

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikan koulutusohjelma / Automaatio- ja prosessitekniikka

Alpo Väre

AMMONIAKIN SYÖTÖN OPTIMOINTI NO_x -PÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMISEKSI
SNCR-LAITTEISTOLLA

Opinnäytetyö 2014

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikka

VÄRE, ALPO

Ammoniakin syötön optimointi NO_x -päästöjen vähentämiseksi SNCR-laitteistolla

Opinnäytetyö

35 sivua + 1 liitesivu

Työn ohjaaja

Pt. tuntiopettaja Hannu Sarvelainen

Käyttöinsinööri Petri Jalkanen

Toimeksiantaja

Kotkan Energia Oy

Toukokuu 2014

Avainsanat

ammoniakki, SNCR, NO_x , optimointi, päästöt, jätteenpolttolaitos

Opinnäytetyö tehtiin Kotkan Energia Oy:n Hyötyvoimalaitokselle. Työssä käsitellään SNCR-laitteiston optimointia jätteenpolttolaitoksella. Hyötyvoimalaitoksella halutaan varautua tulevaisuuden tiukkenevia päästörajoituksia varten ja siksi alettiin tutkia nykyisen laitteiston toimintakykyä ja sitä, miten sitä voitaisiin parantaa.

Työn tavoitteena oli optimoida laitoksen SNCR-laitteisto ja vähentää NO_x -päästöjä laitoksella. Typenoksidien kanssa reagoivan ammoniakin raakapäästöt pyrittiin pitämään samalla mahdollisimman pieninä, koska ammoniakki aiheuttaa kattilaan korroosiota.

Työ suoritettiin tekemällä mittauksia nykyisellä laitteistolla. Mittaukset tehtiin muuttamalla syötettävän ammoniakin sekä laimennusveden määrää ja seuraamalla päästöjä. Laitteeseen suunniteltiin myös uuden malliset syöttösuuttimien kärjet sekä uudet suutinpaikat kattilan etuseinään paremman reaktion saamiseksi ammoniakin ja typenoksidien välillä.

Uusien syöttösuuttimien voidaan olettaa parantavan SNCR-laitteiston toimintakykyä ja vähentää NO_x -päästöjä. Laitteistolla on jo nykyisin mahdollista päästä pienempiin NO_x -päästöihin kasvattamalla syötettävän ammoniakin määrää ilman, että ammoniakin raakapäästöt nousevat merkittävästi.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Energy Technology

VÄRE, ALPO

Optimizing the Ammonia feed to reduce NO_x-emissions
with SNCR-system

Bachelor's Thesis

35pages + 1 appendix page

Supervisor

Hannu Sarvelainen, Lecturer

Petri Jalkanen, Production Engineer

Commissioned by

Kotkan Energia Oy

May 2014

Keywords

ammonia, SNCR, NO_x, optimization, emissions, waste-to-
energy power plant

The thesis was done for the waste-to-energy power plant of Kotkan Energia Oy. The focus of the thesis is to optimize the SNCR- system of the power plant in order to prepare for the future's lower NO_x-emissions limit. Because of this, the operational effectiveness of the current system was tested and possible improvements of the system were investigated.

The aim of this study was to optimize the SNCR-system without increasing the consumption of ammonia (NH₃) or the NH₃-slip. The NH₃-slip causes increased corrosion in the boiler so it has to be kept at minimum.

The current system was used for the measurements. The measurements were done by changing the amount of ammonia injected in the boiler as well as changing the amount of dilution water in order to find the best possible mix for the optimal reaction to happen between ammonia and nitrogen oxide inside the boiler. New nozzle heads for the ammonia hydroxide injection were designed and also the places for new lances in the front wall of the boiler were calculated.

It can be assumed that the new injectors in the front wall will improve the reaction and thus make the SNCR-system more effective and reduce the NO_x-emissions of the power plant. With the current system it is possible to reach lower NO_x-emissions by injecting more ammonia without the NH₃-slip rising too high.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	5
2	KOTKAN ENERGIAN VOIMALAITOKSET	5
	2.1 Hovinsaaren voimalaitos	5
	2.2 Korkeakosken Hyötyvoimalaitos	6
	2.3 Muut voimalaitokset	7
3	HÖYTYVOIMALAITOKSEN YMPÄRISTÖVAATIMUSET	8
	3.1 Polttoaineen laatuvaatimukset	9
	3.2 Arinakattilan palamisen hallinta	9
	3.3 Laitoksen polttoprosessi	9
4	SNCR-LAITTEISTO	11
	4.1 NO _x -päästöjen muodostuminen	11
	4.2 SNCR-laitteiston yleinen toimintaperiaate	12
	4.3 Hyötyvoimalaitoksen SNCR-laitteisto	14
5	SNCR- LAITTEISTON MITTAUKSET	18
	5.1 Alkutilanne	18
	5.2 Mittaukset	23
6	UUDET SUUTTIMIT	26
	6.1 Mittaukset	27
	6.2 Lämpötilajakaumat	28
	6.3 Uusien suutinpaikkojen määrittäminen	29
7	YHTEENVETO	33
	LÄHTEET	35
	LIITTEET	

Liite 1. Kattilan lämpöjakaumat eri höyryvirtauksilla

1 JOHDANTO

Työn tarkoituksena on optimoida ammoniakki-vesiliuoksen syöttömäärää NO_x-päästöjen vähentämiseksi Kotkan Hyötyvoimalaitoksella. Hyötyvoimalaitoksella on käytössä Petro Miljö AB:n valmistama SNCR-laitteisto.

Työllä pyritään parantamaan entisestään toimivaa järjestelmää tulevaisuuden tiukke-
nevia päästörajoituksia varten. Tavoitteena olisi päästä pienempiin NO_x-päästöihin
jatkuvassa ajossa ilman, että kattilan korroosioriski nousee tai ammoniakkin raakapääs-
töt nousevat. Työ on toteutettu määrittämällä laitteiston tehokkuutta mittauksilla ja
tutkimalla, mitkä asiat vaikuttavat suorituskykyä parantavasti laitteiston toimintaan.
Työn toimeksiantajalle tästä työstä on hyötyä vähentämällä tulevaisuuden mahdollisia
investointeja NO_x-päästöjen vähentämiseksi.

Aiheen työlle sain Lokakuussa 2013 Hyötyvoimalaitoksen käyttöpäällikkö Antti Lan-
gilta ja käyttöinsinööri Petri Jalkaselta. Petri Jalkanen toimii yhteyshenkilönä ja ohjaa-
jana työlle.

2 KOTKAN ENERGIAN VOIMALAITOKSET

Kotkan Energia Oy on Kotkan kaupungin kokonaan omistama energiayhtiö, joka on
perustettu vuonna 1993. Yrityksen pääliiketoiminta alueet ovat kaukolämpö, teolli-
suushöyry ja sähkö ja lisäksi se myy jätteiden hyötykäyttöpalveluja ja maakaasua teol-
lisuudelle. Yrityksen liiketoiminta jakautuu energian tuotantoon ja kaukolämpöpalve-
luihin. (1.)

2.1 Hovinsaaren voimalaitos

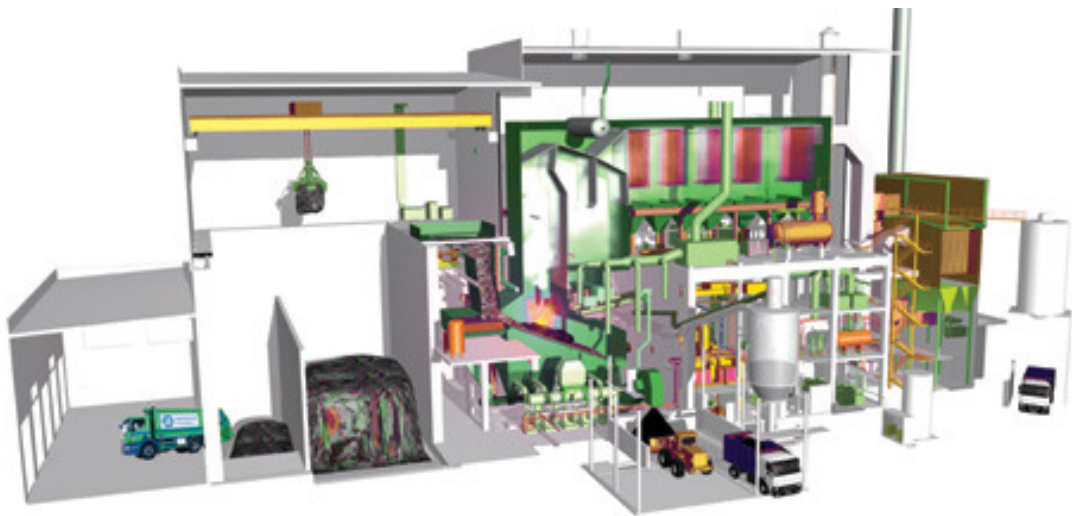
Kotkan Energia Oy:n päätuotantolaitoksena toimii Hovinsaaren voimalaitos, joka on
tyypiltään CHP eli lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitos. Hovinsaaren voimalaitos
tuottaa suurimman osan Kotkassa käytettävästä kaukolämmöstä. Tämän lisäksi laitos
tuottaa prosessihöyryä Danisco Sweeteners Oy:n tehtaalle. Voimalaitos koostuu bio-
voimalaitoksesta sekä maakaasua käyttävästä kombivoimalaitoksesta. (1.)

Hovinsaaren voimalaitoksen pääpolttoaineena käytetään biopolttoaineita kuten metsä-
haketta, kuorta, purua, metsäteollisuuden sivutuotteita, jyrshinturvetta, ruokohelpeä se-

kä kierrätyspolttoaineita. Maakaasua käytetään vain talvella tarvittaessa ja vuosittain kaasuturbiini on käytössä vain noin 2 - 6 viikkoa. Voimalaitos tuottaa vuotuisesti Sähköä 150 - 250 GWh ja kaukolämpöä 300 - 350 GWh sekä prosessihöyryä 140 GWh.
(1.)

2.2 Korkeakosken Hyötyvoimalaitos

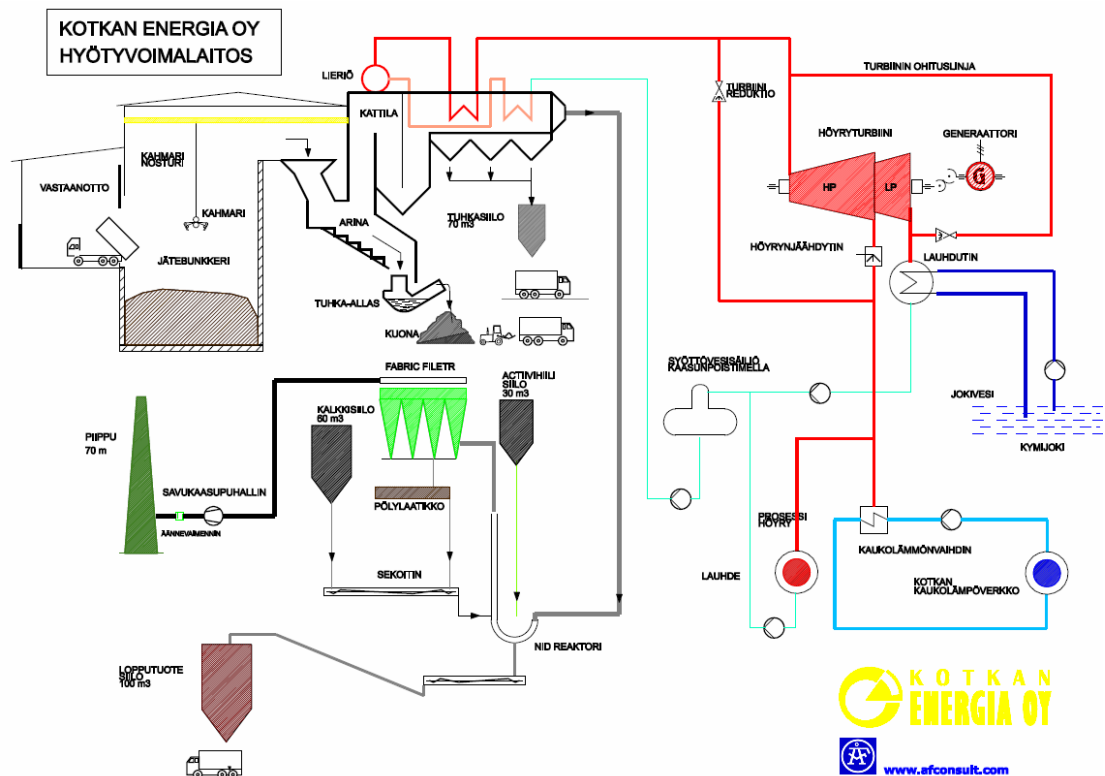
Hyötyvoimalaitos hyödyntää energian tuotannossaan kierrätykseen kelpaamatonta kotitalousjätettä, mikä muuten vietäisiin kaatopaikalle. Polttoaineena käytettävää jätettä kerätään Itä-Uudenmaan, Kymenlaakson, Päijät-Hämeen ja Mikkelin alueelta. Alueella asuu noin 540 000 ihmistä. Laitoksen ansiosta alueen jätehuolto täyttää jo nyt EU:n ja Suomen valtion tulevat jätteenhyötykäyttötavoitteet. Jätettä polttamalla pystytään vähentämään Venäjältä tuotavan maakaasun määrää. Hyötyvoimalaitos otettiin kaupalliseen käyttöön huhtikuussa 2009 ja se on tyypiltään CHP-laitos. Kuvassa 1 on Hyötyvoimalaitoksen mallinnettu prosessi. (1.)



Kuva 1. Hyötyvoimalaitos (2)

Hyötyvoimalaitos on polttoaineteholtaan noin 34 MW. Suurin osa laitoksessa tuotetusta energiasta käytetään teollisuudessa, mutta osa hyödynnetään kotitalouksissa kaukolämpönä Kotkan alueella. Energiantuotannosta teollisuus käyttää noin 50 %, kaukolämpönä käytetään noin 30 % ja sähkönä noin 20 %. Hyötyvoimalaitoksen laskettu käyttöikä on yli 20 vuotta. Laitos on suunniteltu käymään aina 100 % teholla ja se käy vuodessa 11 kuukautta. Vuosittainen polttoaineenkäyttö on noin 100 000 tonnia, jolla saadaan aikaiseksi energiaa noin 260 000 MWh. Laitoksessa käytettäväksi

tekniikaksi on valittu yksinkertaista ja toimintavarmaa. Poltossa syntyvät savukaasut puhdistetaan nykyaikaisilla menetelmillä ja ne lasketaan puhdistettuina taivaalle. Palamisessa syntyvä kuona pyritään hyödyntämään esimerkiksi kaatopaikkojen katemateriaalina. Varakattiloina laitoksella on kaksi 10,2 MW:n maakaasukattilaa, joiden arvioitu vuosittainen polttoaineenkulutus on 100 000 Nm³. Alla olevasta kuvasta näkee Hyötyvoimalaitoksen periaatteellisen kierron. (1; 3.)



Kuva 2. Hyötyvoimalaitoksen periaatekuva (2)

2.3 Muut voimalaitokset

Kotkan Energia Oy tuottaa uusiutuvaa energiaa tuulivoiman avulla. Tuulivoimassa ei synny päästöjä, joten sähkön tuotanto on ympäristöystävällistä. Kotkan Energialla on kolme tuulivoimalaa Mussalon tuulipuistossa. Sinne rakennettiin vuonna 2013 kaksi uutta 2,35 MW ENERCONin valmistamaa tuulivoimalaa ja kolmantena toimii vuonna 1999 rakennettu 1 MW:n tuulivoimala (Ilmari). ENERCONin valmistamat tuulivoimaloiden napakorkeus on 98 m ja roottorin halkaisija 92 m. Yhteensä tuulivoimaloiden vuosituotanto on arvioitu olevan noin 17 000 MWh. (1.)

Tuulivoimaloiden viereen merialueelle on vielä suunnitteilla uudentyyppiselle meriperustalle rakennettava voimala, joka on vastaavan kokoinen kuin kaksi maalla olevaa ENERCONin tuulivoimalaa. Uutta meriperustaa kehitellään yhteistyössä STX-telakkayhtiön kanssa. (1.)

3 HÖYTYVOIMALAITOKSEN YMPÄRISTÖVAATIMUSET

Hyötyvoimalaitoksella on Kaakkois-Suomen ympäristökeskuksen myöntämä ympäristösuojelulain 35 §:n mukainen ympäristölupa Nro A 1146, ja laitokseen sovelletaan jätteenpoltoasetusta (362/2003). Ympäristölupa määrittelee laitoksen toiminnan ja tarkkailun sekä raportoinnin viranomaisille polttoaineista, päästöistä ja syntyvistä jätteistä. Laitos joutuu toimimaan ympäristöluvan määrittelemien rajojen puitteissa. Taulukoista 1 ja 2 selviävät Hyötyvoimalaitoksen päästörajat. (3.)

Taulukko 1. Päästöjen vuorokauden ja puolen tunnin keskiarvojen raja-arvot, mg/Nm³ (3)

	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 (3)

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

3.1 Polttoaineen laatuvaatimukset

Voimalaitokselle myönnetty ympäristölupa määrittelee myös sallitut käytettävät polttoaineet. Jokaisen vastaanotetun jätepolttoaine-erän tiedot kirjataan ja erät punnitaan. Vastaanotetun jätteen laatua tarkkaillaan silmämääräisesti valvomosta käsin ja lisäksi kuormista otetaan pistokokeita tarkempaa analyysiä varten. (3.)

Kiellettyjen aineiden listalla, joita jätekuormat eivät saa sisältää, ovat kaasumaiset ja nestemäiset jätteet, räjähdys- tai palovaaralliset materiaalit, radioaktiivinen materiaali, ongelmajätteet, isot palamattomat kappaleet, suurikokoiset tekstiilit, sähkö- ja elektronikka-romu sekä suuret määrät jauhemaisista aineista. Kyseiset kielletyt aineet pyritään poistamaan poltettavasta jätteestä erilleen ja niistä ilmoitetaan jätteenhoitajalle. (3.)

3.2 Arinakattilan palamisen hallinta

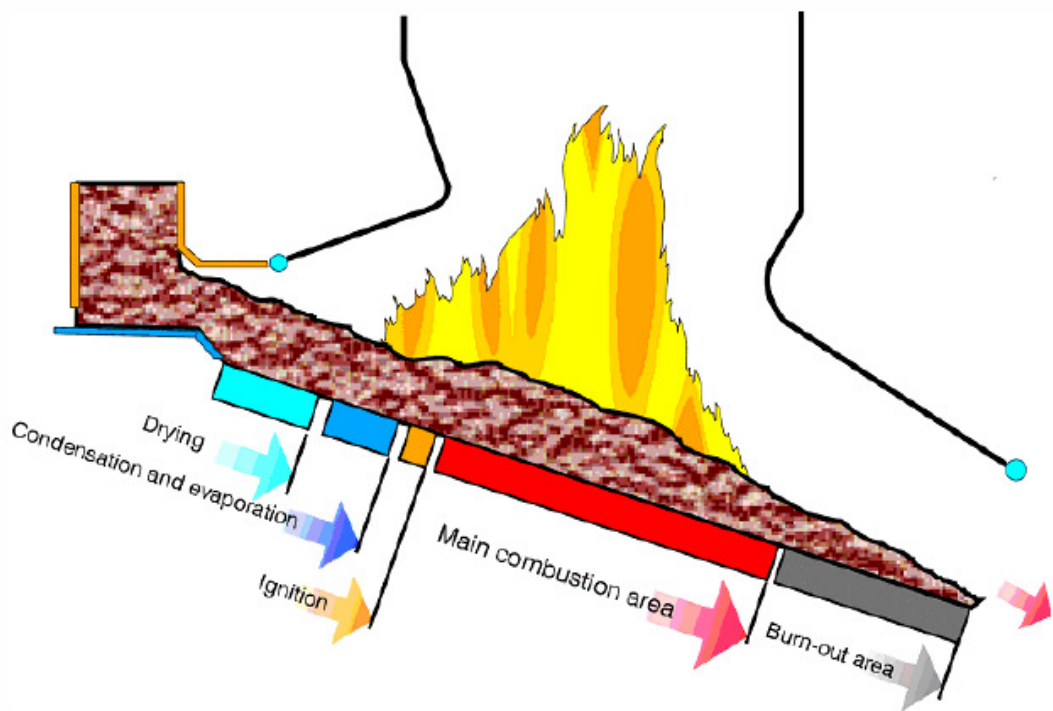
Jätteen palamista kattilassa tarkkaillaan jatkuvasti mittaamalla tulipesän lämpötilaa sekä savukaasujen lämpötilaa, painetta, happipitoisuutta ja vesihöyrysisältöä. Palamisen hallintaan kuuluu myös päästöjen seuranta. Mitattujen päästöjen tulee olla alle ympäristöluvassa annettujen raja-arvojen. Epätäydellisessä palamisessa syntyy päästöjä enemmän, joten arinakattila tarvitsee tarpeeksi suuren ilmakertoimen hyvän palamisen laadun varmistamiseksi. Ilmakerroin tulee olla ainakin 1,3 - 1,4. (3; 4.)

Syntyvien savukaasujen lämpötilaa ja viipymäaikaa tulipesässä tarkkaillaan lämpötila- ja virtausmittausten perusteella. Mittauksilla varmistetaan, että jätettä poltettaessa savukaasujen lämpötila toteuttaa kaikissa olosuhteissa jätteenpolttodirektiivissä annetun vaatimuksen eli savukaasujen lämpötilan tulee olla vähintään 850 °C kahden sekunnin ajan. Lisäpolttimet käynnistyvät automaattisesti, jos 850 °C / 2 s ehto ei täyty palamisen varmistamiseksi. Lisäpolttimia tulee käyttää myös laitosta käynnistettäessä tai pysäytettäessä tarpeeksi korkean lämpötilan ylläpitämiseksi. (3.)

3.3 Laitoksen polttoprosessi

Hyötyvoimalaitoksella on Keppel Seghersin valmistama arinakattila, ja kattila toimii luonnonkierto periaatteella eli syöttövesi kulkeutuu painovoiman vaikutuksesta höyrytymiin ja höyrylieriöstä tulistimiin. Savukaasujen puhdistuslaitteisto on Alstomin valmistama NID-puhdistuslaitteisto. (2.)

Hyötyvoimalaitoksen polttoaineena käytettävä jäte tuodaan jäteautoilla punnituksen kautta vastaanottomonttuun talteen. Vastaanottomontusta jäte nostetaan varastobunkkeriin ja sieltä se nostetaan sekoitettuna syöttötorveen kahmarinosturilla. Syöttötorvesta se valuu painovoimanvaikutuksesta alaspäin syöttöpöydälle. Syöttöpöydällä on kaksi hydraulitoimista sylinteriä, jotka työntävät jätettä tasaista vauhtia arinalle. Arina itsessään muodostuu viidestä elementistä, ja jokaisella elementillä on oma primääriilmapuhallin, joka puhaltaa palamisilman sekä jäähdyttää samalla elementtejä. Ensimmäisellä elementillä jäte kuivuu. Kuivuminen jatkuu vielä toisellakin elementillä, jonka lopussa jäte syttyy palamaan. Pääpalaminen tapahtuu toisella ja kolmannella elementillä. Neljännellä ja viidennellä elementillä jäte palaa loppuun ja viides elementti kuljettaa sekä jäähdyttää jäljelle jäänyttä kuonaa. Viidenneltä elementiltä kuona tippuu vesitäytteiselle kuonakuljettimelle josta jäte siirtyy kuonahalliin. (2.)



Kuva 3. Arinapolton periaatekuva (7)

Mahdollisimman täydellisen palamisen saamiseksi kattilassa on kolme metriä arinan yläpuolella kaksi sekundääris-ilmansyöttöpuhallinta. Polttoprosessia säädetään primääri-, sekundäärispuhaltimilla sekä jätteensyötön nopeuden avulla. Näillä säädöillä

saadaan haluttu polttoteho aikaiseksi. Kattilan ylösajoa sekä mahdollisia ongelmatilanteita varten kattilassa on kaksi maakaasupoltinta. Lämpötila kattilassa heti arinan yläpuolella on yli 1000 °C, tosin tämä lämpötila voi vaihdella hieman polttoaineen laadun ja kosteuden vaikutuksesta. (2.)

Kattila tuottaa höyryä arvoilla 400 °C ja 40 bar. Höyry johdetaan kolmen tulistimen kautta turbiinille, josta väliotosta otetaan matalapainehöyryä asiakkaille, laitoksen omaan käyttöön ja sillä tuotetaan kaukolämpöä kaukolämpöverkkoon. Turbiini pyörittää generaattoria, joka muuttaa mekaanisen pyörimisliikkeen sähkötehoksi. Noin puolet laitoksen tuottamasta energiasta eli n. 15 MW käytetään tehdashöyrynä Sonocolla ja loput kaukolämpönä ja sähkötehona. (2.)

Poltossa syntyneet savukaasut kulkeutuvat kattilassa eteenpäin kohti savupiippua ja matkalla tapahtuu lämmönsiirto savukaasuista kattilan seinien sisällä kulkevissa putkissa virtaavaan veteen sekä tulistimiin, höyrystimiin ja esilämmittäjiin. Savukaasu kulkee tämän jälkeen NID-laitteistoon, jossa tapahtuu savukaasujen puhdistus. Puhdistusprosessissa savukaasujen sekaan lisätään sammutettua kalkkia eli kalsiumhydroksidia $\text{Ca}(\text{OH})_2$, joka neutraloi happamia yhdisteitä kuten SO_2 ja HCl sekä aktiivihiihlä johon haitalliset aineet sitoutuvat. Savukaasu kulkee tämän jälkeen letkusuodattimien läpi joissa siitä erotetaan pöly ja muut kiinteät aineet. NID-laitteistolla savukaasut puhdistuvat 99,9-prosenttisesti. (2.)

4 SNCR-LAITTEISTO

4.1 NO_x-päästöjen muodostuminen

NO_x-päästöt eli typen oksidipäästöt koostuvat typpimonoksidista NO ja typpidioksidista NO₂. Niitä syntyy palamisen yhteydessä typen ja hapen reagoiessa keskenään. Kattilan tulipesässä syntyy pääasiassa typpimonoksidia, joka lämpötilan laskiessa voi hapettua typpidioksidiksi. Typpeä tulee kattilaan palamisilman mukana sekä polttoaineen sisältämänä. (4.)

NO_x-päästöjä muodostuu pääasiassa kolmella eri tavalla. NO_x-päästöjen muodostumismekanismit on lueteltuina Huhtinen M., Kettunen A., Nurminen P. & Pakkanen H. Höyrykattilatekniikka kirjassa seuraavalla tavalla:

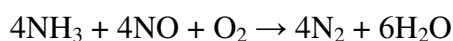
- "1. Palamisilman typpi reagoi palamisilman hapen kanssa korkeassa lämpötilassa (terminen typpioksidin muodostuminen).
2. Palamisilman typpi reagoi palamisilman hapen kanssa hiilivetyradikaaleja runsaasti sisältävässä liekinosassa (nopea (prompt) typpioksidien muodostuminen).
3. Polttoaineen typpi reagoi palamisilman hapen kanssa (polttoaineperäinen typpioksidin muodostuminen)." (4.)

Terminen NO_x ja nopea NO_x vaativat syntyäkseen hyvin korkean lämpötilan kattilan tulipesässä. Hyötyvoimalaitoksen arinan lämpötila ei ole tarpeeksi korkea, jotta näillä kahdella tavalla syntyisi suuria määriä NO_x -päästöjä, joten Hyötyvoimalaitoksella muodostuvat NO_x -päästöt koostuvat pääasiassa polttoaineen sisältämän typen reagoissa hapen kanssa. (4.)

4.2 SNCR-laitteiston yleinen toimintaperiaate

SNCR-prosessi (Selective Non Catalytic Reduction eli selektiivinen ei-katalyyttinen pelkistys) tapahtuu palamisen jälkeen, ja sen tarkoitus on vähentää palamisessa syntyvien typenoksidien määrää savukaasuissa. Vaihtoehtoisesti pelkistämisprosessiin voidaan käyttää ammoniakivettä tai urealiuosta jota ruiskutetaan savukaasujen sekaan heti tulipesän yläpuolella. Pelkistämiskehityksen periaate selviää alla olevien kemiallisten reaktioyhtälöiden mukaan. (6.)

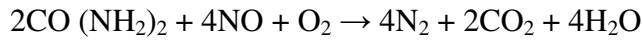
Ammoniakki:



jossa	NH_3	ammoniakki
	NO	typpimonoksidi
	O_2	happimolekyylä
	N_2	typpimolekyylä

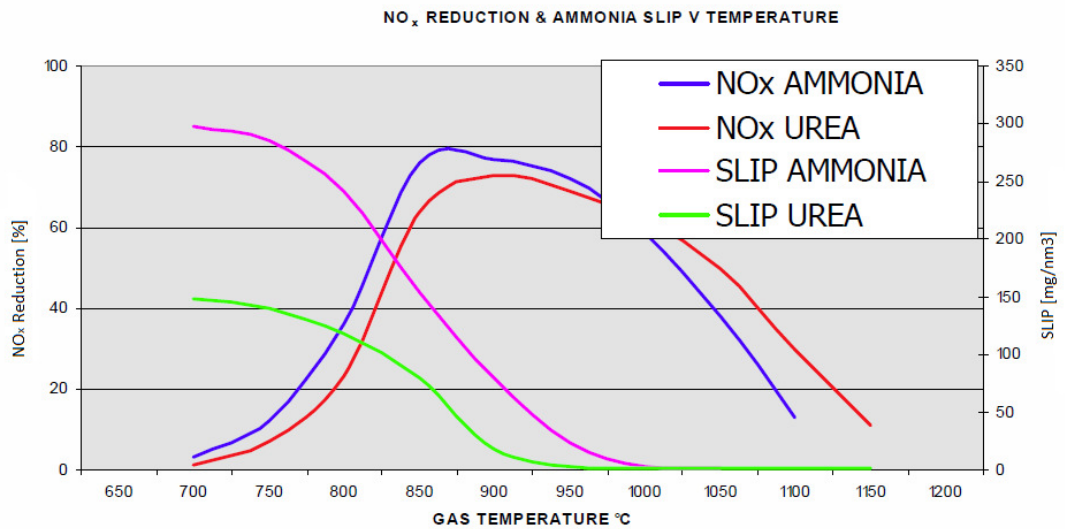
H₂O vesi

Urea:



jossa	2CO (NH ₂) ₂	urea
	NO	typpimonoksidi
	O ₂	happimolekyyli
	N ₂	typpimolekyyli
	CO ₂	hiilidioksidi
	H ₂ O	vesi

Ammoniakilla tapahtuva pelkistämismuutos on erittäin lämpötilariippuvainen. Ammoniakkiveden syöttö tulee tapahtua 850 °C...1050 °C:een lämpötilassa. Jos lämpötila on liian matala, NH₃-slipin eli ammoniakkin raakapäästöjen määrä nousee päästöissä epätäydellisen reaktion vaikutuksesta. NH₃-slip aiheuttaa korroosiota kattilan savukaasukanaviin ja esim. tulistimiin, joten sen tulisi olla mahdollisimman pieni lopputilanteessa. Jos ammoniakkiveden ruiskutus tapahtuu liian korkeaan lämpötilaan, niin ammoniakki palaa pois ennen kuin se ehtii reagoida NO_x:n kanssa. Kuvasta 4 näkee NO_x-päästöjen määrän sekä ammoniakkin ja urean lämpötilariippuvuudet. Vaadittavasta lämpötila-alueesta johtuen kattilaan tarvitaan useampi taso syöttösuuttimia. Riippuen kattilan likaisuudesta ja kuormasta ammoniakkin syöttö tapahtuu eri tasolla. Jos kattila on puhdas tai pienellä kuormalla, käytetään alempana olevia syöttösuuttimia, ja jos kattilan tulipesä on hyvin likainen niin joudutaan käyttämään ylempien tasojen syöttösuuttimia. (6.)



Kuva 4. NO_x- ja NH₃ slip-päästöt (6)

Ammoniakkiveden syötössä kattilaan tulee myös huomioida reaktiivilavuus. Syöttö tulee tapahtua mahdollisimman laaja-alaisesti koko kattilan läpimitalta. Kattiloissa joissa on suuri läpimitta tai korkea savukaasujen nopeus, ammoniakkin syöttö on huomattavasti hankalampaa ja vaatii tarkempaa suunnittelua. Mitä paremmin ammoniakki sekoittuu savukaasuihin, sitä parempi reaktio on. (6.)

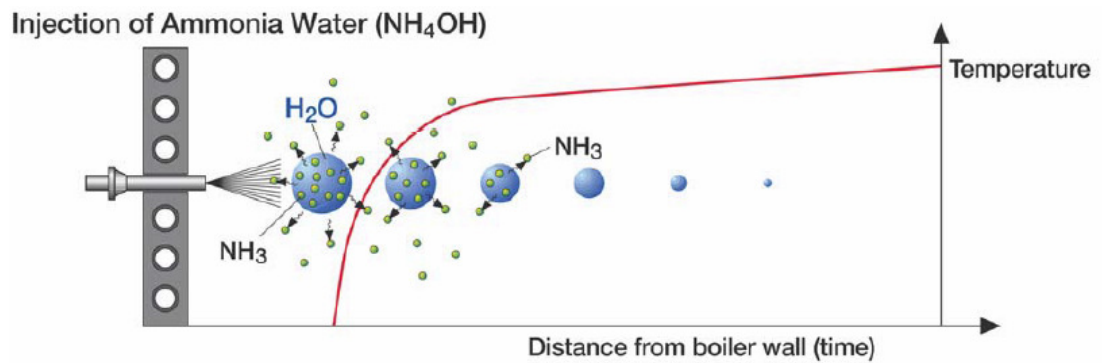
4.3 Hyötyvoimalaitoksen SNCR-laitteisto

Hyötyvoimalaitoksen käyttämä laitteisto muodostuu seuraavista osista (9):

- Ammoniakin varastosäiliö ulkona (25 m³)
- Pumppumoduuli säiliön täyttää varten
- Pumppumoduuli ammoniakkin syöttöä varten
- Pumppumoduuli laimennusvettä varten
- Prosessiyksikkö ammoniakkin sekä laimennusveden annostelua, sekoitusta ja syöttöä varten
- Syöttösuuttimet kattilan sisään.

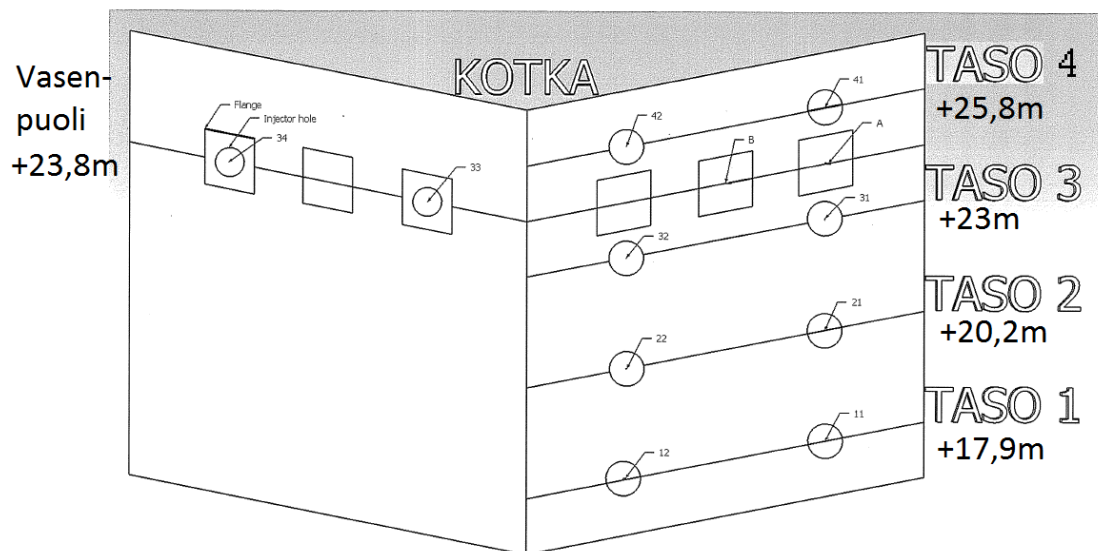
Laitoksella varastoitava ammoniakkiliuos on 24,5 % vahvuista. Suurempaa väkevyyttä ei ole järkeä käyttää, koska ammoniakkiliuosta joudutaan laimentamaan kattilaan syötettäessä sekä yli 25 % ammoniakki vaatisi paineistetun säiliön turvallisuussyistä. Varastosäiliö normaalissa ilmanpaineessa, tosin säiliössä ei ole suoraa yhteyttä ulkoilmaan, koska ammoniakki on luokiteltu vaaralliseksi aineeksi. Säiliö on varustettu painemittauksella sekä yli- ja alipaine turvaventtiileillä. Painemittaus hälyttää valvomossa sekä ali- ja ylipaineesta ennen kuin turvaventtiili aukeaa. (6.)

Prosessiyksikkö on koko järjestelmän tärkein osa. 24 % ammoniakkiliuos pumpataan varastosäiliöstä prosessiyksikköön ja sinne pumpataan myös demineralisoitua laimennusvettä. Prosessiyksikössä tapahtuu ammoniakkiliuoksen ja laimennusveden sekoittaminen sopivaan suhteeseen, joka riippuu kulloinkin sen hetkisestä NO_x -päästöistä. Prosessiyksiköstä lähtee ammoniakkiliuoslinjat suuttimille, joita on 6 kpl yhteensä. Jokaiselle linjalle on oma sulkuventtiilinsä sekä suutinmoduuli. Jokaisessa suutinmoduulissa on säätöventtiili sekä virtausmittaus, ja se myös valvoo myös paineilmansyöttöä suuttimelle. Syöttölinjassa on myös painemittaus, joka lähettää tiedon valvomonäytölle. Jokaisen suuttimen läpi on tarkoitus kulkea yhtä paljon ammoniakkiliuosta, joka on prosessiyksikön jälkeen n. 5 % vahvuista väkevyydeltään. Laimennusveden tehtävä on kasvattaa ammoniakin kulkemaa matkaa savukaasujen sekaan sekä muodostaa tarvittava viipymäaika ammoniakin reagoimiseen NO_x -päästöjen kanssa. Kuvasta 5 selviää laimennusveden rooli ruiskutuksessa. Suuttimet tarvitsevat myös paineilmaa kahdesta syystä. Paineilmalla tapahtuu liuoksen "hajotus" suuttimen kärjessä, jotta se sekoittuisi paremmin savukaasuvirtaukseen. Toinen syy on, että suuttimet tarvitsevat jäähdytystä kattilan sisällä. Vaikka joitain suuttimia ei käytettäisi eli niistä ei tule ammoniakkiliuosta kattilaan, niin jäähdytysilman on oltava päällä koko ajan. Jäähdytysilman paine on noin 1 bar. (6.)



Kuva 5. Laimennusveden vaikutus ammoniakkiliuoksen syötössä kattilaan (11)

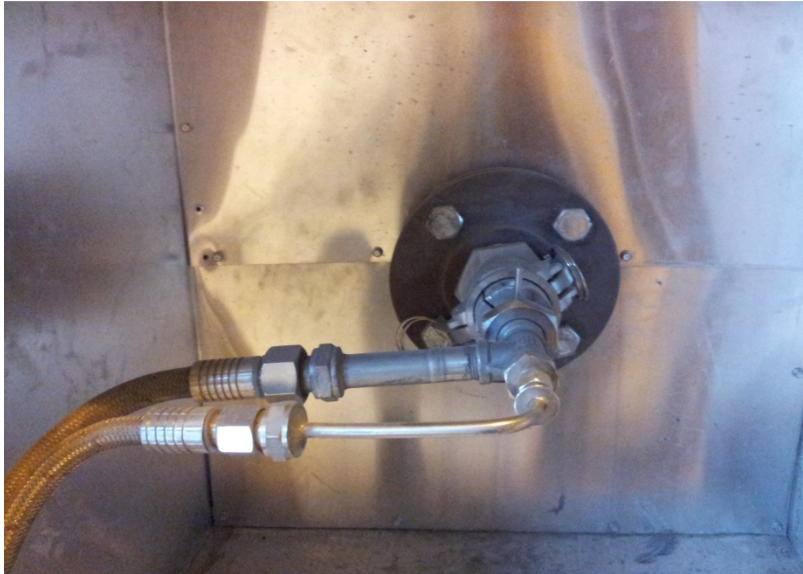
Suuttimet ovat pikalukituksella kiinni kattilan seinässä, jotta ne on helppo ja nopea irrottaa, jos suuttimet täytyy vaihtaa uusiin tai ne täytyy siirtää fyysisesti toiselle tasolle. Suuttimille on 4 tasoa kattilan oikealla seinällä, joista tasot 3 ja 4 ovat käytössä suurimman osan ajasta. Ainoastaan kattilan ollessa puhdas huoltoseisokin jälkeen saatetaan käyttää tasoa 1 ja 2. Jopa puhtaalla kattilalla taso 1 on liian kuuma yleensä, joten taso 2 ja 3 ovat silloin käytössä. Kattilan vasemmalla puolella syöttösuuttimet ovat myös pikalukituksella kiinni, mutta niitä ei siirretä mihinkään. Vasemman puolen taso on tasojen 3 ja 4 välissä. Alla olevasta kuvasta 6 selviää tasot ja niiden korkeus. (6; 10.)



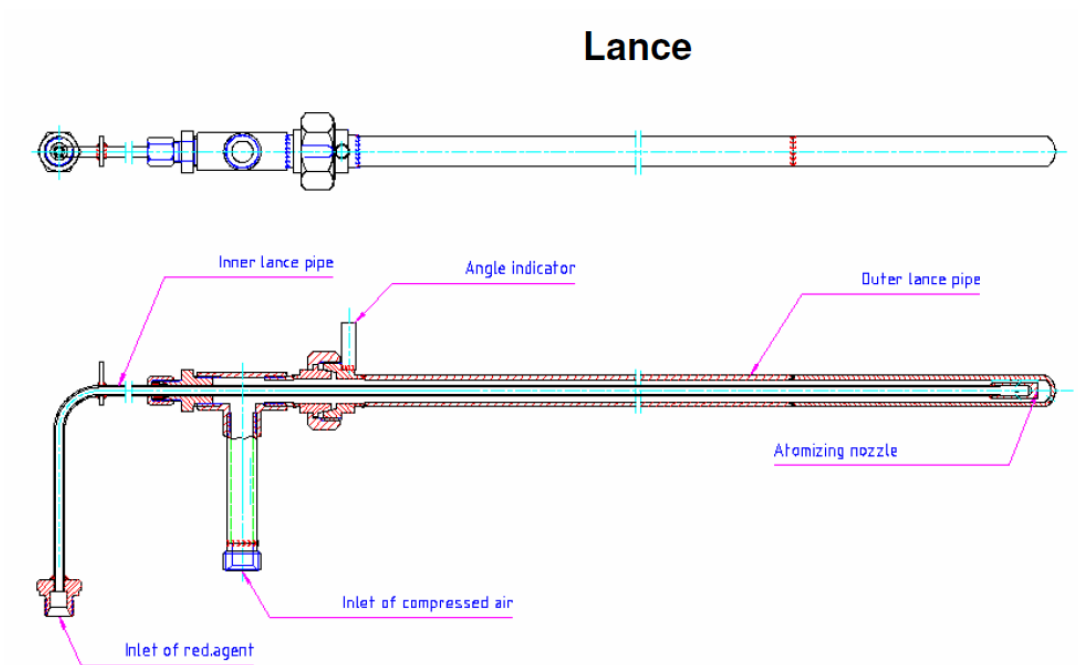
Kuva 6. Syöttösuutintasojen korkeudet (10)

Syöttösuutin koostuu kahdesta päällekkäisestä putkesta, joista sisemmässä kulkee ammoniakkiliuos ja ulommassa jäähdytys- tai hajotusilma. Suuttimissa on kaksi liitän-

tää perässä, toinen ammoniakkiliuokselle ja toinen paineilmalle. Suuttimissa on myös päällä kulman osoitin, josta näkee minne suuntaan ammoniakin syöttö tapahtuu. Syötöreikä on 30°:een kulmassa. Suutinta voidaan kääntää 360° ympäri ja ruiskutuksen pisarakokoa voidaan muuttaa liikuttamalla sisäputkea sisään ja ulos. (8; 9.)



Kuva 7. Ammoniakin syöttösuutin liitettynä kattilaan



Kuva 8. Ammoniakin syöttösuutin (8)

5 SNCR- LAITTEISTON MITTAUKSET

Työ aloitettiin suunnitteleamalla tehtävät mittaukset, joiden tarkoituksena oli selvittää nykyisen laitteiston tehokkuutta ja mahdollisuuksia parantaa sen suorituskykyä. Työn päätarkoitus oli selvittää, onko nykyisellä laitteistolla mahdollista saada parempi suorituskyky NO_x-päästöjen vähentämisessä ilman, että NH₃-slip nousee kohtuuttoman suureksi. Nykyisellään laitteistolla pyritään pitämään NO_x-päästöt alle 200 mg/Nm³ päästörajoituksista johtuen. Tavoitteena oli päästä pysyvästi alle 150 mg/Nm³ päästöihin.

Mittaukset aloitettiin tekemällä alustavan Excel-taulukon mitattavista suureista. Mittauksien edetessä taulukkoon lisättiin tietoja ja uusia mittauksia varmempien tuloksien saavuttamiseksi. Mittaukset aloitettiin ensin nykyisillä asetuksilla ja arvoilla laitteiston osalta. Tutkimuksen edetessä kokeiltiin erilaisia ammoniakkin sekä laimennusveden virtausmääriä ja suhdetta toisiinsa. Työssä testattiin myös syöttää ammoniakkiliuosta eri suutintasoilta sopivan lämpötila-alueen löytämiseksi reaktiolle.

5.1 Alkutilanne

Työssä liikkeelle lähdettiin tutkimalla kuinka suuret hyötyvoimalaitoksen päästöt ovat olleet normaaliajossa. Tarkasteluväliksi valittiin marraskuusta joulukuun puoleenväliin 2013. Tämä osoittautui hyväksi valinnaksi, koska trendikäyrästä marraskuun ajalta näkee laitoksen päästöt likaisella kattilalla. Hyötyvoimalaitoksella oli huoltoseisokki 27.11.2013 - 1.12.2013, joka näkyy kuvassa 9 päästöjen putoamisella nolnaan. Joulukuun trendistä näkee kuinka laitos palaa normaalitilaansa eli samaan kuin marraskuun trendissä suhteellisen nopeasti. NO_x-päästöt ovat otettu trendikäyrään minuutin välein. Päästömittaukset tekee savupiipussa oleva mittalaite. Mittauksen tiheyden vuoksi näkyy paljon muutoksia trendikäyrässä, mutta laitoksen päästöt eivät ole ylittäneet kuitenkaan puolen tunnin sallittua raja-arvoa eli 200 mg/Nm³. Arvot ilmoitetaan viranomaisille redusoituina 11 % happipitoisuuteen ja vähennettynä luottamusväliä 95% kuvaava osuus (20 %) eli kertomalla redusoitu arvo 0,8:lla.

Laitoksella on jatkuvatoiminen FTIR-päästömittauslaitteisto. Savupiipusta imetään näyte laitteistolle, joka mittaa päästöt ppm-muodossa (particles per million) ja saatu tulos on kostea arvo. Sen jälkeen automaatiojärjestelmä muuttaa kostean ppm-arvon muotoon mg/Nm³ (kuiva). Muutos tapahtuu vähentämällä veden osuus pois kaavalla 1

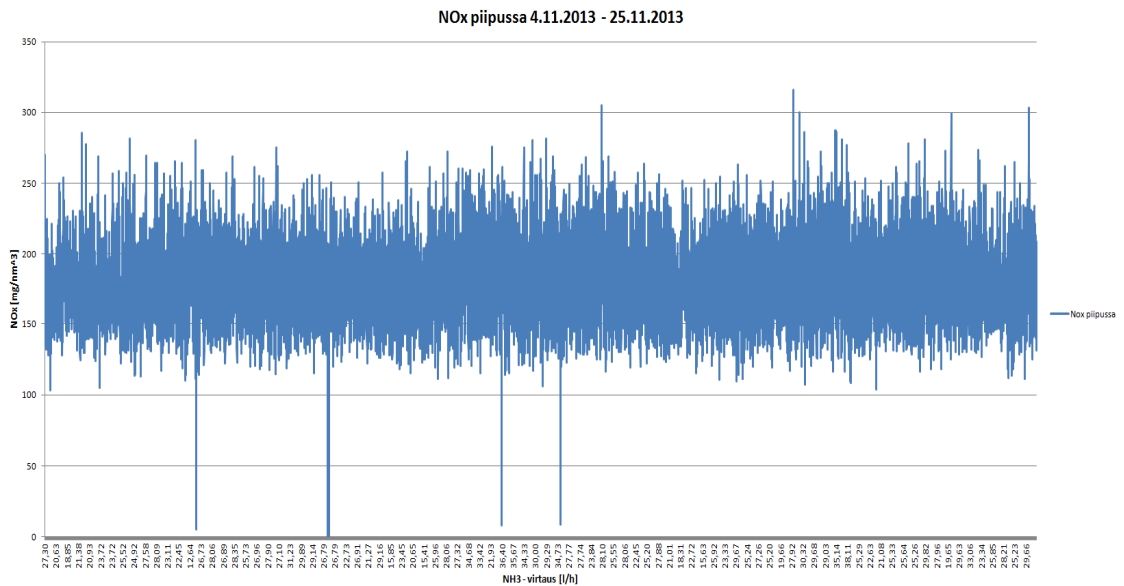
ja kertomalla mitattu ppm-arvo tietyllä kertoimella, joka saadaan jakamalla mitatun päästön moolimassa ideaalikaasun tilavuudella eli 22,4 l/mol. Kun muutos on tehty, niin se redusoidaan 11 % happipitoisuuteen kaavalla 2. (13.)

$$Kuiva\ pitoisuus = c_{kosteaa} \cdot \frac{1}{1 - \frac{c_{H_2O}}{100}} \quad (1)$$

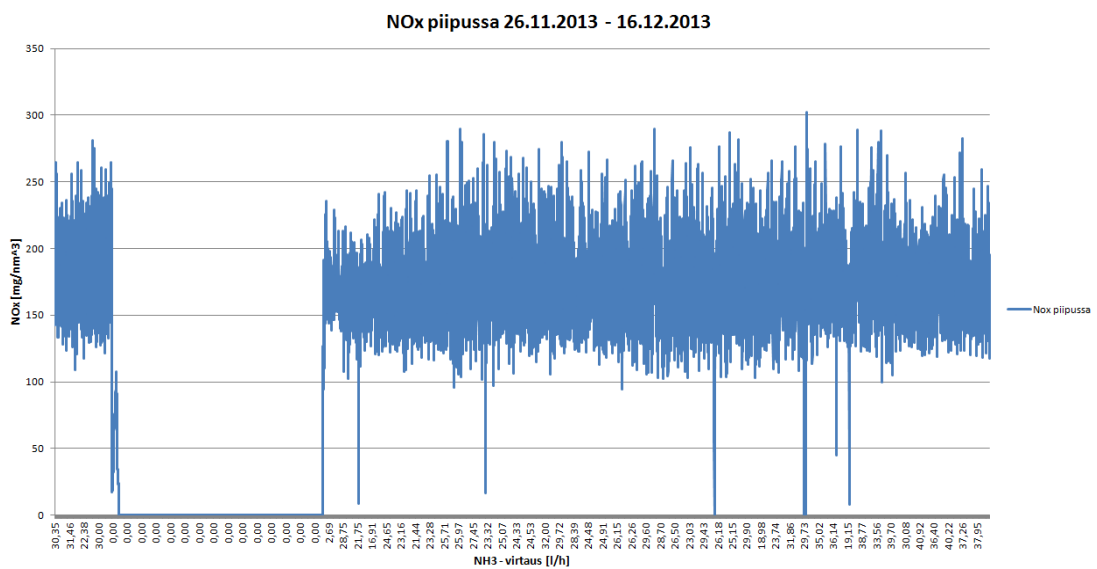
jossa $c_{kosteaa}$ mitattu kostea pitoisuus [ppm]
 c_{H_2O} vesihöyryn osuus [%]

$$Redusoitu\ arvo = c_{kuiva} \cdot \frac{20,94 - 11}{20,94 - O_{2,mitattu}} \quad (2)$$

jossa c_{kuiva} päästön mitattu pitoisuus [mg/Nm³]
 O_2 mitattu happipitoisuus [%]



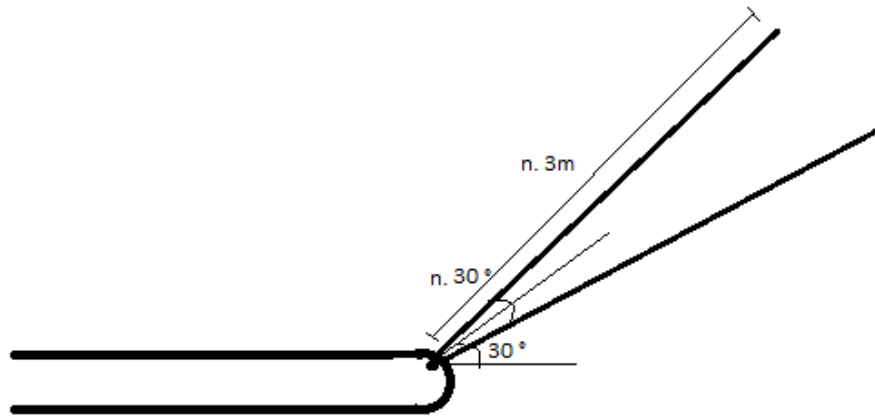
Kuva 9. NO_x-raakapäästöt marraskuussa 2013



Kuva 10. NO_x-raakapäästöt joulukuussa 2013

Aluksi selvitettiin myös minkälainen kuvio ja ruiskutus syöttösuuttimista tuli kattilan sisään. Tämä tapahtui laittamalla ammoniakkilinjan huuhtelu päälle valvomosta, jotta syöttösuuttimista ei tullut ammoniakkiliuosta vaan pelkästään laimennusvettä. Syöttösuuttimen irrottaminen kattilan seinästä on hyvin helppoa ja nopeaa pikaliitännän ansiosta. Suuttimen kärjestä pystyi havaitsemaan pientä syöpymää, normaalisti suutinreiän koko pitäisi olla 3 mm halkaisijaltaan, mutta testattavan suuttimen reikä oli n. 3,5 mm (ks. kuva 12). Tällä ei tosin ole juuri mitään vaikutusta suuttimen ruiskutuste-

hoon. Testattava suutin oli toinen vasemman puoleisista suuttimista. Testauksen aikana laitoksen NO_x-raakapäästöt olivat keskiarvoltaan 409,6 mg/Nm³.



Kuva 11. Suuttimen ruiskutuskuvio

Suuttimen testauksen yhteydessä tehtiin arvio syöttöruiskutuksen kantamasta ja lähtökulmasta, jotta voitaisiin laskea sen täyttämä tilavuus. Lasku antaa tilavuuden normaali-ilmanpaineessa, joten se ei ole sama kuin kattilan sisällä. Kattilan sisällä savukaasun virtaus aiheuttaa suuria muutoksia ruiskutuskuviioon, ja täten laskettu tilavuus on vain suuntaa antava. Kattilassa savukaasuvirtaus on n. 15,5 - 21 Nm³/s riippuen kattilan polttotehosta. Voidaan olettaa, että suuri savukaasuvirtaus vie ammoniakkivesiliuoksen mukanaan hyvin helposti melkein heti ruiskutuksen jälkeen, koska normaali-ilmanpaineessa oleva ruiskutusteho näytti todella heikolta.

Yhden suuttimen ruiskutuskuviion tilavuus:

$$V = \frac{1}{3} \pi r^2 h \quad (3)$$

jossa V tilavuus [m³]

r kartion pohjan säde [m]

h kartion korkeus [m]

$$V = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot (0,803 \text{ m})^2 \cdot 3 \text{ m} = 2,026 \text{ m}^3$$

Neljän suuttimen tilavuus:

$$V_{kok} = 4 \cdot 2,026 \text{ m}^3 = 8,104 \text{ m}^3$$



Kuva 12. Suuttimen kärki

Ammoniakin syöttöä ajatellen tulee verrata suuttimen käyttämää teoreettista tilavuutta kattilan sisätilavuuteen. Korkeus on otettu kattilan sekundääris-ilmansyötöltä ylöspäin, koska lämpötilan ja ammoniakin syötön vuoksi ei tarvitse huomioida kattilan korkeutta aivan arinaan asti.

Kattilan sisätilavuus:

$$V = h l s \tag{4}$$

jossa V kattilan tilavuus [m³]

h	kattilan korkeus	[m]
l	kattilan leveys	[m]
s	kattilan syvyys	[m]

$$V_{kattila} = 13,42 \text{ m} \cdot 4,24 \text{ m} \cdot 4,96 \text{ m} = 282,23 \text{ m}^3$$

Vaikka kaikkia kuutta suutinta käytettäisiin yhtä aikaa, kattilaan jää paljon hyödyntämätöntä reaktiutilavuutta, eli tällä perusteella voitaisiin miettiä myös uusien suuttimien asentamista kattilan etuseinään hyödyntämään käyttämätöntä reaktiutilavuutta. Ruiskutettu liuos sekoittuu savukaasuihin kattilan sisällä ja täten parantaa reaktiota kunhan ammoniakkin viipymäaika on tarpeeksi pitkä sopivalla lämpötila-alueella. Reaktiolle tarpeellinen viipymäaika on 0,3 s - 1 s. (12.)

5.2 Mittaukset

Mittauksia tehtiin useampana eri päivänä mittausten hitauden vuoksi. Aina prosessiin tehdyn muutoksen jälkeen piti odottaa n. 20 - 30 min, että prosessi ja arvot tasaantuivat edustaviksi arvoiksi. Ongelma on lähinnä ammoniakki-slipin kanssa, koska se on erittäin hidas vastaamaan tehtyyn muutokseen. Raaka ammoniakki sitoutuu savukaasukanavassa tuhkaan ja seinämiin, jolloin todelliset raaka ammoniakkipäästöt näkyvät savupiipun päästömittauspisteellä viiveellä. Mittauksia varten muutoksia tehtiin syötettävän ammoniakkin määrään sekä laimennusveden määrään.

Ensimmäisenä mitattiin ja selvitettiin syöttötason vaikutusta päästöihin. Epätarkkuutta testaukseen luultavasti aiheutti syöttösuuttimien ruiskutustehon testaus ennen testien ajamista, joten laitos oli vielä palautumassa normaaliin tilaansa raaka päästöjen jälkeen. Jos tämä huomioidaan testauksessa tasaavana tekijänä, niin syöttötason muutoksella ei juurikaan ole vaikutusta laitoksen päästöihin. Tärkein asia, joka selviää taulukosta on, että ammoniakkin syöttöjärjestelmä ei huomioi sitä, kuinka monta suutinta on käytössä kerrallaan. Ammoniakin virtaus pysyy yhtä suurena koko ajan, mutta laimennusveden määrä muuttuu.

Taulukko 3. Syöttötasojen testaus

	Höyryvirtaus	Tulipesän lt	Nox raaka	NH3 raaka	NH3 virtaus	Laimennusvesi
Suuttimet	[kg/s]	[°C]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[l/h]	[l/h]
Vasen ja Taso 3	11,554	858,054	212,979	1,061	37,266	441,784
Vasen ja Taso 4	10,776	840,007	183,678	1,040	34,797	441,219
Vasen ja tasot 3+4	10,999	832,070	205,105	0,622	39,574	658,074
Taso 4	11,225	849,214	179,681	0,048	40,713	219,152

Seuraavaksi testattiin ammoniakkin syöttömäärän vaikutusta päästöihin. Testausta varten ammoniakkin ja laimennusveden säätimet laitettiin automaatile, jotta pystyttiin käsin syöttämään haluttu asetusarvo eli tässä tapauksessa haluttu virtausmäärä. Laimennusvesi pidettiin testin ajan vakioarvossa 440 l/h käytettäessä tasoa 4 ja käytettäessä tasoja 3 ja 4 yhtä aikaa laimennusveden määrä oli 660 l/h ja vain ammoniakkin virtausmuutettiin. Taulukosta 4 selviää ammoniakkin määrän vaikutus päästöihin laimennusvesivirtauksen pysyessä vakiona. Ammoniakkin syöttömäärällä on selvästi suuri vaikutus NO_x-päästöihin ja NH₃-raakapäästöihin. Kasvattamalla syötettävän ammoniakkin jo pienelläkin määrällä NO_x-päästöt putoavat merkittävästi NH₃-slipin pysyessä vielä siedättävissä lukemissa.

Taulukko 4. Ammoniakkin syöttömäärän muutokset

	NH3 virtaus	Höyryvirtaus	Tulipesän lt	Nox raaka	NH3 raaka
	[l/h]	[kg/s]	[°C]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]
V + taso 4	38,188	11,393	855,915	206,534	0,795
	66,000	11,292	846,116	97,832	2,197
	88,000	11,098	853,555	52,401	2,148
	110,000	11,070	847,192	42,047	13,742
V + taso 3 ja 4	39,574	10,999	832,070	205,105	0,622
	50,496	10,854	850,203	152,701	1,152
	60,060	11,250	867,515	168,472	2,886
	70,684	10,443	831,030	95,781	1,267
	81,247	10,335	824,397	61,597	4,745

Testi toistettiin vielä käyttämällä pelkästään kattilan vasemman puoleisia suuttimia ja suutin tasoa 4. Ammoniakkin lisäys määrät olivat tiheämmällä välillä, jotta nähtäisiin milloin NH₃-slip lähtee nousuun ja NO_x-päästöt ovat tavoitellulla tasolla. Taulukosta 5 näkee uusintatestin tulokset. Testi aika pidettiin samana kuin edellisessäkin eli n. 20 min jokaisella muutoksella ja laimennusveden määrä asetettiin 438 l/h.

Taulukko 5. Toinen testi ammoniakkin syöttömäärän muutoksilla

NH3 virtaus	Höyryvirtaus	Tulipesän It	Nox raaka	NH3 raaka
[l/h]	[kg/s]	[°C]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]
29,969	12,016	857,753	193,349	1,158
35,522	11,473	846,242	117,337	3,325
39,573	11,549	834,242	149,062	2,493
45,719	11,221	817,045	99,644	1,815
49,448	12,857	880,737	180,582	3,247
54,957	12,589	876,946	171,348	3,557
61,565	12,165	858,119	153,896	3,395
65,909	11,881	857,546	135,257	2,581
70,035	10,849	811,744	76,898	4,392
75,893	10,730	823,404	68,309	5,308

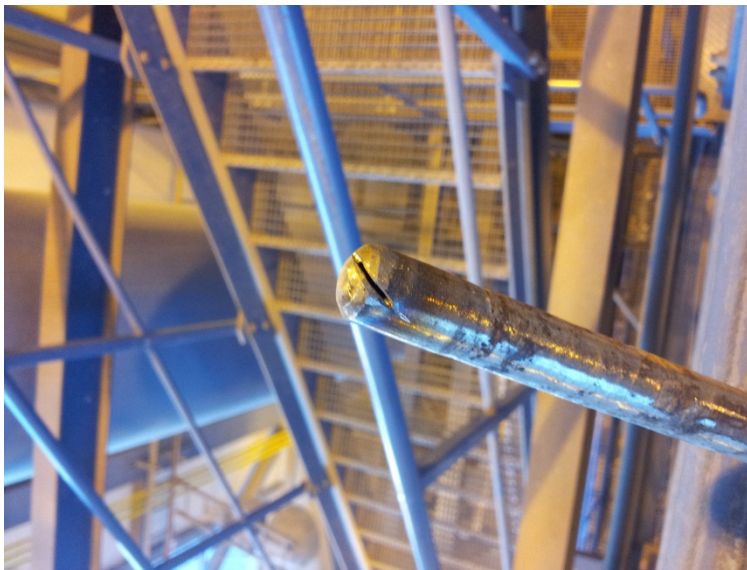
Seuraavaksi päätettiin asettaa ammoniakkin määrä vakioksi ja muuttaa laimennusveden määrää. Vähentämällä tai lisäämällä laimennusveden määrää pystytään muuttamaan ruiskutettavan liuoksen vahvuutta aivan samalla tavalla kuin muuttamalla ammoniakkin määrää. Laimennusveden tarkoitus on saada ammoniakki kulkeutumaan tarpeeksi pitkälle savukaasujen sekaan ja antaa sille sopiva viipymäaika reaktiota varten. Taulukosta 6 näkee, kuinka laimennusvesi vaikuttaa reaktioon. Liian suuri määrä laimennusvettä jähdyttää ammoniakkin ympärillä olevaa savukaasua, jolloin reaktiolämpötila laskee eikä reaktio enää tapahdu niin hyvin. Liian pienellä vesimäärällä taas ammoniakki ei kulkeudu tarpeeksi pitkälle kattilan sisään jolloin reaktiopinta-ala laskee eikä reaktiota tapahdu niin hyvin. Tuloksista voidaan päätellä, että nykyisellään laimennusveden määrä on aika kohdallaan, koska reaktio on silloin parhaimmillaan. Parempiin tuloksiin päästiin muuttamalla syötettävän ammoniakkin määrää kuin laimennusveden määrää muuttamalla.

Taulukko 6. Laimennusveden vaikutus reaktioon

	Laimennusvesi virtaus	Höyryvirtaus	Tulipesän It	Nox raaka	NH3 raaka
	[l/h]	[kg/s]	[°C]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]
V+ taso 4	398,844	9,577	778,201	140,443	6,981
	450,211	9,774	789,609	132,707	4,027
	551,579	11,082	843,925	189,968	4,150
	649,464	10,099	809,263	182,410	3,840
V+ t. 3 ja 4	550,520	11,051	859,899	207,767	1,960
	651,462	11,221	861,595	193,502	1,997
	660,650	10,915	830,332	190,956	1,379
	752,227	11,431	874,399	251,877	1,958

6 UUDET SUUTTIMIT

Hyötyvoimalaitoksella päätettiin testata uuden mallisella kärjellä varustettuja ammoniakkin syöttösuuttimia. Epäiltiin, että vanhoissa suuttimissa oleva yksi reikä ei ehkä tuota parasta mahdollista ruiskutuskuviota ja näin ollen reaktiokaan ei ole paras mahdollinen. Uusissa suuttimissa on vino leikkaus kärjessä, jotta saavutettaisiin enemmän viuhkamainen ruiskutuskuvio ja ammoniakkihiuos sekoittuisi paremmin savukaasujen sekaan. Viuhkamainen kuvio muodostuu suoraan eteenpäin ja kattilan keskustaa kohti. Kuvassa 13 on uusi suutinkärki, jollaiset tehtiin hyötyvoimalaitoksella. Kärjen aukon pinta-ala pyrittiin pitämään mahdollisimman lähellä entisen suuttimen reiän pinta-alaa, jotta ruiskutusteho ei muuttuisi oleellisesti. Suuttimen kärjen vaihto ei vaikuta virtaavan liuoksen määrään, koska virtausmittaus pitää virtauksen vakiona. Varmuuden vuoksi ja tehokkaamman ruiskutuksen vuoksi syöttöilman painetta nostettiin 1,2 baarista 1,6 baariin.



Kuva 13. Uusi ammoniakkin syöttösuuttimen kärki

Vaihdettaessa syöttösuuttimia havaittiin, että tason 4 toinen suutin oli viallinen. Se oli hapettunut pahasti ja sen kärki oli irronnut saumasta. Näin ollen sen ruiskutusteho on ollut huomattavasti huonompi kuin ehjällä suuttimella olisi. Syöttösuuttimien vaihto korjasi ainakin tämän ongelman varmasti.



Kuva 14. Rikkoutunut ammoniakkin syöttösuutin

6.1 Mittaukset

Uusia syöttösuuttimia testattiin toistamalla samat mittaukset kuin vanhoillakin suuttimilla. Ensimmäiset mittaukset tehtiin pitämällä laimennusveden määrä vakiona 438 l/h ja muuttamalla syötettävän ammoniakkin määrää. Testissä käytettiin kattilan vasemman puoleisia suuttimia sekä tason 4 suuttimia. Kuten vanhoillakin suuttimilla, syötettävän ammoniakki määrän muutos vaikuttaa suuresti laitoksen NO_x -päästöihin. NH_3 -slippikään ei nouse liian korkealle testin aikana.

Taulukko 7. Ammoniakin syöttömäärän muutos mittauksia uusilla suuttimilla

NH3 virtaus [l/h]	Höyryvirtaus [kg/s]	Tulipesän lt [°C]	Nox raaka [mg/Nm ³]	NH3 raaka [mg/Nm ³]
30,330	10,979	854,529	245,166	2,233
34,457	10,527	835,477	185,079	0,627
40,707	10,593	834,435	179,314	0,863
45,989	10,949	852,078	172,700	0,768
49,491	11,192	859,491	146,670	1,943
55,213	11,426	868,605	171,768	1,281
61,786	11,198	860,758	153,387	1,857
65,227	11,063	853,832	107,962	1,927
70,016	10,946	866,978	72,861	2,516

Vertailun vuoksi mittaukset tehtiin myös pitämällä ammoniakkin määrä vakiona 40 l/h ja muutettiin laimennus veden määrää. Mittaustulosta heikentää kattilan "kyykkääminen" kesken mittausten eli tuotettavan höyryn määrän putoaminen ja näin ollen kattila ei käynyt samalla teholla koko ajan. Tulipesän lämpötilalla on olennainen vaikutus tuotettavan höyryn määrään. Tämä vaikuttaa siihen, että NO_x-päästöjä tulee lähtökohdaisesti vähemmän ja pienemmän polttotehon takia ruiskutettavan ammoniakkin määrä oli tehoon nähden aika suuri. Tästä johtuen NO_x-päästöt ovat pienet ja NH₃-slip kasvaa.

Taulukko 8. Laimennusvesimäärän muutos uusilla suuttimilla

Laimennusvesi virtaus [l/h]	Höyryvirtaus [kg/s]	Tulipesän It [°C]	Nox raaka [mg/Nm ³]	NH3 raaka [mg/Nm ³]
400,187	10,103	829,248	180,667	4,711
450,698	9,468	807,662	121,642	2,621
550,774	9,722	803,434	115,718	3,381
648,188	10,276	819,265	135,136	2,876

Edelliset mittaustulokset eivät tuottaneet tyydyttävää tulosta työlle, koska ei haluttu kasvattaa syötettävän ammoniakkin määrää ja siten kulutusta. Tästä johtuen päätettiin suunnitella kattilan etuseinään paikat uusille suuttimille. Lisäsuuttimet parantavat pelkistysreaktiota kasvattamalla reaktiutilavuutta ja sen vuoksi ammoniakkin määrää ei tarvitse kasvattaa NO_x-päästöjen vähentämiseksi.

Uusien suuttimien on tarkoitus olla käytössä koko ajan, aivan kuten vasemman puoleiset suuttimet ovat, ja tästä johtuen uudet suuttimet kannattaa haaroittaa vasemmalle puolelle menevästä linjasta. Suunnittelu aloitettiin tarkistamalla laimennusveden ja ammoniakkin syöttöpumppujen teho, jotta ei syntyisi tilannetta missä pumpun teho ei riittäisikään. Laimennusvedelle sekä ammoniakille on kummallekin kaksi keskipakopumppua joita jokaista pyörittää oma 1,5 kW:n moottori. Toinen pumpuista toimii varapumppuna. Kaikki pumput ovat keskenään identtisiä, ja yhden pumpun nimellistuotto on n. 1 m³/h. Tämä määrä riittää hyvin yhdelle tai kahdelle uudelle suuttimelle.

6.2 Lämpötilajakaumat

Uusien suutinpaikkojen määrittämistä varten tehtiin kattilasta laskennalliset lämpötilajakaumat eri höyryvirtauksille. Mitä suurempi on höyryvirtaus sitä suurempi on poltto-

aineteho ja lämpötila ja tämän vuoksi tarvittiin useampi malli. Liitteestä 1 näkee neljä erilaista lämpötilajakaumaa. Sekundääris-ilmansyötön korkeudella oleva lämpötila on saatu Keppel Seghersin materiaalissa olevasta laskennallisesta kaavasta perustuen kattilan lämpötilamittaukseen huipulla sekä savukaasuvirtaukseen. Tämän lämpötilan ja huipun lämpötilan perusteella on sen jälkeen tehty lineaarisesti etenevä lämpötilajakauma kattilasta. (9.)

Lämpötilajakaumien perusteella voi todeta sopivan korkeuden olevan noin tason 3 korkeudella. Siinä tasossa on aina sopiva lämpötila-alue ammoniakkireaktiolle höyryvirtauksesta riippumatta. Myös vasemman puoleinen eli Inskan puoleinen taso on juuri ja juuri lämpötila-alueen rajoilla koko ajan, mutta varmuuden vuoksi suuttimet kannattaa sijoittaa hieman alemmas.

Ammoniakin syöttöä varten käytettävä suutintaso on valittu tähän asti manuaalisesti, vaikka SNCR-laitteiston ohjaus sisältää automaattivalitsimen käytettävälle suutintasolle. Automaatilla suutintaso riippuu kattilan tuottamasta höyryvirtauksesta. Lämpötilajakaumien avulla voidaan määrittää myös uudet höyryvirtausten arvot järjestelmälle automaattiajoa varten. Taulukosta 9 selviävät käytettävät suutintasot automaattiohjausta varten.

Taulukko 9. Automaattiohjauksen arvot

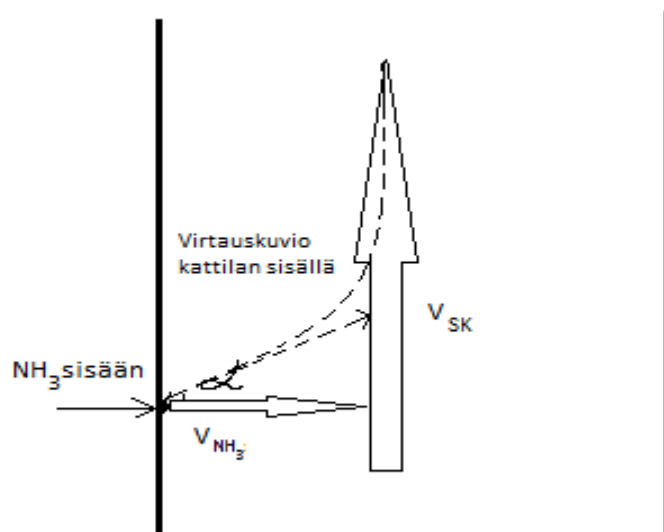
Höyryvirtaus	Syöttötaso
[t/h]	
44,0	Vasen ja taso 4
40,0	Vasen ja taso 4
35,0	Vasen ja taso 3
30,0	Vasen ja taso 3

6.3 Uusien suutinpaikkojen määrittäminen

Jos halutaan lisätä vain yksi uusi suutin kattilaan, kannattavinta on lisätä se kattilan leveysuunnassa keskelle. Keskellä sen syöttämä ammoniakkiliuos ei risteä kattilan sivuilta tulevien virtausten kanssa. Reaktiotilavuus kasvaa siten n. 2 m^3 , ja tällä jo pitäisi olla positiivinen vaikutus reaktioon ja NO_x -päästöjen alenemiseen.

Tarkasteltaessa kahden uuden suuttimen vaihtoehtoa asia on hieman monimutkaisempi, jos käytetään uusien suuttimien kanssa samaan aikaan tason 3 oikeanpuoleisia suuttimia. Jos kattilan etuseinässä olevat suuttimet ovat liian lähellä laitoja ja virtaukset sekoittuisivat keskenään kattilan sisällä, niin voidaan olettaa laimennusveden määrän mahdollisesti viilentävän savukaasuvirtausta paikallisesti hieman, jolloin ammoniakki kulkeutuu pidemmän matkan savukaasujen sekaan. Savukaasujen korkealämpötila ja tilavuusvirtaus aiheuttavat sen, että ei tarvitse huolehtia risteävistä virtauksista liikaa sillä ammoniakkiliuoksen vesi höyrystyy ja ammoniakki reagoi typpioksidin kanssa joka tapauksessa. Liuos kaasuuntuu nopeasti kattilan sisään syötettäessä ja lähtee etenemään savukaasujen mukana.

Kuvassa 15 on arvioitu kuinka ammoniakkiliuos etenee kattilan sisällä. Liuos syötetään kattilaan tietyllä nopeudella ja savukaasut etenevät omalla nopeudellaan. Savukaasut höyrystävät liuoksen ja vievät mukanaan.



Kuva 15. Ammoniakin ruiskutuskuvioiden käyttäytyminen kattilan sisällä

Laskemalla nopeudet ja niiden muodostama kulma pystytään päättämään sopiva matka kattilan laidasta uusille suuttimille ilman virtausten risteämistä kattilan sisällä. Käytettävän suuttimen kärki vaikuttaa tulokseen. Jos käytetään alkuperäistä suutinta, josta ammoniakkiliuos lähtee jo valmiiksi 30° kulmassa ylöspäin, niin se lähtee paljon jyrkemmin ylöspäin savukaasujen mukaan, mutta niiden kantama on hieman pidempi kuin uusien viuhkamaisen kuvion muodostavien suuttimien. Viuhkamaisen kuvion

muodostavat suuttimet syöttävät ammoniakkin suoraan eteenpäin, mutta kantomatka ei ole aivan yhtä pitkä.

Käsitellään yhtä vaakatasoista suutinta ja sen muodostamaa virtausta kattilan sisällä kuvan 15 mukaan. Yhdestä suuttimesta tulee n. 120 l/h ammoniakkiliuosta.

$$w_{NH_3} = \frac{q_{v,NH_3}}{A_s} \quad (5)$$

jossa	w_{NH_3}	virtausnopeus suuttimesta	[m/s]
	q_{v, NH_3}	ammoniakin tilavuusvirtaus	[m ³ /s]
	A_s	syöttösuuttimen reiän pinta-ala	[m ²]

$$V_{NH_3} = \frac{3,3 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s}}{\pi \cdot (0,0015 m)^2} = 4,715377 \frac{m}{s}$$

Jos automaatiojärjestelmän ilmoittama laskennallinen savukaasuvirtaus on esimerkiksi 65 000 Nm³/h, niin todellinen savukaasuvirtaus kattilan sisällä on 77,51239 m³/s, kun otetaan huomioon kattilan lämpötila. Lasku on saatu Keppel Seghersin aineistosta.
(10.)

Tällä virtausmäärällä savukaasun virtausnopeus on yhtälön mukaisesti:

$$w_{SK} = \frac{q_{v,SK}}{A_{kattila}} \quad (6)$$

jossa	w_{SK}	virtausnopeus kattilassa	[m/s]
	$q_{v,SK}$	savukaasun tilavuusvirtaus	[m ³ /s]
	$A_{kattila}$	kattilan poikkileikkaus pinta-ala	[m ²]

$$V_{SK} = \frac{77,51239 \frac{m^3}{s}}{4,96 m \cdot 4,24 m} = 3,685730 \frac{m}{s}$$

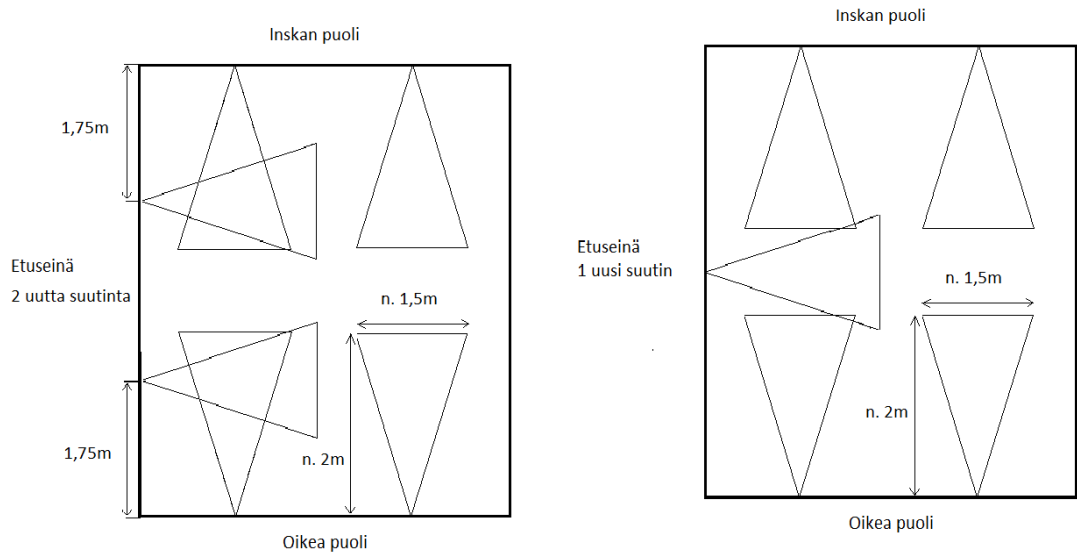
Laskemalla virtausnopeuksien muodostama kulma α saadaan tietää suurin piirtein, mihin suuntaan liuos lähtee suuttimesta kattilan sisällä.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{V_{SK}}{V_{NH_3}}\right) \quad (7)$$

jossa	α	kulma	[°]
	V_{SK}	virtausnopeus kattilassa	[m/s]
	V_{NH_3}	virtausnopeus suuttimesta	[m/s]

$$\alpha = \arctan\left(\frac{3,685730 \frac{m}{s}}{4,715377 \frac{m}{s}}\right) = 38,01^\circ$$

Suuttimesta lähtevän ammoniakkiliuoksen kantama oli n. 3 metriä eteenpäin kattilan ulkopuolella, joten ammoniakkiliuoksen lähtökulmasta ja nopeasta höyrystymisestä päätellen voidaan olettaa liuoksen olevan jo lähtenyt savukaasuvirtauksen mukaan noin 1,5 - 2 m etäisyydellä kattilan seinästä. Tällä perusteella uudet kaksi syöttösuihketta tulisi asettaa n. 1,75 m:n etäisyydelle kattilan kummaltakin sivulta. Kuvasta 16 selviävät arvioidut suutinkuviot kattilan sisällä. Kahdella suuttimella kuviot menevät päällekkäin, mutta tulee muistaa, että vasemman puoleiset suuttimet ovat n. 0,8 m korkeammalla kuin taso 3 ja tason 3 suuttimia käytetään vain ajoittain, joten päällekkäisyys ei haittaa paljoa.



Kuva 16. Suutinkuviot yhdellä ja kahdella suuttimella

Ruiskutuskuvioista ja lähtökulmasta voidaan päätellä, että lisättäessä vain yksi uusi suutin keskelle etuseinää siinä tulisi käyttää suoraan eteenpäin ruiskuttavaa suutinta. Tällaisella suuttimella varmistetaan, että ammoniakkiliuos kulkeutuu kattilan sisällä mahdollisimman pitkän matkan ennen kuin se haihtuu ja lähtee kulkeutumaan savukaasuvirtauksen mukaan.

7 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli optimoida Hyötyvoimalaitoksen SNCR-laitteisto ja vähentää laitoksen NO_x -päästöjä niin, että kattilan korroosio ei nouse ammoniakin vaikutuksesta. Opinnäytetyö eteni loogisessa järjestyksessä etsiessä ratkaisuja laitteiston tehokkuuden parantamiseen.

Työ aloitettiin kartuttamalla nykyisen laitteiston tehokkuus käytännön mittauksilla ja seuraamalla muutoksia. Nykyisellään laitteiston ammoniakin sekä laimennusveden määrät ovat jo kohdallaan eikä niihin tarvitse tehdä muutoksia, jollei NO_x -päästöjen päästörajat kiristy. Siinä tapauksessa voidaan lisätä syötettävän ammoniakin määrää ja, kunhan pitää silmällä NH_3 raakapäästöjä, niin kattilan korroosio ei nouse. SNCR-laitteen automaattiajtoa kannattaa käyttää jatkossa, jotta varmistetaan ammoniakin

syöttö mahdollisimman sopivalle lämpötila-alueelle laitoksen tuottamasta tehosta riippumatta.

Kattilaan kokeiltiin myös uuden mallisia suuttimia ammoniakkin syöttöä varten, mutta niistä ei juurikaan ollut hyötyä. Jatkossa voidaan käyttää kumpaa tahansa, originaalisuutinta, josta ammoniakkiliuos lähtee 30° kulmassa, tai uusia viuhkamaisen kuvion tekeviä suuttimia.

Työn aikana määritettiin myös paikat uusille suuttimille kattilan etuseinään. Niiden lisääminen kattilaan parantaa laitteiston suorituskykyä lisäämällä pelkistysreaktion tilavuutta kattilan sisällä. Jos kattilaan lisätään vain yksi uusi suutin, niin siinä kannattaa käyttää suoraan eteenpäin ruiskuttavaa suutinta, jotta sen kantama kattilan sisällä olisi mahdollisimman pitkä ennen kuin ammoniakkiliuos haihtuu ja lähtee savukaasuvirtauksen mukaan. Uusia suuttimia ei ehditty vielä asentaa ja testata tämän työn valmistuksessa, mutta oletettavaa on, että niiden lisääminen kattilaan on kannattavaa reaktion parantamisen vuoksi. Jos ne toimivat hyvin, niin laitoksen ammoniakkin kulutus voi pienentyä ja NO_x-päästöt jäävät päästörajan alapuolelle.

Työstä selviää mitä asioita tulee huomioida SNCR-laitetta optimoitaessa, joten voidaan sanoa, että työ saavutti sille asetetut tavoitteet. Hyötyvoimalaitoksen laitteistolla pystytään tulevaisuudessa pienentämään NO_x-päästöjä tarpeen vaatiessa ja päästörajojen kiristyessä. Tästä on hyötyä jatkossa työn tilaajalle ja muillekin laitoksille, jotka haluavat optimoida oman vastaavanlaisen laitteistonsa ilman suuria investointeja.

LÄHTEET

1. Kotkan Energia Oy. Yritystiedot. Kotkan Energia Oy:n internetsivut. Saatavissa: <http://www.kotkanenergia.fi/> [viitattu 23.11.2013].
2. Kotkan Energia Oy. Esittelyaineisto.
3. Kotkan Energia Oy. 2006. Ympäristölupa Nro A 1146.
4. Huhtinen M., Kettunen A., Nurminen P. & Pakkanen H. 2000. Hörykattilatekniikka, 5., uusittu painos. Helsinki: Oy Edita Ab.
5. Kylmälä A. 2011. Opinnäytetyö. SNCR- Laitteiston optimointi jätteenpolttolaitoksella.
6. Keppel Seghers. 2008. SNCR Functional Description.
7. Keppel Seghers. 2008. Waste-to-Energy koulutusmateriaali.
8. Petro Miljö. 2008. SNCR Service and maintenance instructions.
9. Petro Miljö. 2008. SNCR Plant description.
10. Petro Miljö. 2011. Boiler temperature mapping.
11. Bernd von der Heide. 2008. SNCR Process. Best Available Technology for NO_x reduction in Waste to Energy Plants.
12. IEA Clean Coal Centre. Selective non-catalytic reduction (SNCR) for NO_x control. Verkkosivut. Saatavissa: <http://www.iea-coal.org.uk/site/ieacoal/databases/ccts/selective-non-catalytic-reduction-sncr-for-nox-control> [viitattu 4.4.2014].
13. VTT Prosessit. 2007. Päästömittaajan käsikirja. Osa 1. Päästömittaustekniikan perusteet.
14. Jakob Krantz. Project Manager. Yara Environmental Technologies AB.

Kattilan lämpötilajakaumat eri höyryvirtauksilla

Liite 1

	Keskiarvot eri höyryvirtauksilla	
	Höyry [kg/s]	Anturi [°C]
x < 800		
800 > x > 850	avg 12,43738	868,76286
850 > x > 950	avg 11,60608	847,836373
950 > x > 1000	avg 10,59717	827,099558
x > 1000	avg 9,655654	794,632131

Höyry 12+ kg/s

Korkeus	lämpötila	
13,42	868,7629	Katto anturi
13	874,8926	
12	889,4873	
11,195	901,236	Taso 4
11	904,0819	
10	918,6766	
9,249	929,6371	Inskan puoli
9	933,2712	
8,395	942,1009	Taso 3
8	947,8658	
7	962,4605	
6	977,0551	
5,595	982,9659	Taso 2
5	991,6497	
4	1006,244	
3,295	1016,534	Taso 1
3	1020,839	
2	1035,434	
1	1050,028	
0	1064,623	Sekundääri-ilman syöttö

Höyry 11-12 kg/s

Korkeus	lämpötila	
13,42	847,8364	Katto anturi
13	853,9661	
12	868,5608	
11,195	880,3095	Taso 4
11	883,1554	
10	897,7501	
9,249	908,7106	Inskan puoli
9	912,3447	
8,395	921,1744	Taso 3
8	926,9393	
7	941,534	
6	956,1286	
5,595	962,0394	Taso 2
5	970,7232	
4	985,3179	
3,295	995,6071	Taso 1
3	999,9125	
2	1014,507	
1	1029,102	
0	1043,696	Sekundääri-ilman syöttö

Höyry 10-11 kg/s

Korkeus	lämpötila	
13,42	827,0996	Katto anturi
13	833,2293	
12	847,824	
11,195	859,5727	Taso 4
11	862,4186	
10	877,0133	
9,249	887,9738	Inskan puoli
9	891,6079	
8,395	900,4376	Taso 3
8	906,2025	
7	920,7972	
6	935,3918	
5,595	941,3026	Taso 2
5	949,9864	
4	964,5811	
3,295	974,8703	Taso 1
3	979,1757	
2	993,7703	
1	1008,365	
0	1022,96	Sekundääri-ilman syöttö

Höyry 9-10 kg/s

Korkeus	lämpötila	
13,42	794,6321	Katto anturi
13	800,7618	
12	815,3565	
11,195	827,1052	Taso 4
11	829,9511	
10	844,5458	
9,249	855,5063	Inskan puoli
9	859,1404	
8,395	867,9701	Taso 3
8	873,735	
7	888,3297	
6	902,9243	
5,595	908,8351	Taso 2
5	917,5189	
4	932,1136	
3,295	942,4028	Taso 1
3	946,7082	
2	961,3028	
1	975,8975	
0	990,4921	Sekundääri-ilman syöttö