

Laura Hulkko

**VOIMALAITOKSEN POLTTOAINEIDEN OMINAISUUSTIEDON HYÖDYNTÄMI-
NEN PÄÄSTÖJEN HALLINNASSA**

**VOIMALAITOKSEN POLTTOAINEIDEN OMINAISUUSTIEDON HYÖDYNTÄMI-
NEN PÄÄSTÖJEN HALLINNASSA**

Laura Hulkko
Opinnäytetyö
Kevät 2016
Energiatekniikka
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikka

Tekijä: Laura Hulkko

Opinnäytetyön nimi: Voimalaitoksen polttoaineiden ominaisuustiedon hyödyntäminen päästöjen hallinnassa

Työn ohjaajat: Heikki Harju-Autti, Heikki Karppimaa ja Jukka Ylikunnari

Työn valmistusluku- ja vuosi: Kevät 2016

Sivumäärä: 79 + 4 liitettä

Opinnäytetyö on tehty yhteistyössä Oulun Energia Oy:n kanssa. Yhtiö kuuluu Oulun Energia -konserniin, joka on yksi Pohjois-Suomen johtavista energia-alan yrityksistä. Työssä tutustutaan Toppilan voimalaitokseen, joka on kahdesta laitostyöyksiköstä koostuva kaukolämmön ja sähkön yhteistuotantolaitos. Työn tavoitteena on perehtyä erityisesti laitoksessa käytettäviin polttoaineisiin, polttoprosesseihin ja energiantuotantoprosesseista aiheutuviin päästöihin.

Voimalaitosten ilmapäästöt aiheuttavat haittaa ekosysteemeille, eliöille ja infrastruktuurille laajalla alueella. Ympäristön suojeleminen on merkittävä kansainvälinen tavoite, joka näkyy alati kiristyneissä päästörajoituksissa. Energia-alan yritysten haasteena on päivittää prosessejaan tulevia ympäristövaatimuksia vastaaviksi ja parasta mahdollista teknologiaa hyödyntäviksi. Tämä aiheuttaa toimenpiteitä myös Oulun Energian voimantuotantolaitoksilla. Toppilan voimalaitokselle on tulossa kevään aikana voimaan uusi ympäristölupa, jossa määritetään laitoksen uudet päästöraja-arvot.

Päästöihin vaikuttavat pääasiassa polttoaineen ominaisuudet ja polttotekniset ratkaisut. Työssä tutkitaan, miten polttoaineen rikki- ja typpipitoisuus vaikuttavat poltossa syntyviin päästöihin ja miten tietoa polttoaineen ominaisuuksien vaihtelusta voitaisiin hyödyntää kattilan ohjauksessa, jotta vältyttäisiin ympäristöluvassa määritettyjen päästöraja-arvojen ylityksiltä.

Asiaa selvitettiin polttoaineanalyysillä ja mittauksilla sekä tutkimalla saatujen tuloksien, prosessitietojen ja päästöjen riippuvuussuhteita. Rikille ja typelle suoritettiin myös taselaskelma, jonka pohjalta määritettiin polttoaineen rikkipitoisuudelle laaturaja-arvot. Taselaskennan pohjalta tutkittiin myös sitä, miten voimalaitoksen päästöjä olisi mahdollista vähentää prosessikemikaalien avulla mahdollisimman kustannustehokkaasti.

Työssä selvisi, että polttoaineen kemiallisella koostumuksella on vaikutusta voimalaitoksen ilmapäästöihin etenkin Toppila 1 -laitostyöyksikön tapauksessa. Toppila 2:n ilmapäästöt sen sijaan riippuvat voimakkaammin palamisolosuhteista. Selkeimmin polttoaineen koostumuksen vaikutus näkyi rikkidioksidipäästöissä. Polttoaineen typpipitoisuuden vaihtelulla on osittainen vaikutus NO_x-päästöihin, mutta typenoksidipäästöt riippuvat voimakkaasti myös palamisolosuhteista ja tarkan päästölähteen paikantaminen on siten hankalaa. Saatuja tuloksia on mahdollista hyödyntää Oulun Energian Toppilan voimalaitoksen energiaketjun ja tuotantoprosessin suunnittelussa, polttoaineen laadun ennustamisessa sekä prosessin ohjauksessa.

Asiasanat: biopolttoaineet, energiantuotanto, leijukerrospoltto, polttoaineet, puu, päästöt, turve

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Energy Technology

Author: Laura Hulkko

Title of thesis: Utilizing Properties of Power Plant Fuel in Emission Reduction

Supervisors: Heikki Harju-Autti, Heikki Karppimaa and Jukka Ylikunnari

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2016 Number of pages: 79 + 4

This thesis is made in co-operation with Oulun Energia Oy which is a parent company of one of the most remarkable energy corporations in Northern Finland. The company is a commercial enterprise and it is owned by the city of Oulu. Oulun Energia produces and sells electric power and district heat for its customers. 90 % of district heat and 40 % of electric power is produced in Toppila power plant. It is a CHP (Combined Heat and Power) plant consisting of two boilers with fuel powers 265 MW and 315 MW. The Toppila power plant uses fluidized bed as a combustion technique.

Air emissions, especially nitric oxide and sulphur dioxide emissions, can cause several problems for ecosystems, people's health, and the infrastructure in a large area. This makes environmental protection and emission reduction significant international goals. This can be seen in tightened emission limits. Energy companies are facing great challenges since they have to revise their processes in order to use best available techniques to achieve the new limits. The Toppila power plant will receive its new environmental permit in spring 2016 which will lead to actions concerning the planning of energy production process.

Generation of air pollutants mainly depends on two things – the chemical consistence of fuel and combustion techniques. The aim of this thesis is to study fuels used in the power plant, their chemical properties and how those properties affect emissions of the combustion process. The closest study will be for the concentrations of nitrogen and sulphur in the fuel. The goal is to find out what amount of pollutants and percentage of emission originates from the fuel sources.

The study was carried out with chemical analyses of fuel mix and process measurements. A study of correlations between fuel consistence, process parameters, and emissions is also a part of this document. The results show that air emission, especially sulphur dioxide emission, depends strongly on the consistence of fuel. Dependence is stronger in the Toppila 1 power plant than in the Toppila 2 because of differences in combustion technique. On the other hand, the correlation between nitric oxide emission and combustion conditions can be seen more clearly in the case of Toppila 2 plant. Results can be used for predicting the quality of fuel, and knowledge of the fuel's properties can be utilized in planning of combustion process.

Keywords: biofuels, combustion, emissions, energy, fuels, peat, wood

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on osa Oulun ammattikorkeakoulun energiatekniikan koulutusohjelmaa ja sen tilaaja on Oulun Energia Oy. Opinnäytetyö on 15 opintopisteen laajuinen ja se sisältää tämän kirjallisen dokumentin sekä sen pohjalta laaditun posterin. Haluan kiittää opinnäytetyön ohjaajaa Oulun ammattikorkeakoulun energiatekniikan lehtori Jukka Ylikunnaria työn aikana saamastani palautteesta ja ohjauksesta.

Opintojeni aikana ymmärsin, että haluan tulevaisuudessa tarkastella energia-alaa ympäristön ja kestäväen kehityksen näkökulmasta. Kiinnostuin erityisesti polttoaineista, niiden ominaisuuksista ja käytön moninaisista vaikutuksista. Haluan esittää suuret kiitokset Oulun Energia Oy:n polttoainejohtaja Heikki Karppimaalle ja käyttöpäällikkö Heikki Harju-Autille, jotka antoivat minulle haastavan, mutta innostavan aiheen ja sitä myötä tarjosivat mahdollisuuden perehtyä teemoihin, joista olen ollut jo pitkään aidosti kiinnostunut.

Erityiskiitokset ansaitsevat myös tuotannon päivämestari Jarkko Enbuske ja polttoainemestari Paavo Puolitaival. Ilman heidän apuaan tämä opinnäytetyö olisi tuskin koskaan valmistunut. Haluan kiittää myös ympäristöasiantuntija Eila Latolaa, kemistimestari Markku Heikkistä, valvomon poikia sekä laboratorion väkeä.

Kiitokset myös läheisille – perheelle ja ystäville – jotka jaksavat aina kannustaa ja tukea.

Oulussa 13. toukokuuta 2016

Laura Hulkko

SANASTO JA MERKKIEN SELITYKSET

BAT-tekniikka	Ympäristölainsäädännössä määritelty paras mahdollinen käytettävissä oleva tekniikka (Best Available Techniques)
Biopolttoaine	Biomassasta eli orgaanisesta aineksesta valmistettu polttoaine, jota voidaan hyödyntää energianlähteenä.
Eksoterminen reaktio	Lämpöä vapauttava reaktio
Endoterminen reaktio	Lämpöä sitova reaktio
Fossiilinen polttoaine	Polttoaine, joka on syntynyt miljoonien vuosien saatossa, kun kuollut orgaaninen aines on hautautunut merenpohjan sedimentteihin ja jäänyt siten hapettomiin olosuhteisiin.
Hake	Puusta hakkurin avulla tehty palamainen polttoaine
Ilma	Työssä ilmaa käsitellään kaasuseoksena, joka sisältää 79,1 % typpeä ja 20,9 % happea. Ilma sisältää myös pieniä määriä muita kaasuja, jotka jätetään huomiotta.
Kalorimetrinen lämpöarvo	Polttoaineen sisältämän vedyn palamisenergia sekä vedystä ja hapesta syntyneen veden höyrystymisenergia. Tunnetaan myös ylempänä lämpöarvona [MJ/kg].
Kiertoleijutekniikka	Leijukerrospolton muoto, jossa petimateriaali kiertää kattilassa kaasun mukana.
Koksi	Jäännöshiili, joka jää jäljelle polttoaineen haihtuvien ainesosien kaasuunuttua.

Kuplaleijutekniikka	Leijukerrospolton muoto, jossa petimateriaali on kattilassa yhtenäisenä kuplivana kerroksena.
Leijukerrospoltto	Polttotekniikka, jossa kiinteä polttoaine palaa ilman avulla leijutettavassa petissä.
Leijutusnopeus	Leijupetikattilan alaosasta syötettävän ilman virtausnopeus [m/s].
Palaminen	Aineen eksotermisen reaktion hapen kanssa.
Peti	Kattilan pohjalla oleva leijutettava kerros. Materiaalina seos, joka koostuu pääasiassa hiekasta, tuhkasta ja koksista.
Puupolttoaine	Biopolttoaine, joka on valmistettu puubiomassasta eli puusta saatavista kasvinosista.
Päästö	Ihmisen toiminnan aiheuttama aineen, energian tai säteilyn ei-toivottu siirtymä lähteestä ympäristöön.
Savukaasu	Kaasuseos, joka syntyy tulipesässä palamisen ja muiden reaktioiden reaktiotuotteista. Työssä käytetään lyhennettä sk.
Tuhka	Polttoaineen sisältämä palamaton aines
Turve	Biomassa, joka syntyy vuosien saatossa kasviosien maatuessa hapettomissa ja kosteissa olosuhteissa.
Yhteistuotantolaitos	Sähköä ja lämpöä tuottava voimalaitos
Ympäristölupa	Viranomaisen myöntämä lupa, joka sisältää määräyksiä muun muassa toiminnan laajuudesta, päästöistä ja niiden vähentämisestä. Vaaditaan kaikelle toiminnalle, joka aiheuttaa ympäristön pilaantumisen vaaraa, esimerkiksi energiantuotannolle.

Lyhenteet ja merkit

aq	Vesiliuoksessa
BFB	Kuplaleiju (Bubbling Fluidized Bed)
CFB	Kiertoleiju (Circulating Fluidized Bed)
g	Kaasufaasi
n	Normi
p-%	Painoprosentti
Q_{net}	Kalorimetrinen lämpöarvo
s	Kiinteä faasi
v-%	Tilavuusprosentti

Kemialliset kaavat

$CaCO_3$	Kalkki
CaO	Kalsiumoksidi
$CaSO_4$	Kalsiumsulfaatti
$CH\cdot$	Hiilivetyradikaali
C_nH_m	Hiilivety
CO	Hiilimonoksidi

CO ₂	Hiilidioksidi. Väritön, hajuton, mauton ja myrkytön kaasu. Syntyy hiilen palamistuotteena. Voimakas kasvihuonekaasu.
HCl	Vetykloridi
HCN	Syaanivety
HNO ₃	Typpihappo
H ₂ O	Vesi
H ₂ SO ₄	Rikkihappo
NaOH	Natriumhydroksidi eli lipeä
NH ₃	Ammoniakki
N ₂ O	Dityppioksidi. Palamistuotteena syntyvä väritön ilmansaaste ja kasvihuonekaasu. Tunnetaan myös ilokaasuna.
NO	Typpimonoksidi. Väritön ja hajuton, myrkyllinen kaasu. Palamaton ja osittain vesiliukoinen. Typen yleisin palamistuote.
NO ₂	Typpidioksidi. Punaruskea kaasu, jossa terävä ja pistävä haju; myrkyllinen ja syövyttävä. Imee itseensä valoa. Muodostuu palamisessa syntyneen typpimonoksidin hapettua.
NO _x	Typenoksidi
OH	Hydroksidi

SO₂ Rikkidioksidi. Väritön kaasu, jossa ärsyttävä ja pistävä haju; voidaan havaita myös makuna pitoisuuksien ollessa 0,3- 1 ppm. Liukenee helposti veteen. Energiantuotannon ja teollisuuden prosessien päästö.

SO₃ Rikkitrioksidi. Kaasu, joka syntyy rikkidioksidin hapettuessa. Muodostaa rikkihappoa reagoidessaan veden kanssa.

Kreikkalaiset

λ Ilmakerroin

ρ Tiheys

Alaindeksit

kok Kokonais

net Netto

pa Polttoaineen

teor Teoreettinen

tod Todellinen

Luonnonvakiot

N_A Avogadron vakio $\approx 6,022 \cdot 10^{23}$ 1/mol

R Yleinen kaasuvakio 8,314 J/(Kmol)

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT.....	4
ALKUSANAT	5
SANASTO JA MERKKIEN SELITYKSET	6
SISÄLLYS.....	11
1 JOHDANTO	13
2 TAUSTATIETOA OULUN ENERGIASTA	14
2.1 Oulun Energia Oy.....	14
2.2 Toppilan voimalaitos.....	15
2.2.1 Toppila 1	15
2.2.2 Toppila 2.....	16
3 PALAMINEN JA POLTTO	17
3.1 Polttoaineet	19
3.2 Seospoltto	22
4 LEIJUKERROSPOLTTO	24
4.1 Kuplaleijutekniikka.....	26
4.2 Kiertoleijutekniikka.....	27
5 PÄÄSTÖT.....	29
5.1 Typenoksidipäästöt	30
5.2 Rikkipäästöt.....	32
5.3 Päästörajat, -sopimukset ja lupamääräykset	33
5.4 Polttotekniikan vaikutus päästöihin.....	34
5.5 Päästöjen vähentäminen	35
5.5.1 Polttoaineen ominaisuudet.....	35
5.5.2 Prosessikemikaalit	36
5.5.3 Savukaasujen puhdistus	37
6 PÄÄSTÖJEN RIIPPUUUS ERI TEKIJÖISTÄ.....	38
6.1 Päästöjen riippuvuus tehosta ja palamisolosuhteista	38
6.1.1 Toppila 1 -laitosyksikön päästöt	38
6.1.2 Toppila 2 -laitosyksikön päästöt	41
6.2 Päästöjen riippuvuus polttoaineen ominaisuuksista	45

6.2.1	Polttoaineen ominaisuudet ja Toppila 1:n päästöt.....	47
6.2.2	Polttoaineen ominaisuudet ja Toppila 2:n päästöt.....	50
7	TASELASKENTA RIKILLE JA TYPELLE	53
7.1	Vedyn määrä polttoaineessa	53
7.2	Tarvittava teoreettinen ilmamäärä	54
7.3	Palamisesta syntyvät savukaasut.....	55
7.3.1	Savukaasun tilavuus ja koostumus	55
7.3.2	Savukaasun rikkipitoisuus.....	56
8	POLTTOAINEEN RIKKIPITOISUUDEN LAATURAJA-ARVOT	57
8.1	Polttoaineen rikkipitoisuuden laaturaja-arvo Toppila 1 -laitosyksikölle	58
8.2	Polttoaineen rikkipitoisuuden laaturaja-arvo Toppila 2 -laitosyksikölle	59
9	NO _x -PÄÄSTÖN MUODOSTUMINEN	62
9.1	NO _x -päästöt ja palamisilman virtaukset	63
9.2	NO _x -päästöt ja prosessilämpötilat.....	64
10	PÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMINEN PROSESSIKEMIKAALIEN AVULLA	66
10.1	Rikkidioksidin poisto kalkilla	66
10.2	Typenoksidien poisto ammoniakkivedellä	67
11	SAAPUVAN POLTTOAINEEN LAADUN ENNUSTAMINEN.....	69
12	POLTTOAINEEN KÄYTÖN VUOSISUUNNITELMA.....	71
13	TIEDON HYÖDYNTÄMINEN KATTILAN OHJAUKSESSA	73
13.1	Reagointi mahdolliseen päästöpiikkiin.....	73
13.2	Tiedon välittäminen operaattoreille.....	74
14	YHTEENVETO	75
	LÄHTEET.....	77
	LIITTEET	80

1 JOHDANTO

Ympäristön suojeleminen on merkittävä kansainvälinen tavoite. Vallitsevien globaalien ilmasto- ja ympäristökysymysten aikana tulee kiinnittää aiempaa enemmän huomiota tulevaisuuden energiantuotannosta aiheutuviin ilmapäästöihin. Tämä ilmenee jo nyt jatkuvasti tiukentuivissa teollisuuslaitosten ympäristöluvissa ja päästörajoituksissa. Energiayhtiöt ovat haastavan tehtävän edessä pyrkiessään kehittämään prosessejaan nykyaikaiset ympäristövaatimukset täyttäväksi ja parasta mahdollista tekniikkaa käyttäväksi.

Tässä työssä tutustutaan Oulun Energia Oy:n Toppilan voimalaitokseen, lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksessa käytettävään polttotekniikkaan ja polttoaineisiin. Tavoitteena on perehtyä laitoksessa käytettävän polttoaineen kemiallisiin ominaisuuksiin ja niiden vaikutuksiin polttoprosessissa syntyviin päästöihin. Erityistä huomiota kiinnitetään polttoaineen rikki- ja typpipitoisuuteen. Avainkysymyksenä työssä on yksinkertaisesti, paljonko on paljon.

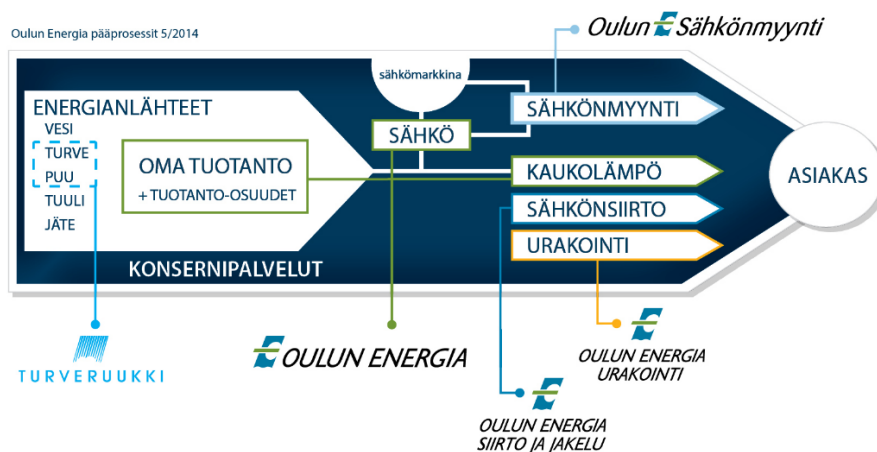
Tavoitteena on selvittää, miten energiantuotantoprosessin rikkidioksidi ja typenoksidipäästöt riippuvat erilaisista tekijöistä sillä niiden muodostumiseen vaikuttavat polttoaineen ominaisuuksien lisäksi myös palamisolosuhteet ja polttotekniset ratkaisut. Rikin ja typen taselaskennalla pyritään selvittämään teoreettinen savukaasun rikkidioksidi- ja typpipitoisuus ja arvioimaan, kuinka suuri polttoaineen rikki- tai typpipitoisuus voisi aiheuttaa mahdollisen päästöraja-arvojen ylityksen normaalissa ajotilanteessa. Työssä selvitetään myös, miten päästöjä voitaisiin vähentää prosessikemikaalien avulla mahdollisimman kustannustehokkaasti.

Taselaskennan ja mittausten pohjalta määritetään polttoaineen rikki- ja typpipitoisuudelle laaturajat. Työssä pohditaan, miten voitaisiin luoda ennuste laitokseen saapuvan polttoaineen ominaisuuksista, ja miten tietoa voitaisiin hyödyntää kattilan ohjauksessa ja ajomallien kehittämisessä. Tavoitteena on luoda yksinkertainen ja havainnollistava malli voimalaitoksen operaattoreiden käyttöön, jotta he saisivat etukäteen tiedon mahdollisista polttoaineen laadun vaihteluista. Tämän pohjalta he voisivat ennakoida tilanteen, muuttaa tarvittaessa kattiloiden ajomalleja ja siten ennaltaehkäistä mahdolliset päästöraja-arvojen ylitykset. Taselaskennassa saatujen tietojen pohjalta kehitetään myös karkea kesällä tuotetun polttoaineen käytön vuosisuunnitelma, jossa otetaan huomioon polttoaineen kosteus ja kemialliset ominaisuudet.

2 TAUSTATIETOA OULUN ENERGIASTA

Tämä opinnäytetyö toteutetaan yhteistyössä Oulun Energia Oy:n kanssa. Yhtiö on Oulun kaupungin omistaman liikelaitoksen Oulun Energia -konsernin emoyhtiö. Toiminta on alkanut jo vuonna 1889 ja tänä päivänä Oulun Energia on yksi Pohjois-Suomen johtavista energiakonserneista. Oulun energia yhtiöitettiin loppuvuodesta 2014 kuntalain muutoksen myötä. Samalla Haukiputaan Energia Oy ja Yli-lin Sähkö Oy sulautuivat osaksi yhtiötä.

Oulun Energia -konsernin tavoitteena on muodostaa yhtenäinen energia-alan kokonaisuus. Konsernin toiminta kattaakin raaka-aineen tuotannon, sähkön ja lämmön tuotannon sekä energian myynnin ja jakelun. Tämän lisäksi toimintaan kuuluvat myös muut energia-alaan liittyvät palvelut: älykkäät energiapalvelut, verkkohallinta, urakointi ja ylläpito. Kuvassa 1 on kuvattu Oulun Energian pääprosessit. Siitä ilmenee myös Oulun Energia Oy:n tytäryhtiöt ja niiden toimialat.



KUVA 1. Oulun Energian pääprosessit (Oulun Energian sisäinen intranet)

2.1 Oulun Energia Oy

Oulun Energia Oy on energiayhtiö, jonka toiminta koostuu energiantuotannosta ja -jakelusta. Yhtiön omistamat voimantuotantolaitokset tuottavat sähköä ja kaukolämpöä. Voimantuotanto on jaettu seuraaville tuotantolaitoksille:

- Laanilan ekovoimalaitos
- Lämpökeskukset
 - Laanila
 - Limingantulli
 - Oulunsuu
 - OYS
 - Pateniemi
 - Vasaraperä
- Merikosken vesivoimalaitos
- Toppilan yhteistuotantolaitos.

Voimantuotantolaitoksista Toppila, Merikoski, ekovoimalaitos ja OYS:n prosessilämpökeskus ovat toiminnassa ympäri vuoden. Muut lämpökeskukset ovat käytössä talvella huippupakkasien aikaan, jolloin energian tarve on kaikkein suurimmillaan.

2.2 Toppilan voimalaitos

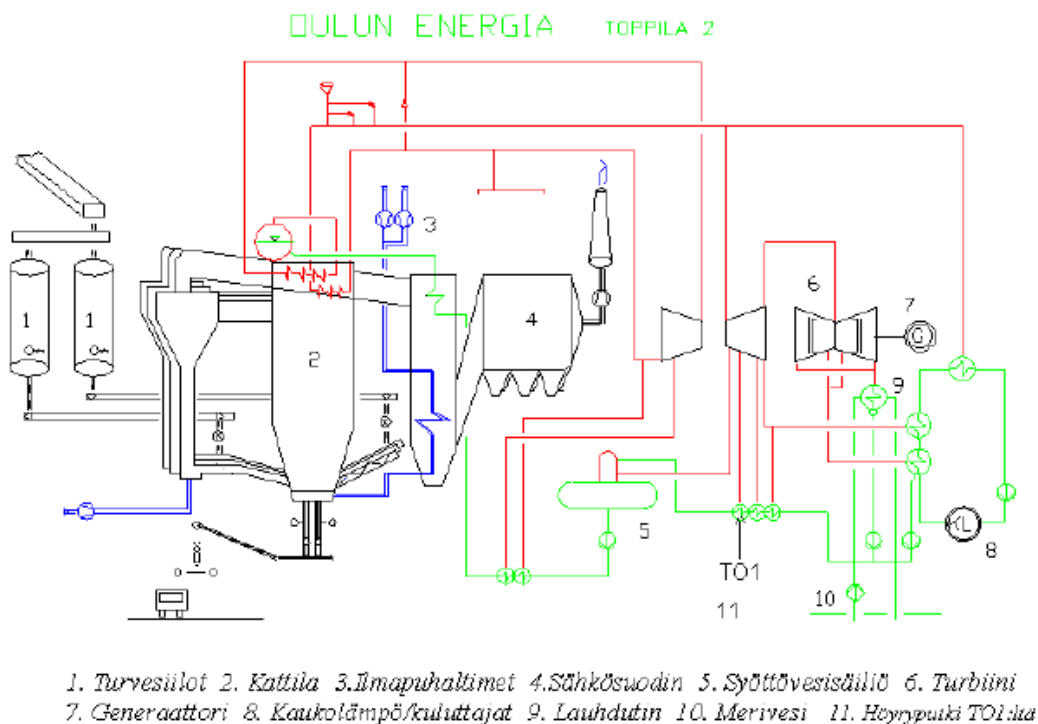
Toppilan voimalaitos on sähkön ja kaukolämmön yhteistuotantolaitos, joka koostuu kahdesta voimalaitosyksiköstä. Molemmat laitosyksiköt käyttävät polttoaineena turvetta ja biopolttoaineita. Laitosalueella sijaitsee myös kaksi huippu- ja varakattilaa, joissa tuotetaan energiaa polttamalla öljyä huippupakkasten ja vakavien häiriötilanteiden aikana. Toppilan voimalaitos tuottaa noin 90 % Oulun Energian hankkimasta kaukolämmöstä ja noin 40 % sähköstä. Vuosina 2009–2013 kaukolämmön tuotanto onkin ollut 1 441–1565 GWh/a. Sähköntuotanto on edellä mainittujen vuosien aikana ollut 644–838 GWh/a.

2.2.1 Toppila 1

Toppila 1 on vuonna 1977 valmistunut vastapainevoimalaitos, jonka polttoaineteho on 265 MW. Laitos saneerattiin mittavasti vuonna 1995, jolloin se myös muutettiin pölypolttokattilasta leijupetikattilaksi, joka hyödyntää kuplaleijutekniikkaa. Voimalaitoksen polttotekniikkaan ja sen ominaisuuksiin perehdytään tarkemmin luvussa 4. Toppila 1 on kuitenkin tulossa käyttökänsä päähän, ja se on suunniteltu korvattavaksi uudella Oulun Laanilaan rakennettavalla laitosyksiköllä lämmityskaudella 2020–2021.

2.2.2 Toppila 2

Vuonna 1995 käyttöön otettu Toppila 2 on voimalaitosalueella sijaitsevista yksiköistä uudempi ja tehokkaampi, ja sen polttoaineteho on 315 MW. Laitos tuottaa yleensä yhteistuotantona kaukolämpöä ja sähköä, mutta sillä voidaan tuottaa lauhdekäytössä pelkkää sähköä kysynnän ollessa korkea. Polttotekniikkana Toppila 2 -yksikössä käytetään kiertoleijutekniikkaa. Prosessikaavio Toppila 2 -laitosyksikön pääprosessista on esitetty kuvassa 2.



KUVA 2. Toppila 2:n pääprosessikaavio (Eskelinen – Pahkala – Rissanen 2009)

3 PALAMINEN JA POLTTO

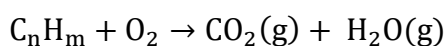
Palamisella tarkoitetaan aineen eksotermisiä eli lämpöä vapauttavia hapettumisreaktioita. Eksotermisessä reaktiossa polttoaineen kemiallinen energia muuttuu lämpöenergiaksi. Palaminen on mahdollista vain, jos kaikki sen edellytykset täyttyvät. Ne ovat

- riittävän korkea lämpötila
- happi
- polttoaine
- esteetön reaktioketju.

Näennäisestä yksinkertaisuudestaan huolimatta palaminen on varsin monimutkainen ja monivaiheinen prosessi. Se voidaan jakaa periaatteellisesti neljään osaan, joka on esitelty luettelossa:

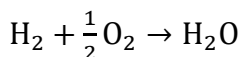
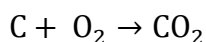
1. polttoaineen kuivuminen ja lämpeneminen
2. pyrolyysi eli haihtuvien aineiden vapautuminen
3. kaasujen syttyminen ja palaminen
4. koksen eli jäännöshiilen hapettuminen.

Polttoaine tuodaan prosessiin useimmiten huoneenlämpöisenä, jolloin se sisältää aina jonkin verran kosteutta. Palamisen ensimmäisessä vaiheessa polttoaineessa oleva vesi haihtuu vesihöyryinä ja kuiva polttoaine lämpenee syttymislämpötilaan. Toisessa vaiheessa eli pyrolyysivaiheessa kuivuneesta polttoaineesta vapautuu palavia kaasumaisia yhdisteitä, kuten vetyä sekä rikki- ja typpiyhdisteitä. Kolmannessa vaiheessa vapautuneet yhdisteet reagoivat korkeassa lämpötilassa hapen (O) kanssa – eli syttyvät ja palavat. Hiilivetyjen palaminen voidaan esittää yksinkertaisena reaktioyhtälönä: (Antila – Karppinen – Leskelä – Mölsä – Pohjakallio 2008; Kilpinen 2002.)

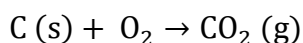


Yhtälöstä nähdään, kuinka hiilivety (C_nH_m) reagoi ilman happimolekyylin (O_2) kanssa, jolloin reaktiotuotteina saadaan hiilidioksidia (CO_2) ja vesihöyryä (H_2O). Reaktioyhtälö voidaan myös pilkkoa

kahteen osaa, jossa esitetään erikseen kiinteän hiilen ja vetykaasun reaktiot hapen kanssa. (Antila – Karppinen – Leskelä – Mölsä – Pohjakallio 2008; Kilpinen 2002.)



Näkyvä liekki syntyy nimenomaan kaasujen palamisesta, sillä kiinteä hiili palaa liekittä. Neljännen palamisen vaiheessa kiinteä jäännöshiili (C) eli koksi reagoi hapen kanssa muodostaen hiilidioksidia. (Antila – Karppinen – Leskelä – Mölsä – Pohjakallio 2008; Kilpinen 2002.)



Koksin palamisesta jäljelle jää enää palamatonta kiinteää aines eli polttoaineen sisältämä tuhka. Usein tuhka kerätään pois kattilasta pohjatuhkana, mutta jossain tapauksessa sitä voidaan myös hyödyntää polttoprosessissa. Esimerkiksi osa leijukerrospoltoissa syntyvästä tuhkasta hyödynnetään peti-materiaalina. Leijukerrospoltoa käsitellään tarkemmin luvussa 4. (Kilpinen 2002)

Palaminen etenee ketjureaktiona. Siinä syntyy ensin vapaita radikaaleja, jotka nopeasti reagoivat edelleen muiden yhdisteiden tai toisten radikaalien kanssa (Antila ym. 2008). Tavallisimpia palamisessa syntyviä radikaaleja on esitetty kuvassa 3 ja ne on merkitty pisteellä.

Syttyminen	Eteneminen	Sammuminen
$\text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3\cdot + \text{H}\cdot$ $\text{O}_2 \rightarrow 2 \text{O}\cdot$	$\text{CH}_4 + \text{H}\cdot \rightarrow \text{CH}_3\cdot + \text{H}_2$ $\text{CH}_4 + \text{HO}\cdot \rightarrow \text{CH}_3\cdot + \text{H}_2\text{O}$ $\text{CH}_3\cdot + \text{O}\cdot \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{H}\cdot$ $\text{CH}_2\text{O} + \text{HO}\cdot \rightarrow \text{CHO}\cdot + \text{H}_2\text{O}$ $\text{CH}_2\text{O} + \text{H}\cdot \rightarrow \text{CHO}\cdot + \text{H}_2$ $\text{CHO}\cdot \rightarrow \text{CO} + \text{H}\cdot$ $\text{CO} + \text{HO}\cdot \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}\cdot$ $\text{H}\cdot + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}\cdot + \text{O}\cdot$	$\text{H}\cdot + \text{R}\cdot \rightarrow \text{RH}$

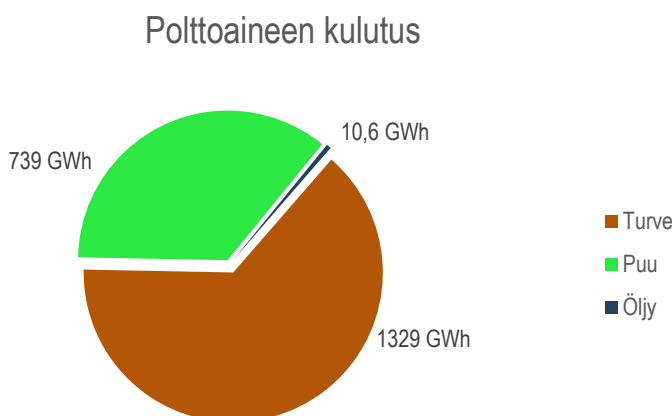
KUVA 3. Ketjureaktiossa syntyviä radikaaleja (R· on mikä tahansa hiiltä sisältävä radikaali) (Antila ym. 2008, 122)

3.1 Polttoaineet

Erlaisissa polttoprosesseissa hyödynnettävät polttoaineet voidaan luokitella uusiutumattomiksi (fossiiliset polttoaineet) tai uusiutuviksi (biopolttoaineet). Sekä fossiiliset polttoaineet että biopolttoaineet sisältävät hiiltä ja vetyä orgaanisina yhdisteinä. Polttoaineen alkuperä ja sen muut ominaisuudet vaikuttavat polttoprosessiin ja sen suunnitteluun sekä laitoksen ympäristölupiin.

Toppilan voimalaitosyksiköissä käytetään polttoaineena pääasiassa jyrshinturvetta ja biopolttoaineita. Turpeen osuus polttoaineseoksesta vaihtelee välillä 60–70 % ja biopolttoaineiden 30–40 %. Tulevaisuuden tavoitteena on kuitenkin päästä tilanteeseen, jossa biopolttoaineiden osuus olisi jopa yli 60 %. (Antila ym. 2008; Ympäristölupahakemus lupamääräysten tarkistamiseksi. 2015)

Eri polttoaineiden käytön vuosijakauma on esitetty kuvassa 4. Vuonna 2014 Toppilan voimalaitoksella tuotetusta energiasta 63,9 % tuotettiin turpeella ja 35,6 % puulla. Polttoöljyä Toppilan voimalaitoksessa käytetään vähän, ja öljyn osuus energiatuotannosta oli 0,5 %. Öljyä käytetäänkin useimmiten vain kattiloiden sytytyspolttoaineena. Kuvaajassa on kuitenkin otettu huomioon myös Toppilan voimalaitosalueella sijaitsevien huippu- ja varakattiloiden käyttämä polttoöljy. (Rasmus 2014.)

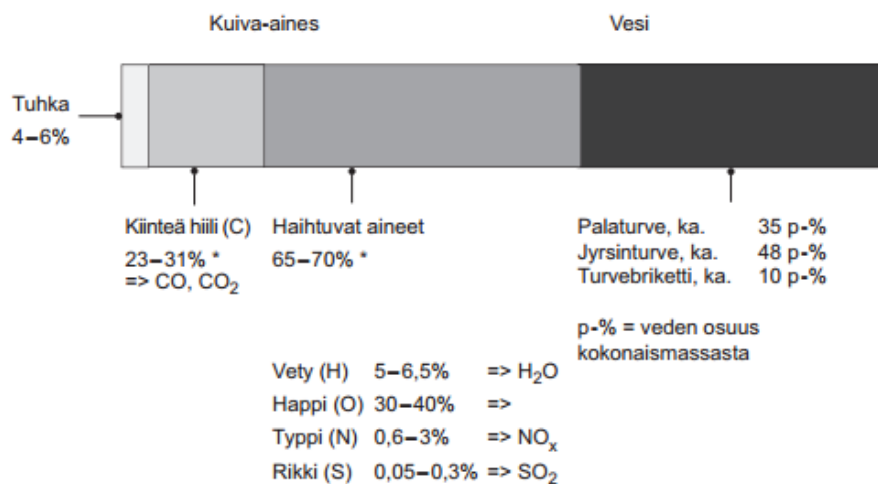


KUVA 4. Toppilan voimalaitoksen polttoaineiden kulutus vuonna 2014

Turve

Turve on polttoaine, jota syntyy kasviosien maatuessa kosteissa ja hapettomissa olosuhteissa. Suomen maaperästä lähes kolmasosa on turvetta, ja tällä hetkellä turvetuotannossa on noin 0,6 %

soista. Toppilan voimalaitokselle turvetta tuottavia soita on 150 ja suurin osa turpeesta tulee voimalaitokselle 80–100 kilometrin säteeltä. Valtaosa polttoaineeksi tuotetusta turpeesta on jyrsinturvetta (90–95 %), mutta jonkin verran tuotetaan myös palaturvetta. Euroopan unioni ja muut kansainväliset tahot ovat luokitelleet turpeen uusiutumattomaksi polttoaineeksi, mutta joissain yhteyksissä sitä käsitellään hitaasti uusiutuvana biomassana. Turpeen koostumus ja kemialliset ominaisuudet riippuvat sen maatumisasteesta ja kasvilajikoostumuksesta. Polttoturpeen keskimääräisestä koostumuksesta on kuitenkin luotu yksinkertainen malli, joka esitetään kuvassa 5. Kuvassa esitetty tuhkapitoisuus 4–6 % vastaa uudelta turvetuotantoalueelta saatavan turpeen tuhkapitoisuutta. Suurin osa Suomen turvetuotantoalueista on kutienkin tätä vanhempia, jolloin turpeen tuhkapitoisuus on usein jopa yli 10 %. (Jokinen – Lahtinen – Leino 2005; Alakangas 2000.)



KUVA 5. Polttoturpeen koostumus (* osuus kuiva-aineen painosta) (Jokinen ym. 2005, 12)

Turpe sopii erittäin hyvin seospolttoon, sillä sen kalorimetrinen lämpöarvo on puupolttoaineita korkeampi (20–23 MJ/kg) ja se sisältää luontaisesti polttoprosessissa tarvittavaa rikkiä. Nämä ominaisuudet osaltaan tekevät siitä Toppilan voimalaitoksen käytetyimmän polttoaineen. Turpeen vuosikulutus oli vuosien 2009–2013 välisenä aikana Toppilan voimalaitoksella 17 700–86 4000 t/a. (Jokinen ym. 2005; Ympäristölupahakemus lupamääräysten tarkistamiseksi. 2015)

Biopolttoaineet

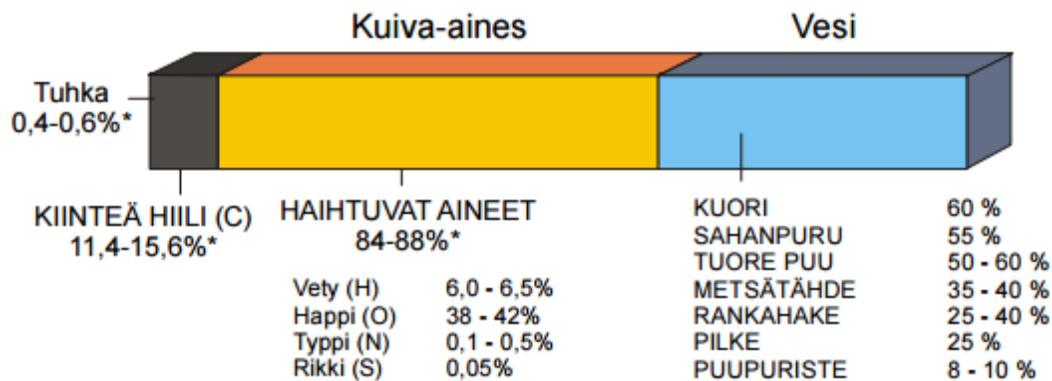
Toppilan voimalaitoksella käytettävä biopolttoaine on puuta. Puupolttoaineet voidaan jakaa kahden ryhmään, metsäpolttoaineisiin ja teollisuuden tähteisiin. Metsäpolttoaineita ovat kokopuu- ja rankahake, metsätähdehake ja kantomurske. Metsäteollisuuden sivutuotteina syntyviä polttoai-

neita ovat taas sahanpuru, kuori, kutterilastu, puutähdehake ja käytöstä poistettu puu. Top-pilan voimalaitoksella on käytetty vuosina 2009–2013 biopolttoaineita 283 000–390 000 t/a ja niistä merkittävimpiä ovat kokopuu- ja rankahake, sahanpuru ja metsätähdehake. (Alakangas 2000; Wood Fuels Basic Information Pack. 2000; Ympäristölupahakemus lupamääräysten tarkistamiseksi. 2015)

Puupolttoaineen lämpöarvo riippuu siitä, mistä puunosasta se on valmistettu ja mikä on polttoaineen tuhkapitoisuus. Yleisimpien puupolttoaineiden kalorimetriset lämpöarvot on koottu taulukkoon 1 ja yksinkertaistettu malli puun koostumuksesta on esitetty kuvassa 6. (Alakangas 2000; Wood Fuels Basic Information Pack. 2000)

TAULUKKO 1. Puupolttoaineiden kalorimetrisiä lämpöarvoja

Puupolttoaine	Q _{net} [MJ/kg]
Metsähake	19 - 21
Kantohake	17 - 19
Sahanpuru	20 - 21



KUVA 6. Puun keskimääräinen koostumus (* osuus kuiva-aineen painosta) (Alakangas 2000)

Biomassoja poltettaessa tulee huomioida, että ne sisältävät muihin polttoaineisiin verrattuna runsaasti alkaliyhdisteitä. Erityisen paljon näitä yhdisteitä on vihreitä kasvinosia ja siten myös klorofylliä sisältävissä biomassoissa, esimerkiksi metsätähdehakeessa. (Aho – Leino – Nevalainen 2013; Alakangas 2000)

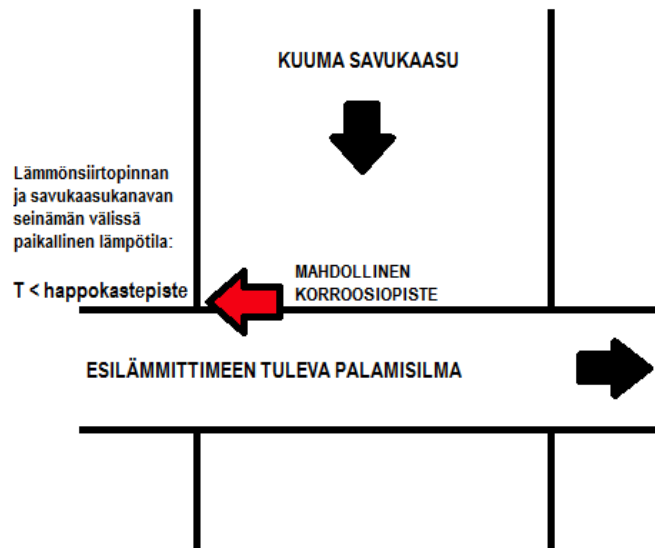
3.2 Seospoltto

Seospoltossa yleisimmin käytettävät polttoaineet ovat turve ja puu, ja kyseinen seos on käytössä myös Toppilan voimalaitoksella. Menetelmässä voidaan käyttää myös muita polttoaineita, kuten fossiilista kivihiiltä tai peltobiomassoja. Öljykin on jossain palamisolosuhteissa mahdollista käyttää osana polttoaineseosta, mutta tavallisesti seos muodostuu kahdesta samassa, useimmiten kiinteässä, faasissa olevasta polttoaineesta.

Seospoltolla saadaan tehokkaasti vähennettyä energiantuotannon hiilidioksidipäästöjä, sillä poltettaessa uusiutuvaa polttoainetta yhdessä fossiilisen polttoaineen kanssa hiilidioksidin kokonaispäästö pienenee. Tämä on merkittävä etu, kun otetaan huomioon alati tiukentuvat päästörajoitukset ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi.

Yksi seospolton peruseriaateista on yhdistää rikki- ja alkalipitoinen polttoaine. Otetaan esimerkiksi rikkipitoisen turpeen ja alkalipitoisen metsätähdehakkeen seospoltto. Metsätähdehakkeessa on mukana klorofylliä eli lehtivihreää sisältäviä neulasia. Vaikka klorofyllimolekyylillä ei itsessään sisällä klooria (Cl), sitä esiintyy usein samoissa kasvinosissa, koska se toimii yhteyttämisen apuna. Polttoaineen sisältämä kloori vapautuu polton yhteydessä joko kaasumaisena vetykloridina tai alkaliklorideina. Alkalikloridit ovat suoloja, jotka sulaaessaan muodostavat likakerroksen kattilan lämmönsiirtopinnoille ja hajoavat korroosiota aiheuttavaksi alkuaineklooriksi. Kun polttoprosessiin lisätään rikkipitoista turvetta, palamisessa syntynyt rikkiatrioksidi (SO_3) alkaa kilpailla kloorin kanssa alkaleista. Rikkiatrioksidi muodostaa alkalien kanssa sulfaatteja, jolloin alkalikloridien muodostuminen vähenee. Jos rikkiä ei saada tarpeeksi polttoaineesta, voidaan sitä syöttää myös suoraan kattilaan. Tässä prosessissa sitoutuva rikki on myös pois savukaasun rikkioksidipäästöistä. (Aho ym. 2013; Alakangas 2000; Hämäläinen – Makkonen 2003; Kilpinen 2002.)

Kaasumainen vetykloridi ei aiheuta prosessissa yhtä merkittävää korroosioriskiä kuin alkalikloridit, jos prosessin lämpötila pidetään happokastepisteen yläpuolella. Vetykloridi saattaa aiheuttaa paikallista korroosiota lämmönsiirtimien lämmönsiirtopinnoilla, mikäli se pääsee tiivistymään. Tämä on mahdollista palamisilman esilämmittimessä, mitä havainnollistetaan myös kuvassa 7.



KUVA 7. Vetykloridin aiheuttama pistekorroosio

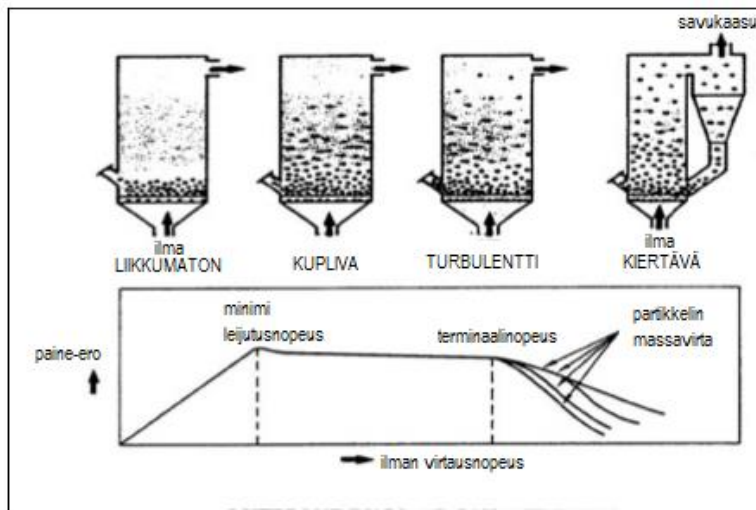
4 LEIJUKERROSPOLTTO

Leijukerrospoltto on kiinteiden polttoaineiden polttamiseen kehitetty polttotekniikka, ja se on nousut kaikkein käytetyimmäksi polttotekniikaksi yhteistuotantolaitoksissa Pohjoismaissa. Leijukerros- poltto käsittää kaksi toisistaan eroavaa tekniikkaa, jotka ovat kuplaleijutekniikka ja kiertoleijutek- niikka. Tärkeimpiä leijukerrospolton etuja ovat muun muassa

- mahdollisuus polttaa kosteaa tai muuten huonolaatuista polttoainetta
- mahdollisuus polttaa useaa polttoainetta samanaikaiseksi
- mahdollisuus polttaa laadultaan vaihtelevaa polttoainetta
- vähäiset päästöt muihin polttotekniikoihin verrattuna
- helppo ja melko ongelmaton säätö kaukolämmön vaatimuksia vastaavaksi. (Huhtinen – Kettunen – Nurminen – Pakkanen 2000; Hyppänen – Raiko 2002; Tornberg 2015)

Leijukerroskattilassa polttoaine palaa petissä, joka muodostuu petihiekasta, tuhkasta ja koksijään- nöksestä. Peti saadaan leijumaan puhaltamalla ilmaa kattilan alaosasta. Ilman virtausnopeutta, jolla petimateriaali saadaan leijumaan, kutsutaan minimileijutusnopeudeksi. Leijutus perustuu sii- hen, että nopeuden kasvaessa ilmavirtauksen painehäviö kasvaa suoraan verrannollisena nopeu- teen. Tietyllä nopeudella painehäviö kasvaa petipartikkelien hydrostaattisen paineen suuruiseksi, jolloin ilmavirtauksen partikkeleihin kohdistama voima on yhtä suuri kuin maan vetovoima. Tällöin petipartikkelit nousevat ilmaan ja alkavat leijua. (Huhtinen ym. 2000.)

Kuvassa 8 on havainnollistettu, miten leijutusilman virtausnopeus vaikuttaa petin paine-eroon, petin tiheyteen ja petipartikkelien liikkeeseen kattilassa. Peti pysyy paikallaan tulipesän pohjalla, kunnes virtausnopeus ylittää minimileijutusnopeuden. Kun leijutusnopeus kasvaa, peti alkaa ensin kuplia. Kun nopeutta kasvatetaan edelleen, petissä olevat kaasukuplat häviävät, ilman virtaus muuttuu turbulenttiseksi ja lopulta petipartikkelit alkavat kulkeutua kaasun mukana virtauksessa. Leijutus- nopeutta, jolla peti alkaa kiertää kattilassa, kutsutaan terminaalinopeudeksi (Huhtinen ym. 2000).



KUVA 8. Petin paine-häviön ja leijutustavan riippuvuus leijutusnopeudesta (Akela – Sharma 2012)

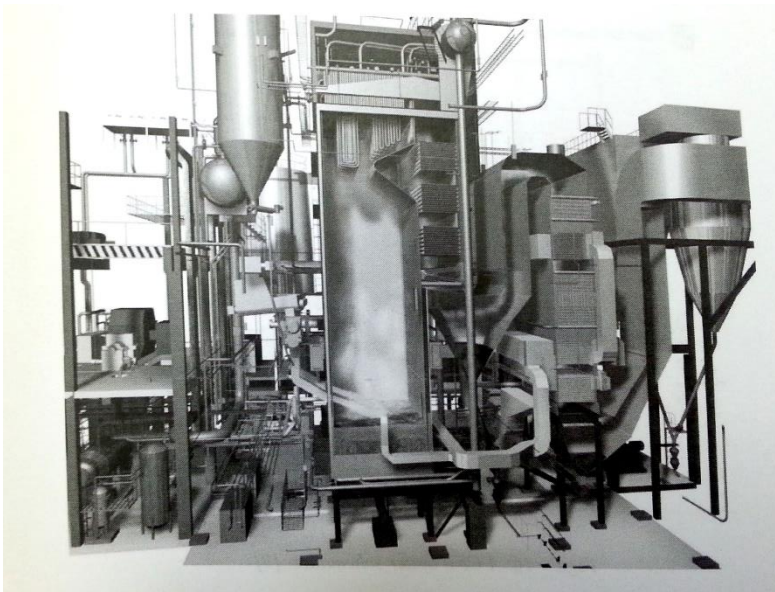
Minimileijutus- ja terminaalinopeudet vaihtelevat jatkuvasti voimalaitoksen ajotilanteen mukaan. Niihin vaikuttavat muun muassa kattilaan ajettava polttoaine, polttoaineen kosteus ja massavirta, petimateriaalin määrä ja koostumus sekä se, onko kyseessä esimerkiksi laitoksen ylös- tai alasajotilanne. (Huhtinen ym. 2000; Hyppänen – Raiko 2002)

Arinasta puhallettava ilma toimii samalla myös prosessin primääri-ilmana. Ilmavirta myös sekoittaa petimateriaalia, mikä tehostaa kaasujen ja lämmön siirtymistä kattilassa. Kattilan lämpötila on keskimäärin 700–950 °C ja sitä kontrolloidaan palamisilman vaiheistuksella. Toppilan voimalaitoksella vaiheistus toteutetaan siten, että kattiloihin tulevasta palamisilmasta noin 50 % on primääri-ilmaa ja 50 % sekundaari- ja tertiääri-ilmoja. Maksimilämpötilan pitäminen maltillisena on tärkeää, sillä petin lämpötila ei saa ylittää tuhkan pehmenemislämpötilaa, jotta kattilaan ei pääse muodostumaan agglomeraatteja. Agglomeraatit ovat sulasta tuhkasta ja hiekasta koostuvia, muuta petimateriaalia isompia partikkeleita, jotka voivat häiritä leijutusta. Tasainen lämpötila myös estää liiallisen lämpörasituksen muodostumista sekä petin sintraantumisen eli petihiekan sulamisen. (Huhtinen ym. 2000; Hyppänen – Raiko 2002; Hämäläinen – Makkonen 2003)

Leijukerrospoltoilla toteutetussa energiantuotantoprosessissa ei yleensä tarvita tukipolttoaineita tai polttoaineen kuivausta, sillä kosteakin polttoaine kuivaa nopeasti ja lämpenee syttymislämpötilaan petimateriaalin korkean lämpökapasiteetin vuoksi. Kattilan käynnistysvaiheessa petin lämmittämiseksi käytetään kuitenkin low-NO_x -öljypolttimia, joita Toppilan voimalaitoksessa on neljä kappaletta kumpaakin kattilaa kohti. (Hyppänen – Raiko 2002; Ympäristölupahakemus lupamääräysten tarkistamiseksi. 2015)

4.1 Kuplaleijutekniikka

Toppila 1 -voimalaitosyksikkö käyttää poltossa kuplaleijutekniikkaa eli BFB-tekniikkaa (Bubbling Fluidized Bed). Tässä tekniikassa peti on kattilassa yhtenäisenä ja selvästi erottuvana kerroksena, jonka paksuus vaihtelee ajotilanteen mukaan. Kun leijutusilman nopeus ylittää minimileijutusnopeuden, petipartikkelien jatkuva kosketus toisiaan kohti katoaa ja ne alkavat liikkua vapaasti toisiinsa nähden. Kun leijutusnopeutta nostetaan, petipartikkeleiden liike aiheuttaa sen, että leijutusilma virtaa petin läpi ilmakuplina. Tämä ilmenee petin ”kuplimisena”. Kaavakuva BFB-kattilasta on esitetty kuvassa 9. (Huhtinen ym. 2000; Hyppänen – Raiko 2002)



KUVA 9. Havainnekuva yhteistuotantolaitoksessa käytettävästä BFB-kattilasta (Tier 2003,39)

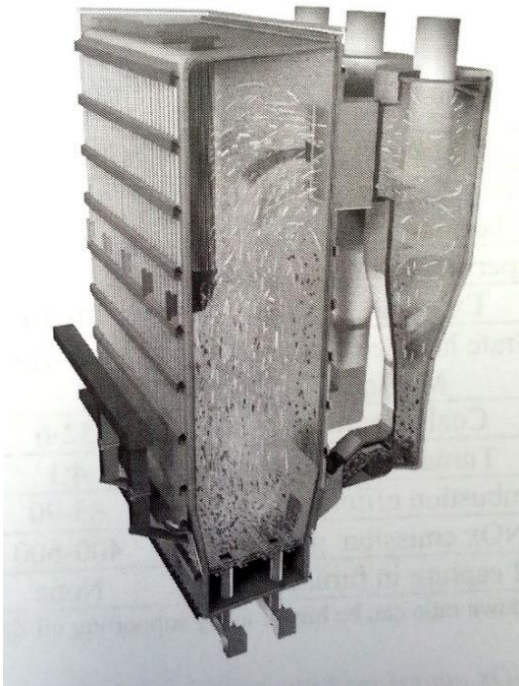
Petipartikkelien raekoko määräytyy käytettävän tekniikan mukaan. Kuplaleijutekniikassa käytettävän petiaineksen raekoon keskimääräinen halkaisija on noin 1 mm. Toppilan voimalaitoksen laboriossa Toppila 1:n kattilan petihiekan raekoon jakaumaa tarkastellaan useana päivänä viikossa aina laitoksen ollessa käynnissä. Tällaisen petimateriaalin leijuttamiseen tarvittava leijutusnopeus on yleensä 1–3 m/s. (Huhtinen ym. 2000)

Polttoaine syötetään petin päälle ja Toppila 1:n kattilassa polttoaine tulee kattilaan tasaisesti useasta kohdasta sen molemmilta sivuilta. Polttoaine tuodaan kattilalle kuljetinta pitkin, josta se pudotetaan sulkusyöttimien läpi tulipesään. Primääri-ilma eli leijutusilma syötetään kattilan alaosasta ja sekundaari- ja tertiääri-ilmot ajetaan kattilaan kahdessa kerroksessa petin yläpuolelta. Tällaisella

ilman vaiheistuksella pidetään kattilan lämpötila tasaisena ja varmistetaan, että palamiseen tarvittavaa happea on riittävästi jokaisessa kattilan osassa. Vaiheistuksella voidaan vaikuttaa myös poltossa syntyviin ilmapäästöihin, joita käsitellään tarkemmin luvussa 5. (Hyppänen – Raiko 2002)

4.2 Kiertoleijutekniikka

Kiertoleijutekniikka eli CFB-tekniikka (Circulating Fluidized Bed) eroaa BFB-tekniikasta siten, että peti ei ole kattilassa yhtenäisenä kerroksena vaan se kiertää kattilassa ilman mukana. Tämä tekniikka on käytössä Toppila 2 -laitosyksikössä. Poikkileikkauskuva kattilasta on esitetty kuvassa 10. Jotta petipartikkelit lähtisivät kiertämään kattilassa, leijutusnopeuden täytyy ylittää partikkelien terminaalinopeus ja leijutusnopeus kiertopetikattiloissa onkin yleensä 8–10 m/s. Leijuminen riippuu myös olennaisesti petipartikkelien koosta, ja kiertoleijutekniikassa käytettävän petimateriaalin keskimääräinen raekoon halkaisija on vain 0,5 mm. Raekoon jakaumaa tarkastellaan laboratoriossa kaksi kertaa viikossa. (Huhtinen ym. 2000)



KUVA 10. Poikkileikkauskuva CFB-kattilasta (Tier 2003,159)

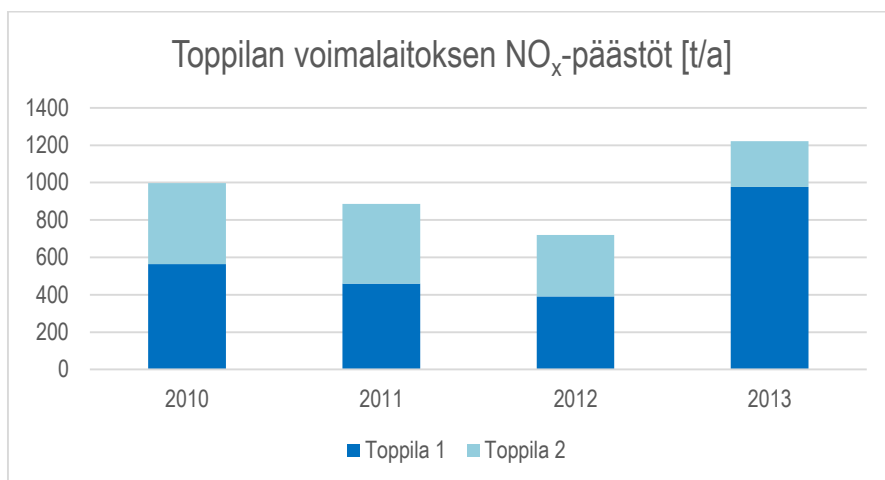
Polttoaine syötetään Toppila 2 -laitoksessa petimateriaalin sekaan kattilan alaosasta siten, että kattilan etuosasta tuleva polttoaine ahdetaan ensin sulkusyöttimillä kuuman petimateriaalin sekaan ja ajetaan sitten kattilaan. Takaosasta syötettävä polttoaine pudotetaan suoraan tulipesään petin

päälle. Toppila 2:n kiertopetikattilan primääri-ilma ajetaan kattilaan arinan suuttimien läpi. Sekundaari- ja tertiääri-ilmot syötetään kattilaan useasta kohdasta sen sivuseiniltä, ja ilman vaihteistuksella huolehditaan riittävästä ilmankierrosta kattilassa. Osa hienosta petimateriaalista poistuu kattilasta savukaasujen mukana ja poistunut aines erotetaan kaasusta syklonien avulla. Toppila 2 -laitoksen kiertopetikattilassa on käytössä kolme kuumasyklonia kiintoaineksen (hiekkä, lentotuhka, koksijäännös) erottamiseksi savukaasuista. Jäljelle jäänyt kiintoaine ohjataan hiekkasiiloon, josta se palautetaan vähitellen takaisin tulipesän alaosaan. (Ympäristölupahakemus lupamääräysten tarkistamiseksi. 2015)

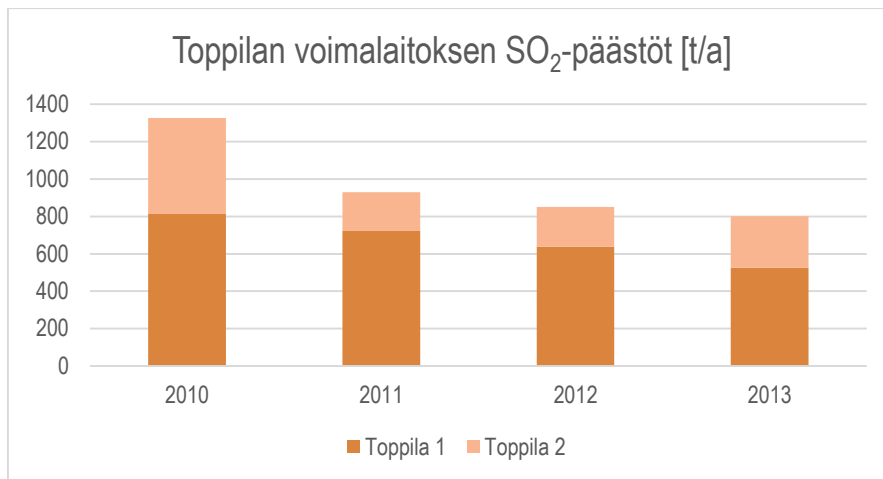
5 PÄÄSTÖT

Voimalaitoksen merkittävimpiä ilmapäästöjä ovat hiili- ja rikkidioksidipäästöt, typenoksidipäästöt ja pienhiukkaspäästöt. Päästöjen määrä vaihtelee tuotannon mukaan. Tässä opinnäytetyössä perehdytään erityisesti polttoprosessissa syntyviin rikki- ja typenoksidipäästöihin sekä mahdollisuuksiin niiden vähentämiseksi ja kontrolloimiseksi. Samalla hiilidioksidi- ja hiukkaspäästöt jätetään työssä huomiotta.

Toppilan voimalaitoksella päästöt mitataan laitoksen piippujen savukaasukanavissa sijaitsevilla päästömittauslaitteistoilla. Päästöjen vuosittaista kehitystä on kuvattu kuvissa 11 ja 12. Vuonna 2014 Toppilan voimalaitoksen peruskuormakattiloiden (Toppila 1 ja Toppila 2) NO_x-päästöt olivat yhteensä 566 tonnia ja SO₂-päästöt 625 tonnia. Etenkin NO_x-päästöt pienenevät huomattavasti vuodesta 2013 ja rikkidioksidipäästötkin laskivat edellisvuoteen verrattuna. (Rasmus 2014; Ympäristölupahakemus lupamääräysten tarkistamiseksi. 2015)



KUVA 11. Laitosyksiköiden typenoksidipäästöt vuosina 2010–2013



KUVA 12. Laitosyksiköiden rikkidioksidipäästöt vuosina 2010–2013

Kaasumaiset ilmapäästöt ovat erityinen ongelma, koska ne kulkeutuvat helposti ilmavirtojen mukana kauas alkuperäisestä päästölähteestään. Paikallinen päästöjen rajoittaminen ei poista ongelmaan kokonaan, sillä kaasujen kaukokulkeutumisesta johtuen päästöt saattavat aiheuttaa ympäristövaurioita laajalla alueella. Päästöjen vähentäminen onkin merkittävä kansainvälinen tavoite. (Kilpinen 2002; lisa – Kilpinen – Yrjas 2002)

5.1 Typenoksidipäästöt

Voimalaitoksien polttoprosessit ovat bensiini- ja dieselmoottorikäyttöisen liikenteen ohella toinen merkittävä typenoksidien päästölähde. Ilmakehään päästessään typen oksidit reagoivat veden kanssa muodostaen typpihappoa (HNO₃), mikä aiheuttaa eliöstölle ja ekosysteemeille haitallista hapanta laskeumaa. Tämän lisäksi maailman suurissa kaupungeissa typenoksidipäästöt aiheuttavat yhdessä liikenteen päästöjen kanssa myös fotokemiallista savusumua eli smogia. (Flagen – Seinfeld 1988; Kilpinen 2002; NO_x emission study – theory and experiences of selected fluidized bed boilers. 2011)

Suurin osa typenoksidipäästöistä on typpimonoksidia (NO), ja sen osuus on ≥ 95 % päästöistä. Polttoprosessissa syntyy myös typpidioksidia (NO₂), jonka osuus päästöistä on ≤ 5 %. Näiden oksidien muodostamista päästöistä puhuttaessa käytetään yleisnimitystä NO_x-päästö. Typpimonoksidi ja typpidioksidi ovat päästövaikutuksiltaan lähestulkoon samanlaiset, sillä valtaosa typpimonoksidista hapettuu ilmakehään päästyään typpidioksidiksi. (Kilpinen 2002; NO_x emission study – theory and experiences of selected fluidized bed boilers. 2011)

Polttoprosesseissa syntyy myös dityppioksidia (N₂O) eli ilokaasua, mutta sen aiheuttamat päästöt ovat yleensä vähäisiä. Niillä on kuitenkin merkitystä, kun polttotekniikkana käytetään leijukerros-polttoa. Dityppioksidin ympäristövaikutukset kuitenkin eroavat muista typenoksideista, sillä se on voimakas kasvihuonekaasu, joka edistää kasvihuoneilmiön kiihtymistä ja siten ilmaston lämpenemistä. Tämän lisäksi ilokaasu aiheuttaa vaurioita myös yläilmakehän otsonikerroksessa. (Kilpinen 2002; NO_x emission study – theory and experiences of selected fluidized bed boilers. 2011)

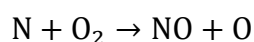
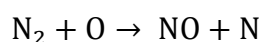
Polttoprosessiin tulee typpeä kahdessa eri muodossa, polttoilmassa olevana molekyylytympeä (N₂) ja polttoaineeseen sitoutuneena orgaanisena tyyppeä (N_{pa}). Polttoaineeseen sitoutunutta typpeä on määrällisesti ilman molekyylytympeä vähemmän, mutta se on paljon reaktiivisempaa. Toppilan voimalaitoksella käytettävän turvepolttoaineen typpipitoisuus on keskimäärin 2,2 p-%. Puupolttoaineiden typpipitoisuudesta ei ole saatavilla mittaustietoa, mutta biopolttoaineiden typpipitoisuus on yleensä pieni, noin 0,1–0,5 p-%. Puun typpipitoisuus on suurin sen kuoriosassa. (Kilpinen 2002; Ympäristölupahakemus lupamääräysten tarkistamiseksi. 2015)

Polttoaineen NO_x

Typenoksidit voidaan luokitella niiden syntymekanismin mukaan. Typpi on haihtuva, joten polttoaineen NO_x:n muodotukseen vaikuttaa polttoaineen typpipitoisuuden lisäksi myös haihtuvien aineiden osuus polttoaineesta. Se, millaisina yhdisteinä typpi on polttoaineeseen sitoutunut, määrittelee myös sen, vapautuuko se alkuainetyyppeä (N) vai molekyylytympeä (N₂). Palamisessa vapautunut alkuainetyppi on huomattavasti reaktiivisempaa kuin molekyylytyppi. Tämä vuoksi polttoaineen NO_x aiheuttaa suurimman osan polton typenoksidipäästöistä. Sen osuus voi olla jopa 80 %. (Kilpinen 2002.)

Terminen NO_x

Termistä hiilimonoksidia muodostuu palamisilman mukana tulleesta tai polttoaineesta vapautuneesta molekyylytympestä kahden reaktion avulla



Vahvan N₂-sidoksen rikkomiseen vaaditaan paljon energiaa, minkä vuoksi reaktio tapahtuu nopeimmin korkeissa lämpötiloissa (1400–1600 °C). Koska kupla- ja kerrosleijutekniikassa palamislämpötila on matala, on termisen NO_x-päästön osuus normaalitilassa vähäinen. Sen osuus voi kuitenkin kasvaa merkittäväksi, jos kattilan lämpötila nousee paikallisesti liian korkeaksi, yli-ilmaa on liikaa tai polttoaineen viipymäaika tulipesässä pitenee. Yleensä termisen NO_x:n muodostuminen aiheutuu kaikkien edellä mainittujen tekijöiden summasta. (Kilpinen 2002)

Nopea NO_x

Nopeaa typpimonoksidia muodostuu tilanteessa, jossa polttoaineen palaminen on vielä kesken. Tämä johtuu siitä, että nopea NO_x muodostuu palamisilman typen reagoiessa hiilivetyradikaalin (CH·) kanssa muodostaen syaanivetyä (HCN) ja alkuainetyyppiä. Nämä reagoivat edelleen ja monien eri reaktiovaiheiden kautta muodostuu typpimonoksidia. Tärkein reaktiopolkku on seuraava:



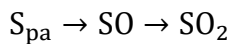
Reaktiopolkun kautta syntynyttä typpimonoksidia kutsutaan nimellä nopea NO_x, sillä reaktionopeus on suuri. Nopean typpimonoksidin osuus leijukerrospolton päästöistä on kuitenkin hyvin pieni ja siten merkityksetön. (Kilpinen 2002)

5.2 Rikkipäästöt

Rikkidioksidia (SO₂) ja rikkitrioksidia (SO₃) muodostuu poltettaessa rikkiä sisältäviä polttoaineita. Suurin osa ihmisen aiheuttamista rikkioksidipäästöistä onkin peräisin fossiilisten polttoaineiden käytöstä energiantuotannossa. Rikkioksidit muodostavat ilmakehän veden kanssa rikkihappoa (H₂SO₄), mikä typpihapon tapaan aiheuttaa ekosysteemeille haitallista ympäristön happamoitumista. Kohonnut rikkihappopitoisuus ilmassa voi aiheuttaa myös hengityselinsairauksia. Ilmassa oleva rikkihappo on haitallista myös infrastruktuurille, sillä se lisää metallien korroosiota ja vaurioittaa myös muita materiaaleja. Suurin osa poltossa vapautuvista rikin oksideista on rikkidioksidia. Rikkidioksidi ja rikkitrioksidi ovat ympäristövaikutusten kannalta samanarvoisia, sillä joutuessaan kosketuksiin ilman kanssa rikkidioksidi hapettuu rikkitrioksidiksi. (Antila ym. 2008; Flagen – Seinfeld 1988; Iisa ym. 2002)

Vaikka rikkiä onkin eniten fossiilisissa polttoaineissa, sitä esiintyy myös biopolttoaineissa. Biopolttoaineiden rikkipitoisuus on kuitenkin hyvin alhainen ja käytännössä merkityksetön. Toppilan voimalaitoksella rikkipäästöt aiheutuvatkin pääosin polttoaineena käytetystä jyrshinturpeesta, jonka rikkipitoisuus voi vaihdella suurestikin tuotantopaikan mukaan. Toppilan voimalaitokselle tuodun turpeen rikkipitoisuus on keskimäärin 0,22 p-%, ja se on sitoutuneena orgaanisiin yhdisteisiin. (Jokinen ym. 2005; Ympäristölupahakemus lupamääräysten tarkistamiseksi. 2015)

Suurin osa polttoaineen rikistä (S_{pa}) vapautuu palamisprosessissa muodostaen oksideja, mutta osa siitä voi kuitenkin sitoutua seospoltossa puun palamisesta syntyvään alkaliseen tuhkaan. Orgaaniset rikkiyhdisteet pilkkoutuvat kuumennettaessa pieniksi molekyyleiksi, jotka reagoivat OH-radikaalien kanssa muodostaen seuraavan hapetusketjun:



Pieni osa rikkidioksidista (SO_2) reagoi edelleen muodostaen rikkiatriksidia. Osa rikkiatriksidista muodostaa yhdessä veden kanssa rikkihappoa. Tämä voi aiheuttaa merkittäviä korroosiovaurioita, jos rikkihappo pääsee tiivistymään pisaroiksi laitteiston pinnoille. Tässä työssä ei perehdytä tarkemmin rikkihapon aiheuttamiin ongelmiin, sillä aihe ei varsinaisesti kuulu tämän opinnäytetyön aihealueeseen. (Flagen – Seinfeld 1988; lisa ym. 2002; Jokinen ym. 2005)

5.3 Päästörajat, -sopimukset ja lupamääräykset

Toppilan voimalaitoksen peruskuormakattiloiden savukaasujen rikkidioksidille ja typenoksideille on asetettu päästöraja-arvot ympäristöluvassa. Luvan on myöntänyt Pohjois-Suomen ympäristölupavirasto 1. helmikuuta 2005 ja Vaasan hallinto-oikeus on antamallaan päätöksellä muuttanut sitä 30. maaliskuuta 2007. Toppilan voimalaitokselle voimassa olevat päästörajat on esitetty taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Toppilan voimalaitoksen savukaasujen päästöraja-arvot

Laitosyksikkö	SO ₂ [mg/m ³ (n)]	NO _x [mg/m ³ (n)]
Toppila1	570	600
Toppila2	500	600

Raja-arvojen noudattamista valvotaan jatkuvatoimisilla mittauksilla ja niistä määritettävien kuukausikeskiarvojen sekä 48 tunnin keskiarvojen perusteella. Valvonnan avulla raja-arvojen ylitykset on saatu vähäisiksi. Ylitykset tapahtuvat yleensä vain ylös- ja alasajotilanteiden tai prosessilaitteiden toimintahäiriöiden yhteydessä. (Ympäristölupahakemus lupamääräysten tarkistamiseksi. 2015)

5.4 Polttotekniikan vaikutus päästöihin

Toppilan voimalaitoksella käytettävän leijukerrospolton etuihin kuuluu poltosta aiheutuvien päästöjen vähäisyys muihin polttotekniikoihin verrattuna. Prosessissa syntyviin päästöihin vaikuttaa, millaisissa palamisolosuhteissa polttoainetta poltetaan. Etenkin prosessissa syntyviä NO_x-päästöjä on mahdollista rajoittaa hyvin pitkälle polttoteknisillä ratkaisuilla. Polttotekniikalla ei ole yhtä suoraa vaikutusta SO₂-päästöjen syntymiseen, mutta rikkidioksidin määrän vähentämiseksi savukaasuista on useita eri menetelmiä. (Iisa ym. 2002; Kilpinen 2002)

Palamisilman vaiheistus

Merkittävimmät leijukerrospolton typenoksidipäästöihin vaikuttavat tekijät ovat polttoaineen laatu, lämpötila ja ilmakerroin eli palamisilman ja täydelliseen palamiseen vaadittavan teoreettisen ilmamäärän suhde. NO_x-päästöjä voidaan vähentää polttoilman vaiheistuksella. Vaiheistuksella pyritään siihen, että polttoaineen sisältämä typpi pelkistyisi haihtuessaan molekyylyitypeksi (N₂) eikä muodostaisi oksideja yhdessä hapen kanssa. Molekyylytppi on melko stabiili, eikä tulipesän alaosassa syntynyt N₂ enää reagoi kovin herkästi hapen kanssa. (Antila ym. 2008; Kilpinen 2002; NO_x emission study – theory and experiences of selected fluidized bed boilers. 2011)

Ilman vaiheistamisella kontrolloidaan myös yli-ilman eli ylimääräisten happiatomien ja -molekyylien määrää tulipesässä, mikä rajoittaa osaltaan oksidien muodostumista. Savukaasun happipitoisuutta seurataankin Toppilan voimalaitoksella jatkuvatoimisilla mittauksilla. Ilman vaiheistus toteutetaan Toppilassa siten, että 50 % palamisilmasta on primääri-ilmaa ja 50 % niin sanottua yläilmaa eli sekundaari- ja tertiääri-ilmoja. Kun yläilma syötetään kattilaan sekundaari-ilman lisäksi myös tertiääri-ilmana, voidaan vähentää NO_x-päästöjä jopa 30 % verrattuna siihen, että ilma syötettäisiin vain sekundaari-ilmana. (Antila ym. 2008; Kilpinen 2002; NO_x emission study – theory and experiences of selected fluidized bed boilers. 2011)

Lämpötilan säätö

Ilman vaiheistuksella pyritään osaltaan pitämään kattilan lämpötila tasaisena, mutta lämpötilan säätämiseksi on myös muita keinoja. Polttoaineen pitäisi tulla kattilaan mahdollisimman tasaisena virtana sen kummaltakin puolelta, jotta endoterminen eli lämpöä sitova kaasuuntumisreaktio ei las- kisi paikallista petilämpötilaa liikaa. Samalla pidetään myös kaasun palamisesta johtuva lämpötilan nousu tasaisena, jotta lämpötila ei pääse paikallisesti kasvamaan liian suureksi kiihdyttäen siten termisen NO_x-päästön muodostumista. Toppila 2:n kattilan alaosassa lämpötila saattaa nousta myös silloin, jos polttoaineen joukossa on suurempia puupartikkeleita, jotka eivät lähde kiertämään petissä kunnolla. Oikea leijutusnopeus vaikuttaa siis osaltaan myös lämpötilan tasaisuuteen.

Jos petin lämpötila kattilassa nousee liian korkeaksi, voidaan lämpötilaa tasata myös savukaasuja kierrättämällä. Tällöin osa kattilasta poistuvista savukaasuista ajetaan takaisin kattilaan sen ala- osasta yhdessä primääri-ilman kanssa. Tämä menetelmä on mahdollista Toppilan voimalaitoksen molemmissa kattiloissa, mutta se on aktiivisessa käytössä vain Toppila 1 -laitosyksikössä.

Vaikka matalampi lämpötila suosii ilokaasun muodostumista, tehdään lämpötilan säätö typpimo- noksidin vähentämiseksi usein ilokaasupäästöjen kustannuksella, sillä N₂O-päästö on muihin päästöihin nähden vähäinen, eikä sitä mitata yhtä aktiivisesti. (Hyppänen – Raiko 2002; Kilpinen 2002; NO_x emission study – theory and experiences of selected fluidized bed boilers. 2011)

5.5 Päästöjen vähentäminen

Suomen valtio on kansainvälisillä sopimuksilla sitoutunut rajoittamaan ja vähentämään aiheuttami- aan ilmapäästöjä. Esimerkiksi Euroopan unioni on laatinut direktiivejä rikkidioksidi- ja NO_x-päästö- jen vähentämiseksi. Toppila 2 -laitosyksikössä sovelletaan ympäristölainsäädännössä määriteltyä BAT-tekniikkaa eli parasta käytettävissä olevaa tekniikkaa (Best Available Techniques), mutta Top- pila 1 -yksikön kattilan rakenteen vuoksi BAT-tekniikan hyödyntäminen ei ole kaikilta osin mahdol- lista (Ympäristölupahakemus lupamääräysten tarkistamiseksi. 2015).

5.5.1 Polttoaineen ominaisuudet

Käytettävän polttoaineen kemialliset ominaisuudet ovat polttotekniikan ohella toinen merkittävä päästöihin vaikuttava tekijä. Yksinkertaisin keino vähentää polttoprosessissa syntyviä NO_x- ja SO₂-

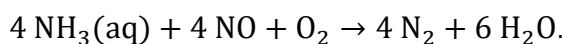
päästöjä on valita polttoaine, jonka typpi- ja rikkipitoisuudet ovat alhaiset. Näin tarkka polttoaineen valikoiminen ei kuitenkaan ole läheskään aina mahdollista.

Vaikka tuhkaa pidetään energiantuotannon kannalta ongelmallisena, sitä tarvitaan prosessissa jonkin verran. Tuhkaa käytetään osana petimateriaalia, koska puupolttoaineista jäljelle jäävä alkalinen tuhka sitoo itseensä rikkiä vähentäen näin SO₂-päästöjä ilmaan. Petimateriaalissa mukana oleva koksijäännös voi joissain pyrolyysiolosuhteissa toimia katalyyttinä typen pelkistysreaktiossa, jolloin NO-päästöt vähenevät typen pelkistyessä molekyylytypeksi. Kaksin toimiminen katalyyttinä on tavallisempaa CFB-kattiloissa kuin BFB-kattiloissa. (Jokinen ym. 2005; Kilpinen 2002)

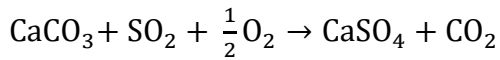
5.5.2 Prosessikemikaalit

Savukaasujen mukana syntyviä ilmapäästöjä on mahdollista säädellä syöttämällä prosessiin lisäkemikaaleja. Kemikaaleja käytetään silloin, kun päästöjä ei saada hallittua tarpeeksi polttoteknisin keinoin tai polttoaineen laatua kontrolloimalla, sillä kemikaalit eivät tuo prosessiin muuta hyötyä ja aiheuttavat energiayhtiölle uuden kustannuserän.

Toppilan 2 -voimalaitosyksikössä on ollut vuodesta 2014 lähtien käytössä SNCR-järjestelmä (Selective Non-Catalytic Reduction), jossa tulipesään voidaan syöttää ammoniakkivesiliuosta yhdessä tai useammassa tasossa typendioksidien sitomiseksi savukaasuista. Menetelmällä voidaan vähentää typpipäästöjä 30–70 %. Menetelmä perustuu ammoniakkin (NH₃) ja typpioksidin (NO_x) väliseen reaktioon, jossa lopputuotteena on vettä (H₂O) ja molekyylytipeä. Reaktio vaatii myös happea, jota saadaan palamisilmasta. (Kilpinen 2002; Ympäristölupahakemus lupamääräysten tarkistamiseksi. 2015.) Reaktio typenoksidien ja ammoniakkin välillä on seuraava:



Rikkidioksidipäästöjen vähentämiseksi voidaan kattilan tulipesään syöttää kalkkikiveä. Kalkin syöttöä voidaan hyödyntää Toppilan voimalaitoksen molemmissa leijupetikattiloissa, joista kumpikin on varusteltu kalkinsyöttölaitteistoilla, jotka mahdollistavat kalkin puhalluksen tulipesään erikseen kattilan etu- ja takaseinältä tai molemmilta seiniltä yhtä aikaa. Kalkkikivihiukkaset (CaCO₃) reagoivat rikkidioksidin ja hapen kanssa muodostaen kalsiumsulfaattia (CaSO₄) ja hiilidioksidia. Tapahtumaa kuvaa seuraava reaktioyhtälö:



Jäljelle jäänyt kiinteä, hienojakoinen kalsiumsulfaatti poistuu kattilasta savukaasujen mukana ja se poistetaan prosessista myöhemmin syklonien ja hiukkassuodattimien kautta. Rikinpoisto kalkin avulla on leijukerrospoltoissa erittäin tehokasta, ja vapautuneesta rikkidioksidista voidaan poistaa jopa 95 %. Tehokkuus johtuu kalkin pitkästä viipymisajasta kattilassa ja poltto prosessin rikinpoiston kannalta optimaalisesta lämpötilasta. Menetelmä aiheuttaa kuitenkin kustannuksia, joiden minimoimiseksi täytyy tehdä töitä kattilaan syötettävän kalkin määrän optimoimiseksi. (Flagen – Seinfeld 1988; lisa ym. 2002; Jokinen ym. 2005; Ympäristölupahakemus lupamääräysten tarkistamiseksi. 2015)

5.5.3 Savukaasujen puhdistus

SO₂-päästöjä voidaan pienentää merkittävästi ajamalla savukaasut savukaasulauhduttimeen. Tällainen lauhdutinlaitos on asennettu Toppila 2 -voimalaitosyksikköön, ja laitoksen rikkidioksidipäästöt ovatkin merkittävästi pienemmät kuin Toppila 1:n. Lauhduttimessa kaasut puhdistuvat tehokkaasti, ja samalla lisätään laitoksen energiatehokkuutta kun savukaasuissa oleva lämpö otetaan talteen. (Ympäristölupahakemus lupamääräysten tarkistamiseksi. 2015)

Lauhdutinlaitoksessa kiertävään vesiliuokseen lisätään natriumhydroksidia (NaOH) eli lipeää fluidin pH:n nostamiseksi neutraalille tasolle. Osa savukaasun sisältämästä happamasta rikkidioksidista sitoutuu nesteeseen ja peseytyy siten pois savukaasuista. Savukaasulauhduttimen suunnitteluvaiheessa sen arvioitiin vähentävän Toppila 1:n rikkidioksidipäästöjä noin 40 %. Poistotehoon vaikuttaa kuitenkin myös savukaasulauhduttimen ajotapa ja fluidiin lisätyn natriumhydroksidin määrä. Koska rikkidioksidin poisto savukaasuista ei ole täydellistä, päästöjen vähentämiseksi on tehtävä toimenpiteitä myös polttoainetta valittaessa. (lisa ym. 2002; Ympäristölupahakemus lupamääräysten tarkistamiseksi. 2015)

6 PÄÄSTÖJEN RIIPPUUUS ERI TEKIJÖISTÄ

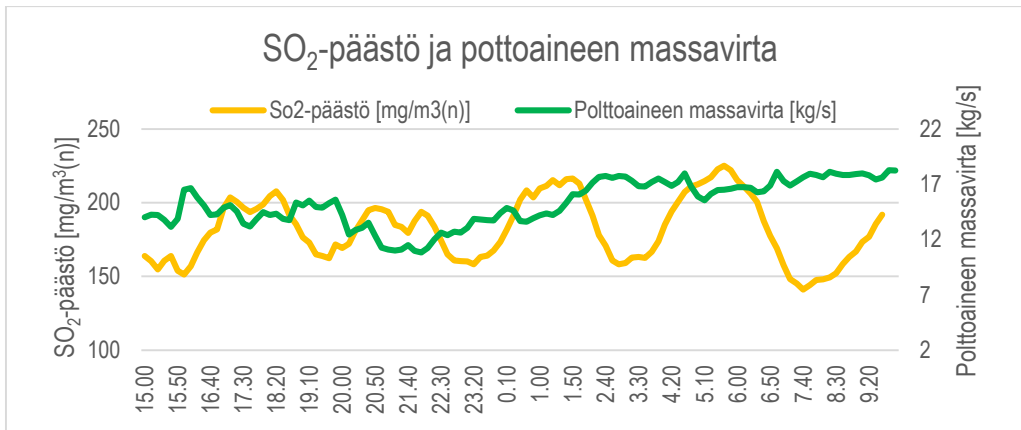
Koska päästöjen määrään vaikuttavia tekijöitä on useita, tutkittiin erilaisia riippuvuustekijöitä ja niiden merkittävyyttä päästöjen muodostumisen kannalta. Selvityksellä pyrittiin hankkimaan tietoa siitä, kuinka suuri osa päästöistä aiheutuu polttoaineen rikki- tai typpipitoisuuden vaihtelusta ja kuinka suuri merkitys polttoteknisillä seikoilla on lopullisten päästöjen muodostumisessa.

6.1 Päästöjen riippuvuus tehosta ja palamisolosuhteista

Toppilan voimalaitoksen päästöjen riippuvuutta erilaisista ajoparametreista ja palamisolosuhteista havainnollistettiin keräämällä prosessitietoja NO_x- ja SO₂-päästöistä, polttoaineen massavirrasta, kattilan keskilämpötilasta ja ilmakertoimesta. Ensimmäisellä mittausjaksolla data kerättiin molemmista laitosyksiköistä kymmenen minuutin välein 22.2.2016 kello 15 - 23.2.2016 kello 10. Saadun datan perusteella laadittiin kuvaajia, joista on havaittavissa riippuvuussuhteita polttoaineen massavirran, palamisolosuhteiden ja päästöjen välillä.

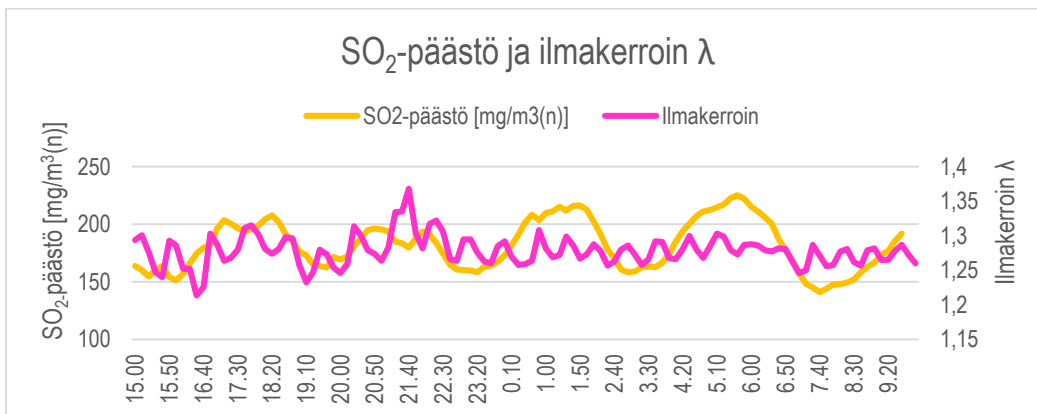
6.1.1 Toppila 1 -laitosyksikön päästöt

Toppila 1:n rikkidioksidipäästöt ovat riippuvaisia polttoaineen massavirrasta ja siten lähes aina myös laitoksen polttoainetehosta. Polttoaineen massavirran ja tehon kasvaessa myös palamista seuraavat päästöt ovat suuremmat. Tämä voidaan huomata kuvaajasta 13, jossa riippuvuudet ovat selkeitä ajankohdissa 15.00 - 23.40. Tämän jälkeen rikkidioksidipäästö vaihtelee suuresti, vaikka polttoaineen massavirta tasaantuu. Vaihtelu johtuu todennäköisesti polttoaineen rikkipitoisuuden vaihtelusta, mikä taas saattaa aiheutua käytetyn puun määrän vaihtelusta.

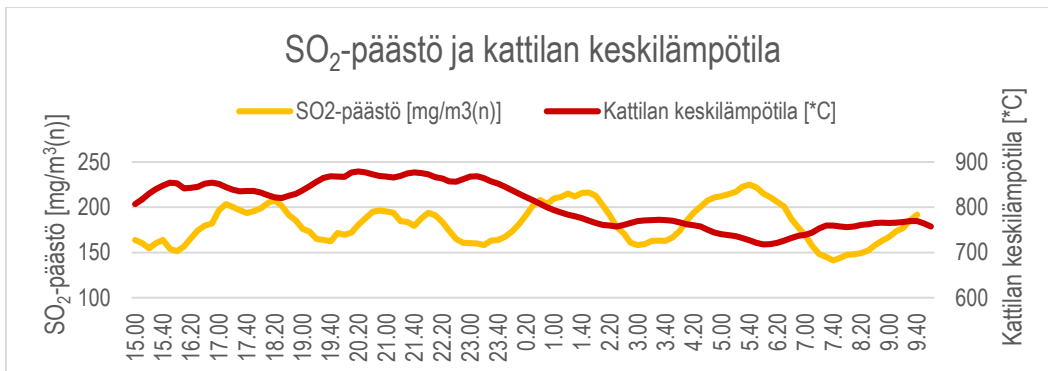


KUVA 13. Toppila 1:n rikkidioksidipäästöt ja polttoaineen massavirta ajan funktiona

Kuten kohdassa 5.4 mainittiin, rikkidioksidipäästöjen ja palamisolosuhteiden – tässä tapauksessa ilmakertoimen ja kattilan keskilämpötilan – välillä ei voida huomata kovin selkeää yhteyttä. Tämä voidaan todeta myös kuvaajista 14 ja 15.

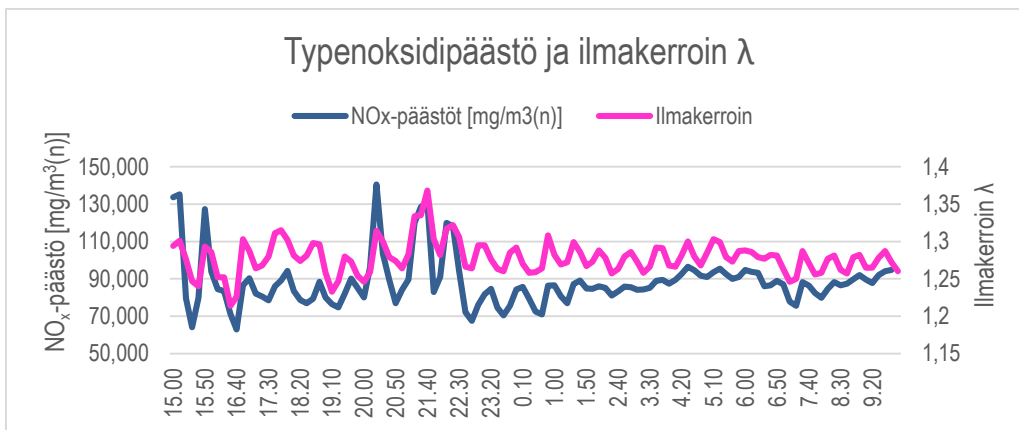


KUVA 14. Toppila 1:n rikkidioksidipäästöt ja ilmakerroin ajan funktiona

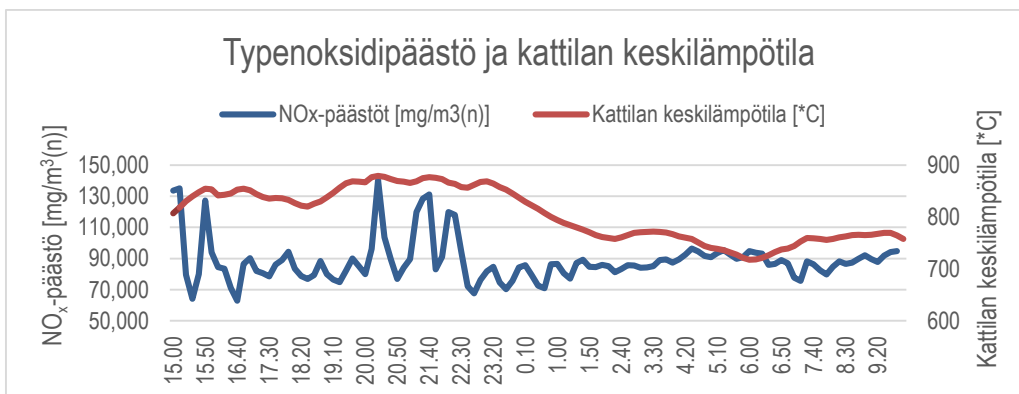


KUVA 15. Toppila 1:n rikkidioksidipäästöt ja kattilan keskilämpötila ajan funktiona

Toisin kuin rikkidioksidipäästöjen tapauksessa, typenoksidipäästöjen ja palamisolosuhteiden välillä on selvä yhteys. Erityisen selvästi on havaittavissa ilmakertoimen vaikutus typenoksidipäästöihin. Kuvasta 16 voidaan nähdä, kuinka ilmakerroin ja NO_x-päästö ovat suoraan verrannollisia toisiinsa. Tämä johtuu termisen NO_x:n muodostumisen kiihtymisestä, kun tulipesässä on enemmän oksidien muodostumiseen tarvittavia vapaita happiatomeja ja -molekyylejä ja ilmaa syötettäessä paikallinen lämpötila kasvaa. Paikallisen lämpötilan nousu nostaa hieman myös kattilan keskilämpötilaa, mikä nähtävissä kuvasta 17.

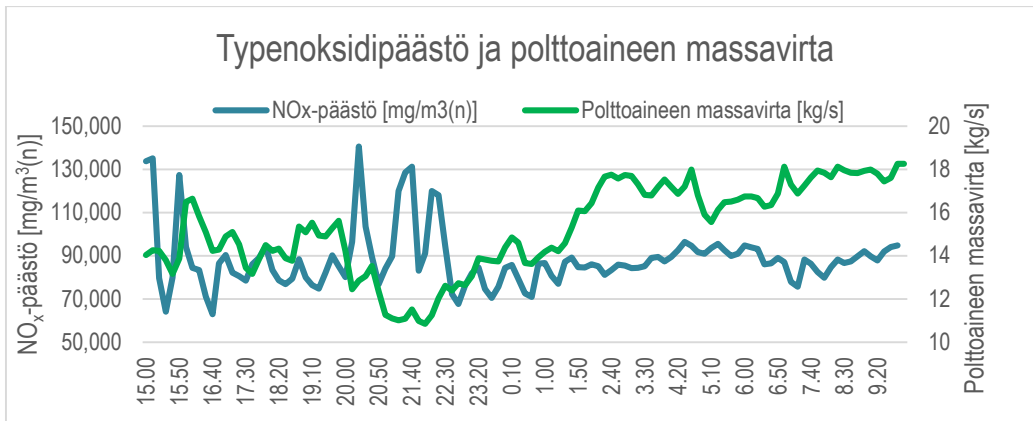


KUVA 16. Toppila 1:n NO_x-päästöt ja ilmakerroin ajan funktiona



KUVA 17. Toppila 1:n NO_x-päästö ja kattilan keskilämpötila ajan funktiona

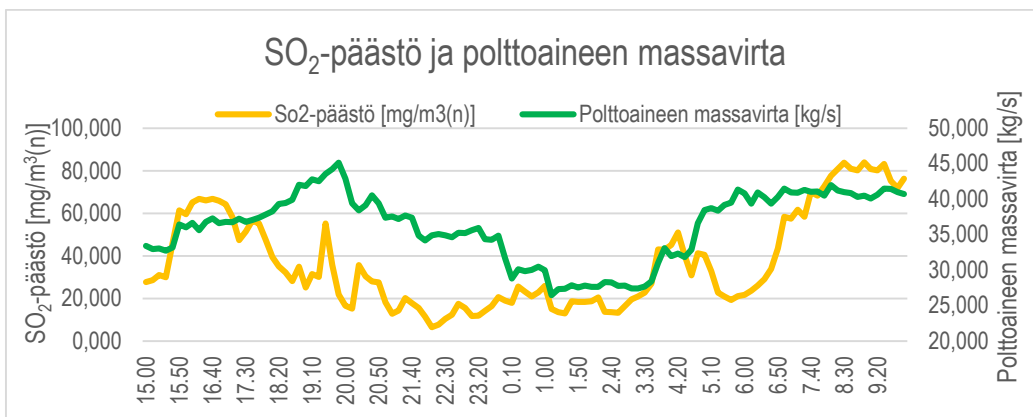
Typenoksidipäästöjen polttoaineen massavirran välillä on myös nähtävissä riippuvuussuhde. Poikkeamat ajanhetkellä 20.20 - 22.20 johtuvat nimenomaan hetkellisestä suuresta ilmakertoimesta ja siten termisen NO_x:n normaalia suuremmasta määrästä. Yhtäkkinen suuri ilmakerroin sen sijaan selittyy polttoaineen vähäisestä määrästä, joka voidaan havaita kuvasta 18. Tilanteessa polttoaineen määrä on luultavasti hetkellisesti pienentynyt merkittävästi, mutta palamisilman määrän säätö on pysynyt edelleen samana.



KUVA 18. Toppila1:n NO_x-päästö ja polttoaineen massavirta ajan funktiona

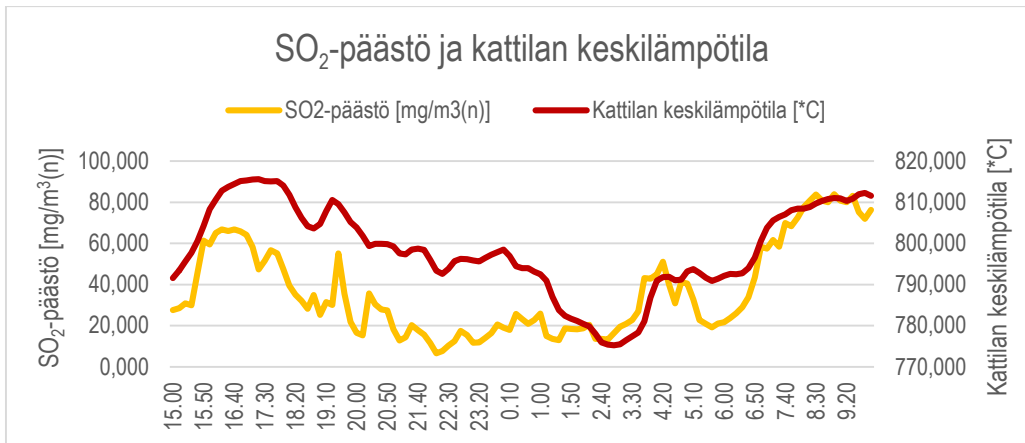
6.1.2 Toppila 2 -laitosyksikön päästöt

Rikkidioksidin muodostumisen ja polttoaineen massavirran välinen suora riippuvuus ei ole ihan yhtä selvä Toppila 2 -voimalaitosyksikössä kuin Toppila 1:n tapauksessa. Tämä on havainnollistettu kuvaajassa 19. Ero selittyy uudempaan laitosyksikköön asennetulla savukaasulauhduttimella, joka vähentää laitosyksikön päästöjä.

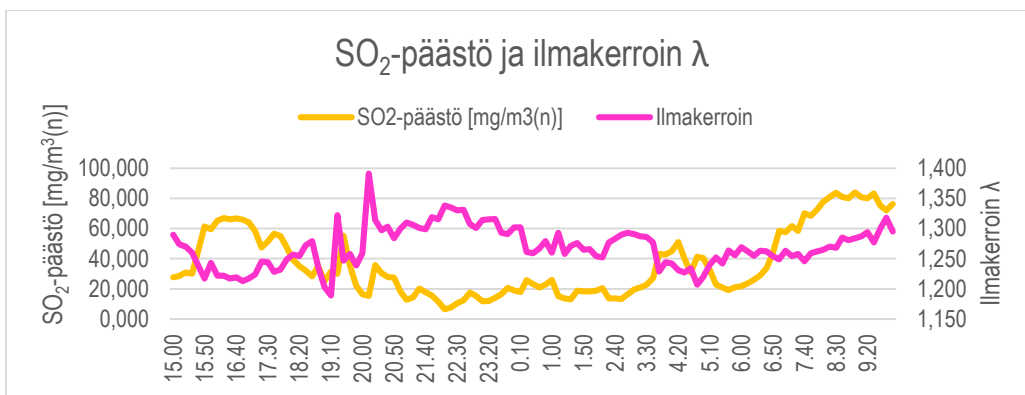


KUVA 19. Toppila 2:n SO₂-päästö ja polttoaineen massavirta ajan funktiona

Kattilan keskilämpötilan ja Toppila 2:n rikkidioksidipäästön välillä on selvä yhteys, joka on nähtävissä kuvasta 20: lämpötilojen noustessa myös rikkidioksidipäästön määrä kasvaa. Tämä johtuu todennäköisimmin polttoaineen suuremmasta määrästä kattilassa, jolloin kattilassa on myös suurempi määrä polttoaineesta haihtuneita palavia kaasuja. Ilmakertoimen ja Toppila 2 -laitosyksikön SO₂-päästön välillä ei kuitenkaan voida havaita riippuvuutta (kuva 21).



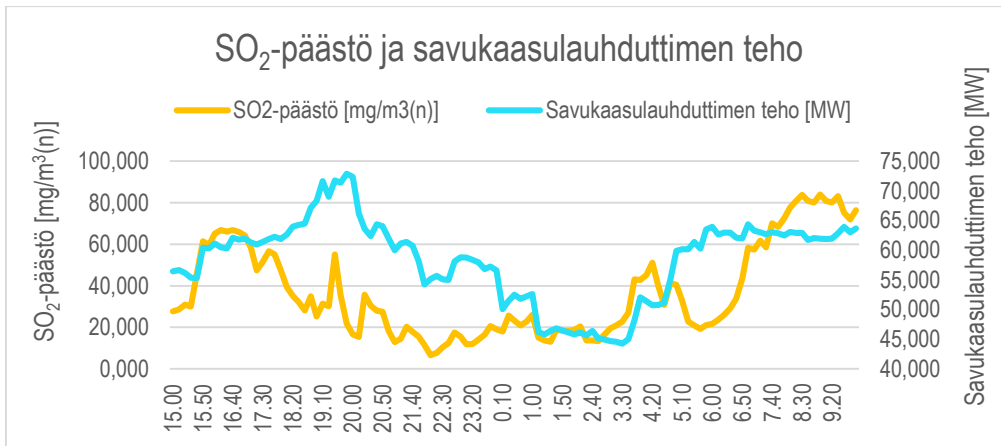
KUVA 20. Toppila 2:n SO₂-päästöt ja kattilan keskilämpötila ajan funktiona



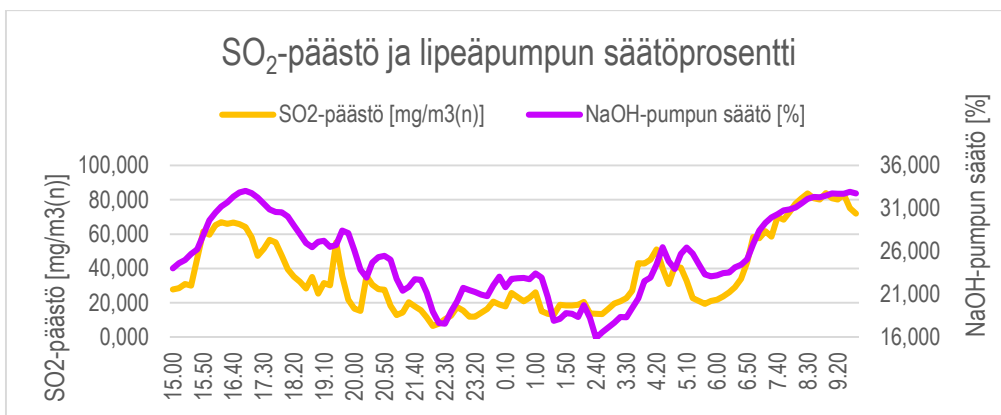
KUVA 21. Toppila 2:n SO₂-päästö ja ilmakerroin ajan funktiona

Kuvaajasta 22 voidaan havaita, miten savukaasulauhduksen teho vaikuttaa jonkin verran SO₂-päästöihin kääntäen verrannollisesti – tehon kasvua seuraa rikkidioksidipäästöjen vähentyminen ja tehon pienentymistä seuraa rikkidioksidipäästöjen lisääntyminen.

Toppila 2:n rikkidioksidipäästöihin vaikuttaa olennaisesti myös lauhduksessa kiertävän nesteen pH. Tätä havainnollistetaan kuvaajassa, jossa esitetään SO₂-päästö ja fluidiin lisättävän lipeän määrää säätelevän pumpun säätö. Kuvasta 23 huomataan, että lisätyn lipeän määrä ja laitoksen päästöt ovat suoraan verrannollisia toisiinsa. Yhteys näiden muuttujien välillä on erittäin vahva, ja fluidin pH:n tasaamiseksi käytettävän lipeän määrä on merkittävin Toppila 2:n rikkidioksidipäästöihin vaikuttava tekijä.

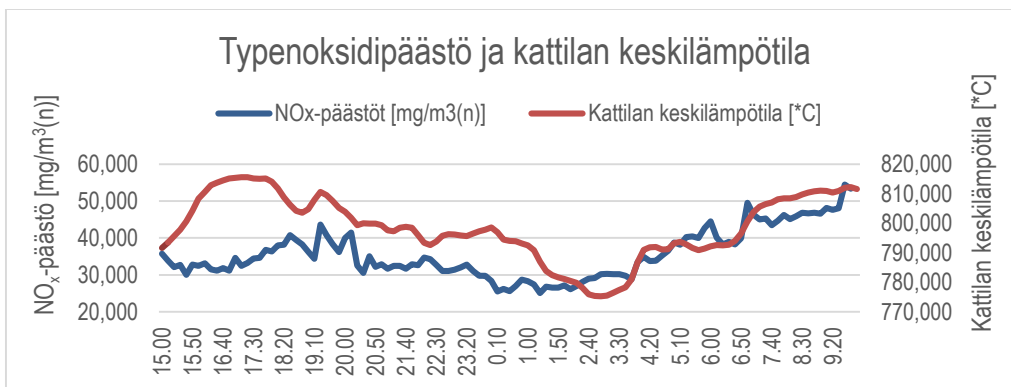


KUVA 22. Toppila 2:n rikkidioksidipäästöt ja savukaasulauhduttimen teho ajan funktiona

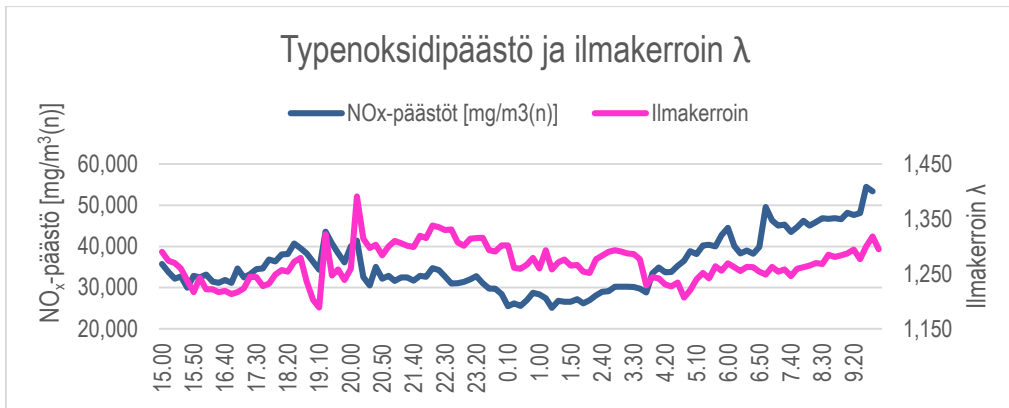


KUVA 23. Toppila 2:n rikkidioksidipäästöt ja lipeäpumpun säätö ajan funktiona

Toppila 2 -laitosyksikön typenoksidipäästöjen ja palamisolosuhteiden välillä on nähtävissä selviä yhteyksiä. Korrelaatio on selkein NO_x -päästön ja kattilan keskilämpötilan välillä, mitä havainnollistetaan kuvassa 24. Ilmakertoimen ja typenoksidipäästöjen välinen yhteys ei kuitenkaan ole yhtä selkeä kuin Toppila 1:n tapauksessa, mutta riippuvuutta on silti nähtävissä kuvassa 25.

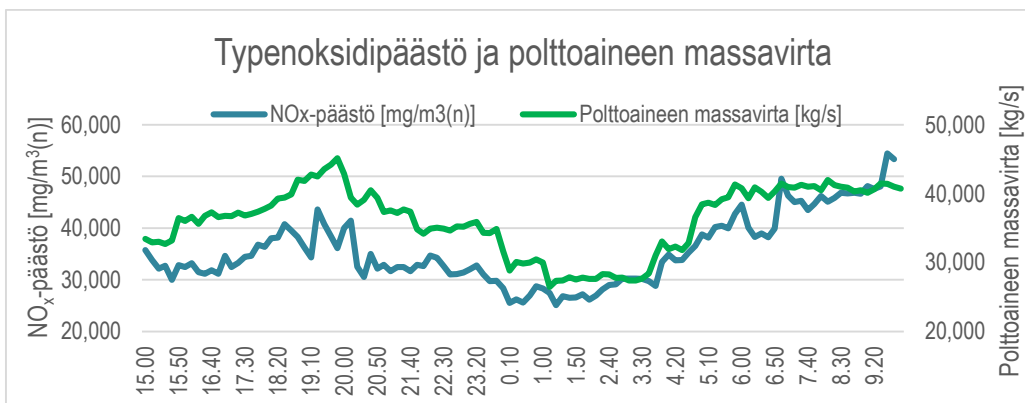


KUVA 24. Toppila 2:n NO_x -päästöt ja kattilan keskilämpötila ajan funktiona



KUVA 25. Toppila 2:n NO_x-päästöt ja ilmakerroin ajan funktiona

Kuvaajassa 26 esitetään polttoaineen massavirran muutoksien vaikutukset NO_x-päästöihin. Yhteys on havaittavissa selkeämmin tässä tapauksessa kuin Toppila 1 -laitosyksikössä, mikä on tuloksena hieman yllättävä. Massavirran vaihtelu vaikuttaa typenoksidipäästöihin kahdella tavalla. Polttoaineen suuri massa voi nostaa lämpötilaa kattilassa niin paljon, että termisen NO_x-päästön määrä lisääntyy. Toisaalta suuren massan mukana voi tulla myös enemmän sellaista polttoainetta, jonka typpipitoisuus on suuri.



KUVA 26. Toppila 2:n NO_x-päästöt ja polttoaineen massavirta ajan funktiona

Kaiken kaikkiaan tuloksien perusteella voidaan todeta, että palamisolosuhteilla on huomattavasti suurempi vaikutus Toppila 2 -laitosyksikön rikkidioksidi- ja typenoksidipäästöihin kuin Toppila 1:n päästöihin. Tulos on odotettu, sillä Toppila 2 -laitosyksikössä käytettävän CFB-tekniikan etuihin kuuluvat päästöjen vähäisyys ja mahdollisuus prosessin tarkkaan kontrollointiin.

6.2 Päästöjen riippuvuus polttoaineen ominaisuuksista

Polttoaineen ominaisuuksien ja päästöjen riippuvuuksien tutkimiseksi järjestettiin kaksi mittausjaksoa. Tutkimuksissa käytetyt polttoainenäytteet haettiin PT17-kuljettimelta, joka jakaa polttoaineen Toppila 1 ja Toppila 2 -laitosyksiköille. Kutakin näytettä punnittiin astiaan noin 300 g ja se kuivattiin lämpökaapissa yön yli, minkä jälkeen sen kosteus laskettiin kaavalla 1.

$$kosteus = \frac{m_{kuiva} - m_{astia}}{m_{kosteaa}} * 100 \% \quad \text{KAAVA 1}$$

missä m_{astia} = punnitusastian massa

m_{kuiva} = kuivan polttoaineen ja punnitusastian yhteismassa

$m_{kosteaa}$ = kostean polttoainenäytteen massa

Kosteuden määrittämisen jälkeen näytteet jauhettiin ja kuivatettiin uudelleen. Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa määritettiin punnitsemalla upokkaaseen noin 1 gramma näytettä ja polttamalla se muhveliuunissa. Tuhkan määrä kuivassa polttoaineesta laskettiin kaavalla 2.

$$tuhkapitoisuus = \frac{m_{tuhka} - m_{upokas}}{m_{näyte}} * 100 \% \quad \text{KAAVA 2}$$

missä m_{upokas} = upokkaan massa

m_{tuhka} = tuhkan ja upokkaan yhteismassa

$m_{näyte}$ = kuivan polttoainenäytteen massa

Näytteet analysoitiin myös Elementar vario MACRO cube -alkuaineanalysaattorilla. Jokaisesta näytteestä tehtiin viisi rinnakkaista mittausta, joiden tuloksien keskiarvosta saatiin selville polttoaineen rikki-, hiili- ja typpipitoisuudet painoprosentteina kuiva-aineessa.

Ensimmäinen, kahden viikon mittainen mittausjakso toteutettiin arkipäivisin 1.3.2016 - 11.3.2016 välisenä aikana. Tällöin polttoainenäyte haettiin kuljettimelta kerran päivässä. Mittausjakson aikana Oulussa vallitsi leuto talvisää, eikä voimalaitosta tarvinnut ajaa huipputehoilla. Analyyseistä saatu data on koottu taulukkoon 3 ja tulokset on ilmoitettu painoprosentteina.

TAULUKKO 3. Toppilan PT17-kuljettimen polttoainenäytteiden ominaisuuksia mittausjaksolla 1.3.2016 - 11.3.2016.

Aika	Kosteus	N	C	S	Tuhka
1.3 11:45	43,7	1,17	52,02	0,169	5,9
2.3 11:45	43,8	0,77	51,53	0,049	3,6
3.3 12:20	41,2	0,62	51,15	0,064	2,9
4.3 10:20	50,2	1,38	52,32	0,090	5,4
7.3 12:40	48,0	1,49	52,25	0,120	6,1
8.3 12:45	47,0	1,06	52,00	0,053	4,0
9.3 12:20	47,7	1,36	51,58	0,081	7,3
10.3 12:10	48,1	1,32	52,19	0,077	5,0
11.3 12:15	48,0	1,85	53,28	0,197	7,2

Toinen mittausjakso järjestettiin 21.3.2016 - 22.3.2016, jolloin laitosta ajettiin suurilla tehoilla kovien pakkasten vuoksi. Tällöin polttoainenäyte haettiin PT17-kuljettimelta neljä kertaa päivässä. Mittaus-
ten tulokset on esitetty painoprosentteina taulukossa 4. Toisen mittausjakson tietoja käytettiin hyväksi myös NO_x-päästön muodostumisen tutkimisessa, mitä käsitellään luvussa 9.

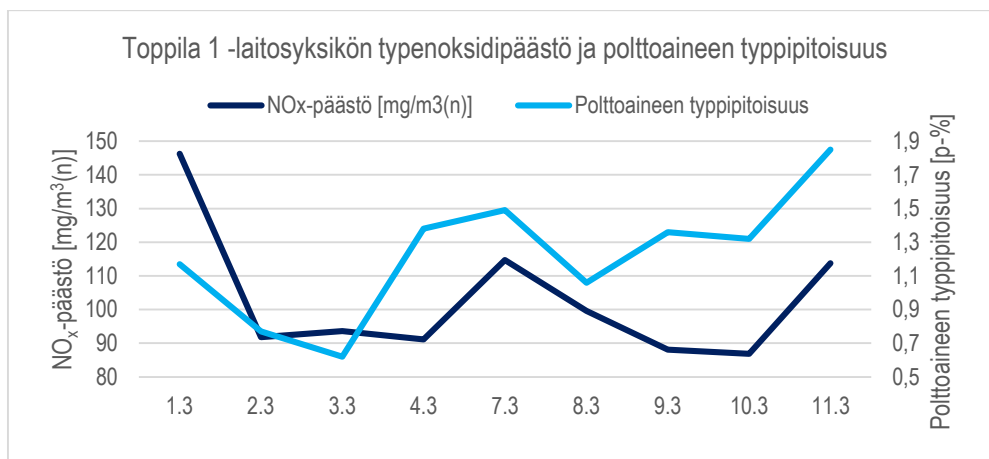
TAULUKKO 4. Toppilan PT17-kuljettimen polttoainenäytteiden ominaisuuksia mittausjaksolla 21.3.2016 - 22.3.2016.

Aika	Kosteus	Tuhka	N	C	S
21.3 07:50	47,4	5,3	0,99	51,42	0,056
21.3 10:05	47,4	8,1	1,58	51,80	0,076
21.3 12:30	48,7	6,9	1,85	52,46	0,134
21.3 14:30	46,9	7,1	1,80	55,35	0,077
22.3 08:05	49,0	6,0	1,92	54,46	0,145
22.3 10:10	50,5	6,3	1,95	56,37	0,125
22.3 12:05	49,7	6,7	2,06	56,31	0,124
22.3 14:50	50,9	7,4	1,97	55,02	0,111

Saatuja tuloksia verrattiin prosessitiedoista saataviin kattiloiden päästöarvoihin. NO_x- ja SO₂-päästöjen arvot on laskettu kuuden mittauksen keskiarvona. Mittaustiedot on luettu kymmenen minuutin välein näytteenottohetkeä seuraavan kolmen tunnin aikana. Määritettyjä polttoaineen koostumuksia käytettiin pohjatietona rikin ja typen taselaskennassa, jossa määritettiin polttoaineen palamisesta syntyvä teoreettinen savukaasun koostumus.

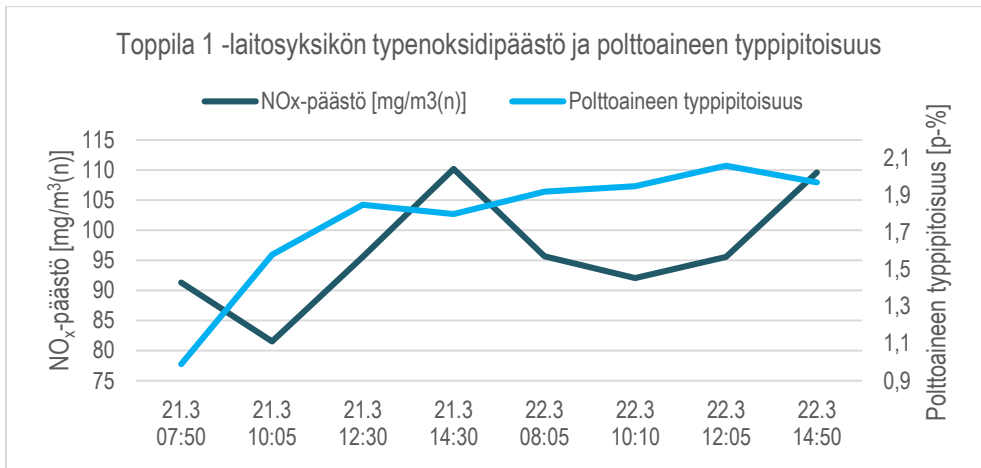
6.2.1 Polttoaineen ominaisuudet ja Toppila 1:n päästöt

Kuvaajasta 27 voidaan havaita, kuinka Toppila 1 -laitosyksikön typenoksidipäästöjen ja polttoaineen typpipitoisuuden välillä on yhteys. Tulos oli odotettu, sillä BFB-kattiloissa korrelaatio päästöjen ja polttoaineen ominaisuuksien välillä on usein vahvempi kuin CFB-kattioissa. Kuplapetikattiloissa voi todennäköisemmin muodostua alueita, joissa typpi pääsee reagoimaan hapen kanssa. Tällöin polttoaineesta pyrolyysissä vapautuva alkuainetyppi muodostaa oksideja typpimolekyylien sijaan. Osa molekyylitypeistäkin reagoi hapen kanssa muodostaen termisen NO_x-päästön.



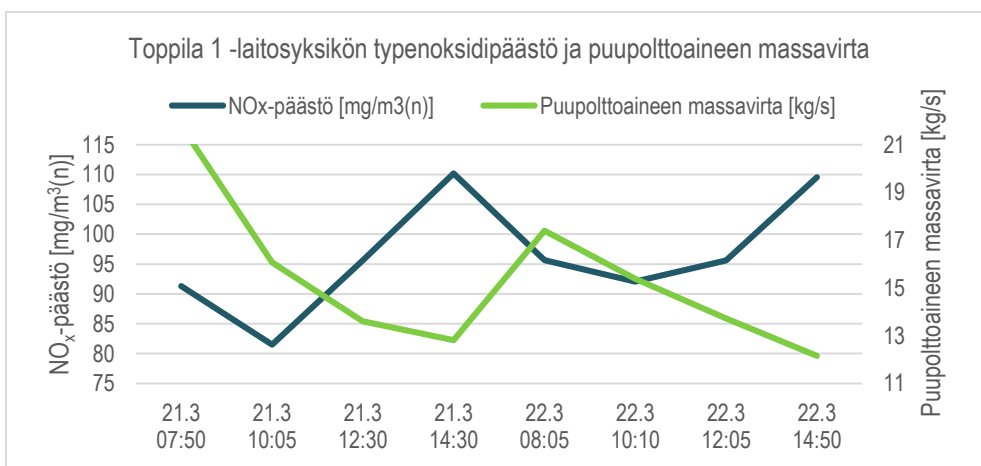
KUVA 27. Toppila 1:n NO_x-päästö ja polttoaineen typpipitoisuus 1.3.2016 - 11.3.2016

Typpipitoisuuden vaikutus Toppila 1:n päästöihin ei ole ihan yhtä selvä toisella mittausjaksolla kuin 1.3.2016 - 11.3.2016. Kuvasta 28 on silti nähtävissä korrelaatio 21.3 kello 7.50 ja 14.30 esiintyviä poikkeamia lukuun ottamatta. Poikkeamat johtuvat muutoksista palamisolosuhteissa.



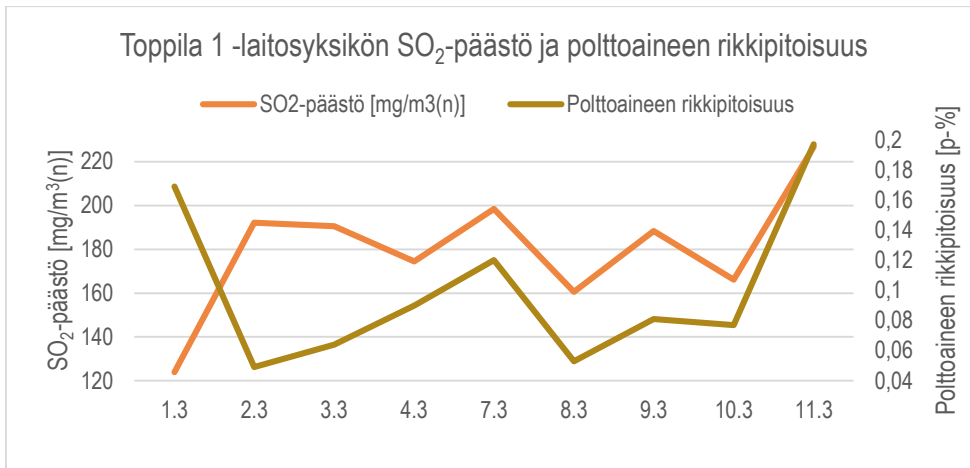
KUVA 28. Toppila 1:n NO_x-päästö ja polttoaineen tyypipitoisuus 21.3.2016 - 22.3.2016

Toisella mittausjaksolla tutkittiin myös, miten käytetyn biopolttoaineen määrä vaikuttaa päästöihin. Vertailu suoritettiin vain Toppila 1 -laitosyksikölle, sillä polttoaine ajetaan suoraan PT17-kuljettimelta Toppila 1:n kattilaan. Toppila 2:n kattilaan menevälle kuljettimelle voidaan PT17-kuljettimen jälkeen ajaa enemmän puuta, jolloin polttoaineseos ei vastaa mitattuja arvoja ja vertailu ei siten ole mielekästä. Kuvasta 29 voidaan huomata, kuinka selvästi puun määrän lisääminen vähentää typenoksidipäästöjä. Tulos on odotettu, sillä puun määrän lisääminen on yksi tärkeimmistä keinoista vähentää NO_x-päästöjä Toppilan voimalaitoksella



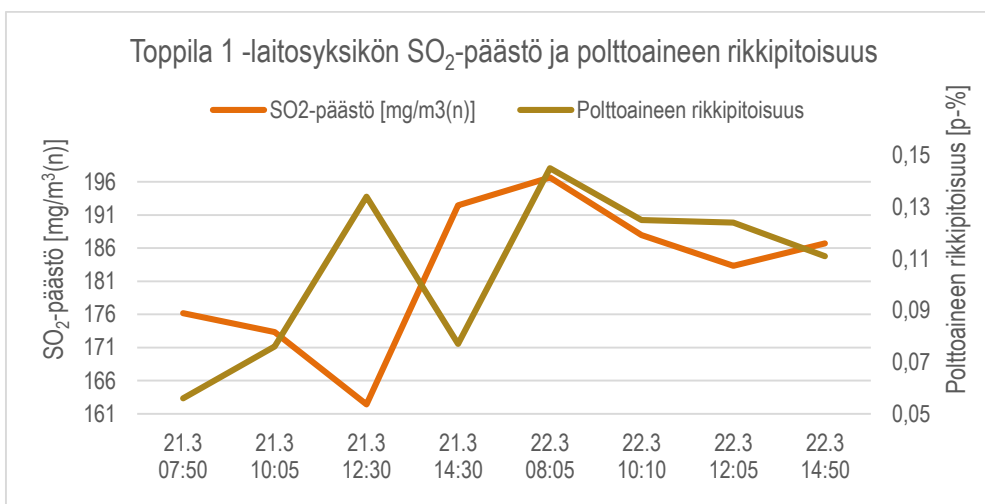
KUVA 29. Toppila 1:n NO_x-päästö ja puupolttoaineen massavirta 21.3.2016 - 22.3.2016

SO₂-päästön ja polttoaineen rikkipitoisuuden välinen yhteys on selvästi nähtävissä kuvaajassa 30 ajankohdasta 4.3. eteenpäin. Ensimmäisen mittausjakson ensimmäisten mittausajankohtien poikkeamat aiheutuvat luultavasti ongelmista näytteenotossa, jolloin PT17-linjan polttoainenäytteeseen on saattanut joutua liikaa haketta eikä näyte siten vastaa täysin todellista tilannetta.



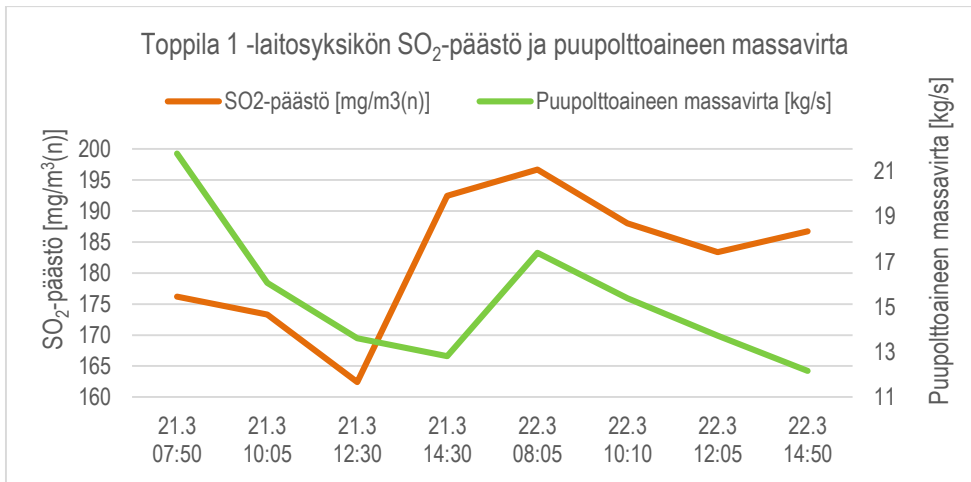
KUVA 30. Toppila 1:n SO₂-päästö ja polttoaineen rikki-pitoisuus 1.3.2016 - 11.3.2016

Kuvaajassa 31 on enemmän poikkeamia rikki-pitoisuuden ja päästöjen välillä kuin kuvaajassa 30. Siitä voidaan kuitenkin huomata, että polttoaineen rikki-pitoisuuden ja SO₂-päästön välillä on yhteys myös toisen mittausjakson aikana. Kuvaajien perusteella voidaan päätellä, että polttoaineen rikki-pitoisuuden vaikutus Toppila 1 -laitosyksikön päästöihin on lähestulkoon sama ajankohdasta ja vallitsevista olosuhteista huolimatta.



KUVA 31. Toppila 1:n SO₂-päästö ja polttoaineen rikki-pitoisuus 21.3.2016 - 22.3.2016

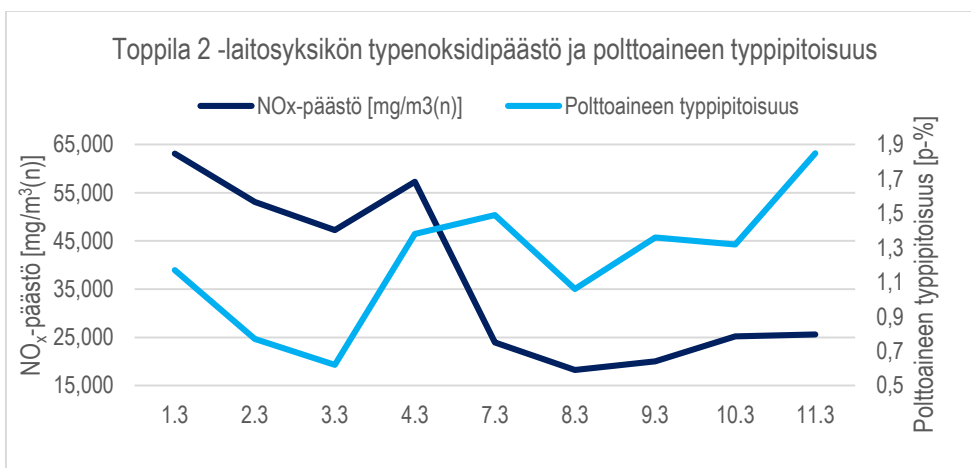
Kuvassa 32 esitetään puupolttoaineen massavirta ja Toppila 1 -laitosyksikön rikkidioksidipäästö. Kun polttoaineeseen lisätään puuta, täytyisi polttoaineen kokonaisrikkipitoisuuden pienentyä. Tämä näkyy kuvaajassa kuitenkin vain muutamissa ajankohdissa. Voidaan todeta, että polttoaineen kokonaisrikkipitoisuuteen vaikuttaa eniten käytettävän turpeen rikki-pitoisuus.



KUVA 32. Toppila 1:n SO₂-päästö ja puupolttoaineen massavirta 21.3.2016 - 22.3.2016

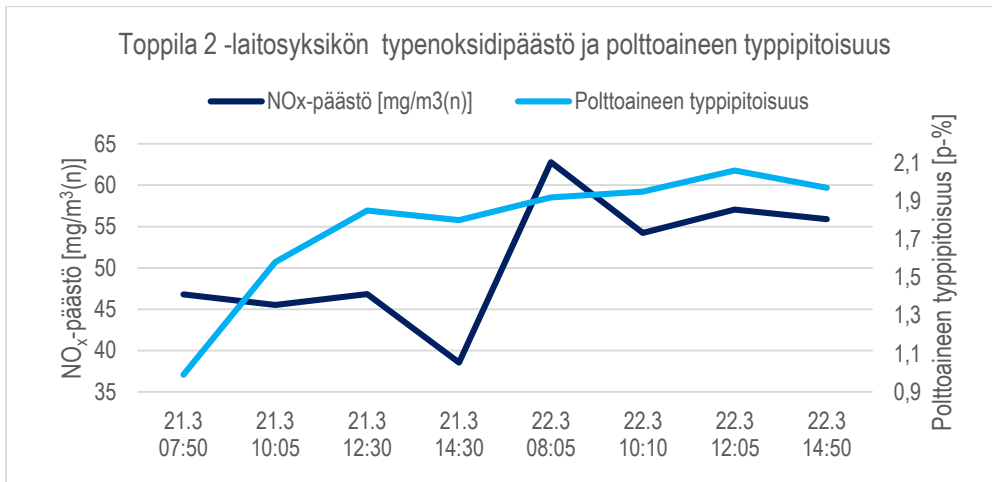
6.2.2 Polttoaineen ominaisuudet ja Toppila 2:n päästöt

Toppila 2 -laitosyksikön NO_x-päästöjen ja polttoaineen ominaisuuksien välillä ei ole yhtä selkeää riippuvuutta kuin Toppila 1:n tapauksessa, mutta jonkinlaista korrelaatiota on havaittavissa. Tämä esitetään kuvissa 33 ja 34. Heikompi riippuvuus johtuu tehokkaasta ilmankierrosta CFB-kattilassa, mikä vähentää typenoksidien muodostumiselle suotuisten alueiden syntymistä kattilassa.



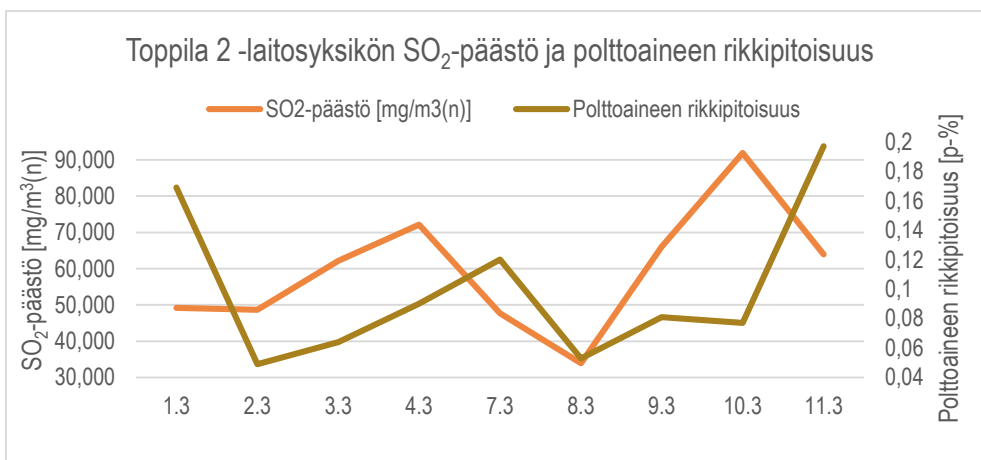
KUVA 33. Toppila 2:n NO_x-päästö ja polttoaineen typpipitoisuus 1.3.2016 - 11.3.2016

Polttoaineen typpipitoisuuden merkitys NO_x-päästöjen aiheuttajana kuitenkin korostuu, kun voimalaitosta ajetaan suuremmilla tehoilla esimerkiksi pakkasten aikaan. Tämä nähdään kuvaajasta 34, jossa NO_x-päästön ja polttoaineen typpipitoisuuden välillä on selvä yhteys. Poikkeamat 21.3. kello 14.30 ja 22.3. klo 08.05 johtuvat muutoksista palamisilman virtauksissa, mitä käsitellään tarkemmin luvussa 9.



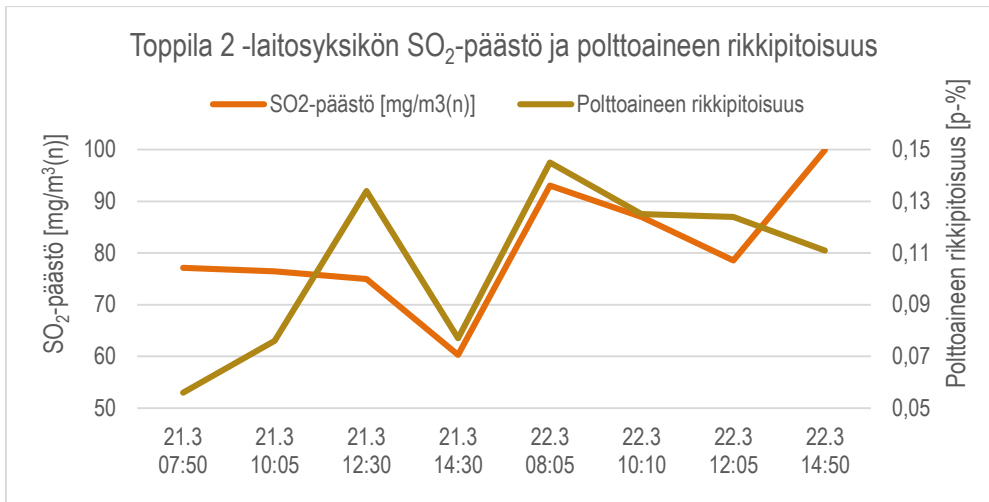
KUVA 34. Toppila 2:n NO_x-päästö ja polttoaineen typpipitoisuus 21.3.2016 - 22.3.2016

Toppila 2 -laitosyksikön savukaasulauhdutin vaikuttaa merkittävästi rikkidioksidipäästöjen määrään. Kuvasta 35 voidaan huomata, että SO₂-päästö vaihtelee melko suuresti aikavälillä 2.3.2016 - 10.3.2016, vaikka polttoaineen rikkipitoisuus pysyy jotakuinkin tasaisena. Polttoaineen ominaisuudet eivät siis vaikuta SO₂-päästöihin ratkaisevasti, kun olosuhteet ovat samankaltaiset kuin ensimmäisen mittausjakson aikana.



KUVA 35. Toppila 2:n SO₂-päästö ja polttoaineen rikkipitoisuus 1.3.2016 - 11.3.2016

Toisella mittausjaksolla polttoaineen laadun vaikutus on selvempi myös SO₂-päästöihin Toppila 2 -laitosyksikössä. Tämä voidaan huomata kuvaajasta 36, jossa korrelaatio rikkidioksidipäästön ja polttoaineen rikkipitoisuuden välillä on selvästi nähtävissä.



KUVA 36. Toppila 2:n SO₂-päästö ja polttoaineen rikkipitoisuus 21.3.2016 - 22.3.2016

Saaduista tuloksista voidaan havaita, että polttoaineen kemialliset ominaisuudet näkyvät selkeämmin Toppila 1 -laitosyksikön päästöissä laitoksen tehosta riippumatta. Toppila 2:n päästöissä eri alkuaineiden pitoisuuksien vaikutukset näkyivät selvästi vain toisen mittausjakson aikana. Tulos on odotettu, kun ottaa huomioon kattiloissa käytettävät polttotekniikat ja luvussa 6.1 esitetyt tulokset laitosten ilmapäästöjen ja palamisolosuhteiden riippuvuuksista.

7 TASELASKENTA RIKILLE JA TYPELLE

Tässä dokumentissa esitetty taselaskelma suoritettiin kaikille polttoainenäytteille. Laskennan pohjaksi luotiin savukaasulaskuri (liite 1), josta saadaan syntyvien päästöjen teoreettinen määrä syötämällä laskentataulukkoon polttoaineen kosteus, koostumus ja kattilan ajotiedot näytteenottohetkellä. Taselaskelma suoritettiin yhdelle kilolle polttoainetta.

7.1 Vedyn määrä polttoaineessa

Taselaskentaa varten määritettiin koostumus kostealle polttoaineelle. Koska polttoaineessa olevan vedyn määrää ei voida mitata alkuaineanalyysointilla, täytyy se laskea polttoaineessa olevan hiilen määrän pohjalta. Oletetaan, että polttoaineen hiili ja vety ovat kokonaisuudessaan sitoutuneet hiilivetyinä. Laskennan perustana on tieto, että hiilivedylle C_nH_m on voimassa kaava 3.

$$m = 2 * n + 2 \quad \text{KAAVA 3}$$

Missä $m =$ vetyatomien määrä
 $n =$ hiiliatomien määrä

Kaavan 4 avulla on mahdollista laskea, kuinka monta kappaletta hiiliatomeja yksi kilogramma polttoainetta sisältää.

$$\frac{m * N_A}{M} \approx \text{kappaletta ainetta} \quad \text{KAAVA 4}$$

missä $N_A =$ Avogadron vakio $\approx 6,022 * 10^{23} [1/mol]$
 $m =$ aineen massa [g]
 $M =$ aineen moolimassa [g/mol]

Kun hiiliatomien määrä polttoaineessa tiedetään, kaavan 3 perusteella lasketaan vetyatomien määrä polttoaineessa. Tämän jälkeen voidaan laskea polttoainekilon sisältämän vedyn massa kaavalla 4 ja määrittää vedyn massaosuus kosteasta polttoaineesta

7.2 Tarvittava teoreettinen ilmamäärä

Tässä opinnäytetyössä ilmaa käsitellään kaasuseoksena, jonka koostumuksesta 79,1 % on typpeä ja 20,9 % happea. Todellisuudessa ilma sisältää pieniä määriä myös muita kaasuja, kuten argonia ja hiilidioksidia, mutta ne jätetään laskennassa huomiotta.

Jokaiselle polttoaineen palavalle komponentille voidaan erikseen laskea happimäärä, joka tarvitaan aineen täydelliseen palamiseen. Laskenta perustuu palamisen reaktioyhtälöihin. Ensinnäkin jokaiselle komponentille lasketaan ainemäärä kaavan 5 avulla.

$$n = \frac{m}{M} \quad \text{KAAVA 5}$$

missä $n = \text{ainemäärä [mol]}$

$m = \text{aineen massa}$

$M = \text{aineen moolimassa}$

Reaktioyhtälöistä voidaan huomata, että hiilen ja rikin palamiseen tarvitaan yhtä monta moolia happea kuin mitä kyseistä palavaa ainetta on polttoaineessa. Vedyn palamiseen happea tarvitaan puolet vedyn ainemäärästä. Näiden hapen ainemäärien summana saadaan polttoaineen täydelliseen palamiseen tarvittava hapen teoreettinen kokonaisainemäärä.

Laskennassa täytyy kuitenkin huomioida polttoaineen sisältämä happi. Polttoaineen koostumuksesta puuttuvan prosenttiosuuden voidaan olettaa olevan happea. Tämä on realistista huomioiden kappaleessa 3.1 esitetyt polttoaineen koostumukset. Polttoaineen sisältämän hapen ainemäärä voidaan vähentää palamisesta tarvittavasta teoreettisesta happimäärästä. Näin saadaan kaavalla 6 teoreettinen ainemäärä palamisilman mukana tuotavalle hapelle.

$$n(O_2)_{teor} = n(C) + \frac{1}{2} * n(H) + n(S) - n(O_2)_{pa} \quad \text{KAAVA 6}$$

Kun ilman koostumus tunnetaan, voidaan laskea sen sisältämän typen ainemäärä ja siten palamisen tarvittaman ilman teoreettinen ainemäärä kaavojen 7 ja 8 avulla.

$$n(N_2)_{teor} = \frac{79,1}{20,9} * n(O_2)_{teor} \quad \text{KAAVA 7}$$

$$n(\text{ilma})_{\text{teor}} = n(N_2)_{\text{teor}} + n(O_2)_{\text{teor}} \quad \text{KAAVA 8}$$

7.3 Palamisesta syntyvät savukaasut

Savukaasujen määrään lasketaan hiilen, vedyn ja rikin palamistuotteet. Reaktioyhtälöiden perusteella voidaan todeta, että hiilidioksidia, vettä ja rikkidioksidia syntyy reaktioissa yhtä monta moolia, kuin mitä palavaa ainetta on polttoaineessa. Savukaasuja ovat myös ilman mukana tuleva ja polttoaineesta vapautuva molekyylylityppi sekä polttoaineen sisältämän veden muodostava vesihöyry. Näiden arvojen ja kaavan 9 avulla voidaan laskea savukaasun teoreettinen ainemäärä.

$$n(\text{sk})_{\text{teor}} = n(CO_2) + n(H_2O) + n(N_2) + n(SO_2) \quad \text{KAAVA 9}$$

Todellisuudessa teoreettinen ilmamäärä ei ole riittävä polttoaineen täydelliseen palamiseen, vaan kattilaan on ajettava yli-ilmaa. Teoreettisen ilmamäärän ja käytetyn palamisilman määrän suhdetta kuvataan ilmakertoimella λ . Ylimääräinen ilma siirtyy savukaasuihin, ja tällöin todellinen savukaasun määrä voidaan laskea kaavoilla 10 ja 11.

$$n(\text{ilma})_{\text{ylimääräinen}} = (\lambda - 1) * n(\text{ilma})_{\text{teor}} \quad \text{KAAVA 10}$$

$$n(\text{sk})_{\text{tod}} = n(\text{sk})_{\text{teor}} + n(\text{ilma})_{\text{ylimääräinen}} \quad \text{KAAVA 11}$$

7.3.1 Savukaasun tilavuus ja koostumus

Koska savukaasun voidaan olettaa käyttäytyvän ideaalikaasun tavoin, voidaan syntyvän savukaasun tilavuuden selvittämiseksi hyödyntää ideaalikaasun tilayhtälöä.

$$pV = nRT \quad \text{KAAVA 12}$$

missä $p = \text{paine [Pa]}$

$V = \text{tilavuus [m}^3\text{]}$

$n = \text{ainemäärä}$

$R = \text{yleinen kaasuvakio } 8,314 \text{ J/(Kmol)}$

$T = \text{lämpötila [K]}$

Savukaasun tilavuuskoostumus saadaan määrittämällä ainemäärän perusteella tilavuus jokaiselle kaasukomponentille kaavan 12 avulla. Savukaasun koostumus tilavuusprosentteina voidaan laskea saatujen arvojen perusteella kaavalla 13.

$$\frac{V_{\text{savukaasukomponentti}}}{V_{\text{sk,kok.}}} * 100 \%$$

KAAVA 13

Koska jokaisen savukaasun komponentin ainemäärä tunnetaan, voidaan kaavalla 5 laskea jokaisen syntyvän palamistuotteen massa. Vertaamalla näitä arvoja palamisessa muodostuvan savukaasun kokonaismassaan, saadaan savukaasun massakoostumus.

$$\frac{m_{\text{savukaasukomponentti}}}{m_{\text{sk,kok.}}} * 100 \%$$

KAAVA 14

7.3.2 Savukaasun rikkipitoisuus

Rikkidioksidin päästöraja-arvo on määritetty ympäristöluvassa milligrammoina normikuutiota savukaasua kohden. Koska savukaasun sisältämän rikkidioksidin tilavuus ja massa tunnetaan, voidaan rikkidioksidin tiheys laskea kaavalla 15.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

KAAVA 15

Kun tiheys on laskettu, voidaan samaa kaavaa soveltamalla määrittää rikkidioksidin massa yhdessä kuutiossa savukaasua, jolloin saatua tulosta on helppo verrata päästöraja-arvoihin.

8 POLTTOAINEEN RIKKIPITOISUUDEN LAATURAJA-ARVOT

Polttoprosessissa tarvitaan aina jonkin verran rikkiä kuumakorroosion ehkäisemiseksi, ja VTT onkin tutkimuksessaan selvittänyt, että puun osuus kiertopetiteknikalla toteutettavassa leijukerros-poltossa voi olla enintään 77 %. Tällöin rikin minimipitoisuus Toppila 2:n kattilaan menevän polttoaineen kuiva-aineessa olisi noin 0,089 %, kun laskennassa käytetään VTT:n tutkimusraportissaan ilmoittamia metsätähdehakkeen ja turpeen rikkipitoisuuksia. Toppila 1:n tyyppiselle laitokselle ei ole saatavilla samanlaista tutkimustietoa, mutta BFB-kattiloissa tarvitaan enemmän rikkiä kuin CFB-kattiloissa ja Toppila 1:n kattilaan tulevan polttoaineen kuiva-aineen minimirikkipitoisuudeksi voidaan olettaa 0,150 %. Merkittävin minimipitoisuuden laaturaja-arvoon vaikuttava tekijä on kuitenkin polttoaineen sisältämän rikin ja kloorin suhde, joka voi vaihdella suuresti käytettävien polttoaineiden – etenkin puupolttoaineen – mukaan. Tässä luvussa keskitytään määrittämään laaturaja-arvot polttoaineen sisältämän rikin maksimipitoisuudelle. (Aho ym. 2013)

Raja-arvot määritettiin molemmille laitosyksiköille erikseen, sillä kattiloiden polttotekniikat eroavat toisistaan ja laitosyksiköille on ympäristöluvassa määrätty erilaiset päästörajat. Laaturaja-arvot laskettiin savukaasulaskurin avulla, ja laskennassa käytettiin prosessitiedoista saatavia kattilan lämpötilan, ilmakertoimen ja paineen keskiarvoja. SO₂-päästöihin vaikuttavat myös polttoaineen koostumus ja kosteus. Keskiarvo ja tuhkapitoisuus laskettiin painotettuna keskiarvona kaikkien polttoainetoimittajien 1.1.2016 - 19.3.2016 valmistuneiden energiaraporttien pohjalta.

$$\textit{kosteus} = 49,9969 \% \approx 50 \%$$

$$\textit{tuhkapitoisuus} = 6,1661 \% \approx 6,2 \%$$

Typen määrä polttoaineen kuiva-aineessa oletettiin olevan 1,35 p-%. Oletus perustuu kohdassa 3.1 esitettyihin polttoaineiden keskimääräisiin koostumuksiin sekä puun ja turpeen osuuksiin polttoaineen kokonaismäärästä (30 % ja 70 %). Kuiva-aineen hiilipitoisuudeksi oletettiin 53 p-% ja arvio perustuu alkuaineanalyysointilla tehtyihin mittauksiin ja saatujen tulosten keskiarvoon.

8.1 Polttoaineen rikkipitoisuuden laaturaja-arvo Toppila 1 -laitosyksikölle

Laaturaja-arvon määrittämisessä käytettiin seuraavia prosessitietoihin perustuvia lähtöarvoja:

lämpötila $T = 805 \text{ °C}$

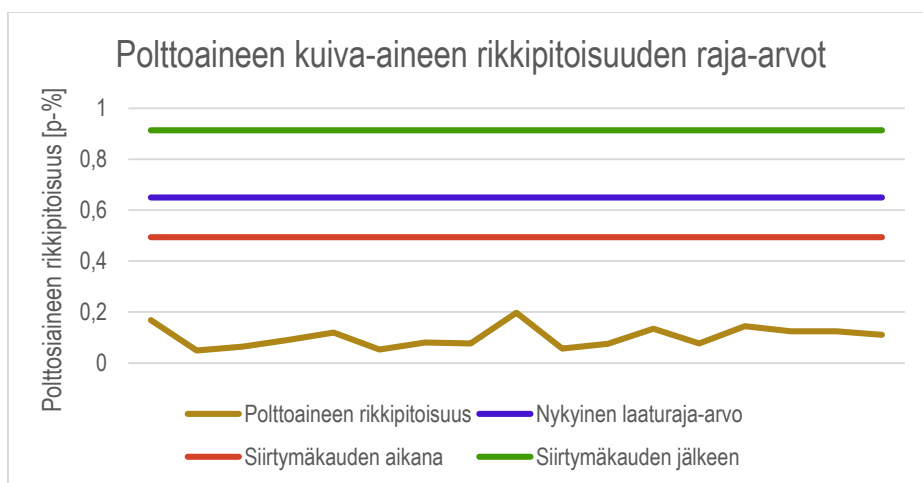
ilmakerroin $\lambda = 1,340$

paine $p = 99929,4 \text{ Pa}$.

Toppila 1 on suunniteltu korvattavaksi uudella laitosyksiköllä lämmityskaudelle 2020–2021. Tämän jälkeen laitosyksikön käyntiaika rajataan enintään 1500 tuntiin viiden vuoden liukuvana keskiarvona. Toppilan voimalaitokselle odotetaan uutta ympäristölupaa, jossa määritellään uudet päästö-
raja-arvot. Oulun Energia Oy on esittänyt lupahakemuksessa rikkidioksidin päästö-
raja-arvot siirtymäkaudelle ja sen jälkeen. Tämän vuoksi rikin maksimipitoisuus kuivassa polttoaineessa laskettiin nykyisen päästö-
raja-arvon lisäksi myös tuleville päästö-
rajoille. Kaikki tulokset on esitetty taulukossa 4 ja kuvassa 37. (Ympäristölupahakemus lupamääräysten tarkistamiseksi. 2015)

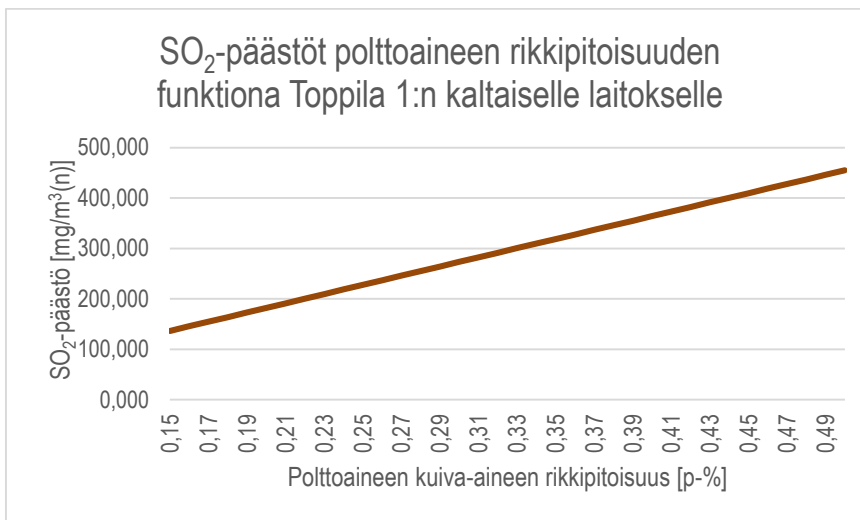
TAULUKKO 4. Polttoaineen rikin maksimipitoisuudet Toppila 1 -laitosyksikölle

	Päästö- raja-arvo [mg/m ³ (n)]	Rikki- pitoisuus max. [p-%]
Nykytilanne	570	0,650
Siirtymäkauden aikana	433	0,494
Siirtymäkauden jälkeen	800	0,914



KUVA 37. Polttoaineen rikkipitoisuuden raja-arvot Toppila 1 -laitosyksikölle

Kuvaajasta voidaan huomata, kuinka nykyiset polttoaineen rikkipitoisuudet ovat vielä melko kaukana raja-arvosta. Raja-arvo saattaa kuitenkin ylittyä, jos polttoaine tulee erittäin rikkipitoiselta tuotantoalueelta ja puun osuus polttoaineseoksesta on huomattavasti normaalia alhaisempi. Toppila 1 -laitosyksikössä muodostuvan SO₂-päästön suuruuden ja polttoaineen kuiva-aineen rikkipitoisuuden kehitystä on havainnollistettu myös kuvassa 28.



KUVA 38. Toppila 1 -tyyppisen laitoksen rikkidioksidipäästöjen ja polttoaineen rikkipitoisuuden yhteys (kosteus 40 %, polttoaineen massa 1 kg)

8.2 Polttoaineen rikkipitoisuuden laaturaja-arvo Toppila 2 -laitosyksikölle

Laitosyksikköön asennettu savukaasulauhdutin mahdollistaa runsasrikkisemmän polttoaineen käytön kattilassa. Lauhdutinlaitoksen suunnitteluvaiheessa laitoksen arvioitiin vähentävän Toppila 2:n rikkidioksidipäästöjä noin 40 %. Tätä arviota käytettiin myös yhtenä lähtöarvona polttoaineen rikkipitoisuuden raja-arvon laskennassa. Muut laskennan lähtöarvot saatiin prosessitiedoista.

$$\text{lämpötila } T = 799 \text{ }^\circ\text{C}$$

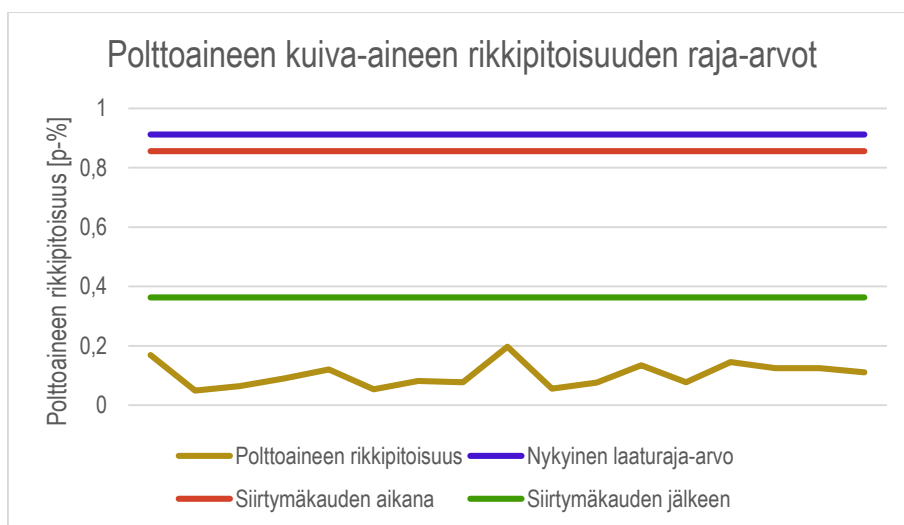
$$\text{ilmakerroin } \lambda = 1,265$$

$$\text{paine } p = 99849,6 \text{ Pa}$$

Lähtöarvojen perusteella saatiin kaikkia päästöraja-arvoja vastaavat polttoaineen rikkipitoisuuden laaturaja-arvot. Tulokset on esitetty taulukossa 5 ja kuvassa 39.

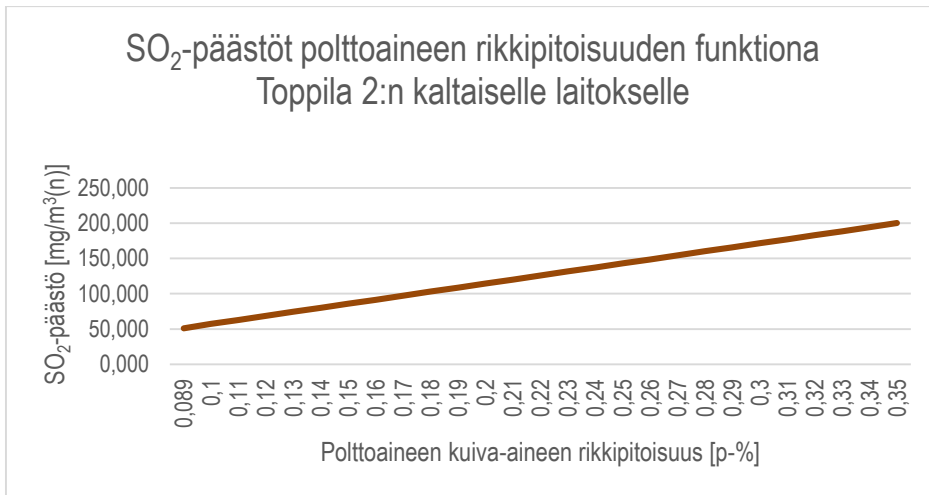
TAULUKKO 5. Polttoaineen rikin maksimipitoisuudet Toppila 2 -laitosyksikössä

	Päästöraja-arvo [mg/m ³ (n)]	Rikkipitoisuus max. [p-%]
Nykytilanne	500	0,912
Siirtymäkauden aikana	468	0,856
Siirtymäkauden jälkeen	200	0,363



KUVA 39. Polttoaineen rikkipitoisuuden raja-arvot Toppila 2 -voimalaitosyksikölle

Tällä hetkellä polttoaineen rikkipitoisuudet ovat kaukana lasketusta raja-arvosta, mutta siirtymäkauden jälkeen päästörajat tiukentuvat huomattavasti. Tulevaisuudessa myös polttoaineen kemialliseen koostumukseen on kiinnitettävä erityistä huomiota, sillä päästöraja-arvon ylitys saattaa silloin aiheutua myös ainoastaan polttoaineen ominaisuuksien vaihtelusta. Tämä on mahdollista etenkin silloin, kun polttoaineessa käytettävä turve tulee rikkipitoiselta tuotantoalueelta ja/tai puun osuus polttoaineesta on normaalia pienempi.



KUVA 40. Toppila 2 -tyyppisen laitoksen rikkidioksidipäästöjen ja polttoaineen rikkipitoisuuden yhteys (kosteus 40 %, polttoaineen massa 1 kg)

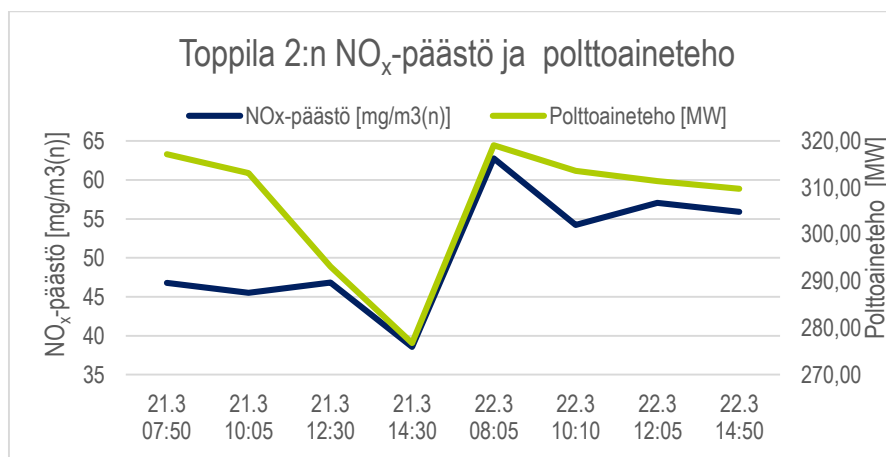
Kuvassa 40 on esitetty rikkidioksidipäästö polttoaineen kuiva-aineen rikkipitoisuuden funktiona. Kuvasta voidaan nähdä, kuinka suoran kulmakerroin on pienempi kuin Toppila 1- tyyppisen laitoksen vastaavassa kuvassa. Savukaasulauhdutinlaitoksen ja polttotekniikan vuoksi Toppila 2 -laitosyksikön CFB-kattilan päästöt kasvavat hitaammin polttoaineen rikkipitoisuuden muuttuessa, kuin Toppila 1:n BFB-kattilan päästöt.

9 NO_x-PÄÄSTÖN MUODOSTUMINEN

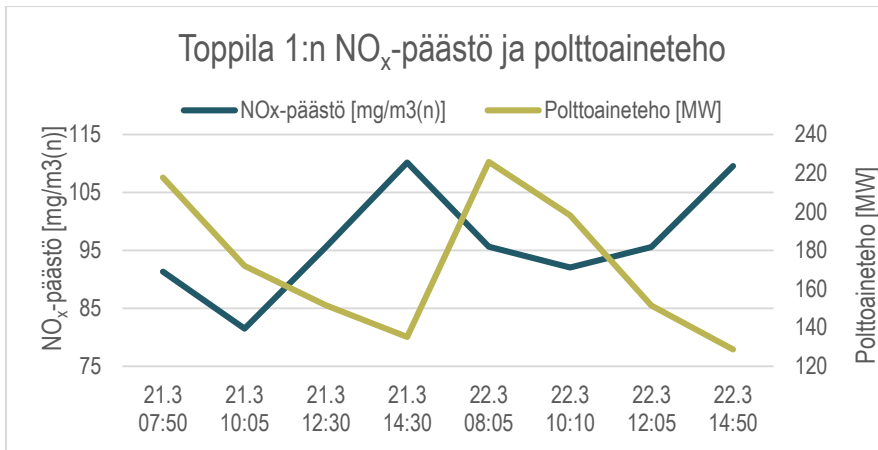
Savukaasun typenoksidipäästö on lähtöisin polttoaineen sisältämästä tpeestä sekä palamisilman mukana tulevasta tpeestä. Taselaskennassa saadaan selville, kuinka paljon molekyylylitypeä savukaasu voi maksimissaan sisältää. Osa tpeestä muodostaa kutienkin hapen kanssa typpioksideja.

Kohdassa 6.1 tutkittiin päästöjen riippuvuutta palamisolosuhteista. Typenoksidipäästöjen muodostumista tutkittiin kuitenkin tarkemmin mittausjaksolla 21.3.2016 - 22.3.2016. NO_x-päästöjä verrattiin kattiloiden polttoainetehoihin, lämpötiloihin kattilan eri osissa ja palamisilmojen tilavuusvirtauksiin. Tämä on relevanttia, sillä näin voidaan yksityiskohtaisemmin tarkastella eri tekijöiden vaikutusta päästöihin ja paikantaa sellaiset prosessin osat, joissa typenoksideja syntyy todennäköisimmin. Kuten kohdassa 6.1 esitettiin, polttoaineen massavirralla – ja siten useimmiten myös polttoaineteholla – on merkittävä vaikutus energiantuotannon typenoksidipäästöihin. Tehon vaikutus päästöihin on vahvempi Toppila 2 -laitosyksikössä.

Polttoainetehon ja kattiloiden päästöjen välisiä yhteyksiä on havainnollistettu kuvaajissa 41 ja 42. Tehon vaihtelu vaikuttaa kattilaan ajettaviin ilmavirtoihin ja lämpötiloihin kattilan sisällä. Näiden suureiden vaihtelu vaikuttaa edelleen polttoaineen tyyppipitoisuuden ohella energiantuotannosta aiheutuviin päästöihin. Tässä kappaleessa esitellään tärkeimmät kattiloiden NO_x-päästöihin vaikuttavat tekijät. Muut kuvaajat typenoksidipäästöistä sekä palamisilmavirroista ja lämpötiloista on koottu liitteeseen 2. Eri palamisolosuhteisiin vaikuttavien tekijöiden vaikutukset typenoksidipäästöihin on koottu yhteenvetona liitteenä 3 olevaan taulukkoon.



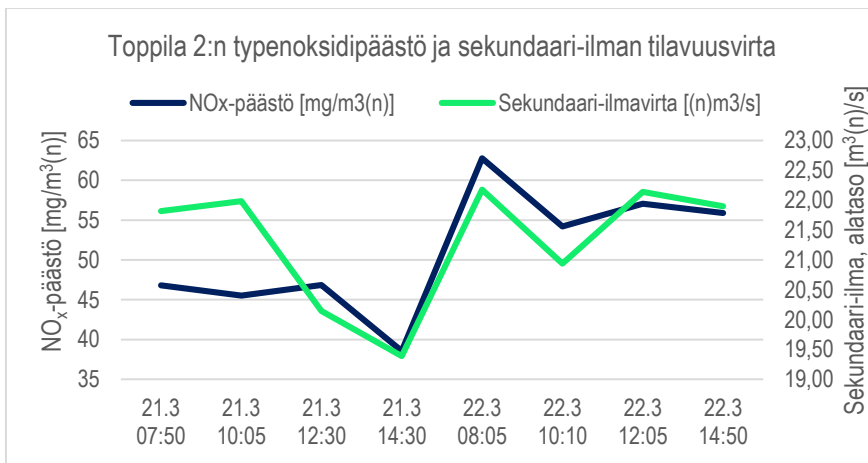
KUVA 41. Toppila 2:n typenoksidipäästö ja polttoainetehto



KUVA 42. Toppila 1:n typenoksidipäästö ja polttoaineteho

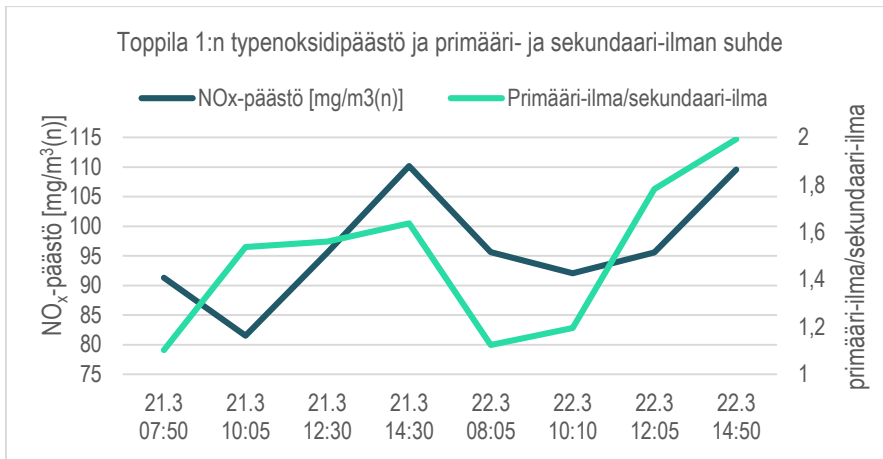
9.1 NO_x-päästöt ja palamisilman virtaukset

Toppila 2 -laitosyksikön typenoksidipäästö on riippuvainen eri ilmojen tilavuusvirtauksista sekä primääri- ja sekundaari-ilmavirtauksen suhteesta. Voimakkaammin päästöihin vaikuttaa sekundaari-ilmojen virtaukset ja etenkin alatasolta ajettava sekundaari-ilma. Typenoksidipäästön ja alataason sekundaari-ilman tilavuusvirran yhteys on havainnollistettu kuvaajassa 43.



KUVA 43. Toppila 2:n NO_x-päästö ja alataason sekundaari-ilmavirtaus

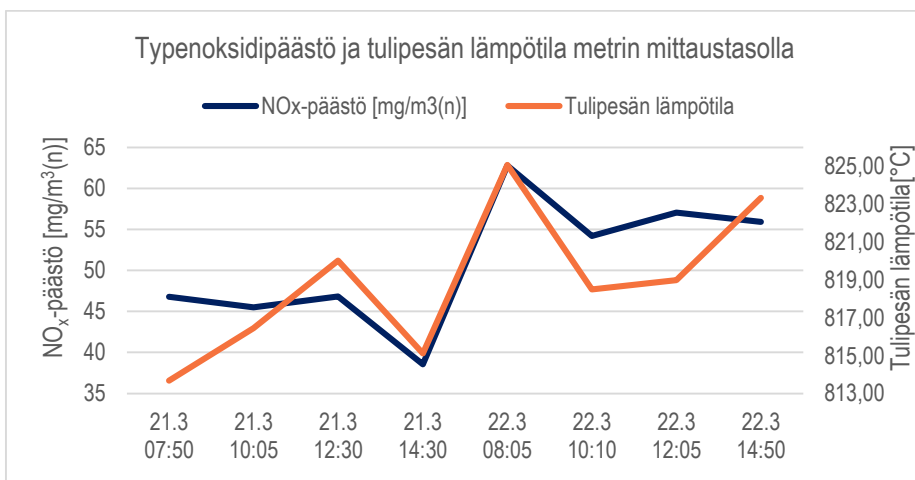
Palamisilman virtauksilla ei ole yhtä selkeää riippuvuutta Toppila 1:n NO_x-päästöihin kuin uudemman laitosisyksikön tapauksessa. Kuplapetikattilassa olennaisinta on se, millä suhteella primääri- ja sekundaari-ilma jaetaan kattilaan. Mitä vähemmän sekundaari-ilmaa ajetaan suhteessa primääri-ilmaan, sitä suuremmat ovat kattilan typenoksidipäästöt. Tämä esitetään kuvaajassa 44.



KUVA 44. Toppila 1:n NO_x-päästö sekä primääri- ja sekundaari-ilmojen suhde

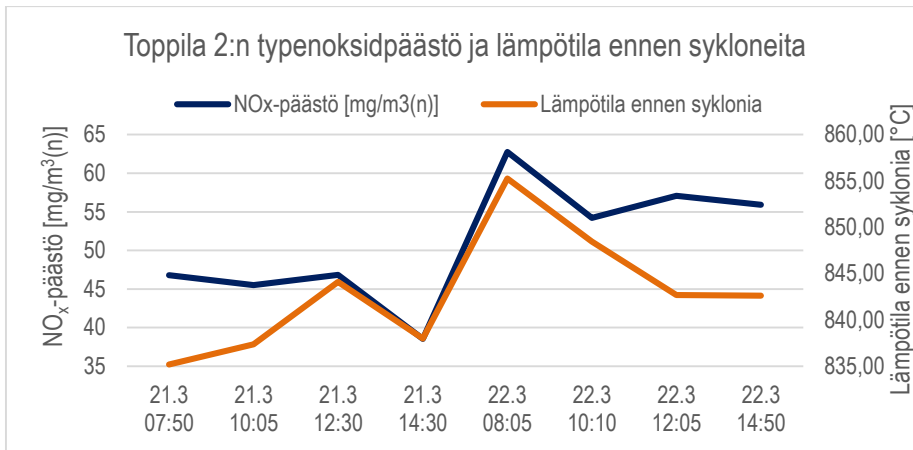
9.2 NO_x-päästöt ja prosessilämpötilat

Palamisilman ohella toinen merkittävä typenoksidipäästöihin vaikuttava tekijä on prosessin lämpötila, joka vaihtelee kattilan eri osissa. Tavoitteena oli selvittää, missä kattilan osissa lämpötilanvaihtelut vaikuttava eniten typenoksidipäästöihin.



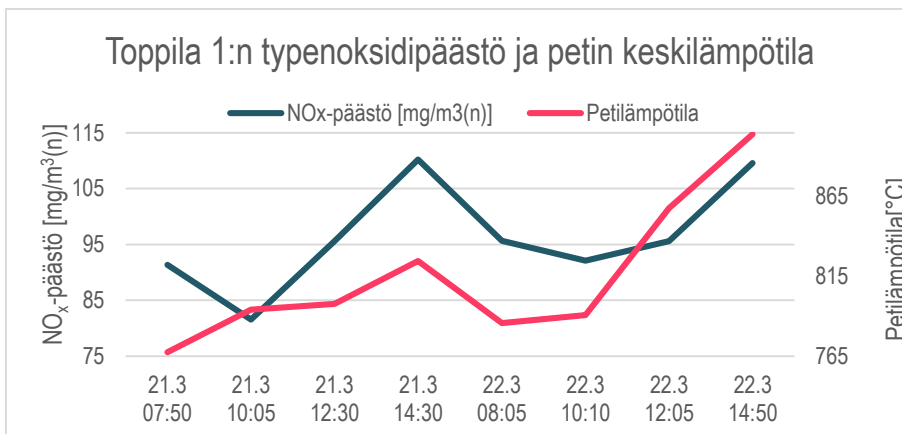
KUVA 45. Tulipesän lämpötilan vaikutus Toppila 2:n typenoksidipäästöön

Toppila 2:n NO_x-päästöihin vaikuttavat eniten tulipesän lämpötila metrin korkeudella kattilan pohjasta ja kattilan lämpötila ennen kuumasykloneita. Kuvaajista 45 ja 46 voidaan nähdä, kuinka lämpötilan nousu kasvattaa myös typenoksidien määrää savukaasuissa. Kuvassa 46 estetty lämpötila on laskettu keskiarvona ennen kutakin sykklonia mitatuista lämpötiloista



KUVA 46. Lämpötila ennen sykklonia ja sen vaikutus Toppila 2:n typenoksidipäästöihin

Toppila 1 -laitosyksikön typenoksidipäästöihin vaikuttaa pääasiassa kattilassa leijuvan petin lämpötila. Tässäkin tapauksessa lämpötilan nousu kasvattaa NO_x-päästön määrää, mikä on nähtävissä kuvaajasta 47. Petilämpötila on Toppila 1:n BFB-kattilassa melko tasainen eikä petin eri alueiden lämpötilojen välillä ole kovin suurta eroa.



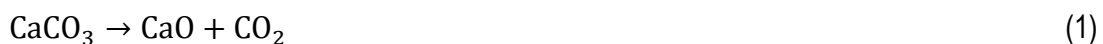
KUVA 47. Petin keskilämpötilan vaikutus Toppila 1:n typenoksidipäästöihin

10 PÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMINEN PROSESSIKEMIKAALIEN AVULLA

Koska prosessikemikaalien käyttö päästöjen vähentämisessä aiheuttaa energiayhtiölle kustannuserän, on tärkeää käyttää kemikaaleja vain tarvittava määrä. Tämän vuoksi laadittiin taselaskelma, joka helpottaa prosessiin syötettävien kemikaalien määrän optimoimista. Laskelma perustuu polttoaineen koostumukseen ja prosessissa syntyvien palamistuotteiden määrään.

10.1 Rikkidioksidin poisto kalkilla

Luvussa 5.5.2 esitettiin, kuinka rikkidioksidin määrää savukaasuissa voidaan vähentää lisäämällä prosessiin kalkkia. Kalkin ja rikkidioksidin välinen reaktio voidaan esittää kahtena erillisenä reaktioyhtälönä, joista numero 1 kuvaa kalkin hajoamista ja numero 2 kalsiumsulfaatin muodostumisreaktiota.



Näiden reaktioyhtälöiden ja ainemäärän kaavan (kaava 5) perusteella voidaan laskea, kuinka paljon kalkkikiveä tarvitaan teoriassa tunnetun rikkidioksidimäärän poistamiseen. Otetaan laskuesimerkiksi Toppilan voimalaitoksen rikkidioksidin kokonaispäästö vuonna 2014, jolloin SO₂-päästöt olivat yhteensä 625 tonnia.

$$n(\text{SO}_2) = \frac{m(\text{SO}_2)}{M(\text{SO}_2)} = \frac{625000000 \text{ g}}{32,06 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 2 * 16,00 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 10177858,16 \text{ mol}$$

Reaktioyhtälöstä nähdään, että kalsiumsulfaatin muodostumisreaktioon tarvitaan kalsiumoksidia sama ainemäärä kuin rikkidioksidia. Kalkkikiven hajoamisreaktiosta voidaan huomata, että kalsiumoksidia muodostuu sama ainemäärä kuin kalkkikiveä on alussa. Tällöin

$$n(\text{SO}_2) = n(\text{CaO}) = n(\text{CaCO}_3) = 10177858,16 \text{ mol}$$

Kun tarvittavan kalkkikiven ainemäärä tunnetaan, voidaan laskea sen massa.

$$m(\text{CaCO}_3) = n(\text{CaCO}_3) * M(\text{CaCO}_3)$$

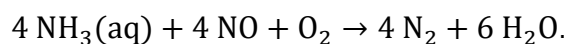
$$m(\text{CaCO}_3) = 10177858,16 \text{ mol} * (40,08 + 12,01 + 3 * 16,00) \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$= 1018508000 \text{ g} = 1018508 \text{ kg}$$

Jotta kaikki vuoden 2014 SO₂-päästöt olisi voitu poistaa, olisi kattiloihin pitänyt vuoden aikana ajaa yhteensä noin 1018,5 tonnia kalkkikiveä. Taselaskelma on liitetty osaksi savukaasulaskuria (liite 1). Laskentataulukko ilmoittaa palamisessa syntyvien rikkidioksidipäästöjen poistamiseen tarvittavan teoreettisen kalkkimäärän. Prosessissa tarvitaan kalkkia kuitenkin teoreettista määrää enemmän. Kun voimalaitoksen ei ole tarpeen poistaa rikkidioksidia kokonaan, voidaan tarvittavan kalkin massa laskea kertomalla saatu tulos sillä osuudella, mikä rikkidioksidista halutaan poistaa.

10.2 Typenoksidien poisto ammoniakkivedellä

Toppila 2 -laitosyksikköön asennettu SNCR-järjestelmä mahdollistaa typenoksidipäästöjen vähentämisen ammoniakkivedellä. Toppilan 2:n typenoksidipäästöt olivat vuonna 2013 yhteensä noin 244 tonnia. Kuten luvussa 5.5.2 esitettiin, ammoniakkin ja typpimonoksidin välistä reaktiota kuvaa seuraava yhtälö:



Reaktioyhtälöstä huomataan, että ammoniakilla voidaan poistaa savukaasuista vain typpimonoksidia. Typpimonoksidin osuus NO_x-päästöistä on noin 95 %. Tällöin

$$m(\text{NO}) = 0,95 * (244 * 10^6) \text{ g} = 231,8 * 10^6 \text{ g}$$

Ainemäärän kaavalla (kaava 5) voidaan laskea typpimonoksidin ainemäärä.

$$n(\text{NO}) = \frac{m}{M} = \frac{231,8 * 10^6 \text{ g}}{14,00 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 16,00 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 7,727 * 10^6 \text{ mol}$$

Reaktioyhtälön perusteella puhdasta ammoniakkia tarvitaan reaktioon sama ainemäärä kuin savukaasuista poistettavaa typpimonoksidia. Kun ammoniakin ainemäärä tunnetaan, voidaan laskea myös sen massa.

$$n(NH_3) = n(NO) = 7,727 * 10^6 \text{ mol}$$

$$m(NH_3) = 7,727 * 10^6 \text{ mol} * \left(16,00 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 3 * 1,008 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right) = 131,5 * 10^6 \text{ g}$$

Toppilassa käytettävä ammoniakkiliuos on vahvuudeltaan 24,5 %. Tällöin typpimonoksidin poistamiseen tarvittavan ammoniakkiveden massa on

$$m(NH_3)_{aq} = \frac{100}{24,5} * 131,5 * 10^6 \text{ g} = 536,9 * 10^6 \text{ g} = 536,9 \text{ t}$$

Jotta kaikki vuoden 2013 NO_x-päästön sisältämä typpimonoksidi olisi voitu poistaa, olisi Toppila 2:n kattilaan pitänyt ajaa 536,9 tonnia ammoniakkivettä. Tarvittavan ammoniakkiveden tilavuus voidaan laskea tiheyden kaavalla (kaava 15). Ammoniakkiliuoksen tiheys on käyttöturvallisuustiedotteen mukaan 0,909 g/cm³.

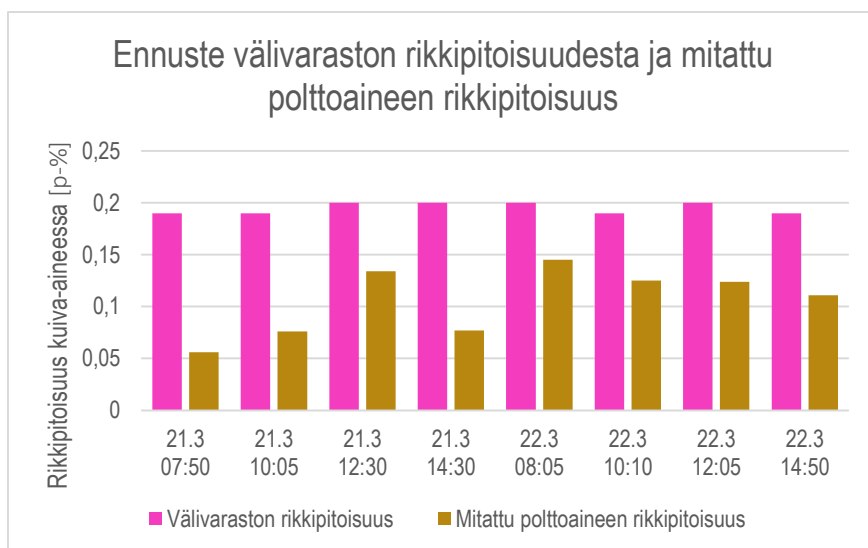
$$V(NH_3)_{aq} = \frac{m}{\rho} = \frac{536,9 * 10^6 \text{ g}}{0,909 \text{ g/cm}^3} = 590,6 \text{ cm}^3 = 590,6 \text{ m}^3$$

Voimalaitoksen savukaasuista ei ole tarpeen poistaa kaikkea typpimonoksidia. Typpimonoksidin ja ammoniakin taselaskemalle luotiin laskentataulukko, johon syötetään typenoksidipäästön kokonaisuudessa. Tämän jälkeen laskuri laskee NO_x-päästön sisältämän typpimonoksidin täydelliseen poistamiseen tarvittavan ammoniakkiveden teoreettisen massan ja tilavuuden. Laskentataulukko on esitetty liitteessä 4.

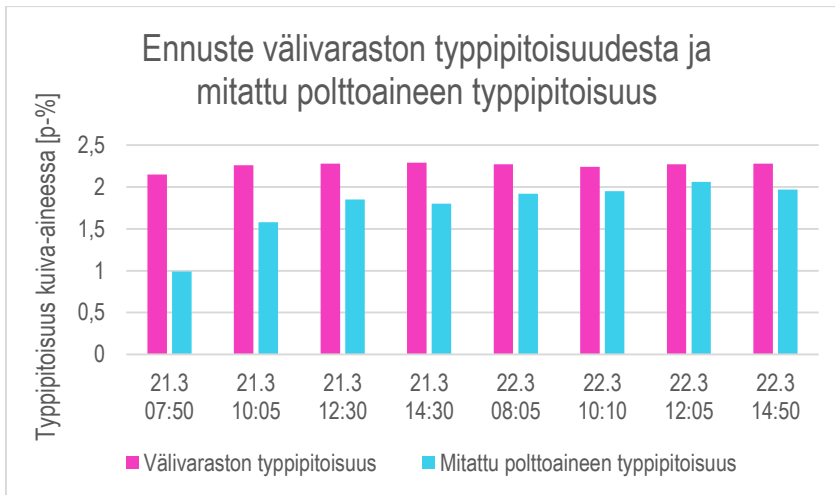
11 SAAPUVAN POLTTOAINEEN LAADUN ENNUSTAMINEN

Toppilan voimalaitoksella on käytössä energiaketjun tietojenhallintajärjestelmä Once. Tällä hetkellä järjestelmä laskee ennusteen välivaraston turpeen kuiva-aineen typpi- ja rikki- ja rikkipitoisuuksista. Ennuste perustuu tilattuihin polttoainekuormiin ja kesällä tehtyihin tuotantoalueiden turveaumojen typpi- ja rikkipitoisuuksien määrittäisiin. Ennusteen paikkansapitävyyttä tarkasteltiin vertaamalla sitä 21.3.2016 - 22.3.2016 otettujen polttoainenäytteiden rikki- ja typpipitoisuuksiin.

Ennuste on vain osittain suuntaa antava, sillä siinä ei oteta huomioon polttoaineen kosteutta eikä turpeeseen sekoitettavan puun määrää ja ominaisuuksia. Biomassan lisääminen polttoaineeseen vähentää sen rikin ja typen kokonaispitoisuuksia, mikä on huomattavissa myös kuvaajista 48 ja 49. Suurimmat erot ennusteen ja mitattujen pitoisuuksien välillä ovat polttoaineen rikkipitoisuuksissa, joissa mitattu pitoisuus saattaa olla alle puolet ennusteesta. Typpipitoisuuksissa erot ennusteen ja mitattujen arvojen välillä ovat pääsääntöisesti pienemmät.



KUVA 48. Oncen ennuste välivaraston rikkipitoisuudesta ja mitattu polttoaineen rikkipitoisuus



KUVA 49. Oncen ennuste välivaraston typpipitoisuudesta ja mitattu polttoaineen typpipitoisuus

Jotta järjestelmän laatimaa ennustetta voitaisiin hyödyntää tehokkaammin, tulisi siinä huomioida myös säädetty puun osuus polttoaineesta ja polttoaineseoksen kosteus. Tällöin ennuste kuvaisi koko polttoainemassaa, eikä ainoastaan turvetta. Kuten kappaleessa 6.2 mainittiin, biopolttoaineen määrän lisääminen vähentää merkittävästi laitoksen päästöjä ja sen huomioiminen olisi siten olennaista ennusteen hyödynnettävyyden kannalta.

Polttoaineen ominaisuustietoa voitaisiin tulevaisuudessa hyödyntää polttoainetilausten suunnittelussa, jolloin voimalaitokselle saapuvan polttoaineen koostumus sekä laatu tunnettaisiin etukäteen, ja päästöpiikkejä olisi mahdollista ennaltaehkäistä. Jos kaikkien turvetuotantoalueiden aumojen rikki- ja typpipitoisuudet tunnetaan, voisi polttoainetta tilatessa valita polttoaineet eri tuotantoalueilta siten, ettei kokonaispitoisuus ylitä määritettyä raja-arvoa. Tällaiset valintakriteerit ovat jo käytössä polttoaineen tuhkapitoisuuden osalta.

12 POLTTOAINEEN KÄYTÖN VUOSISUUNNITELMA

Energiantuotantoprosessissa voimalaitoksen ajotilanteet muuttuvat jatkuvasti muun muassa kaukolämpöverkon lämmitystehon tarpeen mukaan. Muutoksia normaaliajoon aiheuttavat myös erilaiset prosessin häiriöt. Joitain oletuksia ja yleistyksiä voidaan kuitenkin tehdä. Pääasiassa talvisin ilmaston ollessa kylmä tehon tarve on suurempi kuin syksyisin tai keväisin, jolloin korkeammat päivälämpötilat vähentävän lämmitystehon tarvetta. Erilaisiin olosuhteisiin ja ajotilanteisiin tarvitaan ominaisuuksiltaan hieman erilaisia polttoaineita. Esimerkiksi ylös- ja alasajotilanteisiin olisi hyvä valita kuivaa sekä matalat typpi- ja rikki- ja rikkipitoisuudet omaavaa polttoainetta, sillä näissä tilanteissa riski päästöraja-arvojen ylittymiselle on muutenkin korkeampi kuin tasaisen normaaliajon aikana. Tämän vuoksi laadittiin polttoaineen käytön vuosisuunnitelma lämmityskaudelle, jossa huomioitiin polttoaineen kosteus sekä alkuainekoostumus.

Suunnitelma erilaisten polttoaineiden käytöstä lämmityskauden aikana on esitetty taulukossa 6. Vuosisuunnitelma on karkea ja suuntaa antava, sillä lämmityskauden aikana ilmeneviin erikoistilanteisiin, häiriöihin sekä säätölojen muutoksiin tulee aina mahdollisuuksien mukaan varautua erikseen. Suunnitelma pohjautuu aiempiin mittauksiin ja niistä saatuihin tuloksiin, savukaasulaskurilla suoritettuihin testeihin ja kokeiluihin sekä tietoon prosessin toiminnasta. Sitä voidaan hyödyntää polttoainetilauksen suunnittelussa, jotta voimalaitokselle saataisiin aina silloiseen tilanteeseen parhaiten sopivaa polttoainetta.

TAULUKKO 6. Polttoaineen käytön vuosisuunnitelma lämmityskaudelle

	Kosteus	Typpi- ja rikki- ja rikkipitoisuus	Huomioitavaa
Syksy	<p>Käynnistyksen yhteydessä:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Kuivat polttoaineet <p>Kun laitos on käynnissä:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Kosteat polttoaineet 	<p>Käynnistyksen yhteydessä:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Niin alhaiset typpi- ja rikkipitoisuudet kuin mahdollista <p>Kun laitos on käynnissä:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Pienet tai keskimääräiset pitoisuudet 	<p>Laitoksen käynnistyksen yhteydessä riski päästöraja-arvojen ylittymiselle on muutenkin korkeampi kuin normaaliajon aikana.</p>
Talvi	<p>Lauhalla kelillä:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Mahdollisimman tasainen kosteus <p>Kovilla pakkasilla:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Muuten kosteat polttoaineet, mutta huippupakkasilla kuivat 	<p>Lauhalla kelillä:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Keskimääräiset tai sitä isommat rikki- ja typpipitoisuudet <p>Kovilla pakkasilla:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Pienet tai keskimääräiset pitoisuudet 	<p>Polttoainemassat mahdollistavat isommat pitoisuudet polttoaineessa ilman päästöraja-arvon ylittymistä.</p> <p>Suurilla tehoilla ajettaessa polttoaineen ominaisuuksien merkitys kasvaa etenkin Top-pila 2 -laitoksessa.</p>
Kevät	<p>Kevättalvella:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Kosteat polttoaineet <p>Alasajon lähestyessä:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Kuivat polttoaineet 	<p>Kevättalvella:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Keskimääräiset pitoisuudet, myöhemmin pienet pitoisuudet <p>Alasajon lähestyessä:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Alhaiset rikki- ja typpipitoisuudet 	<p>Laitoksen alasajon yhteydessä riski päästöraja-arvojen ylittymiselle on korkeampi kuin normaaliajon aikana.</p>

13 TIEDON HYÖDYNTÄMINEN KATTILAN OHJAUKSESSA

Voimalaitokselle saapuvan polttoaineen ominaisuustietoa voidaan hyödyntää prosessin suunnittelussa ja kattilan ohjauksessa. Kun polttoaineen laadusta saadaan luotettava ennuste, voidaan mahdollisuuksien mukaan säätää polttoprosessin ajoparametrejä optimaalisiksi. Tämän lisäksi tieto polttoaineen koostumuksesta auttaa tunnistamaan mahdolliset tulevat päästöpiikit, jolloin niihin voidaan reagoida hyvissä ajoin.

13.1 Reagointi mahdolliseen päästöpiikkiin

Mahdolliset päästöraja-arvon ylitykset on pitkälti mahdollista välttää voimalaitoksen valvomosta käsin prosessia säätämällä. Kun tieto polttoaineen laadun vaihtelusta tulee valvomoon, kannattaa tarkistaa seuraavat asiat:

- puun osuus polttoaineesta
- tasainen polttoainevirta kattilaan
- kattilan lämpötilat ovat sallituissa rajoissa
- primääri-, sekundaari- ja tertiääri-ilmojen jako kattilaan.

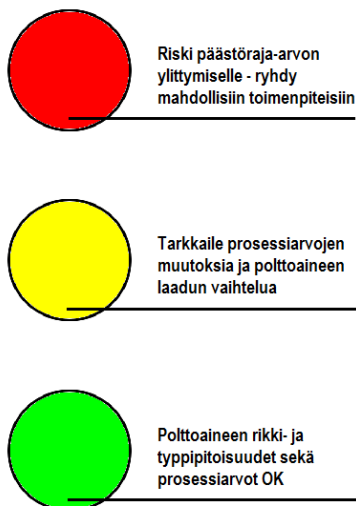
Tehokas keino päästöpiikkien ehkäisemiseksi on puun osuuden kasvattaminen polttoaineessa niin pitkälle kuin mahdollista. Tällöin polttoaineen rikin ja typen kokonaispitoisuudet pienenevät. Puun osuus polttoaineesta ei kuitenkaan saa nousta liian suureksi, koska se voi aiheuttaa moninaisia ongelmia kattilassa. Tällä hetkellä puun maksimimäärä polttoaineessa on Toppila 1 -laitosyksikölle 30 % ja Toppila 2:lle 40 %.

Jos päästöpiikkiä ei pystytä estämään puun määrää lisäämällä, voidaan prosessiin ajaa kemikaaleja päästöjen vähentämiseksi. Taselaskennan perusteella voidaan arvioida, kuinka paljon kalkkia tai ammoniakkivettä tarvitaan mahdollisen rikkidioksidi- tai typenoksidipäästön poistamiseksi savukaasuista. Näin voidaan välttää kemikaalien ylimääräinen käyttö.

Prosessin tilanteen salliessa voitaisiin joissain tapauksissa pohtia, olisiko prosessiin ajettavien primääri- ja sekundaari-ilmojen tilavuusvirtoja mahdollista säätää. Aiemmissa tarkasteluissa havaittiin, että Toppila 1:n tapauksessa ilman määrän väheneminen kasvattaa päästöjä. Tällöin primääri- ja sekundaari-ilmavirtojen kasvattaminen oikeassa suhteessa vähentäisi laitoksen typenoksidipäästöjä. Primääri-ilmaa säädettäessä tulee kuitenkin varmistaa, ettei leijutus häiriinny. Toppila 2 -laitosyksikössä tilanne on päinvastainen ja palamisilman määrän lisääminen kasvattaa NO_x-päästöjen määrää. Tällöin voitaisiin pohtia, olisiko etenkin sekundaari-ilmojen määrää mahdollista rajoittaa. Täytyy kuitenkin muistaa, että ensimmäisenä prioriteettina on polttoaineen puhdas palaminen ja onnistunut leijutus.

13.2 Tiedon välittäminen operaattoreille

Tieto polttoaineen laadun ja koostumuksen vaihteluista voitaisiin välittää voimalaitoksen operaattoreille yksinkertaisten ”liikennevalojen” avulla, joiden väri vaihtelee polttoaineen laatuennusteen ja säädettyjen prosessiarvojen perusteella. Idea on esitetty alla olevassa kuvassa 50. Tarvittaessa malliin voisi lisätä hälytysrajan liian alhaiselle polttoaineen rikkipitoisuudelle. Mallin tulee olla selkeä ja yksinkertainen, jotta se kiinnittää operaattorin huomion informaatiotulvassa.



KUVA 50. Havainnekuva liikennevalomallista

Toinen vaihtoehto voisi olla yksinkertainen rikkipitoisuuden arvon esitys prosessin ohjausjärjestelmässä. Lukema muuttuisi punaiseksi ja hälytys käynnistyisi silloin, kun rikin määrä polttoaineessa on liian alhainen tai niin suuri, että se saattaisi aiheuttaa mahdollisen päästöpiikin.

14 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tutustua Oulun Energia Oy:n omistamaan Toppilan voimalaitokseen, laitoksen ominaisuuksiin sekä siellä käytettäviin polttoaineisiin ja niiden ominaisuuksiin. Työssä perehdyttiin myös energiantuotantoprosessissa syntyviin rikkidioksidi- ja typenoksidipäästöihin sekä siihen, millainen vaikutus käytettävällä polttoaineella on niihin. Opinnäytetyön tavoitteena oli myös tutkia, miten tietoa voimalaitoksessa käytettävän polttoaineen kemiallisista ominaisuuksista voidaan hyödyntää polttoprosessin suunnittelussa, kattilan ohjauksessa, kemikaalivirtojen optimoinnissa ja siten myös päästöjen hallinnassa.

Tutkimuksissa havaittiin, että polttoaineen koostumus ja muut ominaisuudet vaikuttavat vahvasti Toppila 1 -laitosyksikön päästöihin. Sen sijaan Toppila 2:n päästöt riippuvat enimmäkseen palamisolosuhteista, vaikkakin polttoaineen kemiallisen koostumuksen merkitys kasvaa suurilla tehoilla ajettaessa. Polttoaineen laadun merkitys tulee kasvamaan myös uudemmassa laitosyksikössä, kun päästöraja-arvot kiristyvät uuden ympäristöluvan myötä. Etenkin siirtymäkauden jälkeen heinäkuussa 2020 voimaan tulevan päästöraja-arvon vuoksi polttoaineen koostumukseen tulee kiinnittää huomiota paljon nykyistä enemmän. Koska suurin osa polttoon tukevasta rikistä ja tpeestä tulee polttoaineen sisältämästä turpeesta, puun osuutta polttoaineesta kannattaa kasvattaa niin paljon kuin se on teknisesti mahdollista. Tämä onkin ollut Oulun Energia Oy:n pitkäaikainen tavoite.

Siirtymäkauden jälkeen myös prosessikemikaalien käyttö nousee merkittävään rooliin päästöjen hallinnassa. Toppila 2 -laitosyksikön NO_x-päästöjen sallittu määrä savukaasuissa pienenee kolmasosaan nykyisestä, joten etenkin SNCR-järjestelmä voi tulevaisuudessa olla hyvinkin säännöllisessä käytössä. Myös kalkin syöttö tulipesään tulee luultavasti yleistymään, sillä osa voimalaitokselle tulevasta turpeesta on peräisin isorikkisiltä tuotantoalueilta. Polttoaineen rikkipitoisuuden pitäminen sopivalla tasolla vähentää myös savukaasulauhduttimeen lisättävän, fluidin neutraloimiseen käytettävän lipeän määrää. Tietoa polttoaineen ominaisuuksista voidaan hyödyntää tehokkaasti prosessikemikaalien käytön optimoinnissa, jotta kemikaalien hankinnasta aiheutuvat kustannukset olisivat mahdollisimman alhaiset.

Toisenlaiset polttoaineet sopivat paremmin erilaisiin ajotilanteisiin kuin toiset. Kun voimalaitoksen biokentällä ja turvetuotantoalueiden varastoauomoissa olevien polttoaineiden ominaisuudet tunnetaan, voidaan tietoa hyödyntää tilausten suunnittelussa, jotta eri vuodenaikoina ja ajotilanteissa

saadaan kulloiseenkin tilanteeseen parhaiten soveltuvaa polttoainetta. Etenkin erikoistilanteita, kuten ylös- ja alasajotilanteita varten kannattaa mahdollisuuksien mukaan tilata korkeatasoista ja tasalaatuista polttoainetta. Tällöin riski päästöraja-arvojen ylittymiselle on muutenkin korkeampi kuin normaaliajon aikana. Hyödyntämällä polttoaineen ominaisuustietoa polttoainetilausten suunnittelussa, pystytään saapuvan polttoaineen laatu ennakoimaan ja ennaltaehkäistä mahdollisia päästöpiikkejä. Tämän opinnäytetyön suorituksen aikana saatua tietoa voidaan hyödyntää myös polttoainejärjestelmä kehittämisessä ja sen toimintojen monipuolistamisessa.

LÄHTEET

1. Aho, Martti – Leino, Timo – Nevalainen, Heidi 2013. Puupolttoaineen osuuden maksimointi kiertoleijupoltossa. Tutkimusraportti. Jyväskylä: VTT.
2. Akela, Dinanath – Sharma, Mandeep 2012. Hydrodynamic Study of Cold Model Bubbling Fluidized Bed System Using Bubble Caps. Luentomateriaali. Central Mechanical Engineering Research Institute. Durgabur, West Bengal, India.
3. Alakangas, Eija 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus. Espoo: Otamedia Oy
4. Antila, Anna-Maija – Karppinen, Maarit – Leskelä, Markku – Mölsä, Heini – Pohjakallio, Maija 2008. Tekniikan kemia. 10. Painos. Helsinki: Edita Publishing Oy.
5. Eskelinen – Pahkala – Rissanen 2009. Toppilan voimalaitosten energia-analyysi. Raportti. Empower Oy.
6. Flagen, Richard C. – Seinfeld. John H. 1988. Fundamentals of Air Pollution Engineering. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice- Hall, Inc.
7. Hyppänen, Timo - Raiko, Risto 2002. Leijupolttotekniikka. Teoksessa Hupa, Mikko – Kurki-Suonio, Ilmari – Raiko, Risto – Saastamoinen, Jaakko. Poltto ja palaminen. 2. painos. Jyväskylä: Gummerus kirjapaino Oy.
8. Huhtinen – Kettunen – Nurminen – Pakkanen 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. painos. Helsinki: Oy Edita Ab.
9. Hämäläinen, Jouni - Makkonen, Pasi 2003. Leijupolttotekniikka: vihreää energiaa. Saatavissa: <http://ppom.mbnet.fi/RV.pdf>. Hakupäivä 3.3.2016

10. Iisa, Kristiina – Kilpinen, Pia – Yrjas, Patrik 2002. Rikin oksidien muodostuminen ja poistaminen. Teoksessa Hupa, Mikko – Kurki-Suonio, Ilmari – Raiko, Risto – Saastamoinen, Jaakko. Poltto ja palaminen. 2. painos. Jyväskylä: Gummerus kirjapaino Oy.
11. Jokinen, Minna – Lahtinen, Perttu – Leino, Pentti 2005. Turpeen energiakäytön asema Suomen energijärjestelmässä. Kauppa- ja teollisuusministeriö. Espoo: Edita Publishing Oy.
12. Kilpinen, Pia 2002. Palamisen kemiaa. Teoksessa Hupa, Mikko – Kurki-Suonio, Ilmari – Raiko, Risto – Saastamoinen, Jaakko. Poltto ja palaminen. 2. painos. Jyväskylä: Gummerus kirjapaino Oy.
13. Kilpinen, Pia 2002. Typen oksidien muodostuminen ja hajoaminen. Teoksessa Hupa, Mikko – Kurki-Suonio, Ilmari – Raiko, Risto – Saastamoinen, Jaakko. Poltto ja palaminen. 2. painos. Jyväskylä: Gummerus kirjapaino Oy.
14. NO_x emission study – theory and experiences of selected fluidized bed boilers. 2011. Metso.
15. Energiantuotanto. Oulun Energia. Saatavissa: <http://www.oulunenergia.fi/energia-ja-ymparisto/energiantuotanto>. Hakupäivä 16.2.2016.
16. Rasmus, Eila 2014. Oulun Energian Toppilan voimalaitosten vuosiraportti 2014. Ympäristövuosiraportti 2014. Oulun Energia.
17. Teir, Sebastian 2003. Steam Boiler Technology. Väitöskirja. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto. Helsinki: Picaset Oy.
18. Tornberg, Aleks 2015. Leijukattilan savukaasujen loppulämpötilan hallinta. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, energiatekniikan koulutusohjelma. Saatavissa: http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/104733/Diplomity%C3%B6_Tornberg_muutokset%20tehty.pdf?sequence=2. Hakupäivä 4.3.2016.

19. Wood Fuels Basic Information Pack. 2000. Benet bioenergynetwork - Energi Dalen – Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Jyväskylä: ER-paino Oy

20. Ympäristölupahakemus lupamääräysten tarkistamiseksi. 2015. Päivitys, joka korvaa 23.6.2014 päivätyn version. ÅF-Consult LTd. Tilaaja Oulun Energia, Toppilan voimalaitos

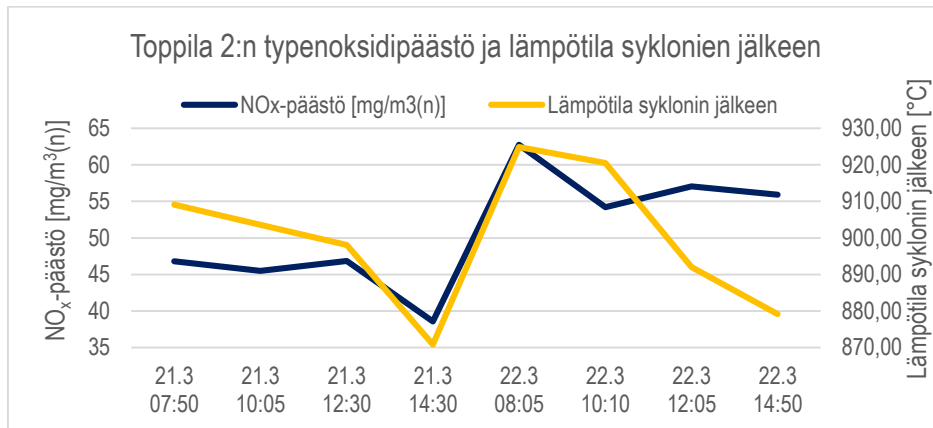
Lähtöarvot ja palamisessa syntyvän savukaasun tilavuus					
Polttoaineen koostumus [p-%]:			Prosessiarvot:		
H ₂ O	50	λ	1,342		
N*	1,35	T	805 °C		
C*	53	p	-0,708 mbar(e)		
S*	0,22	m _{pa}	1000 g		
Tuhka*	6,2				
* Osuus kuiva-aineesta			Kostean polttoaineen koostumus:		
Kuiva-aineen osuus:	0,5			[p-%]	
		N	0,00675	0,675	
Lämpötila:		C	0,265	26,5	
T	1078,15 K	S	0,0011	0,11	
Paine:		H	0,044483	4,448293	
p	99929,2 Pa	O	0,151667	15,16671	
Yleinen kaasuvakio:		Tuhka	0,031	3,1	
R	8,314 J/(Kmol)	H ₂ O	0,5	50	
Moolimassat:			Komponenttien ainemäärät polttoaineessa:		
M(N)	14 g/mol	n(N ₂)	0,241071	mol	
M(C)	12,01 g/mol	n(C)	22,06495	mol	
M(S)	32,06 g/mol	n(S)	0,034311	mol	
M(H)	1,008 g/mol	n(H ₂)	22,06495	mol	
M(O)	16 g/mol	n(O ₂)	0,47396	mol	
Avogadron vakio:		n(H ₂ O)	27,75311	mol	
N _A	6,022E+23 1/mol				
Atomien lukumäärä:			Tarvittava ilmamäärä:		
C	1,329E+25 kpl	n(O ₂) _{teor}	32,65777	mol	
H	2,658E+25 kpl	n(N ₂) _{teor}	123,5995	mol	
Vedyn massa polttoaineessa:			n(ilma) _{teor}	156,2573	mol
m(H):	44,482931 g				
			Savukaasun ainemäärä:		
			n(savukaasu) _{teor}	195,7579	mol
Savukaasukomponenttien ainemäärät:			n(ilma) _{ylim.}	53,43999	mol
n(N ₂)	123,84057 mol	n(savukaasu) _{tod}	249,1979	mol	
n(CO ₂)	22,064946 mol				
n(SO ₂)	0,0343107 mol				
n(H ₂ O)	49,818054 mol	Savukaasun tilavuus:			
			V(sk)	22,35327	m ³

Syntyvän savukaasun koostumus							
Kaasukomponenttien tilavuudet:				Kaasukomponenttien massat:			
N ₂	11,10861	m ³		N ₂	3,468585	kg	
CO ₂	1,979245	m ³		CO ₂	0,971078	kg	
SO ₂	0,003078	m ³		SO ₂	0,002198	kg	
H ₂ O	4,468724	m ³		H ₂ O	0,897522	kg	
V(sk)				Savukaasun kokonaismassa:			
V(ilma)	4,793615	m ³		m(sk)	6,74571	kg	
Savukaasun tilavuuskoostumus:				Savukaasun massakoostumus:			
		[v-%]				[p-%]	
N ₂	0,647285	64,72848		N ₂	0,514191	51,41912	
CO ₂	0,088544	8,854388		CO ₂	0,143955	14,39549	
SO ₂	0,000138	0,013768		SO ₂	0,000326	0,032583	
H ₂ O	0,199914	19,99136		H ₂ O	0,133051	13,30508	
O ₂	0,04482	4,481963		O ₂	0,052983	5,29828	
Yli-ilman koostumus:							
V(N ₂) _{ilma}	3,360324	m ³					
V(O ₂) _{ilma}	1,001866	m ³					
n(N ₂) _{ilma}	37,46143	mol					
n(O ₂) _{ilma}	11,16896	mol					
m(N ₂) _{ilma}	1,04892	kg					
m(O ₂) _{ilma}	0,357407	kg					
m(ilma):	1,406327	kg					

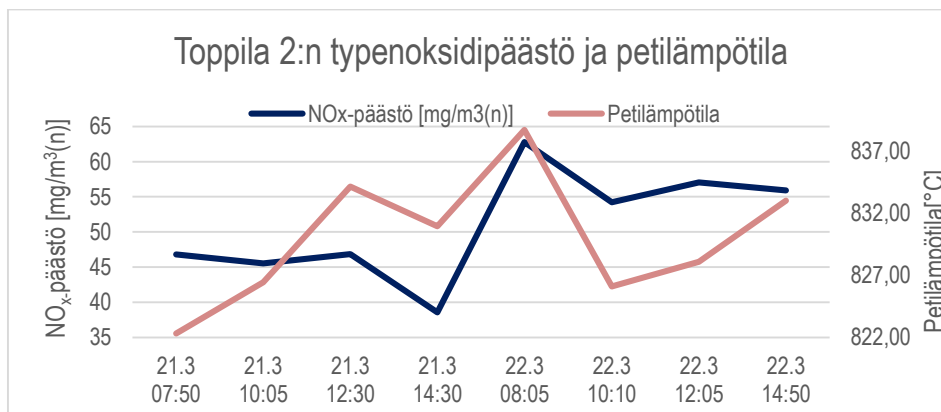
Palamisesta syntyvät rikkidioksidipäästöt						
Yksi kuutiometri savukaasua sisältää rikkidioksidia:						
V(SO ₂)	0,000129	m ³ _{SO2} /m ³ _{sk}				
Rikkioksidin tiheys:						
ρ(SO ₂)	0,717576	kg/m ³				
Rikkidioksidin massa yhdessä normikuutiossa savukaasua:						
m(SO ₂)	0,00018	kg				
	0,180429	g				
	180,4286	mg				
Toppila 2 (jos savukaasulauhdutin on toiminnassa):						
m(SO ₂)	108,2571	mg				
Nykyiset päästöraja-arvot:						
Jos	Toppila 1	≥ 570	mg/m ³	HUONO	< 570	mg/m ³ HYVÄ
	Toppila 2	≥ 500	mg/m ³	HUONO	< 500	mg/m ³ HYVÄ

Rikkidioksidin poistaminen savukaasuista kalkin avulla						
Moolimassat:			Ainemäärät:			
M(Ca)	40,06	g/mol	n(SO ₂)	0,034311	mol	
M(C)	12,01	g/mol	n(CaO)	0,034311	mol	
M(SO ₂)	64,06	g/mol	n(CaCO ₃)	0,034311	mol	
M(O)	16	g/mol				
Tarvittavan kalkkikiven massa:						
m(CaCO ₃)	3,433468	g				
	0,003433	kg				

Päästöt ja prosessilämpötilat



KUVA 51. Toppila 2 -laitosyksikön typenoksidipäästö ja lämpötila syklonin jälkeen. Lämpötila on laskettu keskiarvona kunkin sykloninjälkeen mitatuista lämpötilojen arvoista.

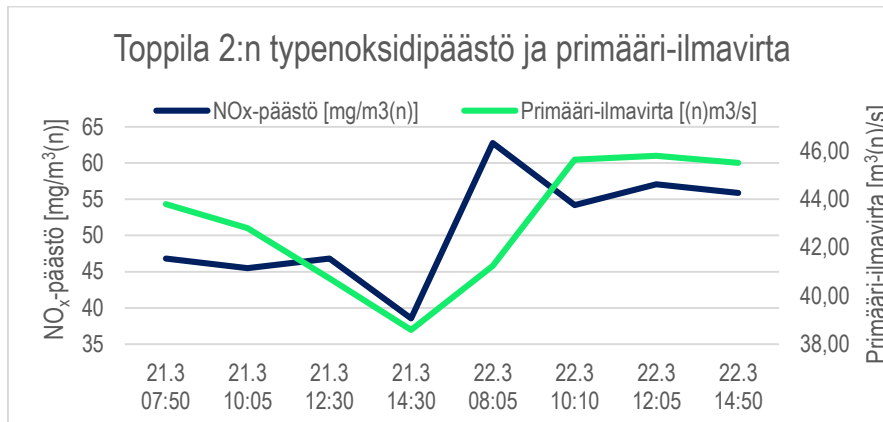


KUVA 52. Toppila 2 -laitosyksikön typenoksidipäästö ja petin keskilämpötila.

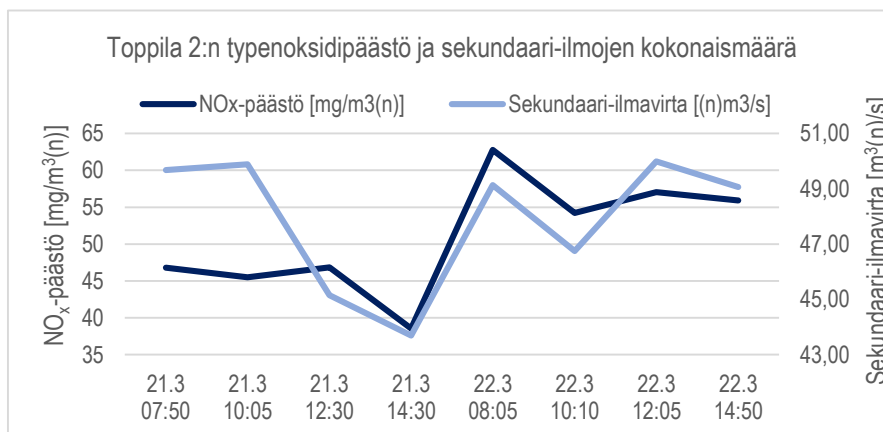


KUVA 53. Toppila 2 -laitosyksikön typenoksidipäästö ja lämpötila kahden metrin mittaustasolla

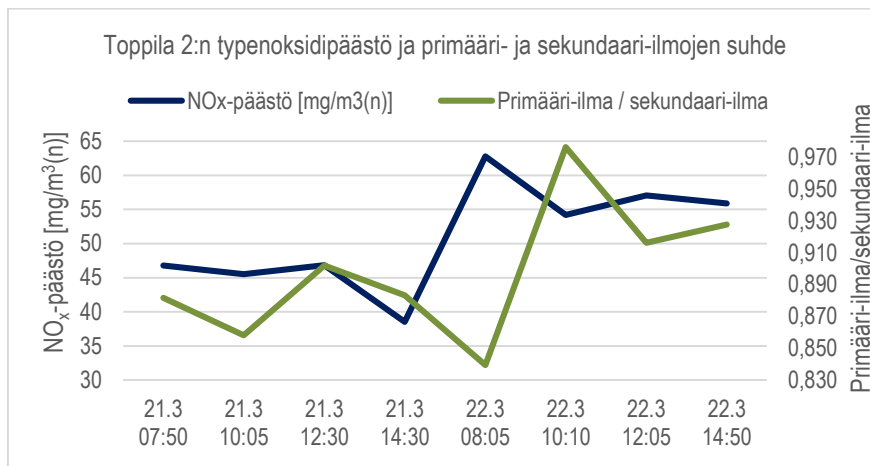
Päästöt ja palamisilmojen tilavuusvirrat



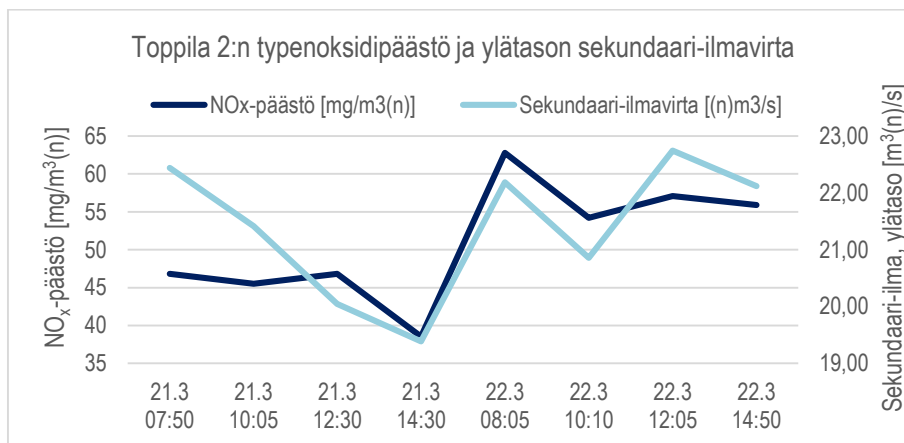
KUVA 54. Toppila 2 -laitosyksikön typenoksidipäästö ja primääri-ilman tilavuusvirta



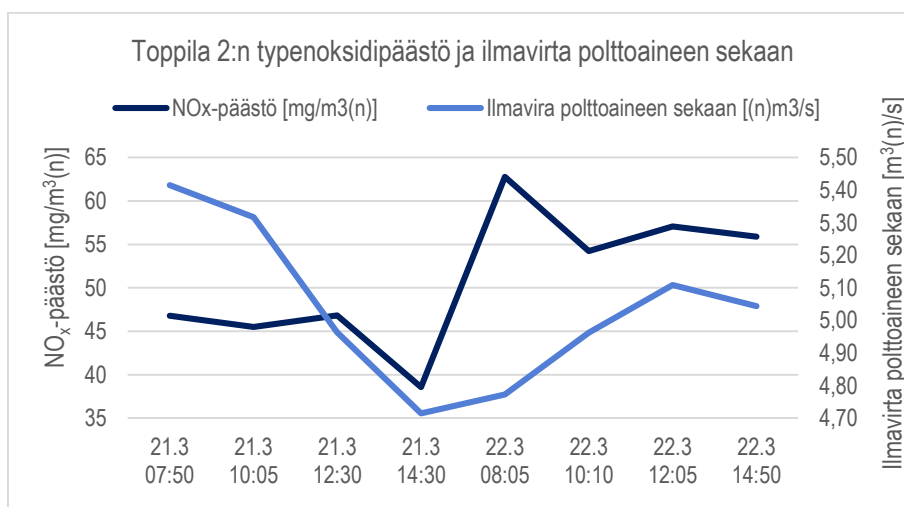
KUVA 55. Toppila 2 -laitosyksikön typenoksidipäästö ja sekundaari-ilman tilavuusvirta



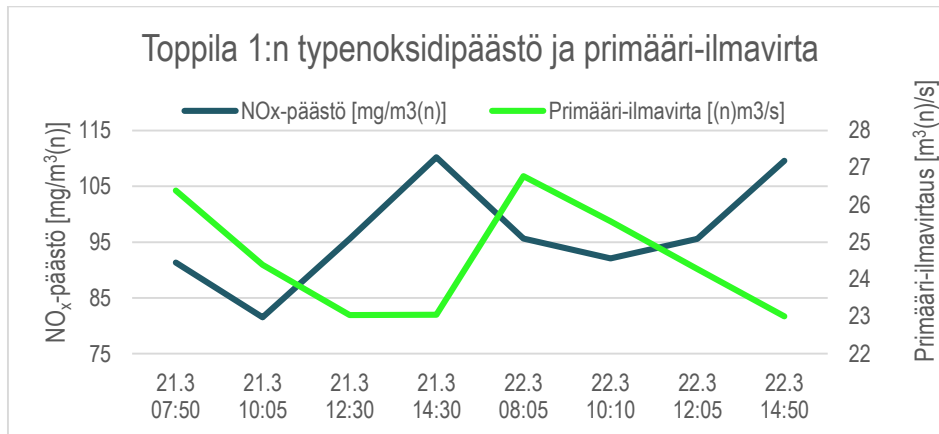
KUVA 56. Toppila 2 -laitosyksikön typenoksidipäästö sekä primääri- ja sekundaari-ilman suhde



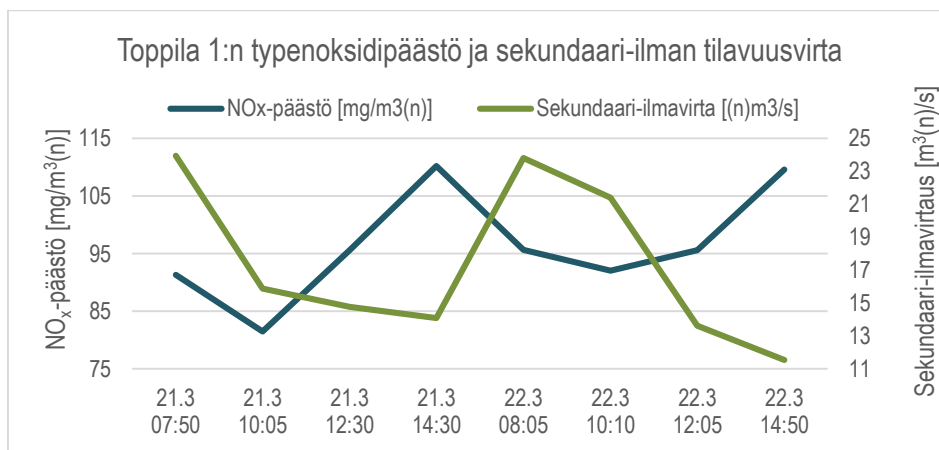
KUVA 57. Toppila 2 -laitosyksikön typenoksidipäästö ja ylätason sekundaari-ilmavirta



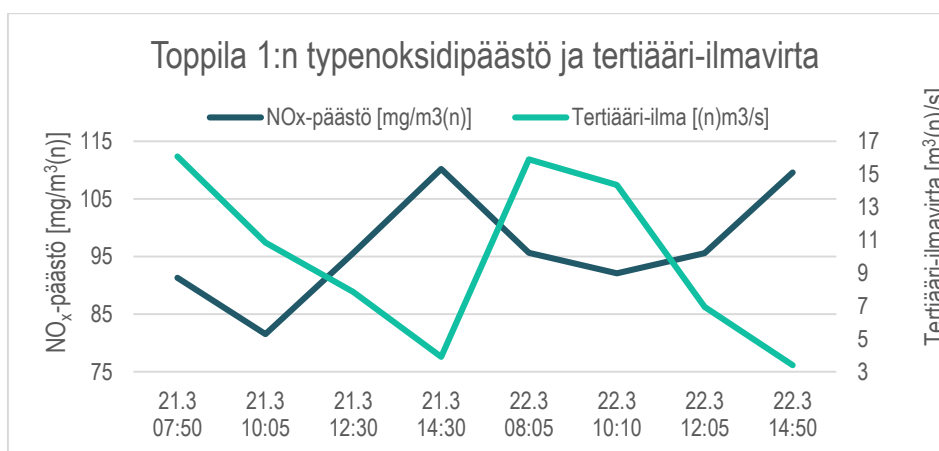
KUVA 58. Toppila 2 -laitosyksikön typenoksidipäästö ja ilmavirta polttoaineen sekaan



KUVA 59. Toppila 1 -laitosyksikön typenoksidipäästö ja primääri-ilman tilavuusvirta



KUVA 60. Toppila 1 -laitosyksikön typenoksidipäästö ja sekundaari-ilman tilavuusvirta



KUVA 61. Toppila 1 -laitosyksikön typenoksidipäästö ja tertiääri-ilman tilavuusvirta

	Toppila 1	Toppila 2
Kattilan lämpötila	Keskilämpötilan nousu vaikuttaa termisen NO _x :n muodostumiseen lisäävästi.	<p>Tulipesän lämpötilan nousu lisää päästöjä. Merkittävin vaikutus on lämpötilalla metrin mittaustasolla.</p> <p>Lämpötiloilla ennen sykloneja on myös suuri vaikutus päästöjen muodostumiseen.</p> <p>Myös muilla kattilan lämpötiloilla on hieman vaikutusta päästöihin, mutta niiden merkitys päästöjen aiheuttaja ei ole yhtä suuri.</p>
Petin lämpötila	Lämpötilan nousu voi aiheuttaa merkittävän NO _x -päästön lisääntymisen.	<p>Petilämpötilalla on vain hieman vaikutusta päästöihin.</p> <p>Merkittävä lämpötilan nousu kuitenkin aiheuttaa termisen NO_x:n määrän kasvamista</p>

Primääri-ilma	Primääri-ilman tilavuusvirtauksen pieneneminen aiheuttaa typenoksidipäästöjen määrän kasvun.	Tilavuusvirtaus on yleensä melko tasainen, eikä sillä ole kovin suurta merkitystä päästöihin. Ilmamäärän merkittävä pieneneminen kuitenkin vähentää hetkellisesti NO _x -päästöjä.
Sekundaari-ilma	Tilavuusvirran pieneneminen kasvattaa typenoksidipäästöjä. Päästöjen kannalta oleellisinta on kuitenkin primääri- ja sekundaari-ilmavirtojen suhde.	Virtauksen kasvaminen lisää päästöjä. Suurin vaikutus päästön muodostumiseen on alatasen sekundaari-ilmalla. Ylätason sekundaari-ilman virtauksella on sama vaikutus, mutta se ei ole yhtä suuri. Polttoaineen sekaan ajettavalla sekundaari-ilmalla ei juurikaan ole merkitystä päästöjen muodostumisen kannalta.
Tertiääri-ilma	Tertiääri-ilman virtaus kattilaan vaikuttaa NO _x -päästöihin jonkin verran. Vaikutus on samanlainen kuin sekundaari-ilman virtauksella.	

Typpimonoksidin poisto savukaasuista ammoniakkiveden avulla						
Typpioksidien massat:			Savukaasun kokonaistilavuus ja NO _x -päästö:			
m(NO _x)	1303,25	mg	V(sk)	25	m ³	
			NO _x	52,13	mg/m ³	
m(NO _x)	1,30325	g				
m(NO)	1,2380875	g	(Typpimonoksidin osuus 0,95 %)			
Moolimassat:						
M(N)	14	g/mol				
M(O)	16	g/mol				
M(H)	1,008	g/mol				
Ainemäärät:						
n(NO)	0,0412696	mol				
n(NH ₃)	0,0412696	mol				
Puhtaan ammoniakkin massa:						
m(NH ₃)	0,7025734	g				
Ammoniakkiveden vahvuus:			24,5 %			
Ammoniakkiveden massa:						
m(NH ₃) _{aq}	2,8676465	g	0,028676	kg		
Ammoniakkiveden tiheys:						
ρ	0,909	g/cm ³				
Ammoniakkiveden tilavuus:						
V(NH ₃) _{aq}	3,1547266	ml				
	0,0031547	l				
	3,155E-06	m ³				