loo, The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing, Earthscan, London, UK, 2008, 441 p.
- [11] A. Aalto, A. Sarvaranta, J. Jääskeläinen, N. Honkasalo, M. Raiko & P. Järvinen, Mistä lisäjoustoa sähköjärjestelmään? Energiateollisuus ry, Fingrid Oyj, [https://energia.fi/files/694/Mista\\_lisajoustoa\\_sahkojarjestelmaan\\_loppuraportti\\_28\\_11\\_2012.pdf](https://energia.fi/files/694/Mista_lisajoustoa_sahkojarjestelmaan_loppuraportti_28_11_2012.pdf).
- [12] Suunnitelmaan kuuluvien laitosten laskennalliset NOx-päästöt vuonna 2016 ja 2019, Suomen ympäristöministeriö, web page. Available (accessed 10.9.2018): <http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BEA35D265-53C2-4FC4-A16F-9DE8794129D3%7D/95454>.
- [13] Voimalaitoksen käyttöhenkilökunta, Haastattelut ajankohtina 26.11.2017, 22.12.2017, 14.4.2018.