

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma / Energia- ja ympäristötekniikka

Antti Kylmä

SNCR-LAITTEISTON OPTIMOINTI JÄTTEENPOLTTOLAITOKSELLA

Opinnäytetyö 2011

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka

KYLMÄLÄ, ANTTI

SNCR-laitteiston optimointi jätteenpolttolaitoksella

Opinnäytetyö

56 sivua + 5 liitesivua

Työn ohjaaja

yliopettaja Markku Huhtinen

käyttöpäällikkö Antti Lanki

Toimeksiantaja

Kotkan Energia Oy

Maaliskuu 2011

Avainsanat

SNCR, NO_x, typpioksidi, jätteenpolttolaitos, ammoniakki

Kotkan Energia Oy:n Hyötyvoimalaitoksella on sen toiminnan ajan vuodesta 2009 alkaen ollut typenoksidipäästöjä vähentävän SNCR-laitteiston toiminta odotettua huonompaa. Ammoniakin raakapäästöjä on muodostunut huomattavan paljon, ja ammoniakkivesiliuoksen kulutus on ollut hiukan odotettua korkeampaa. Reagoimaton ammoniakki aiheuttaa kattilan sisäosissa ja piipussa korroosiota, ja ammoniakkivesiliuoksen ylimääräinen kulutus nostaa kustannuksia. Työn tarkoituksena oli optimoida SNCR-laitteiston toiminta ja ammoniakin raakapäästöjen muodostuminen, sekä selvittää käytössä olevan laitteiston maksimitehokkuus typenoksidipäästöjen vähennyksessä.

Työn aikana tutustuttiin useaan aihetta käsittelevään teokseen, toisen jätteenpolttolaitoksen vastaavaan SNCR-laitteistoon sekä oltiin yhteydessä Hyötyvoimalaitoksen laitteiston valmistajan asiantuntijoihin. Tarkasteluiden pohjalta suoritettiin useita erilaisia testejä ja tutkittiin kattilan ajotrendejä tutkimusongelman selvittämiseksi.

Tutkimuksen avulla selvisi, että SNCR-laitteiston huono toiminta johtui ammoniakin huonosta sekoittumisesta savukaasuvirtaukseen. Testausten ja tulosten perusteella päätettiin sekoitusta parantaa muuttamalla ruiskutus kattilan molemmanpuoleiseksi. Muutos toteutettiin lisäämällä kattilan toiselle sivulle yhden ruiskutuslaitteen. Lisäyksellä saavutettiin merkittävä parannus ammoniakin reagointiin. Ammoniakkivesiliuoksen kulutus ja ammoniakin raakapäästöt vähenivät merkittävästi. Ammoniakkivesiliuoksen kulutus väheni noin 20 % ja ammoniakin raakapäästöt tippuivat noin 65 %.

Lopputuloksena saavutettu suutinten lisäys on otettu pysyvästi käyttöön 15.2.2011 alkaen. Toteutetulla muutoksella saadaan vuositasolla merkittävää suoraa ja epäsuoraa rahallista hyötyä.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Mechanical and Production Engineering

KYLMÄLÄ, ANTTI

Bachelor's Thesis

56 pages + 5 pages of appendices

Supervisor

Markku Huhtinen, Senior Lecturer

Antti Lanki, Operation Manager

Commissioned by

Kotkan Energia Oy

March 2011

Keywords

SNCR, NO_x, nitrogen oxide, waste-to-energy power plant, ammonia

Since 2009 the nitrogen oxide (NO_x) emissions removal system SNCR has not been working as well as expected at Kotka Energia Oy's waste-to-energy power plant. The formation of raw ammonia in the stack has been greater than assumed and the consumption of ammonia solution has been slightly too high. The raw ammonia may cause corrosion in the boiler and stack and the excessive consumption of ammonia raises the costs.

The aim of this thesis was to optimize the SNCR system and the formation of raw ammonia in the stack and also to find out the maximum reduction of NO_x achievable by this current SNCR system.

The research was carried out by studying several works focusing on SNCR systems and NO_x emissions, by getting familiar with one more SNCR system of a similar power plant and also by being in contact with the specialists of the manufacturer of the current SNCR system. After these examinations various tests were performed and operation trends from boiler data were studied to solve the research problem.

The biggest problem discovered was that the ammonia did not mix well enough with the combustion gases. With this discovery it was decided to change the injection of the ammonia solution to both the sides of the boiler. The change was put into practice by adding two injectors to the left side of the boiler. The adding brought remarkable enhancement to the reaction of ammonia and nitrogen oxide. The consumption of ammonia solution dropped 20 % and the formation of raw ammonia in the stack dropped 65 %.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	6
2	YRITYKSEN ESITTELY	6
	2.1 Hovinsaaren voimalaitos	7
	2.2 Hyötyvoimalaitos	8
	2.3 Hyötyvoimalaitoksen tuotantoprosessi	9
3	JÄTTEENPOLTON YMPÄRISTÖVAATIMUKSET	11
	3.1 Polttoaineet ja -olosuhteet	11
	3.2 Savukaasujen päästöt	12
	3.3 Kuonat ja tuhkat	13
4	NO _x -PÄÄSTÖT	13
	4.1 NO _x -päästöjen muodostuminen	13
	4.1.1 Terminen NO:n muodostuminen	14
	4.1.2 Nopea NO:n muodostuminen	15
	4.1.3 Polttoaineperäisen NO:n muodostuminen	16
	4.1.4 NO ₂ :n muodostuminen	18
	4.2 NO _x -päästöjen vähennys	20
	4.2.1 SCR	20
	4.2.2 SNCR	20
	4.2.3 Palamisilman ja polttoaineen vaiheistus	24
5	TUTKIMUKSEN ALKUTILANNE	25
	5.1 Hyötyvoimalaitoksen SNCR-laitteisto	25
	5.2 Päästömittauslaitteisto	31
	5.3 NO _x -päästöt ja ammoniakkin kulutus	31
6	TUTKIMUKSET	33
	6.1 Päästömittauslaitteiston vika	33
	6.2 SNCR-laitteiston tehokkuus	34
	6.3 Tarkempi tutkiminen ja testaukset	39
7	TUTUSTUMINEN TOISEEN SNCR LAITTEISTOON	41

7.1 Ekovoima Oy:n jätevoimala	41
7.2 Ekovoiman SNCR-laitteisto	42
7.3 SNCR-laitteiston suorituskyky	43
8 SUUTINTEN LISÄYS KATTILAN TOISELLE SIVULLE	44
8.1 Ammoniakkilinjan muutos	45
8.2 Testaukset	47
8.3 Petro Miljö Ab:n käynti Hyötyvoimalaitoksella	48
8.4 Uuden kytkennän tulokset	49
8.5 Savukaasunpuhdistuslaitteiston paine-eron väheneminen	51
8.6 SNCR-laitteiston maksimitehokkuus	52
9 YHTEENVETO	53
LÄHTEET	55
LIITTEET	

Liite 1. NO_x mittauksen ja redusoidun arvon erot 5.-9.2010

Liite 2. Petro Miljö lämpötilamittaukset Hyötyvoimalaitoksella 14.-15.2.2011

1 JOHDANTO

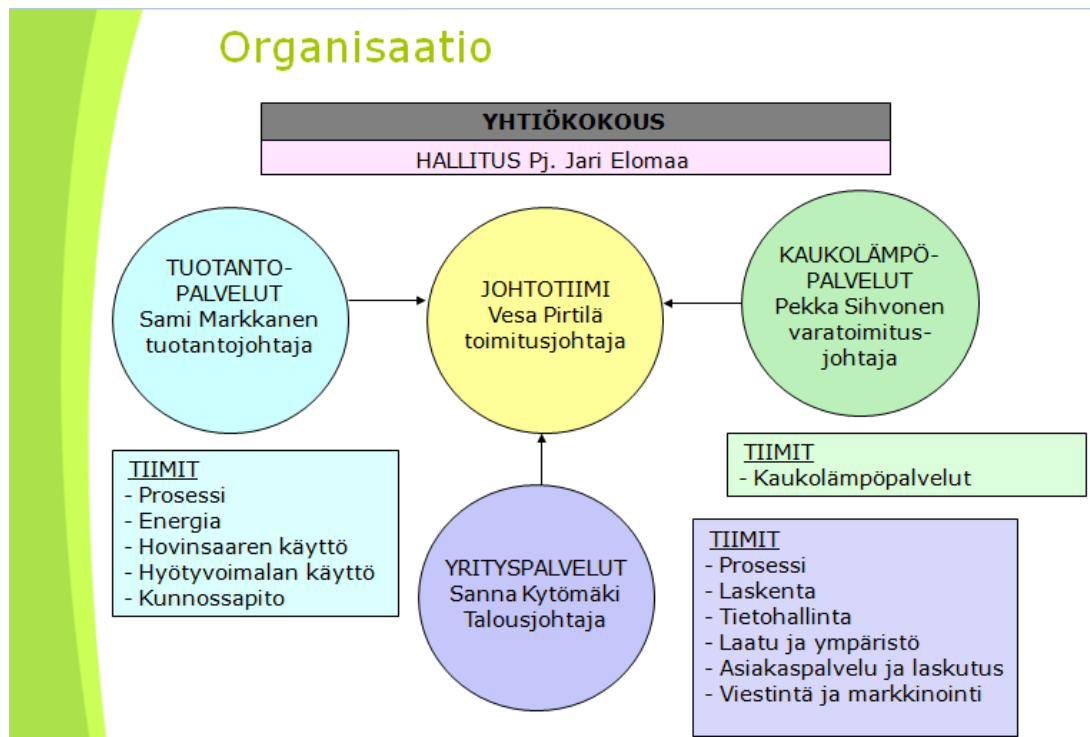
Tämän työn tavoitteena oli optimoida Kotkan Energia Oy:n Hyötyvoimalaitoksen typenoksidipäästöjen vähennyksessä käytettävä SNCR-laitteisto ja vähentää ammoniakkin raakapäästöjen muodostumista. Tarkoituksena oli myös selvittää laitteiston käytännön maksimi NO_x-päästöjen vähennyksessä tulevaisuuden mahdollisesti tiukkenevien päästörajoiden takia.

Työ sai alkunsa siitä, että ammoniakkin raakapäästöjä on muodostunut huomattavasti odotettua enemmän lähes koko laitoksen toiminnan ajan. Myös ammoniakkivesiliuoksen kulutus typenoksidien vähennyksessä on ollut hiukan odotettua suurempaa ja epätasaista.

Työn aiheen sain elo-syyskuussa 2010 Hyötyvoimalaitoksen käyttöpäälliköltä Antti Langilta ja hän toimi työn yhteyshenkilönä.

2 YRITYKSEN ESITTELY

Kotkan Energia Oy on vuonna 1993 perustettu Kotkan kaupungin kokonaan omistama energiayhtiö. Yhtiön liiketoiminta koostuu energian tuotannosta ja kaukolämpöpalveluista uusiutuvia energiavaroja ja jätteitä taloudellisesti käyttäen. Päätuotteita ovat kaukolämpö, teollisuushöyry ja sähkö. Yhtiö toimii tiimiorganisaation muodossa (kuva 1) ja sen toiminta koostuu tuotantopalveluista, kaukolämpöpalveluista ja yrityspalveluista, joita johtaa johtotiimi. (1.)



Kuva 1. Kotkan Energia Oy organisaatio (2)

Kotkan Energia Oy:n keskeisiä arvoja energian tuotannossa ovat ympäristöystävällisyys ja tehokkuus. Energian tuotannossa käytetään bio- ja tuulivoimaa, kierrätyspoltoaineita, sekä tukipolttoaineina maakaasua ja kevyttä polttoöljyä. Kotkan Energia Oy pyrkii tuottamaan laadukkaita, kustannustehokkaita ja ympäristöystävällisiä energia-palveluita sekä kehittämään omaa toimintaansa jatkuvasti. Yhtiölle on myönnetty ISO 9001:2000-laatusertifikaatti ja ISO 14001:2004-ympäristösertifikaatti. (2.)

Yhtiöllä on kaksi voimalaitosta, Hovinsaaren voimalaitos ja Korkeakosken Hyötyvoimalaitos, sekä kaksi 1MW:n tuulivoimalaa. Tämän lisäksi yrityksellä on yksi bio-kaasulaitos ja useita kaukolämpökeskuksia. (1.)

2.1 Hovinsaaren voimalaitos

Hovinsaaren voimalaitos on Kotkan Energia Oy:n päätuotantolaitos. Voimalaitos on tyypiltään CHP eli lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitos. Hovinsaaren voimalaitoksessa tuotetaan suurin osa Kotkassa käytettävästä kaukolämmöstä. Lisäksi laitoksella tuotetaan prosessihöyryä Danisco Sweeteners Oy:n tehtaalle sekä sähköä valtakunnan verkkoon. Se on nykyaikainen ja ympäristöystävällinen laitos, jossa erityistä huomiota on kiinnitetty savukaasujen puhdistukseen ja muiden ympäristöhaittojen minimointiin. (1.)

Hovinsaaren voimalaitos muodostuu kombivoimalaitoksesta ja biovoimalaitoksesta. Kombivoimalaitos käyttää polttoaineenaan maakaasua ja biovoimalaitos metsähaketta, kuorta, purua, metsäteollisuuden sivutuotteita, jyrshinturvetta, ruokohelpeä ja kierrätyspolttoaineita. Näiden lisäksi vara- ja tukipolttoaineena käytetään maakaasua. (1.)

Hovinsaaren voimalaitos tuottaa vuosittain 150-250 GWh sähköä, 300-350 GWh kaukolämpöä ja noin 140 GWh prosessihöyryä. (1.)

2.2 Hyötyvoimalaitos

Hyötyvoimalaitos on vuonna 2009 käyttöön otettu CHP-laitos eli yhdistetty lämmön- ja sähköntuotantolaitos. Laitos on polttoaineteholtaan 34 MW ja se käyttää polttoaineenaan 90-prosenttisesti kierrätykseen kelpaamatonta kotitalousjätettä sekä 10 % teollisuuden jätettä ja tuottaa siitä sähköä, prosessihöyryä ja kaukolämpöä. Keräysalue koostuu Itä-Uudenmaan, Kymenlaakson, Päijät-Hämeen ja Mikkelin alueesta. Keräilyalueella asuu noin 540 000 ihmistä. Teollisuuden jätettä tulee Korkeakoskella olevalta Sonoco-Alcoren kartonkitehtaalta. Hyötyvoimalaitoksen ansiosta alueen jätehuolto täyttää jo nyt EU:n ja Suomen valtion tulevat jätteenhyötykäyttötavoitteet. (1.)

Teollisuus käyttää suurimman osan laitoksessa tuotetusta energiasta, mutta osa hyödynnetään tavallisissa kotitalouksissa Karhulan alueella. Noin 50 % käytetään teollisuudessa, 30 % kaukolämpönä ja 20 % sähköinä. Hyötyvoimalaitos on pitkän ajan energiaratkaisu, sen käyttöaika on yli 20 vuotta. Vuosittainen käyntiaika on yli 11 kuukautta, ja voimala on suunniteltu käymään aina 100 %:n teholla. Vuosittain Hyötyvoimalaitos käyttää polttoainetta n. 90 000 t, jonka energiasisältö on noin 270 000 MWh. Laitoksessa käytettävä tekniikka on valittu siten, että se on yksinkertaista ja toimintavarmaa. (2.)

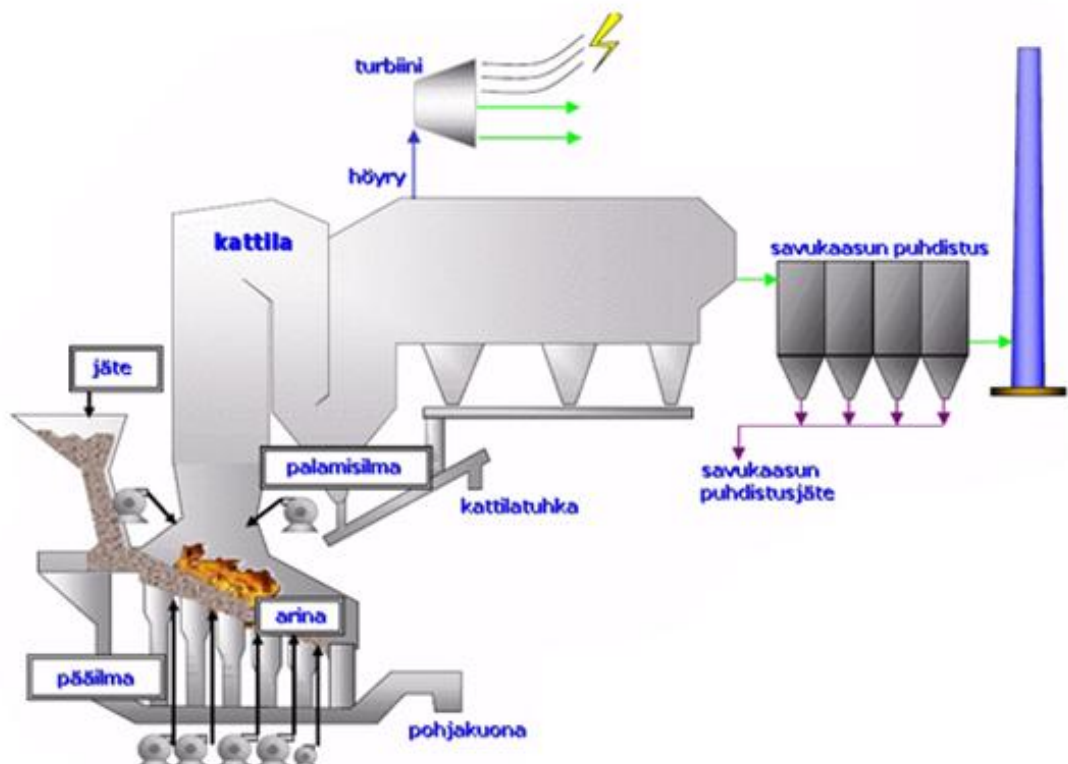
Jätteiden palamisesta jäljelle jäävät savukaasut puhdistetaan nykyaikaisilla menetelmillä ja lasketaan puhdistettuina taivaalle. Lisäksi palamisesta jäävä tuhka pyritään hyödyntämään esimerkiksi kaatopaikkojen katemateriaalina. (1.)



Kuva 2, Hyötyvoimalaitos (2)

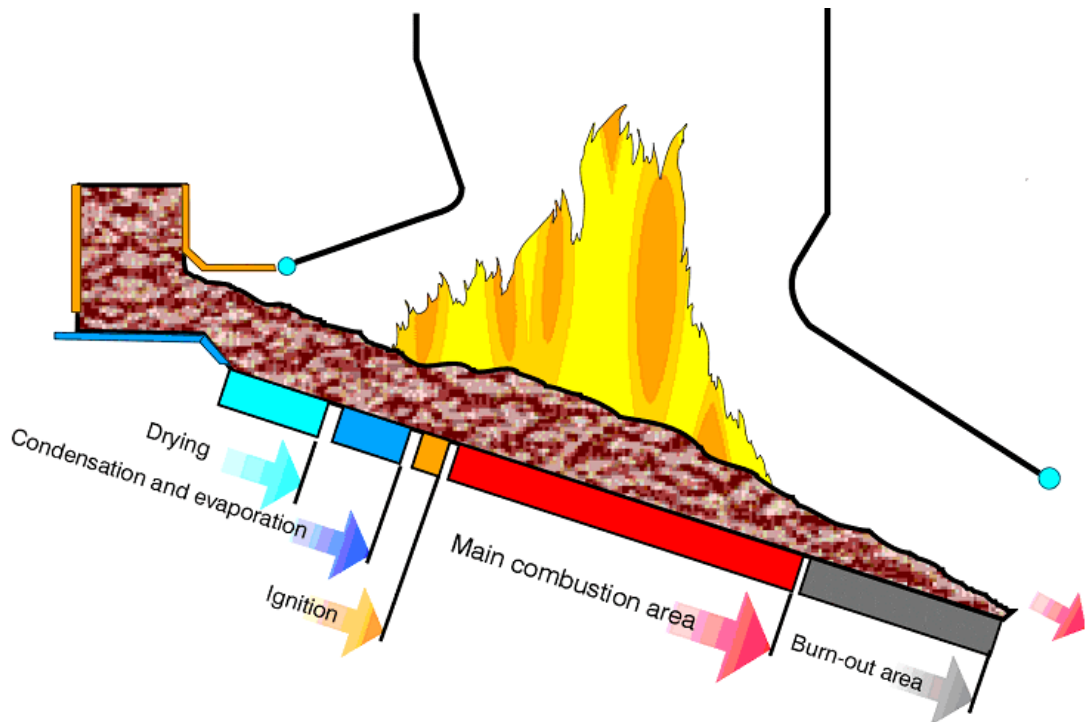
2.3 Hyötyvoimalaitoksen tuotantoprosessi

Hyötyvoimalaitoksella käytettävä kattilateknikka on hyvin yksinkertaista ja toimintavarmaa. Laitoksen arinakattila on Keppel Seghersin valmistama ja savukaasujen puhdistuksessa käytetään Alstomin valmistamaa NID-puhdistuslaitteistoa. (3.)



Kuva 3. Hyötyvoimalaitoksen tuotantoprosessi (2)

Jäte siirretään kahmarinosturilla syöttötorveen, josta se valuu painovoiman vaikutuksesta syöttöpöydälle ja sieltä kahden hydraulisen työntimen avulla arinalle. Ilmajäähdytetty ja hydraulikalla toimiva arina koostuu viidestä elementistä, jolla jäte kuivuu, syttyy ja palaa (kuva 4). Ensimmäisellä ja toisella elementillä jäte kuivuu ja syttyy palamaan. Kolmannella ja neljännellä elementillä jäte palaa. Viidennellä elementillä varmistetaan jätteen palaminen loppuun ennen sen tippumista vesitäytteiselle kuonakuljettimelle, jossa poltosta jäljelle jäävä kuona jäähtyy. Jokaisella elementillä on oma primääripuhallin. (3.)



Kuva 4. Palamisen vaiheet (3)

Täydellisen palamisen varmistamiseksi ja polttotapahtuman hallitsemiseksi syötetään noin 3 metriä arinan yläpuolelle kahdella sekundääripuhaltimella polttoilmaa leijailemaan lähtevien partikkeleiden ja kaasujen polttamiseksi sekä säädetään kattilan jäännöshappi tavoitteeseen. Lämpötila arinan kuumimmassa kohdassa on noin 1000 °C riippuen mm. polttoaineen laadusta, kosteudesta ja kattilan kuormasta. Lämpötilan pysyminen riittävän korkealla varmistetaan automaattisesti käynnistyvillä maakaasulla toimivilla apupolttimilla (yksi poltin kattilan molemmin puolin). (3.)

Syntyvät savukaasut kulkevat kattilan läpi ja luovuttavat lämpönsä kattilan seinien sisällä putkistoissa kulkevaan veteen ja kattilan sisällä oleviin konvektiolämmönsiirtimiin: tulistimiin, höyrystimiin ja esilämmittämiin. Syntyvä korkeapaineinen höyry

johdetaan väliottolauhdeturbiiniin, joka pyörittää sähköä tuottavaa generaattoria. Väliotosta höyry menee matalapaineisena lähialueen tehtaille prosessihöyryksi sekä tuotetaan kaukolämmönvaihtimen avulla kaukolämpöä lähialueen kotitalouksiin. (3.)

Kattilan jälkeen savukaasut ohjataan savukaasun puhdistuslaitokseen, jossa savukaasu kulkee NID-reaktorin läpi. Reaktorissa savukaasuun lisätään sammutettua kalkkia ja aktiivihiiltä. Käsitelty savukaasu johdetaan letkusuodattimiin, jotka suodattavat siitä pois pölyn ja muun kiinteän aineen. Savukaasu puhdistuu 99,9-prosenttisesti. (3.)

3 JÄTTEENPOLTON YMPÄRISTÖVAATIMUKSET

Hyötyvoimalaitoksen toimintaa ohjaa Kaakkois-Suomen ympäristökeskuksen myöntämän ympäristösuojelulain 28.§:n mukainen ympäristölupa Nro A 1146. Polttolaitokseen sovelletaan jätteenpolttoasetusta (362/2003). Lupa määrittelee laitoksen toiminnan ja tarkkailun, niin polttoaineiden, -olosuhteiden, päästöjen kuin syntyvien jätteiden/tuhkien osalta. (4.)

3.1 Polttoaineet ja -olosuhteet

Polttolaitoksessa voidaan polttaa niitä jättepolttoaineita, joita hakemuksessa on esitetty. Ensisijaisia polttoaineita ovat syntypaikkalajiteltu yhdyskuntajäte, kartonginvalmistuksessa syntyvät polttokelpoiset jätteet sekä purkupuua ja kierrätyspuu. Maakaasua voidaan polttaa ilman käyttömäärärajoituksia. (4.)

Poltto-olosuhteet on oltava mahdollisimman täydelliset siten, että pohjakuonan orgaanisen hiilen kokonaismäärä jää alle kolmen prosentin tai niiden hehkutushäviö alle viiden prosentin kuivapainosta. Tulipesän savukaasujen lämpötilan on noustava valvotusti vähintään 2 sekunniksi 850 °C:een polttoilman viimeisen syötön jälkeen mitattuna. Savukaasujen lämpötilan laskiessa alle 850 °C:een maakaasulla toimiva lisäpolttin/lisäpolttimet käynnistyvät automaattisesti. Lisäpolttimia käytetään laitoksen käynnistys- ja pysäytystoimien aikana mainitun lämpötilan ylläpitämiseksi niin kauan kuin arinalla on palamatonta jätettä. Polttoprosessin ohjausjärjestelmässä on automaattiset jätteensyötön estävät järjestelmät, mikäli palamisolosuhteet eivät täytä ympäristöluvan ehtoja. (4.)

3.2 Savukaasujen päästöt

Savukaasujen päästöjä valvotaan ja mittaustuloksia on verrattava päästöjen raja-arvoihin jätteenpoltoasetuksen 17.§:n, 18.§:n, 19.§:n, 21.§:n ja 22.§:n mukaisesti. Epäpuhtauksien pitoisuudet kuivissa savukaasuissa ilmoitetaan redusoituna 11 %:n happipitoisuuteen ja ne saavat olla enintään taulukon 1 ja 2 mukaisia.

Taulukko 1. Päästöjen vuorokauden ja puolen tunnin keskiarvojen raja-arvot, mg/nm³.
(4)

	Vrk- keskiarvo	0,5 tunnin keskiarvo
Hiukkaset	10	30
Orgaanisen hiilen kokonaismäärä	10	20
HCl	10	60
HF	1	4
SO ₂	50	200
NO _x (NO ₂ :na)	200	400
CO (ei käynnistys- ja pysäytysaikoina)	50 (97%)	100

Taulukko 2. Raskasmetallien, dioksiinien ja furaanien keskiarvojen raja-arvot. (4)

Raskasmetallit mg/m ³	
Cd, Tl	yhteensä 0,05
Hg	0,05
Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V	yhteensä 0,5
Dioksiinit ja furaanit (ng/m ³)	0,1

Voimalaitoksen typenoksidipäästöt on pidettävä mahdollisen pieninä ja niitä tulee vähentää selektiivisellä ei-katalyyttisellä ammoniakilla tehoaineena käytävällä NO_x-vähennysjärjestelmällä. Savukaasujen happamia kaasukomponentteja (SO₂, HCl ja HF) puhdistetaan puolikuivalla savukaasujen puhdistusmenetelmällä. Reagoivina aineina käytetään kuivaa kalsiumhydroksidia Ca(OH)₂. Elohopeaa, dioksiineja ja furaaneja sekä muita raskaita orgaanisia yhdisteitä poistetaan syöttämällä savukaasuihin aktiivihiiltä. Jälkipuhdistimena toimiva letkusuodatin puhdistaa savukaasusta hiukkaset ja pölyn. Ympäristöluvan mukaisesti savukaasujen puhdistuksessa on pyrittävä saavut-

tamaan mahdollisimman hyvä puhdistustulos käyttämällä luvan mukaisia menetelmiä.
(4.)

3.3 Kuonat ja tuhkat

Polttaessa jätepolttoainetta syntyy palamattomasta jätteestä pohjakuonaa ja lentotuhkaa sekä savukaasun puhdistuksessa syntyvää jätettä. Jätteet saa luovuttaa vain sellaiselle vastaanottajalle, jolla on jätelain 15.§:n mukainen hyväksyntä jätteen vastaanottamiseksi. Tuhkat on kuljetettava ja välivarastoitava tarvittaessa siten, että niiden joutuminen ympäristöön estetään. (4.)

4 NO_x-PÄÄSTÖT

Palamisen yhteydessä muodostuu haitallisia typpiyhdisteitä, joista tärkeimmät ovat typpimonoksidi (NO) ja typpidioksidi (NO₂). Yhdisteistä käytetään yhteisnimitystä NO_x. Muodostuminen tapahtuu typen ja hapen reagoiessa keskenään. NO_x-yhdisteistä noin 95 % on peräisin NO:sta ja loput 5 % NO₂:sta. Typpioksidipäästöjä mitattaessa ei tehdä eroa monoksidien ja dioksidien välillä vaan käytetään yhteistä lyhennettä NO_x, koska suuri osa typpimonoksidista hapettuu ilmakehässä suhteellisen nopeasti typpidioksidiksi. Tämän vuoksi NO- ja NO₂-päästöt ovat ympäristövaikutuksiltaan pitkälti samanlaisia. Mitatut NO_x-pitoisuudet ilmoitetaan täten NO₂:na. (5,300.)

NO_x-päästöt aiheuttavat sekä terveyshaittoja että ympäristön happamoitumista. Happamoittava vaikutus syntyy typen oksidien muuttuessa ilmakehässä typpihapoksi. Happamoitumisen lisäksi NO_x- päästöt voivat lisätä saastesumua ja alailmakehän otsonia alueilla, joilla on paljon liikennettä. Suomessa suurin NO_x-päästöjen lähde on liikenne. Energiantuotannon polttoprosessit ja teollisuus ovat toiseksi suurin päästölähde. (5,300.)

4.1 NO_x-päästöjen muodostuminen

Hapen kanssa tulipesässä reagoiva typpi on joko polttoaineen sisältämää orgaanista tyyppiä tai polttoilmassa olevaa molekyylytipeä. Palamisen yhteydessä syntyy pääosin typpimonoksidia ja syntyneestä typpimonoksidista muodostuu vähän typpidioksidia. (5, 304.)

4.1.1 Terminen NO:n muodostuminen

Palamisilman sisältämän molekyylytymen (N_2) muodostuminen typpimonoksidiksi edellyttää typpiatomien välisen voimakkaan sidoksen rikkoutumista N_2 :ssa (sidosenergia n.950kJ/mol). Muodostus tapahtuu reaktioketjun avulla, jonka molekyylytymen ja happiatomin välinen reaktio käynnistää. (5, 304–306.)



$N_2 = \text{molekyylytymppi}$

$O = \text{happiatomi}$

$NO = \text{typpimonoksidi}$

$N = \text{orgaaninen typpi}$



$N = \text{orgaaninen typpi}$

$O_2 = \text{molekyyhappi}$

$NO = \text{typpimonoksidi}$

$O = \text{happiatomi}$

On havaittu, että ilmaylimäärän pienessä sekä kokonaan ali-ilmaisissa, pelkistävässä olosuhteissa O_2 :n merkitys N-atomien hapettajana vähenee (reaktio 2). Reaktiossa 1 muodostuneet N-atomit hapettuvat tällöin typpimonoksidiksi pääasiassa hydroksyyli-radikaalin avulla. (5, 304–306.)



$N = \text{orgaaninen typpi}$

$OH = \text{hydroksyyli-radikaali}$

$NO = \text{typpimonoksidi}$

$H = \text{vety}$

Reaktiomekanismi 1 + 2 + 3 tunnetaan nimellä Zeldovichin mekanismi. Reaktio 1 on Zeldovichin mekanismien nopeutta rajoittava tekijä. Reaktion 1 lähtökomenttina tarvittavien O-atomien pitoisuus kasvaa lämpötilan noustessa. Matalissa lämpötiloissa O-atomien pitoisuudet ovat hapettumisen kannalta merkittäviä vain hyvin lyhyen ajan. Polttoilman typen muodostuminen typpimonoksidiksi on näin ollen erittäin lämpötila-herkkä. Laskelmien mukaan termisen NO:n muodostumista ei käytännössä tapahdu polttolämpötilan ollessa alle 1400 °C. Polttolämpötilan noustessa yli 1600 °C:n typpimonoksidin muodostus kiihtyy voimakkaasti. (5, 304–306.)

4.1.2 Nopea NO:n muodostuminen

Ali-ilmaisissa hiilivetyliekeissä polttoilman typpi muodostuu typpimonoksidiksi mekanismilla, jonka molekyylytymen (N_2) ja hiilivetyradikaalien (CH) välinen reaktio käynnistää. (5, 306.)



$N_2 = \text{molekyylytymppi}$

$CH = \text{hiilivetyradikaali}$

$HCN = \text{syaanivety}$

$N = \text{orgaaninen typpi}$

Happipitoisten komponenttien ollessa läsnä reaktiossa muodostunut syaanivety (HCN) ja typpiatomi (N) reagoivat edelleen typpimonoksidiksi monien reaktiovaiheiden kautta. Useimmissa olosuhteissa reaktioyhtälö on reaktion 5 mukainen. (5, 306.)



HCN = syaanivety

O = happiatomi

NCO = isosyanaatti

H = vetyatomi

N = orgaaninen typpi

O₂ = molekyylihappi

OH = hydroksyyli-radikaali

NO = typpimonoksidi

Typpimonoksidin muodostumista tapahtuu vain liekin polttovyöhykkeessä, jossa polttoaineen palaminen on kesken ja reaktiossa 4 tarvittavia hiilivetyradikaaleja on läsnä. NO:n muodostuminen on yleensä hyvin nopeaa. Nopea NO:n syntyminen on vain lievästi lämpötilasta riippuvainen ja sen osuus on suurin kylmissä, ali-ilmaisissa olosuhteissa lyhyillä viiveajoilla. Käytännön poltinpoltossa nopean typpimonoksidin osuus NO-päästöstä arvioidaan yleensä vähäiseksi, alle 5 %. (5, 306.)

4.1.3 Polttoaineperäisen NO:n muodostuminen

Typpi on sitoutuneena polttoaineessa yleensä pyridiini- ja pyrrollityyppisissä rengasrakenteissa. Nuoremmilla polttoaineilla huomattava osa typestä voi esiintyä myös aminoryhmissä. Taulukossa 3 on esitetty eri polttoaineiden typpi-pitoisuuksia. (5, 307–309.)

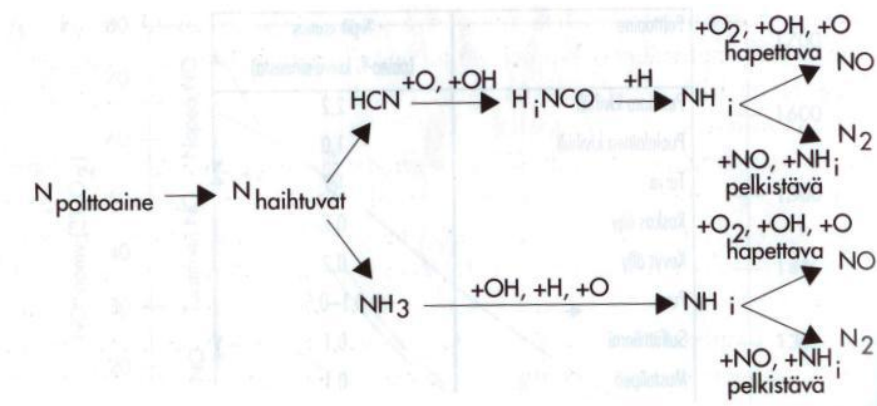
Taulukko 3, Eri polttoaineiden tyypillisiä typpipitoisuuksia. Maakaasun sisältämä typpi ei ole orgaanisesti sitoutunut, vaan molekyylytipeä, joka käyttäytyy samoin kuin polttoilman typpi. (5, 309.)

Polttoaine	Typpi-pitoisuus (paino-% kuiva aineesta)
Petshora kivihiili	2,2
Puolalainen kivihiili	1,0
Turve	1,7
Raskas öljy	0,7
Kevyt öljy	0,2
Puu	0,1-0,5
Sulfiittiliemi	0,1
Mustalipeä	0,1
Maakaasu	0,5-5,0
Olki	0,5-1,0
Pakkausjäte	1,0
Yhdyskuntajäte	1,0-5,0

Typhen määrä polttoaineessa on paljon pienempi verrattuna polttoilman typhen määrään, mutta se on kuitenkin huomattavasti reaktiivisempaa. Typpiatomien sidosenergia polttoaineesta peräisin olevissa typpiyhdisteissä vaihtelee välillä 150-750 kJ/mol (vrt. molekyylytipeä n.950 kJ/mol). Tästä johtuen tyypeä sisältävien polttoaineiden NO-päästö on yleensä selvästi suurempi kuin typpetömän polttoaineen. (5, 307–309.)

Pyrolyysissa osa polttoaineen typestä vapautuu ja muodostaa pienimolekyyllisiä, kaasumaisia syano- ja syanidiyhdisteitä, kuten syaanivetyä (HCN), ja aminoyhdisteitä kuten ammoniakkia (NH₃). Jos tilanteessa on happipitoisia komponentteja läsnä, HCN- ja NH₃-yhdisteet hapettuvat edelleen typpimonoksidiksi. Polttoaineperäisen typpimonoksidin muodostuminen on vain vähän riippuvaista lämpötilasta ja sitä muodostuukin helposti alhaisissa lämpötiloissa. (5, 307–309.)

Polttoaine-NO on kuitenkin herkkä polttoilman ja polttoaineen väliselle stökiometrialle. Mikäli tilanne, jossa HCN- ja NH₃-yhdisteitä muodostuu, on ali-ilmainen eli pelkistävä ympäristö, HCN ja NH₃ muodostuvat pääasiassa molekyylytipeksi. Typpimonoksidin muodostuminen tapahtuu monien välivaiheiden kautta, joista useimmissa olosuhteissa tärkeimmät on esitetty kuvassa 5. (5, 307–309.)



Kuva 5. Yksinkertaistettu kaaviokuva polttoainetyypen haihtuvien komponenttien hapettumisesta typpimonoksidiksi ja molekyylytypeksi poltinpoltossa. (5, 310.)

4.1.4 NO₂:n muodostuminen

Palamistapahtumassa syntyneestä typpimonoksidista muodostuu typpidioksidia reaktion 6 mukaisesti. (5, 316.)



NO = typpimonoksidi

HO_2 = vetyperoksyyliradikaali

NO_2 = typpidioksidi

OH = hydroksyyliradikaali

Reaktio 6 edellyttää vetyperoksyyliradikaalia (HO_2), jota muodostuu yleensä pääasiassa vetyatomin ja hapen reagoidessa kolmannen kaasukomponentin (M) läsnä ollessa. Vetyatomi ja happi voivat kuitenkin reagoida myös suoraan, jolloin muodostuu hydroksyyliradikaali ja happiatomi reaktion 7 mukaisesti. (5, 316.)



H = vetyatomi

O_2 = molekyylihapppi

$M = \text{kolmas kaasukomponentti}$

$HO_2 = \text{vetyperoksyyliradikaali}$



$H = \text{vetyatomi}$

$O_2 = \text{molekyylihappi}$

$OH = \text{hydroksyyliradikaali}$

$O = \text{happiatomi}$

Polton olosuhteissa reaktio 8 on yleensä hallitseva. Kuitenkin lämpötilan laskiessa reaktion 7 merkitys kasvaa. Merkittäviä HO_2 -pitoisuuksia saattaa näin esiintyä liekin kylmillä alueilla, jolloin huomattava osa läsnä olevasta NO:sta voi reagoida NO_2 :ksi reaktion 6 mukaan. (5, 316.)

Typpidioksidille on ominaista hyvin nopea hajoaminen. Typpidioksidin joutuessa liekin kuumiin alueisiin kaikki alemmissa lämpötiloissa mahdollisesti muodostuneet NO_2 -päästöt hajoavat takaisin NO:ksi. Reaktiot 9 ja 10 kuvaavat typpidioksidin hajoamista. (5, 316.)

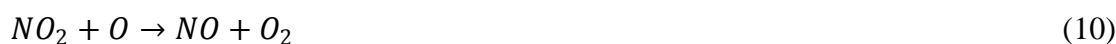


$NO_2 = \text{typpidioksidi}$

$H = \text{vetyatomi}$

$NO = \text{typpimonoksidi}$

$OH = \text{hydroksyyliradikaali}$



$NO_2 = \text{typpidioksidi}$

O = happiatomi

NO = typpimonoksidi

O_2 = molekyylihappi

Jos typpidioksidia esiintyy suurina määrinä savukaasuissa, se johtuu O- ja H-pitoisuuksien alenemista. Pitoisuuksien aleneminen saattaa olla seurausta siitä, kun kuumat ja kylmät savukaasuvirtaukset sekoittuvat hyvin nopeasti. (5, 316.)

4.2 NO_x-päästöjen vähennys

Typenoksidipäästöjä voidaan vähentää joko poistamalla palamisessa syntyneitä NO_x-kaasuja savukaasuista tai pienentämällä typpioksidien muodostumista palotapahtumassa. (5, 300–342) Seuraavissa kappaleissa esitetään yleisimmin käytössä olevia vähennysmenetelmiä.

4.2.1 SCR

SCR (selektiivinen katalyyttinen pelkistys, Selective Catalytic Reduction)-menetelmä on tehokkain tapa poistaa typenoksideja savukaasuista. Menetelmässä typenoksideja vähennetään lisäämällä savukaasuihin ammoniakkia tai ureaa, minkä jälkeen savukaasut pelkistyvät savukanavassa katalyyttielementeistä kootussa reaktorissa. Pelkistymisreaktorissa typenoksidit pelkistyvät vedeksi ja molekyylytypeksi. Katalyytti voi olla esim. vanadiinioksidia V₂O₅, volframioksidia WO₃ tai titaanidioksidia TiO₂. Reaktiot tapahtuvat noin 250 – 500 °C lämpötiloissa. (5, 332–333.)

Menetelmällä on saavutettu varsin hyviä tuloksia, typenoksidien vähennyksessä on päästy 80-90 %:n vähenemään NH₃/NO moolisuhteella 1. Menetelmän haittapuolena ovat korkeat investointi- ja käyttökustannukset. (6, 260–261.)

4.2.2 SNCR

SNCR (selektiivinen ei-katalyyttinen pelkistys, Selective Non Catalytic Reduction)-menetelmä on typenoksidipäästöjen vähennystekniikka, jossa ruiskutetaan ammoniak-

kivettä tai urealiuosta kuumien savukaasujen sekaan. Vähennys perustuu seuraaviin typenoksidien ja pelkistyskemikaalien reaktioyhtälöihin. (7.)



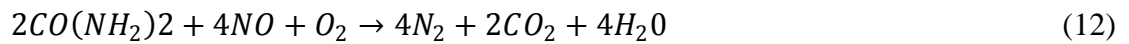
$\text{NH}_3 = \text{ammoniakki}$

$\text{NO} = \text{typpimonoksidi}$

$\text{O}_2 = \text{molekyylihappi}$

$\text{N}_2 = \text{molekyylityppi}$

$\text{H}_2\text{O} = \text{vesimolekyyli}$



$\text{CO}(\text{NH}_2)_2 = \text{urea}$

$\text{NO} = \text{typpimonoksidi}$

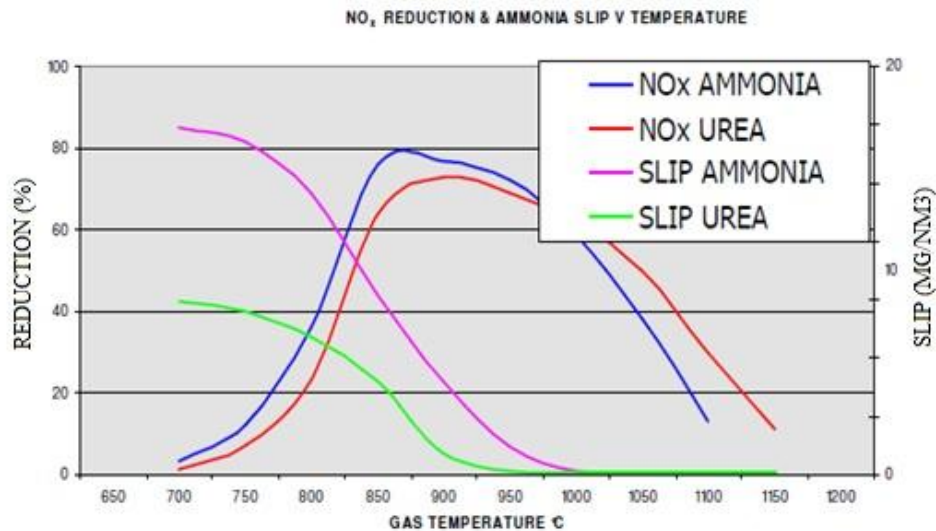
$\text{O}_2 = \text{molekyylihappi}$

$\text{N}_2 = \text{molekyylityppi}$

$\text{CO}_2 = \text{hiildioksidi}$

$\text{H}_2\text{O} = \text{vesimolekyyli}$

Savukaasujen typenoksidit reagoivat pelkistyskemikaalin kanssa muodostaen molekyylityppeä ja vettä sekä urealla lisäksi hiildioksidia. (7.)



Kuva 6. Typenoksidien vähennys ja NH₃ slip. (3)

SNCR-menetelmässä on tärkeää löytää kattilasta sellainen lämpötilaikkuna, jossa reaktio typenoksidien ja pelkistyskemikaalin välillä tapahtuu. Optimilämpötila on noin 850–1050 °C (kuva 6). Riittävä viipymäaika on tässä lämpötilassa välttämätöntä, jotta reaktiot kemikaalin ja typenoksidien välillä ennättävät tapahtua. Viipymäaikaan tarvitaan myös sekoittumiselle. Menetelmän toimivuuteen optimilämpötilan ja viipymäajan lisäksi vaikuttavat myös pelkistyskemikaalien syöttömäärä, syöttötapa (suuttimien määrä ja sijainti), mahdolliset lisäaineet, käytettävän polttoaineen koostumus, savukaasujen happipitoisuus, kosteus ja muodostuvan NO_x:n pitoisuus. Pelkistyskemikaalin ruiskuttaminen liian matalaan lämpötilaan aiheuttaa pelkistyskemikaalin läpi menemistä raakana (kuva 6). Ruiskuttaminen liian korkeaan lämpötilaan lisää pelkistyskemikaalin tarvetta ja NO_x:n pelkistys heikkenee. (7.)

Ammoniakin (NH₃) läpi menemistä raakana tulisi välttää, sillä ammoniakki itsessään on syövyttävää ainetta sekä se saattaa reagoida savukaasuissa olevan SO₃:n (rikki-trioksidi) kanssa muodostaen ammoniumvetysulfaattia (NH₄HSO₄). (8, 263–264.)

Noin 425 °C:n lämpötilassa SO₃ reagoi savukaasujen kosteuden (H₂O) kanssa muodostaen rikkihapposumua (H₂SO₄) seuraavan reaktioyhtälön mukaan. (8, 263–264.)



$SO_3 =$ rikkitrioksidi

$H_2O =$ vesimolekyyli

$H_2SO_4 =$ rikkihappo

Muodostuva H_2SO_4 reagoi savukaasuissa olevan NH_3 :n kanssa noin $315\text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilassa muodostaen ammoniumvetysulfaattia (NH_4HSO_4) reaktioyhtälön 14 mukaisesti. (8, 263–264.)

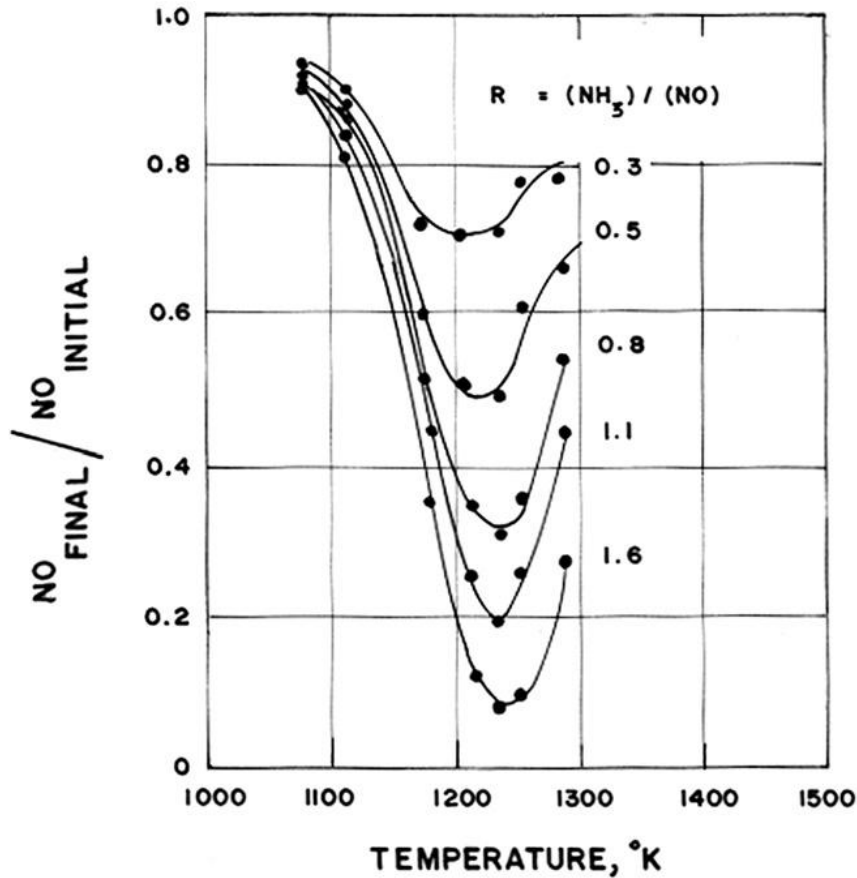


$NH_3 =$ ammoniakki

$H_2SO_4 =$ rikkihappo

$NH_4HSO_4 =$ ammoniumvetysulfaatti

Ammoniumvetysulfaatti on erittäin tarrautuvaa ja syövyttävää nestettä ja sen on todettu aiheuttavan korroosiota kattilan sisäosiin. Reagoimattoman ammoniakkin pitoisuuden savukaasuissa tulisi olla alle $7,5\text{mg/nm}^3$. (8, 263–264.)



Kuva 7. NO:n vähennys ja NH_3/NO moolisuhde suhteessa lämpötilaan (8, 262)

SNCR-laitteiston tehokkuus voidaan määrittää tarkkailemalla typenoksidien vähennys- % suhteessa typenoksidien puhdistamattomaan pitoisuuteen sekä pelkistyskemikaalin ja puhdistamattomien typenoksidien moolisuhdetta. Ammoniakkia pelkistyskemikaalina käyttävällä SNCR- menetelmällä saavutetaan yleisesti 40–90 %:n vähennys NH_3/NO -moolisuhteen ollessa välillä 0,5-1,6 sekä savukaasujen lämpötilan ollessa välillä 1180–1280 K (907–1007 $^{\circ}\text{C}$) (kuva 7). (8, 261–263.)

4.2.3 Palamisilman ja polttoaineen vaiheistus

Vaiheistetulla poltolla tarkoitetaan palamisilman tuontia tulipesään eri korkeuksiin. Esimerkiksi kolmeen vaiheeseen: primääri-, sekundääri- ja tertirääri vaiheisiin. Vaiheistuksella on tarkoitus hallita paremmin palamislämpötiloja sekä järjestää polttoaineen pyrolyysin yhteyteen ali-ilmainen alue ja näin ollen vähentää termisen typenoksidin muodostumista. Tekniikka on yleisesti käytössä esimerkiksi leijupetikattiloissa. Low- NO_x -polttimissa käytetään samaa periaatetta; palamisilma tuodaan liekkiin useassa vaiheessa. Myös matalampi liekin lämpötila vähentää typpioksidin muodostumista. (5, 309–312.)

Polttoainevaiheistus perustuu joidenkin polttoaineiden toimintaan tehokkaina typpi-monoksidin pelkistäjänä. Esimerkiksi maakaasu ei sisällä orgaanista typpeä ja se muodostaa helposti typpimonoksidin pelkistämiseksi tarvittavia hiilivetyradikaaleja. Polttoainevaiheistus koostuu kolmesta vaiheesta:

- Pääpalamisvaihe, jossa primääripolttoaine, esim. hiili tai öljy, poltetaan ilmaylimäärällä.
- Vaiheistusvaihe, sekundääripolttoainetta, kuten maakaasua lisätään typpillisesti 10–20 %. Syntyneessä ali-ilmaisessa pelkistyvässä vyöhykkeessä pääpalamisvaiheessa syntynyt typpimonoksidi pelkistyy molekyylytypeksi sekundääripolttoaineesta peräisin olevien hiilivetyradikaalien (CH) käynnistämän monimutkaisen ketjureaktion avulla.
- Loppupalamisvaihe, jossa ilmaa lisätään sekundääripolttoaineen loppuun polttamiseksi. Läsnaolevat typen yhdisteet hapettuvat takaisin NO:ksi ja N₂:ski, mutta matalasta lämpötilasta (alle 1000 °C) johtuen tilanne on edullisempi molekyylytymen muodostumiselle.

Polttoainevaiheistusta käytetään sekä low NO_x-polttimissa, että koko tulipesässä. Tällöin vaiheistusvaiheen polttoaineena käytetään yleensä samaa polttoainetta kuin pääpalamisvaiheessa. (5, 312.)

5 TUTKIMUKSEN ALKUTILANNE

5.1 Hyötyvoimalaitoksen SNCR-laitteisto

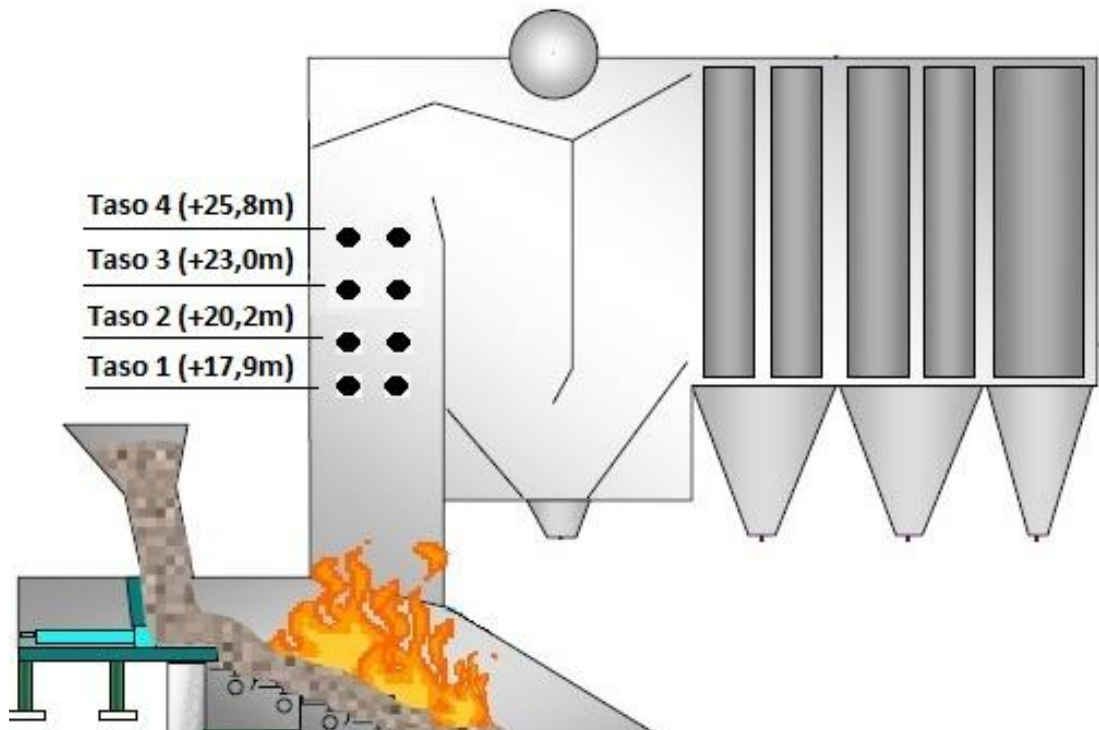
Hyötyvoimalaitoksella käytössä oleva laitteisto on Petro Miljö Ab:n valmistama projekti NA8333. Laitteisto käyttää typenoksidien vähennyskemikaalina 24,5 prosentista ammoniakkivesiliuosta (NH₄OH, tiheys 0,909kg/l). (9.)

Laitteisto koostuu seuraavista osista:

- Ammoniakin varastosäiliö 25m³
- Varastosäiliön täyttöpumppumoduuli
- Pumppumoduuli ammoniakille

- Pumpputuotusmoduuli laimennusvedelle
- Prosessiyksikkö ammoniakkin ja veden annostelulle, sekoitukselle ja jakamiselle
- Suuttimet ammoniakki/vesi-seoksen ruiskuttamiseen tulipesään 6 kpl

Laitteiston ruiskutus-suuttimet on sijoitettu kattilan ensimmäiseen tyhjiin vetoon oikealle puolelle kolmelle eri tasolle, kaksi suutinta per taso (kuva 8). Eri ruiskutustasoilla on tarkoitus saada ruiskutus tulipesän optimaaliseen lämpötilaan. Käytävissä on lisäksi yksi ylimääräinen taso kattilan alaosassa, jota käytetään vain kattilan ollessa täysin puhdas ja pienellä höyryteholla (taso 1). Suuttimet sijoitetaan puhdastaan/puhdistetun kattilan ylösajossa fyysisesti alimmille tasoille. Normaaliajossa suuttimet sijaitsevat tasoilla 4, 3 ja 2. Edellä mainitussa puhtaana kattilan ylösajossa tasoilla 3, 2 ja 1. (9.)



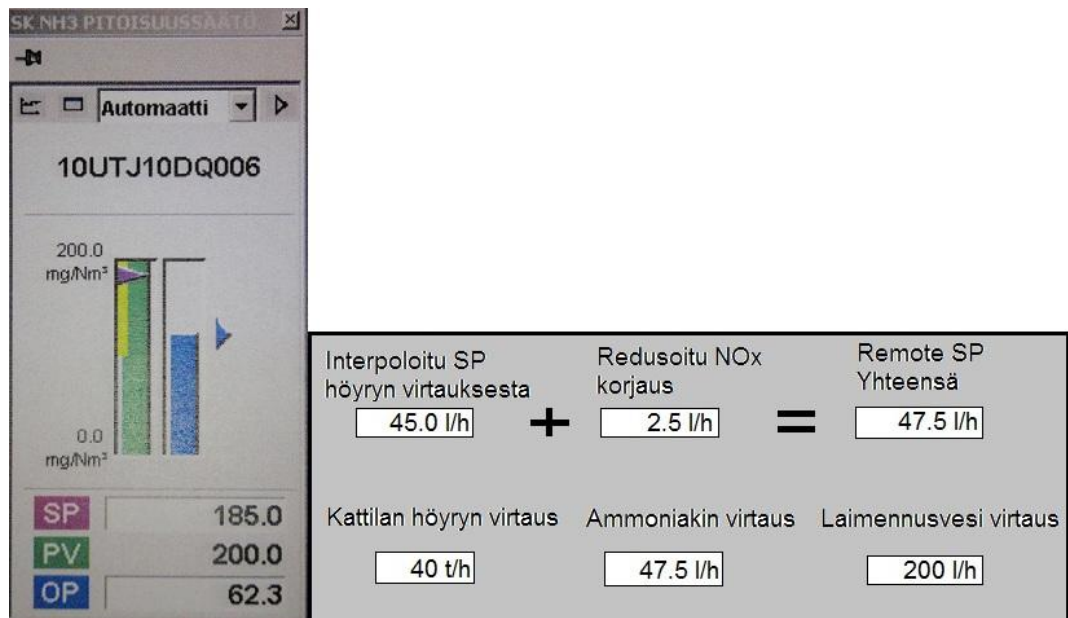
Kuva 8. Ammoniakin ruiskutus-suutinten sijainti (7)

Kattilan höyryn virtaus	Amm. virtaus peruas.arvo	Laimennusvesi as.arvo /lanssi
t/h	l/h	l/h
44.0	50.0	100.0
40.0	45.0	92.5
35.0	40.0	85.0
30.0	35.0	75.0

Likaantumisaste Kattilan höyryn virtaus	Puhdas (uusi laitos)	Normaali likaantumisas (+/- 1500 h)	"Ende Reisezeit" (+/- 8000 h)
Käsiohjaus	Pois	Päällä	Pois
44.0	AA123/124	AA125/126	AA125/126
40.0	AA121/122	AA123/124	AA125/126
35.0	AA121/122	AA123/124	AA123/124
30.0	AA121/122	AA121/122	AA121/122

Kuva 9. Ammoniakin ja laimennusveden, sekä kattilan likaantumisen/syöttötason valinnan alkup. parametrit

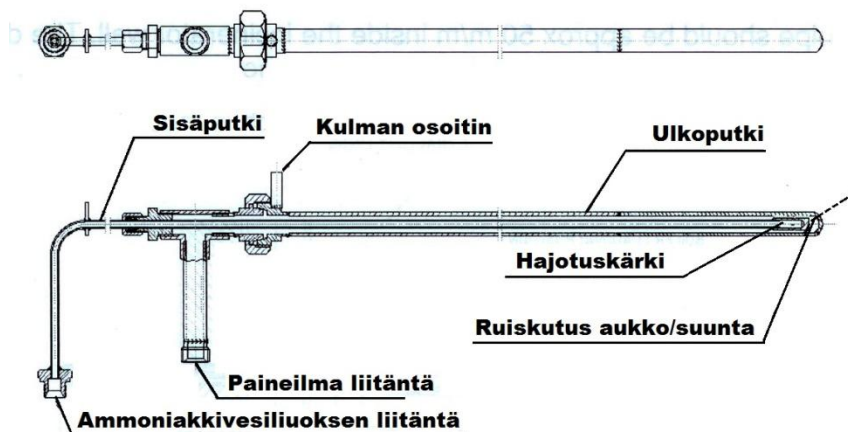
Ruiskutustasoa ja ammoniakkivesiliuoksen määrää ohjaa kattilan ohjausjärjestelmä automaattisesti (kuva 9). Automaatti tarkkailee höyryvirtausta, joka määrittää ruiskutustason (AA125/126, 123/124 ja 121/122) ja NH_4OH :n perusvirtauksen asetetuista arvoista. Kattilan likaantumisen/käyttöajan mukaan voimalaitoskäyttäjä valitsee säätimestä halutun moodin, jonka perusteella automaatti käyttää tiettyjä ruiskutustasoja tietyillä höyryvirtauksilla. Pääperiaatteena se, että kattilan likaantuessa tulipesän yläosan lämmöt nousevat (lämmönsiirtyminen tulipesän alaosissa heikkenee likaantumisen vuoksi) ja näin ollen SNCR-menetelmän optimilämpötila on ylempänä. (9.)



Kuva 10. NO_x pitoisuuden säätö ja säätimen tekemä korjaus

Päästömittauslaitteiston antama redusoitu NO_x-pitoisuus ohjaa NH₄OH:n kokonaisuuden säädintä, joka antaa NH₄OH:n virtaukselle tarvittavan korjauksen joko lisäten tai vähentäen virtausta. Voimalaitoskäyttäjät voi säätää NO_x-pitoisuuden säätimille halutun NO_x-tavoitearvon välillä 165-200 mg/Nm³. Normaalisti säätimen asetus pidetään arvossa 185 mg/Nm³, jolla varmistetaan NO_x-päästön pysyminen varmasti ympäristöluvan vuorokauden keskiarvo rajan 200 mg/Nm³ alapuolella.

Suutin



Kuva 11. Hyötyvoimalaitoksen SNCR suutin (9)

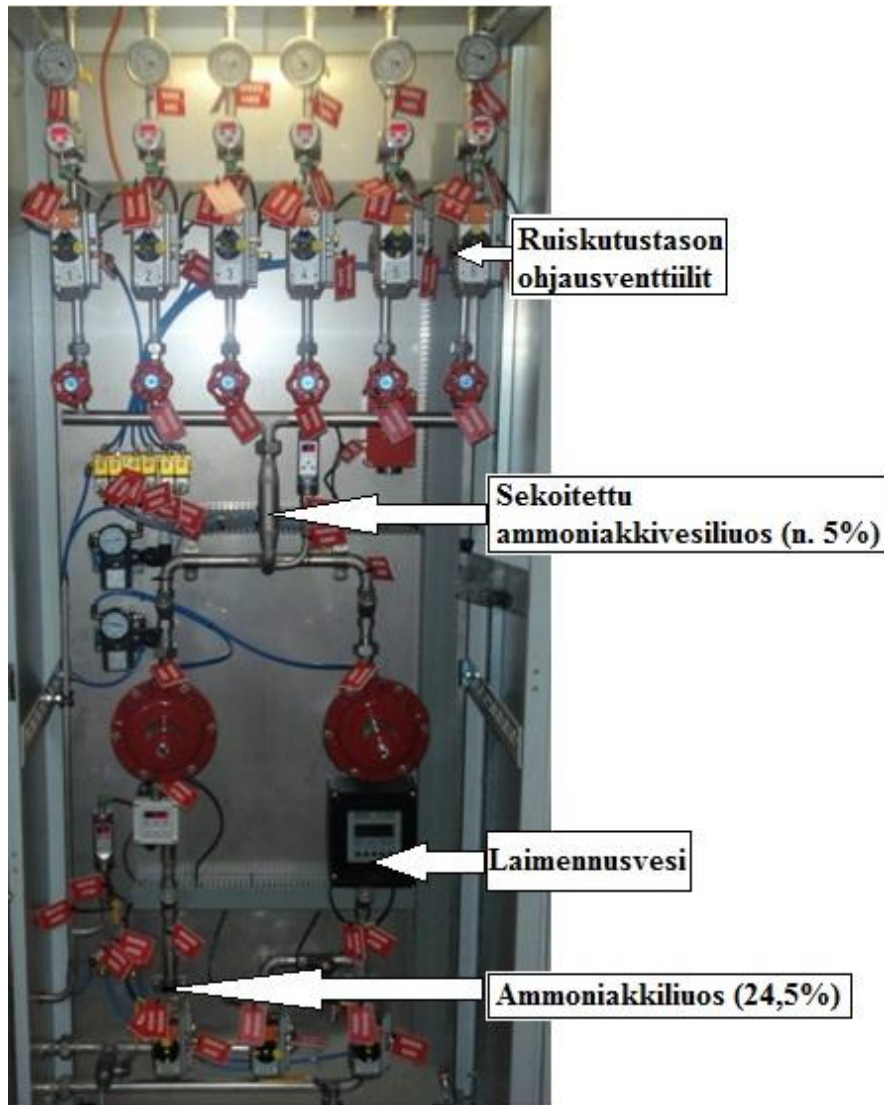
Ruiskutussuutin on kuvan 11 mukainen Petro Miljön valmistama, ja siinä on monia säätömahdollisuuksia. Suutin koostuu sisäputkesta, ulkoputkesta, hajotuskärjestä ja ammoniakkivesiliuoksen ja hajotusilman liitännöistä sekä suuttimen kulman asennon

osoittimesta. Sisäputkessa kulkee ammoniakki/vesiliuos hajotuskärkeen ja ulkoputkessa paineilma. Ulkoputken kärjessä on 30 asteen kulmassa oleva ruiskutusreikä. Suutinta voidaan kääntää 360 astetta ympäri ruiskutuksen suuntaamiseksi. Pelkistyskemikaalin pisarakokoa voidaan säätää sisäputkea liikuttamalla sisään ja ulos. Suutin kiinnitetään pikakiinnityksen ja -irrotuksen mahdollistavalla camlock-liittimellä (kuva 12). Suuttimet suunnataan tehdasasetusten mukaisesti klo 14:n suuntaan (kulman osoitin klo 14) savukaasun myötävirtaan. (9.)

Ruiskutusvaiheessa ammoniakkivesiseoksen NH_3 -pitoisuus pidetään noin 5 %:ssa, jotta seoksen höyrystymisnopeus hidastuu siten, että ruiskutetut pisarat pystyvät tunkeutumaan riittävän hyvin savukaasuvirtaukseen. Seos hajotetaan paineilmalla, jotta se leviää paremmin ruiskutusalueeseen. Paineilmaa käytetään myös suutinten jäähtytykseen kun suutin on valmiustilassa (kun ruiskutus muutetaan toiselle tasolle ja suutinta ei irroteta kattilan seinästä). (9.)



Kuva 12. Ruiskutussuuttimen pikakiinnitys



Kuva 13. SNCR laitteiston prosessiyksikkö

Kattilan ohjausjärjestelmän antamat ohjaukset tulevat prosessiyksikölle (kuva 13). Prosessiyksikkö sekoittaa ammoniakkiveden ja laimennusveden, säätelee virtausmäärät ohjausjärjestelmän mukaisiksi sekä ohjaa auki/kiinniventtiileillä ruiskutuksen tietylle tasolle. Jokaiselle suuttimelle on oma auki/kiinniventtiili sekä säätöventtiili, jolla suuttimien virtaukset voidaan tasapainottaa. On tärkeää, että samalla tasolla olevien suuttimien virtaus on tasapainossa, jotta ammoniakkivesiliuos sekoittuu mahdollisimman tasaisesti savukaasuvirtaukseen. Kahdesti päivässä tarkkaillaan ammoniakkivesiliuoksen virtausta prosessiyksiköstä sekä hajotusilmanpainetta paineenaleantimelta suuttimien vierestä. Hajotusilmanpaine pidetään noin 1 bar:ssa. Suuttimien kuntoa tarkkaillaan visuaalisesti kerran kuukaudessa ottamalla suuttimet pois kattilan sisältä. (9.)

5.2 Päästömittauslaitteisto

Hyötyvoimalaitoksen savukaasujen päästöjä mitataan Kontram Oy:n toimittamalla jatkuvatoimisella päästömittauslaitteistolla. Jatkuvatoimisen kaasumittauksen näytteenotto perustuu näytettä ottavaan eli ekstraktiiviseen menetelmään. Mitattava näytekaasu imetään savukanavasta olevasta näytesondista ejektorin avulla näytelinjaa pitkin näytteenkäsittely-yksikössä olevalle FTIR-analysaattorille. Näytekaasu tulee analyysaattorille kosteana. Eri kaasukomponenttien mittaukseen käyttämän MKS Instrumentsin valmistaman MultiGas 2030-analysaattorin mittausperiaate on FTIR eli Fourier-muunnos-infrapunaspektroskopia. Hiukkas-, virtaus-, savukaasun paine- ja lämpötilamittaus tapahtuvat niin sanottuna in situ-mittauksena suoraan savukanavassa. Päästömittauslaitteisto ilmoittaa pitoisuudet eri päästöille muodossa ppm (kosteaa). Kattilan ohjausjärjestelmä muuttaa arvot laskennallisesti muotoon mg/Nm³. Laskenta tapahtuu kertomalla mitatun päästön ppm-pitoisuus päästön mukaisella kertoimella. Kerroin määritetään seuraavan kaavan avulla. (10.)

$$\text{mitattu pitoisuus} \times \text{kerroin} = \text{mg/Nm}^3 \quad (15)$$

$$\text{mitattu pitoisuus} = \text{ppm}$$

$$\text{kerroin} = \text{mitatun päästön moolimassa} \div \text{idealikaasun tilavuus}$$

$$\text{moolimassa} = \frac{g}{mol}$$

$$\text{ideaalikaasun tilavuus} = 22,4 \frac{l}{mol}$$

5.3 NO_x-päästöt ja ammoniakkin kulutus

Savukaasujen kaikki päästöt ilmoitetaan ympäristöluvan mukaisesti kuivissa savukaasuissa redusoituna 11 %:n happeen. Kattilan ohjausjärjestelmä muuttaa lasketun mg/Nm³-pitoisuuden redusoituun kuivaan arvoon seuraavilla kaavoilla.(11.)

$$\text{mitattu pitoisuus} \times TOF = \text{redusoitu arvo} \quad (16)$$

$$TOF (\text{muuntokerroin}) = DRF \times OXF \quad (17)$$

$$DRF = \text{kuivakaasuksi muuntokerroin} \quad (18)$$

$$DRF = \frac{100}{(100 - \text{savuk. kosteus})}$$

$$OXF = \text{happiredusointi kerroin}$$

$$OXF = \frac{20,94 - 11}{20,94 - (\text{savuk. O}_2 \times 100 / (100 - \text{savuk. kosteus}))}$$

Tässä työssä käytetyt NO_x (NO₂)-arvot ovat kaikki yllä mainittuja redusoituja arvoja, jotta saadut tulokset ovat vertailukelpoisia minkä tahansa muun laitoksen vastaaviin arvoihin. Ympäristöviranomaiselle toimitettavista NO_x-pitoisuuksien keskiarvoista vähennetään mittaustuloksen 95 %:n luotettavuutta kuvaava osuus – 20 %. Vähennys toteutetaan kertomalla mitattu pitoisuuden keskiarvo 0,8:lla. (11.)

Hyötyvoimalaitoksen 95 %:n luottamusvälin mukainen NO_x (ilmoitettu NO₂:na, red. 11% O₂)-kokonaispäästö ja -pitoisuus, NH₃-pitoisuus piipussa ja kokonaispäästö sekä ammoniakkivesiliuoksen virtaus ja höyryvirtaus on vuonna 2010 ollut taulukon 4 arvojen mukaisia.

Taulukko 4. Kotkan Energia Oy Hyötyvoimalaitoksen vuoden 2010 NO_x- ja NH₃-päästöt. (11)

Vuosi	NO _x kokonaispäästö (kg)	NO _x pitoisuus keskiarvo (mg/Nm ³)		
2010	47 000	143		
Vuosi	NH ₃ kokonaispäästö (kg)	NH ₃ pitoisuus keskiarvo (mg/Nm ³)	NH ₄ OH virtaus keskiarvo (l/h)	KP höyryn virtaus (t/h)
2010	3 619	14,15	48	37,8

NO_x:n pitoisuus on pysynyt vuoden 2010 ajan reilusti alle päästörajan (200 mg/Nm³). Reagoimattomana läpi menevän ammoniakkin pitoisuus ja kokonaispäästö on reilusti oletettua korkeampi. Pitoisuus on lähes kaksi kertaa luvussa 4.2.2. esitetyn ohjearvon mukainen (alle 7,5 mg/Nm³). Vuotuinen ammoniakkin kokonaispäästö muutettuna 24,5 prosenttiseksi ammoniakkivesiliuokseksi vastaa noin 16 000 litraa. Ammoniakkia menee näin ollen reilusti hukkaan.

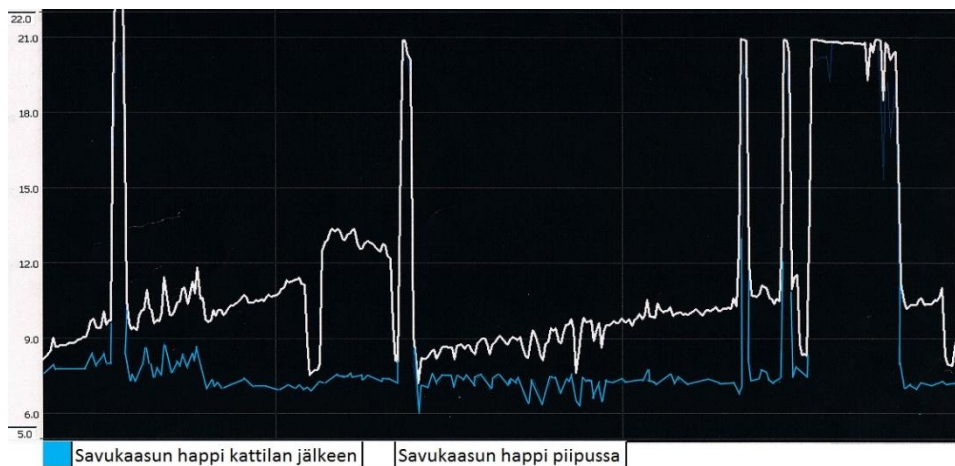
NH_4OH :n keskimääräinen virtaus on suhteessa keskimääräiseen korkeapainehöyryn virtaukseen korkea. Kattilan on toiminut vuoden 2010 vain noin 95 %:n teholla, jolloin SNCR- laitteiston valmistajan mukaan ammoniakkivesiliuoksen virtauksen tulisi olla noin 43 l/h (kattilan 100 %:n kuorman höyryvirtaus 40 t/h) (9). Ammoniakkivesiliuoksen kokonaiskulutus on ollut vuonna 2010 n. 380 000 kg (11).

6 TUTKIMUKSET

Aloitin tutkimisen analysoimalla ammoniakkivesiliuoksen kulutuksen trendejä voimalaitoksen ohjausjärjestelmästä vuoden 2010 ajalta ja siten etsien syy-seuraussuhteita korkealle kulutukselle. Sekä selvitin SNCR- laitteiston tehokkuuden.

6.1 Päästömittauslaitteiston vika

Tutkimuksen alkuvaiheessa ilmeni, että päästömittauslaitteiston happimittaus oli näyttänyt virheellistä lukemaa ainakin 28.11.2009 alkaen (ohjausjärjestelmän kapasiteetti tiedon säilytyksessä noin 1 vuosi), mikä voidaan huomata kuvasta 14.

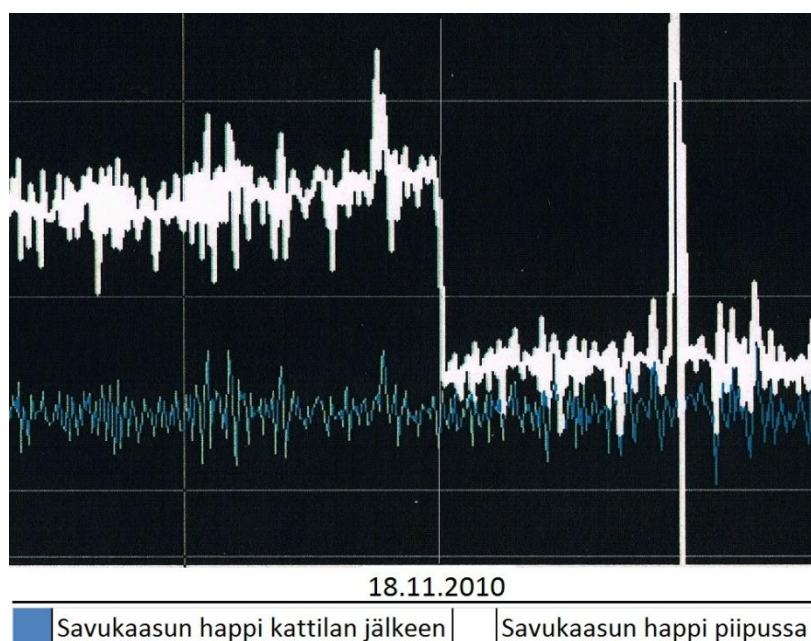


Kuva 14. Savukaasun happimittaukset 28.11.2009-28.11.2010

Kattilan jälkeisen happimittauksen ja piipussa olevan mittauksen eron tulisi olla noin 1 %, NID-savukaasupuhdistuslaitteiston lisäämän ilmamäärän takia. Tutkimalla trendiä voidaan kuitenkin huomata mittauksien eron kasvaneen hiljalleen isommaksi ja toisin sanoen epätodelliseksi (piikit ylöspäin trendissä ovat kattilan seisokkiaikoja). Piipun kohonnut happimittaus oli vääristänyt päästömittauksen arvoja siten, että esim. NO_x -mitattu pitoisuus oli näyttänyt todellista alhaisempaa arvoa ja redusoitu arvo todellista korkeampaa pitoisuutta laskennasta johtuvan virheen vuoksi (TOF muuntoker-

roin luku 5.3). Kyseiset asiat voidaan todeta liitteen 1 trendistä. Kohonnut redusoitu NO_x :n arvo oli siten lisännyt ammoniakkin syötön ohjausta ja ruiskutusta. Näin ollen suuri osa vuoden 2009 ja 2010 korkeasta ammoniakkin kulutuksesta selittyy happimitauksen näyttämällä virheellä.

Happimittauksen näyttämä virhe oli huomattu jo osin vuoden 2010 alussa. Päästömittauslaitteisto kalibroitiin säännöllisesti sekä laitteiston valmistajan että Hyötyvoimalaitoksen henkilöstön puolesta, ja se korjasikin virheen aina hetkellisesti. Kuvan 14 trendistä voidaankin huomata mittauksen palautuneen kalibroitien jälkeen näyttämään normaalilukemaa, mutta hiljalleen nousseen näyttämään virheellistä arvoa.



Kuva 15. Happimittaus kuntoon 18.11.2010

18.11.2010 selvisi, että happimittauksen anturi oli vioittunut siten, että sen näyttämä arvo oli alkanut ryömiä ylöspäin. Kyseinen vioittuminen oli ensimmäinen laatuaan myös laitevalmistajalle. Anturin vaihdon jälkeen happimittaus alkoi näyttää oikeaa arvoa. Kyseisen päivämäärän jälkeen happimittauksien eroa on tarkkailtu vähintään kerran viikossa, sekä O_2 :n 1 %:n kalibroitikaasun happipitoisuus tarkkuusmitattiin. Kaasun todellinen happipitoisuus oli n. 1,05 %.

6.2 SNCR-laitteiston tehokkuus

SNCR-laitteiston tehokkuus voidaan, kuten luvussa 4.2.2 mainittu, määrittää selvittämällä NO_x :n vähennys % ja NH_3/NO -moolisuhte. Vähennys-%:n ja moolisuhteen

laskemiseen tarvitaan syntyvien NO_x:n raakapäästön pitoisuus. Tarvittavia hetkellisiä raakapäästöjä ei kuitenkaan voida määrittää/mitata laitteiston ollessa toiminnassa, koska vähennyskemikaali ruiskutetaan kattilaan sille alueelle, jossa päästö muodostuu. Suoritin työn aikana 12 kappaletta testejä NO_x:n hetkellisten raakapäästöjen selvittämiseksi. Testit on suoritettu siten, että ammoniakkivesiliuoksen ruiskutus on keskeytetty noin 10-15 minuutiksi, jonka jälkeen on kerätty tulokset kattilan ohjausjärjestelmästä. Testien tulokset on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. NO_x raakapäästö testaukset

pvm ja klo	Raaka NO _x (red 11% O ₂) mg/Nm ³	Kp Höyry virt. t/h
10.1.2011 12:42	480	37,5
10.1.2011 10:04	443	34,89
10.1.2011 9:14	486	38,79
8.1.2010 11:55	457	43,2
29.12.2010 16:43	418	40,1
10.12.2010 9:51	433	37,64
10.12.2010 7:57	429	36,45
30.11.2010 13:54	355	37,89
30.11.2010 13:09	390	36,84
26.11.2010 12:39	426	39,38
26.11.2010 10:22	403	41,68
25.11.2010 13:03	461	42,53
keskiarvo	432	
min	355	
max	486	

NO_x:n hetkellisten raakapäästöjen voidaan todeta olevan välillä 355-486 mg/Nm³ (red. 11 % O₂). Syntyvät NO_x-päästöt ovat pääosin polttoaineen sisältämän typen aiheuttamia; tulipesän lämpötila on korkeimmillaan vain noin 1100 °C eikä näin ollen palamisilman typpi hapetu typenoksidiksi. Raakapäästöjen suuri vaihtelu selittyy jätepolttoaineen heterogeenisuuden vuoksi; päästöt vaihtelevat suuresti polttoaineen koostumuksen (jätepolttoaineen typen määrä on 1-5 % kuivapainosta (taulukko 3)), määrän ja lämpöarvon mukaan.

Vähennys-% ja moolisuhteen laskussa on käytetty testeistä saatujen raakapäästöjen ylintä ja alinta arvoa. Tulokset eivät siis ole absoluuttisen oikeita, vaan kertovat kyseisten laskujen arvioidut ylä- ja alarajat. Vähennys-% ja moolisuhteen määrittystä on tehty vain 18.11.2010 jälkeisistä arvoista edellä mainitun päästömittauslaitteiston näyttämän virheen vuoksi. Kaikki laskuissa käytetyt kaavat on johdettu lähteen 12 tiedoista. Vähennys-% on määritetty kaavasta 19.

$$\text{vähennys \%} = 1 - \left(\frac{\text{saavutettu } NO_x \text{ pitoisuus}}{\text{raaka } NO_x \text{ pitoisuus}} \right) \quad (19)$$

Moolisuhteen määrittäminen on tehty vain typpimonoksidin ja ammoniakkin välisestä reaktioyhtälöstä, koska tulipesässä muodostuva typpiyhdiste on 95 prosenttisesti typpimonoksidia ja loput 5 prosenttia typpidioksidia. Moolisuhteen määrittäminen on tehty luvun 4.2.2 reaktioyhtälön 11 mukaan.



Reaktioyhtälön mukaan NH_3 :n ja NO :n teoreettisessa reagoinnissa tarvitaan 1 mooli ammoniakkia 1 moolia NO :ta. Yhdisteiden moolimassat on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Yhdisteiden moolimassat (12, 159.)

Alkuaine	moolimassa, g/mol
N (typpi)	14
O (happi)	16
H (vety)	1
Yhdiste	moolimassa, g/mol
NO	30
NH_3	17

Yhdisteiden (aineen) massan määrittämiseen tunnissa on käytetty ammoniakkin kohdalla virtausmittauksesta saatua tulosta, joka on muutettu vastaamaan 100 prosenttista ammoniakkia kertomalla luku ammoniakkiveden tiheydellä 0,909 kg/l sekä ammoniakkin pitoisuudella 24,5 %.

$$m_{NH_3} = \text{mittaus} \left(\frac{l}{h} \right) \times \text{tiheys} \left(\frac{kg}{l} \right) \times \text{pitoisuus} \quad (20)$$

m_{NH_3} = ammoniakkin massa

mittaus $\left(\frac{l}{h}\right)$ = ammoniakkivesiliuoksen virtaus litraa per tnti

tiheys $\left(\frac{kg}{l}\right)$ = ammoniakkivesiliuoksen tiheys

pitoisuus = ammoniakkivesiliuoksen pitoisuus

Typenoksidien kohdalla määrittäminen on tehty kaavan 21 mukaisesti.

$$m_{NO} = NO_{raaka} \left(\frac{mg}{Nm^3}\right) \times skv \left(\frac{Nm^3}{h}\right) \quad (21)$$

m_{NO} = typpimonoksidin massa

$NO_{raaka} \left(\frac{mg}{Nm^3}\right)$ = typpimonoksidin raaka pitoisuus

$skv \left(\frac{Nm^3}{h}\right)$ = savukaasun virtaus normikuutiota tunnissa

Päästömittauksen ilmoittama NO_x -pitoisuus on ilmoitettu ympäristöluvan mukaisesti typpidioksidina (NO_2), joten pitoisuus on muutettu vastaamaan moolisuhteen laskussa tarvittavaa typpimonoksidia (NO) kaavan 22 mukaisesti.

$$mp \div kerroin = ppm \text{ pitoisuus} \quad (22)$$

mp = mitatun päästön pitoisuus $\frac{mg}{Nm^3}$

kerroin = mitatun päästön moolimassa \div idealikaasun tilavuus

ppm pitoisuus = päästön pitoisuus yksikössä ppm

idealikaasun tilavuus = $22,41 \frac{l}{mol}$

Ensiksi mitattu NO₂-pitoisuus muutetaan vastaamaan NO_x ppm- yksikköä, josta se muunnetaan edelleen vastaamaan NO:ta. Esimerkki NO₂:n muuntaminen NO_x ppm-yksikköön mitatun pitoisuuden ollessa 150 mg/Nm³.

$$NO_{2,kerroin} = 46 \frac{g}{mol} \div 22,41 \frac{l}{mol} = 2,054 \frac{kg}{m^3}$$

$$150 \frac{mg}{Nm^3} \div 2,054 \frac{kg}{m^3} = 73 \text{ ppm } (NO_x)$$

Tämän jälkeen pitoisuus muutetaan vastaamaan NO:ta käyttämällä kaavaa 23.

$$\text{ppm pitoisuus} \times \text{kerroin} = mp \quad (23)$$

$$NO_{kerroin} = 30 \frac{g}{mol} \div 22,41 \frac{l}{mol} = 1,34 \frac{kg}{m^3}$$

$$73 \text{ ppm } (NO_x) \times 1,34 \frac{kg}{m^3} = 97 \frac{mg}{Nm^3} (NO)$$

Moolisuhteen laskemiseksi on määritetty aineiden ainemäärät kaavan 24 mukaisesti.

$$n = m/M \quad (24)$$

$$n = \text{ainemäärä}$$

$$m = \text{aineen massa}$$

$$M = \text{moolimassa}$$

Moolisuhde on määritetty kaavan 25 mukaisesti.

$$\text{moolisuhde} = \frac{n_{(NH_3)}}{n_{(NO)}} \quad (25)$$

$$n_{(NH_3)} = \text{ammoniakin ainemäärä}$$

$$n_{(NO)} = \text{typpimonoksidin ainemäärä}$$

Taulukko 7. Vähennys- %:t ja moolisuhteet viikoittaisista keskiarvoista 27.11–25.12.2010.

PVM	NH ₄ OH virt. l/h	NO _x (red) mg/Nm ³	NO _x vähennys		NH ₃ :NO moolisuhte		KP höyryn virtaus (t/h)
			min	max	min	max	
27.11.2010	47	188	47 %	61 %	1,2	1,6	39,63
4.12.2010	43	190	46 %	61 %	1,0	1,4	39,80
11.12.2010	41	191	46 %	61 %	1,0	1,4	39,02
18.12.2010	43	184	48 %	62 %	1,0	1,4	39,55
25.12.2010	47	191	46 %	61 %	1,1	1,6	39,34
Keskiarvo	44	189	47 %	61 %	1,1	1,5	39,5

Vähennys- % on keskiarvallisesti ollut välillä 47 % -61 % moolisuhteen ollessa välillä 1,1–1,5. Typenoksidien vähennyksen voidaan todeta olevan riittävällä tasolla, mutta moolisuhte on korkeammalla kuin luvussa 4.2.2 kuvan 6 esittämät arvot. On huomiotava, että moolisuhteen arvot 1,1 ja 1,5 on laskettu mitatun NO_x:n raakapäästön (taulukko 5) maksimi- ja minimiarvoista. Todellisen moolisuhteen voidaan näin ollen olettaa olevan noin 1,25. Luvussa 4.2.2 esitetyn kuvan 6 mukaan moolisuhteella 1,25 on mahdollista saavuttaa yli 80 %:n vähennys. Ammoniakkia joudutaan syöttämään enemmän kuin on teoreettisesti tarpeellista ja täten syntyy NH₃-raakapäästöjä.

Kuvan 6 mukaisesti voidaan olettaa moolisuhteella 0,7-0,8 pääsevän 60 %:n vähennykseen, joka tarkoittaisi ammoniakkivesiliuoksen syöttönä noin 32 l/h.

6.3 Tarkempi tutkiminen ja testaukset

Ammoniakin korkea syöttötarve ja huono reagointi voi johtua väärästä ruiskutusalueen lämpötilasta, liian lyhyestä viipymäajasta tai huonosta sekoittumisesta. Ammoniakin korkeiden raakapäästöjen vuoksi ainakin ruiskutuslämpötilan voidaan olettaa olevan liian matala. Asian testaamiseksi ohjasin ruiskutusta eri tasoille höyryvirtauksen ollessa 38–40 t/h. Testillä saavutetut tulokset olivat kohtuullisen mitättömiä. Ruiskutuksen ollessa tasolla 4 tai 3 ammoniakin kulutus ja NO_x:n vähennys pysyivät käytännössä muuttumattomina. Ruiskutuksen tiputtaminen tasolle 2 nosti NO_x:n pitoisuutta piipussa selvästi ja näin ollen ammoniakin ruiskutuksen tarvetta. Ruiskutusosojen lämpötiloja ei pystytty määrittämään oikeanlaisen lämpötilamittarin puutteesta johtuen, mutta voidaan olettaa, että lämpötila on höyryvirtauksen ollessa 38–40 t/h ainakin

lähellä optimaalista aluetta tasoilla 4 ja 3, koska ruiskutus matalammalle tasolle nosti NO_x-pitoisuutta.

Liian lyhyen viipymääjan ja huonon sekoittumisen mahdollisuuden selvittämiseksi tutkin tarkemmin ajotrendejä, joista selvisi seuraavaa: ammoniakkin reagointi on pienemmillä kuormilla (höyryn virtaus alle 38 t/h) parempaa kuin suurilla kuormilla (taulukko 8). Ainakin osin tämä selittyy pienemmällä savukaasun virtausnopeudella (pidempi viipymäaika ja parempi sekoittuminen).

Taulukko 8. Moolisuhde isolla ja pienellä höyryvirtauksella, tuntikeskiarvot.

PVM	NH ₄ OH virt. l/h	NO _x (red) mg/Nm ³	NO _x vähennys		NH ₃ :NO moolisuhde		Höyry virt. t/h
			min	max	min	max	
7.1.2011 9:00	45	185	48 %	60 %	1,2	1,6	37,88
7.1.2011 10:00	46	195	45 %	58 %	1,1	1,4	36,18
7.1.2011 11:00	45	194	45 %	58 %	1,1	1,5	35,70
keskiarvo	45	192	46 %	58 %	1,10	1,50	36,59
3.1.2011 17:00	53	201	43 %	56 %	1,2	1,7	41,15
3.1.2011 18:00	51	182	49 %	61 %	1,2	1,6	39,20
3.1.2011 19:00	55	203	43 %	56 %	1,3	1,8	41,10
keskiarvo	53	195	45 %	58 %	1,23	1,69	40,48

Hyötyvoimalaitoksen SNCR-laitteiston valmistajan ohjeiden mukaan suuttimia säätämällä voidaan saavuttaa optimaalinen toiminta laitteistolle. Kokeilin suuttimilla kaikki mahdolliset erilaiset säädöt: ruiskutussuuntauksen vaihtamista ylempäs ja alemmas, pisarakoon pienentämistä ja suurentamista sekä hajotusilman paineen nostoa ja laskua. Mikään säätö ei vaikuttanut merkittävästi NO_x:n vähennykseen tai ammoniakkin parempaan reagointiin.

Matalammalla höyrykuormalla saavutettu ammoniakkin parempi reagointi antoi olettaa, että ammoniakki ei suuremmalla höyrykuormalla joko ehdi reagoida tarpeeksi hyvin typenoksideihin tai se ei sekoitu riittävän hyvin koko savukaasuvirtaukseen. Kattilan sisäpuolen leveys ruiskutuskohdasta on myös kohtuullisen suuri (n.4,9m), minkä vuoksi on aihetta olettaa, että ammoniakki ei pysty sekoittumaan riittävästi koko savukaasuvirtaukseen.

Reagointiaikaa ja sekoittumista yritin parantaa lisäämällä laimennusveden virtausta 200 l/h -> 300 l/h. Arvioin lisäyksen parantavan ammoniakkivesiliuoksen levittymistä koko savukaasukanavan alueelle, sekä hidastavan ammoniakkipisaroiden liian nopeaa höyrystymistä. Taulukossa 9 on esitetty testin tulokset.

Taulukko 9. Moolisuhde isolla ja pienellä laimennusveden virtauksella

PVM	NH ₄ OH virt. l/h	NO _x vähennys		NH ₃ :NO moolisuhde		Laimennusveden virt l/h	Kphöyr virt t/h
		min	max	min	max		
13-17.1.2011	39	46 %	61 %	0,9	1,2	300	39,4
8-12.1.2011	43	48 %	62 %	1,0	1,4	200	39,5
24-28.1.2011	46	45 %	60 %	1,1	1,5	200	39,2

Suuremmalla laimennusveden virtauksella saavutettiin kohtalainen parannus. Moolisuhteen ja ammoniakkiveden virtauksen voidaan todeta tippuneen. Oletettavasti syy on edellä mainittu parempi ammoniakkin sekoittuminen savukaasuvirtaukseen ja pidempi viipymäaika. Kuitenkaan ammoniakkin reagointi ei ole vielä lähellekään täydellistä, sillä reagoimattoman ammoniakkin pitoisuus on vielä huomattavasti yli oletetun (+12 mg/Nm³).

Verrattaessa taulukoiden 7, 8 ja 9 arvoja on myös huomioitava, että jätepoltoaineen heterogeenisuuden vuoksi tulokset ovat enemmän suuntaa antavia kuin absoluuttista totuutta kertovia.

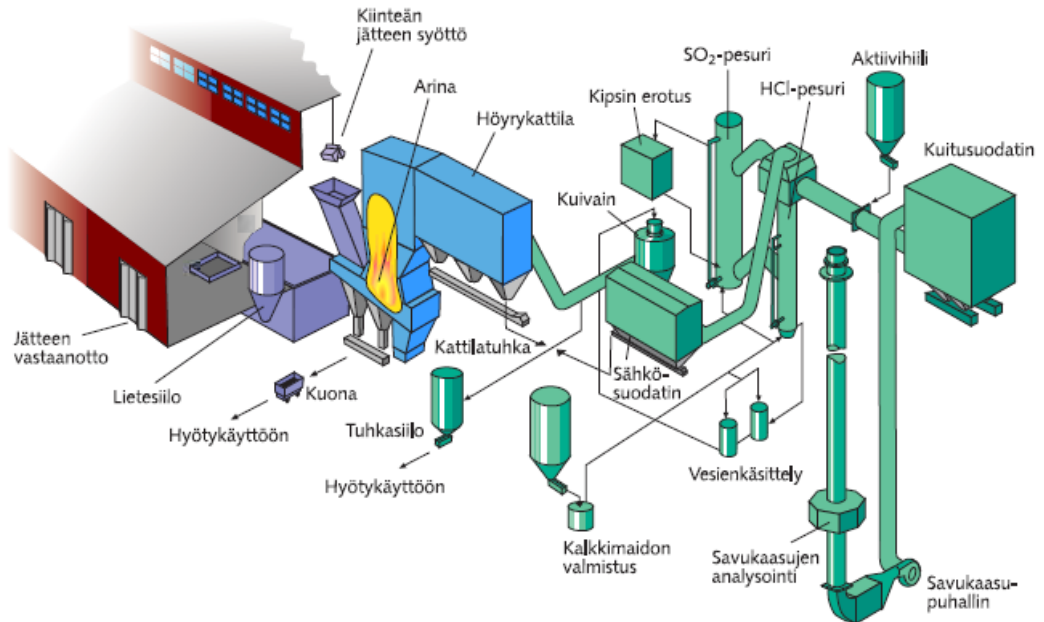
7 TUTUSTUMINEN TOISEEN SNCR LAITTEISTOON

Työn aikana kävin tutustumassa Riihimäellä sijaitsevan Ekokem Oy Ab:hen kuuluvan Ekovoima Oy:n jätevoimalaitokseen ja sen SNCR-laitteistoon. Tutustumiskäynnillä oli tarkoitus verrata laitteiston toimivuutta Hyötyvoimalaitoksen laitteistoon sekä hankkia uusia näkemyksiä laitteiston parantamiselle.

7.1 Ekovoima Oy:n jätevoimala

Ekovoima Oy:n jätevoimala on rakenteeltaan ja ominaisuuksiltaan lähes samanlainen kuin Kotkan Energian Hyötyvoimalaitos, lukuun ottamatta savukaasun puhdistuslaitteistoa. Jätevoimalassa poltetaan syntypaikkalajiteltua yhdyskuntajätettä ja erilaisia

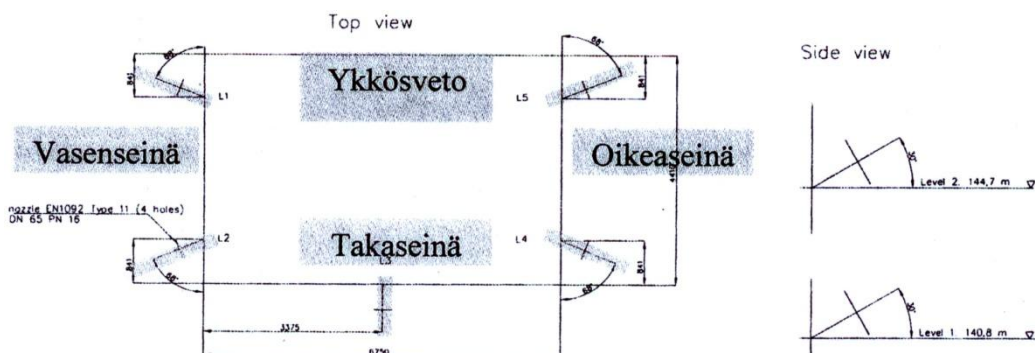
teollisuusjätteitä. Laitoksen polttoaineteho on 55 MW. Jätteet palavat viisivyöhykkeisellä porrassarinalla. Typen oksidien pelkistämiseksi tulipesään syötetään ammoniak-kivettä. Kattilassa syntyvä korkeapainehöyry johdetaan laitosalueen yhteiseen höyryverkkoon ja jalostetaan sähköksi ja kaukolämmöksi. Savukaasujen viisivaiheinen puhdistuslinja koostuu sumutuskuivaimesta, sähkösuodattimesta, lämmönvaihtimesta, suolahappo- ja rikkidioksidipesureista sekä kuitusuodattimesta. (13.)



Kuva 16. Ekovoima Oy jätevoimala. (13)

7.2 Ekovoiman SNCR-laitteisto

SNCR-laitteisto on peruseriaatteeltaan samanlainen kuin Hyötyvoimalan oma. Pelkistyskemikaalina käytetään ammoniakkivesiliuosta. Ammoniakkivesiliuoksen varastointi ja pumppumoduulit ovat samanlaiset kuin Hyötyvoimalaitoksella. Suurin ero on suutinten sijainnissa ja mallissa sekä laimennusveden määrässä. (14.)



Kuva 17. Ekovoima SNCR suutinten sijainti (14)

Ekovoimalla suuttimet on sijoitettu kattilaan ensimmäiseen vetoon kahdelle tasolle sivuseinille sekä takaseinälle (kuva 17). Kattilan ohjausjärjestelmä valitsee ruiskutustason kattilan katon lämpötilamittauksien mukaan. Yli 760 °C:n lämpötiloissa ruiskutus on ylätasolle ja alle 760 °C:n lämpötiloissa alatasolle. Käytännössä kattilan normaaliolosuhteissa ruiskutus on aina ohjattuna ylätasolle. Vain ylösajossa ruiskutus ohjataan alemmalle tasolle. Suuttimet on sijoitettu alaviistoon siten, että niiden ruiskutus-suunta on savukaasuvirtausta vastaan. Suuttimen ruiskutussuunta on samalla linjalla suuttimen rungon kanssa suoraan eteenpäin (kuva 18). (14.)



Kuva 18. Ekovoima SNCR suutin (14)

Laimennusveden virtaus on suurempi ja ohjaustapa erilainen kuin Hyötyvoimalaitoksella. Ammoniakkiliuokselle ja vedelle on määritetty maksimi kokonaisvirtaus 800 l/h. Ammoniakkiliuoksen virtauksen kasvaessa veden virtaus pienenee. Veden virtaus per suutin on välillä 154–140 l/h Hyötyvoimalaitoksen vastaavan arvon ollessa n. 100 l/h. (14.)

7.3 SNCR-laitteiston suorituskyky

Laitteistolla saavutetaan NO_x :n vähennys tasolle 175 mg/Nm^3 (red. 11 % O_2 95 % luottamusväli) ammoniakkivesiliuoksen virtauksen ollessa välillä 29–100 l/h. Ammoniakin raakapäästöt ovat keskimäärin alle 2 mg/Nm^3 . Jo ammoniakin raakapäästön alhainen taso kertoo, että laitteisto toimii huomattavasti paremmin kuin Hyötyvoimalaitoksen vastaava (vrt. $>10 \text{ mg/Nm}^3$). Suurin syy laitteiston huomattavasti paremmalle toiminnalle on oletettavasti ammoniakin leviäminen koko savukaasuvirtaukseen ja täten ammoniakin parempi reagointi. Moolisuhteita eikä vähennys- % määritetty, sillä NO_x -raakapäästöjä ei voitu/ehditty mitata, eikä näin ollen verrata laitteiston tehokkuutta Hyötyvoimalaitoksen laitteistoon. NO_x -raakapäästöjen voidaan kuitenkin olettaa olevan samantasoisia kuin Hyötyvoimalaitoksella samanlaisesta polttoaineesta ja kattilatekniikasta johtuen. Ammoniakkivesiliuoksen kulutuksen tulisi täten olla suh-

teessa kattilan tehoon samanlaista. Ammoniakkivesiliuoksen kulutus on keskimäärin 65 l/h, joka on suhteutettuna kattilan polttoainetehtoon parempi kuin Hyötyvoimalaitoksen vastaava.

$$Ekovoima = 65 \frac{l}{h} \div 55MW = 1,18 \frac{l/h}{MW} \quad (26)$$

$$Hyötyvoimalaitos = 45 \frac{l}{h} \div 34MW = 1,32 \frac{l/h}{MW} \quad (27)$$

Yksi huomioitava asia on myös Hyötyvoimalaitoksesta eroava Ekovoiman tavoitetaso NO_x :lle. Ekovoiman jätevoimalassa NO_x -pitoisuus pyritään pitämään noin 175 mg/Nm^3 :ssa ja Hyötyvoimalaitoksella noin 150 mg/Nm^3 :ssa. Osaltaan tämäkin selittää ammoniakkinliuoksen pienempää tarvetta; NO_x -pitoisuutta pyritään laskemaan 25 mg/Nm^3 vähemmän.

Ammoniakkivesiliuoksen syöttöä ohjaava NO_x -pitoisuussäädin on säädetty paljon Hyötyvoimalaitoksen vastaavaa nopeammaksi. Heti kun mitattu pitoisuus tippuu alle asetuksen, NH_4OH :n virtaus laskee reilusti alemmas. Pitoisuuden noustessa yli asetuksen virtaus nousee reilusti ylemmäs. Voidaan olettaa, että säätimen nopeamman reagoinnin ansiosta ammoniakkivesiliuosta ei syötetä koskaan enemmän kuin on tarve. Tämäkin osaltaan varmasti vähentää NH_3 raakapäästöjen syntymistä.

Vierailu antoi hyviä uusia näkemyksiä ja ideoita Hyötyvoimalaitoksen laitteiston parantamiselle sekä selvensi käytännössä saavutettavien tuloksien tavoitteita.

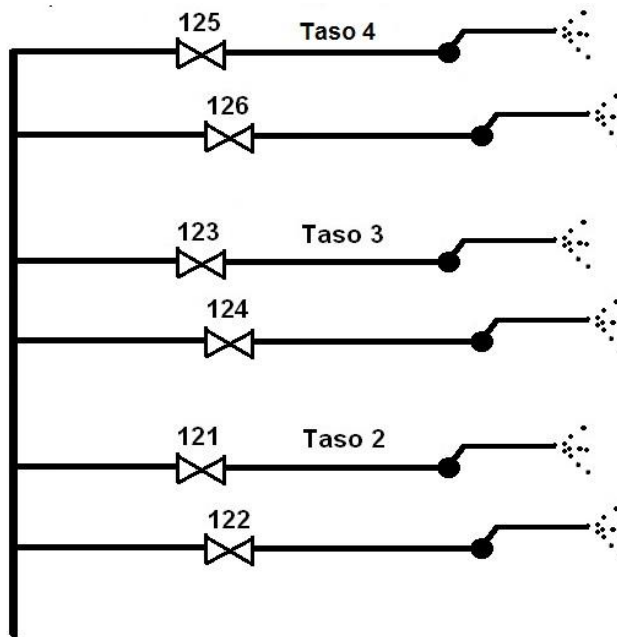
8 SUUTINTEN LISÄYS KATTILAN TOISELLE SIVULLE

Edeltävien tutkimuksien ja päätelmien sekä Ekovoiman SNCR-laitteistoon tutustumisen myötä päätettiin Hyötyvoimalaitoksen kattilan toiselle puolelle lisätä yhden ammoniakkin ruiskutuslaitteen. Olin miettinyt suutinten lisäystä jo aikaisemmin tutkimusten aikana, kun vaikutti siltä, että ammoniakkivesiliuoksen suuri kulutus saattoi johtua huonosta sekoittumisesta ja liian lyhyestä viipymäajasta. Suuttimia ei kuitenkaan lisätty, koska ei oltu täysin varmoja siitä, olisiko lisäyksestä riittävää hyötyä suhteessa lisäyksen tuomiin kustannuksiin ja työmäärään. Tutustuminen toiseen laitteistoon vakuutti lisäyksen kannattavuuden.

Asennuspaikat uusille suuttimille löytyi kattilan vasemmalta puolelta, jossa on ylimääräisille lämpötila-antureille tarkoitettut asennusaukot. Asennusaukot ovat tason 4 (+25,8m) ja 3 (+23,0m) välissä. Asennusaukkojen peitteenä olevat laipat korvattiin laipoilla, joihin on asennettu camlock-naarasliittimet suuttimien kiinnitystä varten.

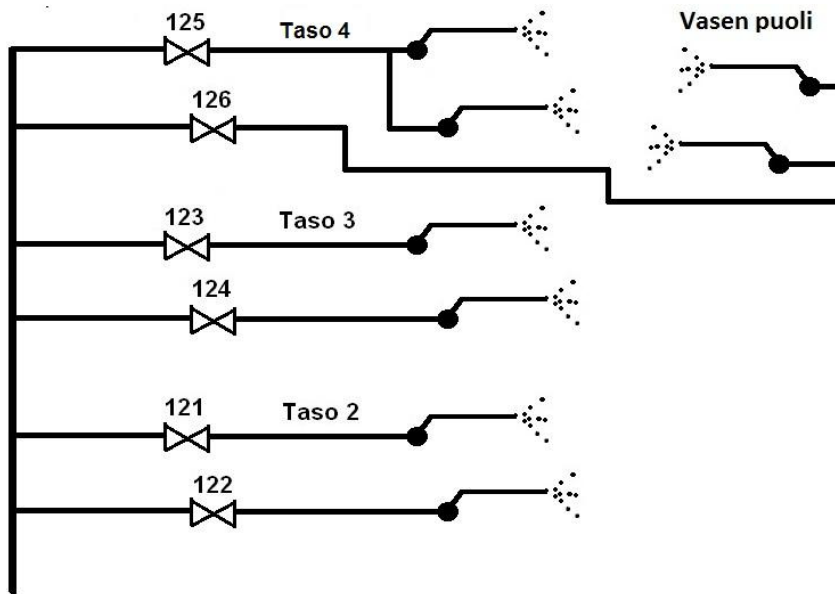
8.1 Ammoniakkilinjan muutos

Ammoniakkivesilinjaan tarvittava muutos haluttiin toteuttaa mahdollisimman yksinkertaisesti ja edullisesti siten, että paluu alkuperäiseen suutinten kytkentään on mahdollisimman helppoa ja nopeaa, mikäli uusien suuttimien kytkentä ei jostain syystä olisi toimiva tai riittävä typenoksidien vähennyksessä.

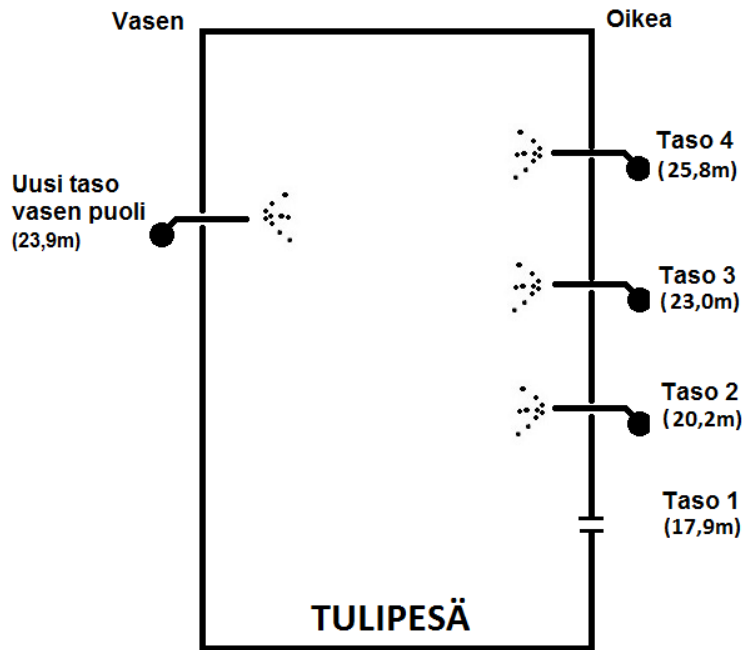


Kuva 19. Periaatekuva ammoniakkilinjan ja suutinten alkuperäisestä kytkennästä

Alkuperäisen kytkennän mukaisesti jokaisella ruiskutus-suuttimella on oma ohjauskaapissa sijaitseva auki/kiinniventtiili (kuvan 19 venttiilit 125,126 jne.), jolla ohjataan ruiskutus halutulle tasolle. Suutinten lisäys toteutettiin siten, että tason 4 toisesta ammoniakkivesilinjasta haaroitettiin linja toiselle puolelle kattilaa (kattilan vasen puoli). Tason 4 molemmat suuttimet yhdistettiin venttiilin 125 ohjaamaan linjaan ja vasemman puolen suuttimet venttiilin 126 ohjaamaan linjaan (kuva 20). Ammoniakkivesilinjan lisäksi vasemman puolen uusille suuttimille tarvittiin paineilimaliitettä hajotusillemalle.



Kuva 20. Periaatekuva ammoniakkilinjan ja suutinten uudesta kytkennästä



Kuva 21. Periaatekuva suutinten sijainnista kattilan takaosasta katsoen.

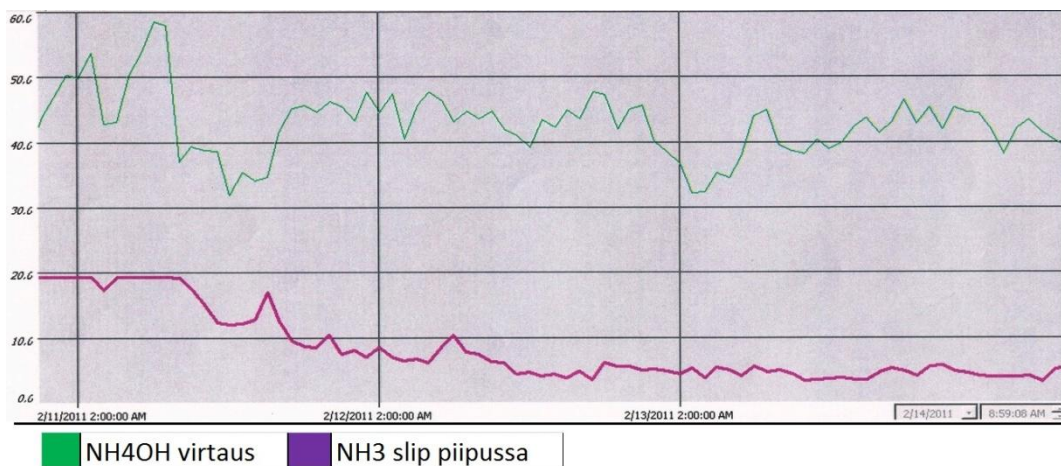
Kyseisen kytkennän haittapuoli on siinä, että ruiskutuksen virtausta ei pystytä säätämään täysin tasaiseksi jokaiselle suuttimelle, eikä käyttämään kattilan ohjausjärjestelmän automaattia tasojen vaihdossa. Testit päätettiin toteuttaa siten, että ruiskutus ohjataan vain tasolle 4 ja vasemmalle puolelle, eikä tasoja vaihdeta höyryvirtauksen mukaan. Tieto Ekovoiman yhden tason ruiskutuksen toimivuudesta antoi olettaa, että yhden tason ruiskutuksen tulisi toimia ainakin välttävästi myös Hyötyvoimalaitoksella (vrt. luku 7.3).



Kuva 22. Uusien suuttimien asennus kattilan vasemmalla puolella. Kuvassa ammoniakkivesilinjat ja hajotusilmalinjat paineenalentimiseen.

8.2 Testaukset

Testausten alussa asetin kattilan ohjausjärjestelmästä SNCR-laitteiston syöttötasojen valinnan manuaalille ja laimennusveden virtauksen säätimen automaattille ja asetin sille kokonaisvirtaukseksi 330 l/h, jotta ammoniakkivesiliuos levittäytyy riittävästi koko savukaasuvirtaukseen. Ammoniakkivesiliuoksen virtauksen säätimen pidin kaskadi-moodilla ja näin ollen virtaus säätyi automaattisesti tilanteen vaatimalle tasolle. Testaus aloitettiin 11.2.2011.



Kuva 23. Ensimmäinen testitulos 4 suuttimella, 11.2-14.2.2011

Heti toisten suuttimien lisäyksen jälkeen voidaan huomata merkittävä parannus ammoniakkivesiliuoksen kulutuksessa ja NH_3 -raakapäästöissä piipussa. Ammoniaki-

vesiliuoksen kulutus putosi tasolta 50 l/h tunnissa tasolle 42 l/h ja NH_3 -raakapäästö putosi ensimmäistä kertaa laitoksen toiminnan aikana tasolle 4-5 mg/Nm³. On myös huomioitava, että kyseisellä testaushetkellä kattilaa operoitiin suuremmalla kuormalla kuin normaalisti (+40 t/h), jolloin ammoniakkivesiliuoksen tarve on normaalia korkeampi. Kulutuksen suhteutus höyryvirtaukseen kertoo sen, että ammoniakki reagoi huomattavasti paremmin kuin aiemmin. Suurin syy paremmalle reagoinnille on oletettavasti ammoniakkin parempi sekoittuminen koko savukaasuvirtaukseen.

Tarkempia laskelmia en vielä tämän aikavälin testeistä tehnyt, koska laitteiston valmistaja oli tulossa tekemään säätötoimenpiteitä alkuperäisen kytkennän ja ohjauksen mukaiselle laitteistolle 14.–15.2.2011.

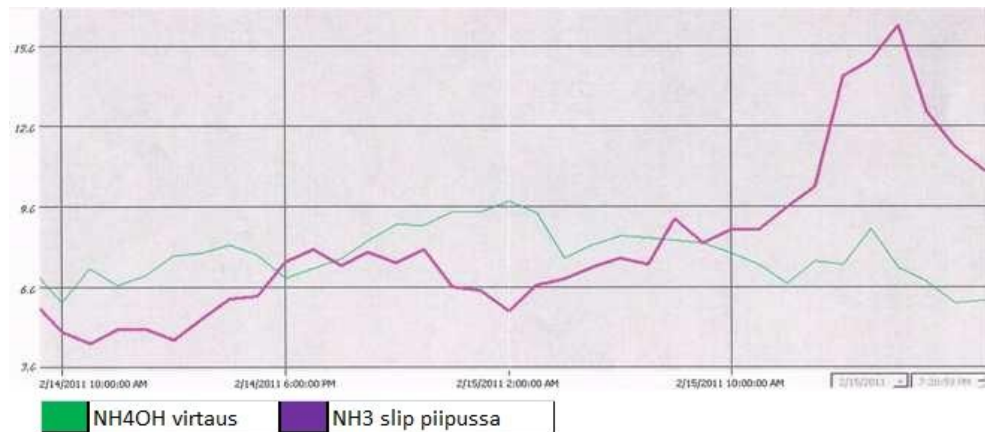
8.3 Petro Miljö Ab:n käynti Hyötyvoimalaitoksella

Työn aikana olin ollut yhteydessä SNCR-laitteiston valmistajaan Petro Miljö Ab:hen optimointiin liittyvissä asioissa. He olivat kiinnostuneita tekemästäni tutkimuksesta ja laitteiston muutoksesta ja tulivat tekemään laitteiston takuuseen liittyviä säätöjä kattilavalmistajan pyynnöstä. Heidän oli tarkoitus säätää laitteistoa siten, että se saavuttaa takuehtojen mukaiset arvot.

Säätötoimenpiteet aloitettiin siten, että he mittasivat ruiskutusasteista savukaasun lämpötiloja. Mittauspöytäkirja on esitetty liitteessä 2/1-4. Tasojen 4 ja 3 lämpötilat todettiin olevan normaaliajossa (höyryn virtaus 36-40+ t/h) riittävän optimaaliset SNCR laitteiston toiminnan kannalta. Tasoja 1 ja 2 ei ole tarpeellista käyttää käytännössä missään ajotilanteessa. Tämä myös vahvisti luvussa 6.3 esitetyt testauksella saavutetut tulokset.

SNCR-laitteiston kytkentä ja ohjausjärjestelmä palautettiin vastaamaan alkuperäistä. Petro Miljö suoritti erinäisiä säätötoimenpiteitä ja pyrki näin saamaan takuehtojen mukaisia tuloksia. Heti siirryttäessä takaisin alkuperäiseen, vain toispuoleiseen ruiskutukseen, ammoniakkivesiliuoksen kulutus ja NH_3 -raakapäästö nousivat takaisin ylös (yli 10 mg/Nm³). Tämä voidaan huomata kuvan 24 trendistä. Trendin loppupuolella näkyvä ammoniakkivesiliuoksen kulutuksen hienoinen väheneminen johtuu pääosin siitä, että kattilaa ei pystytty operoimaan täydellä kuormalla NID-savukaasunpuhdistuslaitteiston korkean paine-eron takia. NID-laitteiston letkusuodatimen korkea paine-ero on useasti laitoksen toiminta ajan estänyt kattilan operoinnin

täydellä kuormalla. Nyt ensimmäistä kertaa huomattiin, että NH_3 :n raakapäästöillä on tähän selvä vaikutus. Tästä asiasta on luvussa 8.5 tarkempaa pohdintaa.



Kuva 24. Petro Miljö testitulokset

Petro Miljön edustajat eivät saaneet laitteistoa toimimaan takuuehtojen mukaisesti. Keskusteluissa heidän kanssaan ilmeni, että toimitettu SNCR-laitteisto on luultavasti mitoitettu väärin joko heidän tai kattilanvalmistajan toimesta. Kattilan tulipesän leveyden ylittäessä 4 metriä Petro Miljö käyttää molemminpuolista ruiskutusta (Hyötyvoimalan tulipesän leveys noin 4,9 m).

Petro Miljön edustajat suosittelivat uuden kytkennän käyttämistä varauksetta tästä eteenpäin ammoniakkin huomattavasti paremman reagoinnin vuoksi.

8.4 Uuden kytkennän tulokset

Petro Miljön suosituksesta ja laitteiston huomattavasti paremman toimivuuden johdosta päätettiin käyttää ruiskutusta kiinteänä tasolle 4 ja vasemmalle puolelle 15.2.2011 lähtien.

Taulukko 10. Uuden kytkennän moolisuhteet ja vähennysprosentit aikavälillä 17.2.–28.2.2011

PVM	NH ₄ OH virt. l/h	NO _x (red) mg/Nm ³	NO _x vähennys		NH ₃ :NO moolisuhde		KP höyryn virtaus (t/h)	NH ₃ slip mg/Nm ³
			min	max	min	max		
17-19.2.2011	35	193	46 %	60 %	0,73	0,99	39,61	5,00
20-22.2.2011	36	205	42 %	58 %	0,76	1,04	39,38	2,71
23-25.2.2011	37	198	44 %	59 %	0,78	1,07	38,97	4,83
26-28.2.2011	36	199	44 %	59 %	0,78	1,07	39,94	5,18
Keskiarvo	36	199	44 %	59 %	0,76	1,04	39,47	4,43

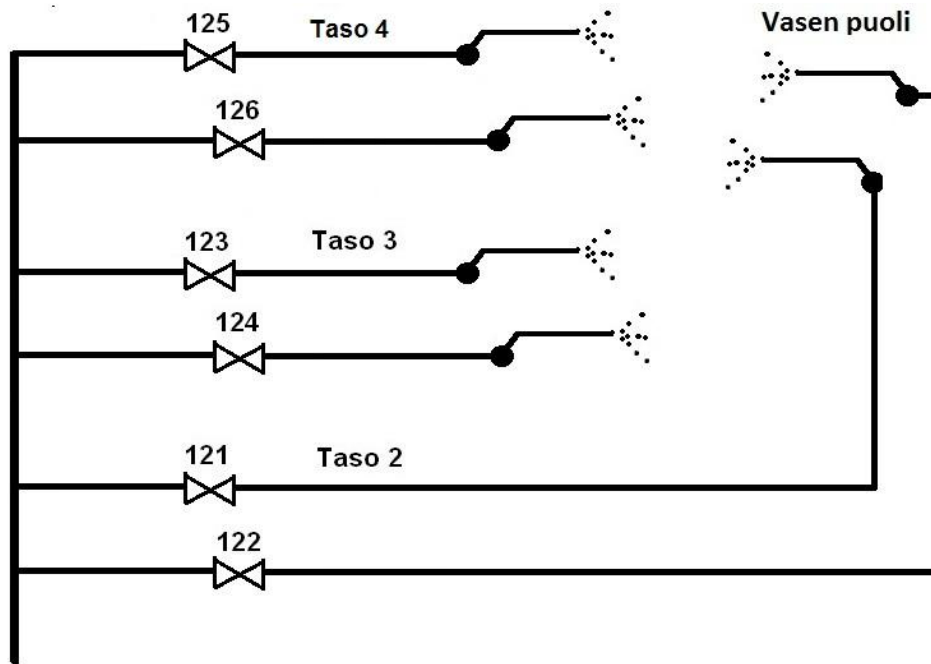
Taulukko 11. Alkuperäisen kytkennän moolisuhteet ja vähennysprosentit viikoittaisista keskiarvoista aikavälillä 27.11.–25.12.2010

PVM	NH ₄ OH virt. l/h	NO _x (red) mg/Nm ³	NO _x vähennys		NH ₃ :NO moolisuhde		KP höyryn virtaus (t/h)	NH ₃ slip mg/Nm ³
			min	max	min	max		
27.11.2010	47	188	47 %	61 %	1,2	1,6	39,63	17,1
4.12.2010	43	190	46 %	61 %	1,0	1,4	39,80	12,4
11.12.2010	41	191	46 %	61 %	1,0	1,4	39,02	15,1
18.12.2010	43	184	48 %	62 %	1,0	1,4	39,55	11,4
25.12.2010	47	191	46 %	61 %	1,1	1,6	39,34	15,6
Keskiarvo	44	189	47 %	61 %	1,1	1,5	39,5	14,3

Uudella kytkennällä voidaan todeta saavuttaneen merkittäviä parannuksia (vertaa taulukon 10 arvoja taulukon 11 arvoihin). Moolisuhde on keskimäärin 0,9 NO_x-vähennyksen ollessa noin 52 %. Moolisuhde on huomattavasti paljon matalampi kuin tutkimuksen alkutilanteessa ollut 1,25. Ammoniakkivesiliuoksen virtaus on laskenut 44 l/h:sta noin 36 l/h. Sekä ammoniakin raakapäästö on pudonnut tasolta 14 mg/Nm³ alle 5 mg/Nm³. Laitteisto toimii noin 20 % tehokkaammin verrattessa ammoniakkivesiliuoksen virtauksia. Ammoniakin reagointi on huomattavasti paljon tehokkaampaa.

Laitteiston toimintaa pystyisi vieläkin optimoimaan lisää. Ammoniakkivesiliuoksen ruiskutus on tällä hetkellä ohjattuna vain tasolle 4 ja vasemmalle puolelle. Kun kattilan höyrykuorma tippuu alle 38 t/h, NH₃ raakapäästö nousee tasolle 7-10 mg/Nm³. Tämä johtuu luultavasti pääosin ruiskutustason 4 lämpötilan tippumisesta alle opti-

maalisen alueen. Tulevaisuudessa tullaan toteuttamaan ammoniakiviesilinjaan muutos, jossa tason 2 linja jatketaan vasemman puolen suuttimille (kuva 25).



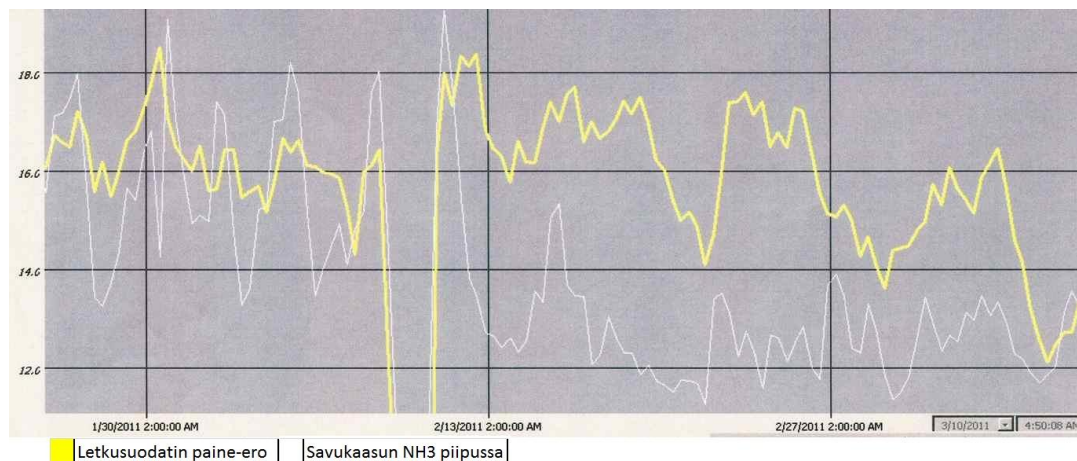
Kuva 25. Periaatekuva ruiskutussuutinten tulevasta kytkennästä

Kattilan ohjausjärjestelmän SNCR-syötön ohjausta muutetaan siten, että vasemman puolen suuttimet pysyvät ajossa aina ja automaatti vaihtaa höyryvirtauksen mukaan oikean puolen ruiskutusta tasojen 4 ja 3 välillä. Tulipesän lämpötilan tippuessa ruiskutus ohjataan alemmas eli kuumempaan alueeseen. Lämpötila vasemmalla puolella on melko optimaalinen kattilan normaaleilla höyrykuormilla, mikä voidaan todeta liitteestä 2. Linjamuutoksen avulla vasemman puolen suuttimia pystytään ohjaamaan erikseen venttiileillä 121 ja 122 ja tason 4 ja 3 suuttimia venttiileillä 125, 126 ja 123, 124 (kuva 25). Muutos mahdollistaa myös virtauksen säädön jokaiselle suuttimelle erikseen ja vielä entistä tasaisemman leviämisen koko savukaasukanavalle. Tason 2 suuttimet jätetään vielä paikoilleen ja kytkentä toteutetaan siten, että tason 2 käyttö on mahdollista kohtuullisen pienillä muutoksilla, mikäli tarvetta sen käytölle ilmenee.

8.5 Savukaasunpuhdistuslaitteiston paine-eron väheneminen

Hyötyvoimalaitoksen savukaasunpuhdistuslaitteiston letkusuodattimen paine-ero on ollut useasti laitoksen toiminnan aikana korkealla siten, että se on estänyt kattilan ope-roinnin täydellä kuormalla. Mitään tarkkaa syytä asialle ei ole löytynyt, mutta nyt

NH₃-raakapäästön pudotessa huomasi, että niillä on jonkinlaista korrelaatiota keskenään.



Kuva 26. Letkusuodattimen paine-ero ja NH₃-raakapäästö ennen ja jälkeen suutinten lisäyksen

Kuvasta 26 voidaan todeta kohtuullisen selvästi NH₃-raakapäästön vaikutus letkusuodattimen paine-eroon. NH₃-raakapäästön laskiessa letkusuodattimen paine-ero laskee. Raakapäästön noustessa letkusuodattimen paine-ero kasvaa. Suurin syy asialle on luultavasti luvussa 4.2.2 esitetty ammoniumvetysulfaatti. Voidaan olettaa, että ammoniumvetysulfaatti on tarrautunut letkusuodattimen letkujen pinnalle ja näin huonontanut niiden läpäisykykyä. Madaltunut letkusuodattimen paine-ero on mahdollistanut kattilan operoinnin aikaisempaa korkeammalla kuormalla (+40 t/h).

8.6 SNCR-laitteiston maksimitehokkuus

Tutkimuksen aikana selvitin laitteiston maksimitehokkuuden typenoksidipäästöjen vähennyksessä. Selvitys toteutettiin mahdollisesti tulevaisuudessa tiukkenevien päästöjen raja-arvojen takia.

Taulukko 12. SNCR laitteiston maksimi tehokkuus

PVM	NH ₄ OH virt. l/h	NO _x (red) mg/Nm ³	NO _x vähennys		NH ₃ :NO moolisuhte		NH ₃ slip mg/Nm ³
			min	max	min	max	
10.3.2011 9:36	56	135	62 %	72 %	1,07	1,47	6,68

Laitteistolla saavutettiin typenoksideille pitoisuus 135 mg/Nm^3 , joka vastaa keskimäärin 67 %:n vähennystä ammoniakkivesiliuoksen virtauksen ollessa 56 l/h. Saavutetulla vähennyksellä moolisuhde on noin 1,27 ja ammoniakkin raakapäästö $6,68 \text{ mg/Nm}^3$. On huomioitava, että ympäristöviranomaisille ilmoitettavasta pitoisuudesta poistetaan vielä mittauksen epävarmuus, joka on typenoksideille 20 %. Ympäristöluvan mukainen arvo typenoksideille olisi näin ollen 108 mg/Nm^3 . Kyseistä arvoa voidaan pitää erittäin hyvänä.

Laitteistolla olisi todennäköisesti mahdollisuus saavuttaa vieläkin suurempi vähennys, mutta tämän hetken kytkentä ei mahdollista juurikaan tämän suurempaa virtausta ammoniakkivesilinjojen läpi (yhden linjan läpi menee kahden suuttimen tarvitsema virtaus 190 l/h, joka on käytännössä maksimivirtaus yhdelle linjalle). Tulevaisuudessa uudella kytkennällä voidaan ammoniakkin virtausta nostaa vieläkin ylemmäs ja päästä näin ollen parempaan vähennykseen.

9 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli optimoida typenoksidien vähennyksessä käytettävä SNCR-laitteisto ja vähentää ammoniakkin raakapäästöjen muodostumista sekä selvittää laitteiston käytännön maksimi typenoksidipäästöjen vähennyksessä. Tärkeimpänä tavoitteena oli SNCR-laitteiston optimointi.

Tutustuin työn aikana useaan aihetta käsittelevään teokseen, toiseen vastaavaan laitteistoon sekä olin yhteydessä Hyötyvoimalaitoksen laitteiston valmistajaan. Tutkimusten ja testausten avulla saavutin merkittäviä tuloksia joiden perusteella toteutettiin suutinten lisäys kattilan vasemmalle puolelle. Lisäyksellä saatiin merkittävä parannus SNCR-laitteiston toimivuuteen ja sen tehokkuuteen. Ammoniakkivesiliuoksen kulutus väheni noin 20 % ja ammoniakkin raakapäästöjä muodostuu noin 60 % vähemmän. Lisäys otettiin pysyvästi käyttöön 15.2.2011 lähtien.

Työn aikana selvitin myös laitteiston maksimitehokkuuden typenoksidien vähennyksessä. Tämän hetkiselällä kytkennällä on mahdollista saavuttaa ainakin 67 %:n vähennys, tulevaisuudessa tehtävien muutosten avulla on mahdollista päästä vielä korkeampaan vähennykseen. Myös työn aikana havaitun happimittauksen virheen ja sen aiheuttamien ongelmien takia on mittauksen näyttämään arvoon ja sen oikeellisuuteen kiinnitetty aiempaa enemmän huomiota.

Työ saavutti sille asetetut tavoitteet. Saavutetuista tuloksista ja tehdystä muutoksesta on konkreettista hyötyä kohdeyritykselle ja työssä esitetyistä testauksista ja tuloksista on luultavasti apua vastaavanlaisen ongelman selvittämiseksi myös muissa vastaavanlaisissa laitteistoissa.

Työn aikana toteutettujen muutoksien avulla ammoniakkivesiliuosta saadaan vuositasolla säästettyä kattilan 100 %:n kuormalla noin 64 000 litraa. Se tuo suoria säästöjä, riippuen ammoniakin hinnasta, n. 10 000- 20 000 € vuodessa.

Suurempaa hyötyä, jonka arvoa suoraan rahallisesti mitattuna on käytännössä mahdotonta määrittää, tuo ammoniakin raakapäästön merkittävä väheneminen. Ammoniakin raakapäästön alhainen taso on vähentänyt savukaasunpuhdistuslaitteiston letkusuodatimen paine-eroa, joka on mahdollistanut kattilan operoinnin suuremmalla kuormalla. Tämä tarkoittaa suurempaa jätteen hyötykäyttöä sekä suurempaa energiantuotantoa. Myös ammoniakin väheneminen kattilan sisäosissa vähentää korroosioriskiä ja näin ollen parantaa käytettävyyttä ja käyttöikää. Varovaisen arvion mukaan edellä mainittujen asioiden epäsuora rahallinen hyöty on vuositasolla +100 000 €.

LÄHTEET

1. Kotkan Energia Oy. Tietoa yrityksestä. Saatavissa:
<http://www.kotkanenergia.fi/index.php> [luettu 9.12.2010]
2. Kotkan Energia Oy. 2010. Esittelykalvot.
3. Keppel Seghers. 2008. Waste-to-Energy basics-koulutuskalvot.
4. Kotkan Energia Oy. 2006. Ympäristölupa Nro A 1146
5. Kilpinen Pia. 2002. Typenoksidien muodostuminen ja hajoaminen. Teoksessa Poltto ja Palaminen. s.300-342. Toinen täydennetty painos. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
6. Huhtinen M., Kettunen A., Nurminen, P. ja Pakkanen, H. 2000. Höyrykattilakniikka. 5., uusittu painos. Helsinki: Oy Edita Ab.
7. Keppel Seghers. 2008. SNCR Function Description.
8. Javed M. Tayyeb, Irfan Naseem, Gibbs B.M.. 2007. Control of combustion-generated nitrogen oxides by selective non-catalytic reduction. Journal of Environmental Management. Volume 83. Issue 3. Pages 251-289.
9. Petro Miljö Ab. 2008. SNCR manual.
10. Kontram Oy. Kotkan Energia Hyötyvoimala Päästöjen mittausjärjestelmä.
11. Kotkan Energia Oy. 2011. Päästöjen valvonta.
12. Maol taulukot. 2001. 1.-3. uudistettu painos. Helsinki: Otava.
13. Ekokem Oy, Yhdyskuntajätteen käsittelyprosessi. Saatavissa:
http://www.ekokem.fi/portal/fi/ekokem-yhtiot/kasittelyprosessit/yhdyskuntajatteen_kasittelyprosessi/ [Luettu 24.2.2011]

14. Ekokem Oy. 2011. SNCR laitteiston käyttöohje.

Point	Time	Avg Temp	Depth	Max Temp	Min Temp	1st pass Left	1st pass Right	1st pass Middle	Temp boiler average	Load
42 Monday 14. helmi	16:30	920	1m	945	880	825	835	861	840	40.58
41 Monday 14. helmi	16:45	870	1m	900	840	823	830	847	833	40.24
32 Monday 14. helmi	16:58	900	1m	930	850	806	810	835	817	38.79
31 Monday 14. helmi	17:10	900	1m	920	850	787	798	807	797	37.14
32 Monday 14. helmi	17:20	930	1m	950	900	845	861	880	862	40.47
22 Monday 14. helmi	17:40	960	1m	1000	910	844	855	873	857	41.65
21 Monday 14. helmi	Hole too small									
11 Monday 14. helmi	18:15	1010	1m	1040	980	871	886	900	886	44.92
12 Monday 14. helmi	18:25	990	1m	1050	940	860	871	897	876	44.73

