



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

JÄTTEENPOLTTOLAITOKSEN HAPPAMIEN PÄÄSTÖJEN HALLINTA

TEKIJÄ: Miro Lilja

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä(t) Miro Lilja			
Työn nimi Jätteenpolttolaitoksen happamien päästöjen hallinta			
Päiväys	31.3.2020	Sivumäärä/Liitteet	43/1
Ohjaaja(t) Yliopettaja Merja Tolvanen ja tuntiopettaja Juha-Matti Aalto			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Riikinvoima Oy			
Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää Riikinvoiman ekovoimalaitoksen päästöjenhallintaan liittyvää ongelmaa. Työ on tärkeä osa kattilalaitosten savukaasupäästöjen hallintaa. Päästöistä on viranomaisen määräämät luparajat, jotka tulee alittaa. Opinnäytetyön käytännön osuus tehtiin kesällä 2019, jolloin opinnäytetyön tekijä oli työsuhteessa Riikinvoimalla 4kk ajan. Raportti laadittiin loppuvuoden 2019 sekä alkuvuoden 2020 aikana.</p> <p>Opinnäytetyössä selvitettävä ongelma oli HCl-pitoisuuden äkillinen nousu luparajan yli savukaasulauhduttimen alasajon yhteydessä. Työssä käytettiin apuna laitoksen omia savukaasujen puhdistuksen toimintakuvauksia sekä kirjallisuutta. Työssä perehdyttiin ensiksi savukaasujenpuhdistuksen ja siihen liittyvien mittalaitteiden toimintaan. Tämän jälkeen työssä laadittiin suunnitelma koesarjoille sekä mittausjärjestelyille. Suunnitelman pohjalta suoritettiin koeajoja, joiden tarkoituksena oli saada savukaasulauhdutin ajettua alas ilman luparajan ylittämistä.</p> <p>Opinnäytetyön lopputuloksena ongelma saatiin selvitettyä. Koeajojen tulokset käsiteltiin ja niistä tehtyjen johtopäätösten perusteella ongelma pystyttiin ratkaisemaan. Työssä laadittiin lisäksi parannusehdotus ongelman korjaamiseksi.</p>			
Avainsanat Ekovoimalaitos, Savukaasujen puhdistus, Savukaasulauhdutin, HCl-pitoisuus			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Environmental Technology			
Author(s) Miro Lilja			
Title of Thesis Management of acid emissions in waste incineration plant			
Date	31 March 2020	Pages/Appendices	43/1
Supervisor(s) Ms Merja Tolvanen, Principal Lecturer and Mr Juha-Matti Aalto, Lecturer			
Client Organisation /Partners Riikinvoima Oy			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to examine a problem concerning emission control at Riikinvoima eco power plant. The thesis is an important part of boiler plants emission control. The practical part of the thesis was carried out in summer of 2019, when the author of this thesis was employed for four months at Riikinvoima. The final report was prepared in late 2019 and in early 2020.</p> <p>The problem to be solved in this thesis was a sudden increase over the permit limit in HCl concentration, when the flue gas condenser shuts down. The plant's own flue gas cleaning function descriptions and literature were used in the thesis. First, the thesis focused on the functioning of flue gas cleaning and related measuring equipment. After that, a plan for the test series and the measuring arrangements were prepared in the thesis. Based on the plan, test runs were conducted to get the flue gas condenser shutdown without exceeding the permit limit.</p> <p>As a result of this thesis the problem was solved. The results of the test runs were processed and based on the conclusions the problem could be solved. In addition, an improvement proposal was prepared in the thesis to remedy the problem.</p>			
<p>Keywords Eco power plant, Flue gas cleaning, Flue gas condenser, HCl concentration</p>			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
2	KOHDELAITOS RIIKINVOIMA OY	7
3	JÄTTEEN POLTTOA KOSKEVA LAINSÄÄDÄNTÖ.....	8
3.1	Valtioneuvoston asetus 151/2013 jätteen polttamisesta	8
3.2	Euroopan parlamentin ja neuvoston IE-direktiivi 2010/75/EU.....	9
3.3	YVA-menettely ja ympäristölupa	10
4	SAVUKAASUJEN PUHDISTUS	10
4.1	Voimalaitos.....	10
4.2	Riikinvoiman puolikuiva savukaasujen puhdistusjärjestelmä.....	11
4.2.1	Puolikuivan kaasujen poistolaitoksen toimintaperiaate	12
4.2.2	Turbosorp-savukaasunpuhdistuslaitos	14
4.2.3	Turboreaktorin toiminta	16
4.2.4	Letkusuodatin.....	17
4.3	Savukaasujen puhdistuslaitoksen lisäainejärjestelmä	18
4.4	Reaktiotuotteiden kierrätysjärjestelmä	20
4.5	Savukaasujen prosessivesijärjestelmä	20
4.6	Savukaasulauhdutin.....	21
4.7	Savukaasuanalysaattorit.....	22
5	KOESARJAN SUUNNITELMA JA MITTAUSJÄRJESTELYT	24
5.1	Näytteenotot	24
5.2	Savukaasujen mittausjärjestelyt.....	25
5.3	Sammutetun kalkin laadunvarmistus.....	27
5.4	Prosessivesi sekä turboreaktorin lämpötila.....	28
6	KOEAJOT	30
6.1	HCl-mittalaitteen asennus	30
6.2	Ensimmäinen koeajo.....	30
6.3	Ensimmäisen kokeen alasajo	32
6.4	Toinen koeajo.....	36
6.5	Kolmas koeajo	37
6.6	Muut näytteenotot koeajojen aikana.....	39
7	KOEAJOJEN TULOSTEN POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET	41

8 OPINNÄYTETYÖN MERKITYS.....	43
LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT.....	44

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää syy savukaasulauhduttimen alasajon jälkeen tapahtuvaan päästöjen hallintaan liittyvään ongelmaan jätteenpolttolaitoksella. Savukaasulauhduttimen alasajon yhteydessä HCl-pitoisuus nousee äkillisesti aiheuttaen piikin ja puolen tunnin luparaja ylittyy. HCl-pitoisuuden piikki kestää noin 30-60 min, kunnes se laskee normaalille, vähäiselle tasolle. Syytä kyseisen piikin syntymiseen ei tiedetä. Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia ja selvittää syy piikin syntymiseen sekä löytää tilanteeseen ratkaisu.

Työ on tärkeä osa kattilalaitosten savukaasupäästöjen hallintaa. Päästöistä on viranomaisen asettamat luparajat, jotka tulee alittaa. Työn avulla parannetaan sekä optimoidaan Riikinvoiman ekovoimallaitoksen päästöjen hallintaa.

Työ aloitetaan perehtymällä Riikinvoiman savukaasujen puhdistusjärjestelmään, päästöihin liittyvään lainsäädäntöön ja muihin aiheeseen liittyviin komponentteihin. Perehtymisen avulla tavoitteena on saada selville mahdolliset ongelman aiheuttavat tekijät. Perehtymisvaiheen perusteella tehdään suunnitelma ongelman syyn selvittämiseksi. Suunnitelma sisältää laitoksella tehtävät koesarjat sekä tarvittavat mittausjärjestelyt. Suunnitelman pohjalta suoritetaan savukaasulauhduttimen alasajosta koeajoja erilaisilla säädöillä. Tarkoituksena koeajoissa on kytkeä mittalaite mittaamaan HCl-pitoisuutta savukaasukanavaan ennen savukaasulauhdutinta, jotta HCl-pitoisuutta voidaan seurata ennen savukaasulauhdutinta. Tavoitteena on suorittaa alasajo ilman luparajan ylittymistä. Koeajojen aikana Riikinvoiman kalkinsammutuslaitoksen valmistamasta sammutetusta kalkista sekä savukaasujen puhdistusjärjestelmässä kiertävästä reaktiotuotteesta otetaan näytteitä. Koeajojen sekä näytteenottojen tulokset käsitellään ja niiden perusteella tehdään johtopäätökset ongelman selvittämiseksi.

Työn pohjalta luodaan savukaasulauhduttimen alasajoa varten ajo-ohje tai esitetään ratkaisu ongelman korjaamiseksi. Lisäksi työssä kuvataan Riikinvoiman ekovoimallaitoksen prosessi sekä sen käyttämä savukaasujen puhdistustekniikka.

2 KOHDELAITOS RIIKINVOIMA OY

Riikinvoima Oy on voimalaitosyhtiö, joka omistaa ja ylläpitää ekovoimalaitosta. Riikinvoiman ekovoimalaitos (Kuva 1) sijaitsee Leppävirralla. Yhtiö perustettiin vuonna 2012 ja ekovoimalaitoksen rakentaminen alkoi lokakuussa vuonna 2014. Laitos otettiin käyttöön helmikuussa 2017. Riikinvoima Oy:n omistajina ovat kahdeksan kunnallista jätehuoltoyhtiötä sekä Varkauden Aluelämpö Oy. Nämä kahdeksan jätehuoltoyhtiötä järjestävät jätehuollon n. 650 000 ihmiselle. (Riikinvoima.fi)

Riikinvoima tuottaa sähköä sekä kaukolämpöä polttokelpoisesta jätteestä, joka ei kelpaa kierrätykseen. Riikinvoima tuottaa vuodessa sähköä, joka riittää n. 4300 omakotitalolle sekä kaukolämpöä, joka riittää n. 10 000 omakotitalolle. Ekovoimalaitoksen polttoaineena käytetty jäte esikäsitellään Riikinvoiman jätteenkäsittelyssä, jossa se murskataan. Jätteestä erotellaan myös metallit, jotka menevät lopulta kierrätykseen. Ekovoimalaitoksen kattila, jossa esikäsitelty jäte poltetaan, perustuu kiertopetiteknikkaan. Kiertopetikattilassa poltettu jäte palaa tehokkaasti sekä hyvällä hyötysuhteella. Jätteen poltosta syntyvät savukaasut johdatetaan savukaasujenpuhdistusjärjestelmään, jossa savukaasut puhdistetaan niin että päästöraajat alittuvat. Prosessissa syntyvät tuhkat pyritään hyödyntämään sekä savukaasujen puhdistuksen synnyttämä loppujäte käsitellään. Loppujäte loppusijoitetaan turvallisesti sen käsittelyn jälkeen. (Riikinvoima.fi)



Kuva 1. Riikinvoiman ekovoimalaitos (varkaudenalueämpö.fi)

3 JÄTTEEN POLTTOA KOSKEVA LAINSÄÄDÄNTÖ

3.1 Valtioneuvoston asetus 151/2013 jätteen polttamisesta

Jätteen polttamista koskee Valtioneuvoston asetus 151/2013:

Jätteenpolttolaitos sekä jätteen rinnakkaispolttolaitos, jossa poltetaan käsittelemättöntyä jätelain 6 §:n 1 momentin 3 kohdassa tarkoitettua sekalaista yhdyskuntajätettä tai vaarallista jätettä, on suunniteltava, rakennettava ja varustettava ja sitä on käytettävä siten, että savukaasun epäpuhtauksien pitoisuudet eivät ylitä tämän asetuksen liitteessä 2 ilmaistuja päästöjen raja-arvoja. (VNA 15/2013, 14 §)

Jätteenpolttolaitoksessa ja jätteen rinnakkaispolttolaitoksessa on tehtävä tämän asetuksen liitteen 5 mukaiset ilmaan johdettavien päästöjen mittaukset seuraavasti:

1) jatkuvat mittaukset seuraavista epäpuhtauksista:

- a) typenoksidit (NO_x), jos ympäristöluvassa on niitä koskeva päästöjen raja-arvo;*
- b) hiilimonoksidi (CO);*
- c) hiukkasten kokonaismäärä;*
- d) orgaanisen hiilen kokonaismäärä (TOC);*
- e) suolahappo (HCl);*
- f) fluorivety (HF);*
- g) rikkidioksidi (SO₂);*

2) jatkuvat mittaukset seuraavista prosessin toimintaan liittyvistä muuttujista:

- a) lämpötila palamiskammion sisäseinän läheisyydestä taikka muusta ympäristöluvassa tai siinä määrättyssä tarkkailusuunnitelmaa koskevassa päätöksessä määritellystä palamiskammion edustavasta kohdasta;*
- b) savukaasun happipitoisuus, paine, lämpötila ja vesihöyrysisältö;*

3) vähintään kahdesti vuodessa mittaukset raskasmetalleista, dioksiineista ja furaneista, kuitenkin siten, että laitoksen ensimmäisen 12 käyttökuukauden aikana mittaukset tehdään vähintään joka kolmas kuukausi. Savukaasujen viipymäaika, vähimmäislämpötila ja happipitoisuus on todennettava asianmukaisesti vähintään kerran laitoksen käyttöönoton aikana ja epäedullisimmiksi ennakoituissa käyttöolosuhteissa. (VNA 15/ 2013, 18 §)

Päästöjen raja-arvot on laskettava siten, että lämpötila on 273,15 K ja paine 101,3 kPa, kun savukaasujen vesihöyrypitoisuutta koskevat korjaukset on tehty.

Savukaasun raja-arvot on standardoitava 11 prosentin happipitoisuuteen, jollei kysymys ole öljyjätteen polttamisesta, jolloin raja-arvot on standardoitava 3 prosentin happipitoisuuteen, tai 20 §:n 2 tai 3 momentissa tarkoitettusta tapauksesta.

(VNA15/2013, Liite 2)

Taulukkoon 1 on koottu ilmapäästöjen vuorokausikeskiarvojen raja-arvot. Taulukossa 2 on esitetty ilmapäästöjen puolen tunnin keskiarvojen raja-arvot.

Taulukko 1. Jätteenpolttolaitoksen ilmapäästöjen raja-arvot vuorokausikeskiarvoille (VNA15/ 2013, Liite 2)

1. Vuorokausikeskiarvot

Epäpuhtaus	Raja-arvo, mg/m ³ (n)
Hiukkasten kokonaismäärä	10
Kaasumaiset ja höyrymäiset orgaaniset aineet orgaanisen hiilen kokonaismääränä (TOC)	10
Suolahappo (HCl)	10
Fluorivety (HF)	1
Rikkidioksidi (SO ₂)	50
Typpimonoksidi (NO) ja typpidioksidi (NO ₂) typpidioksidina; koskee käytössä olevia jätteenpolttolaitoksia, joiden nimelliskapasiteetti on yli 6 tonnia/tunti, sekä uusia jätteenpolttolaitoksia	200
Typpimonoksidi (NO) ja typpidioksidi (NO ₂) typpidioksidina; koskee käytössä olevia jätteenpolttolaitoksia, joiden nimelliskapasiteetti on enintään 6 tonnia/tunti	400

Taulukko 2. Jätteenpolton ilmapäästöjen raja-arvot puolen tunnin keskiarvoille (VNA15/ 2013, Liite 2)

2. Puolen tunnin keskiarvot

Epäpuhtaus	Raja-arvo, mg/m ³ (n)	
	(100%) A	(97%) B
Hiukkasten kokonaismäärä	30	10
Kaasumaiset ja höyrymäiset orgaaniset aineet orgaanisen hiilen kokonaismääränä (TOC)	20	10
Suolahappo (HCl)	60	10
Fluorivety (HF)	4	2
Rikkidioksidi (SO ₂)	200	50
Typpimonoksidi (NO) ja typpidioksidi (NO ₂) typpidioksidina; koskee käytössä olevia jätteenpolttolaitoksia, joiden nimelliskapasiteetti on yli 6 tonnia/tunti, sekä uusia jätteenpolttolaitoksia	400	200

3.2 Euroopan parlamentin ja neuvoston IE-direktiivi 2010/75/EU

Jätteenpolttoa koskee myös IE-direktiivi 2010/75/EU:

Jätteenpolttolaitosten ilmaan joutuvien päästöjen raja-arvot

1. Kaikki päästöjen raja-arvot on laskettava siten, että lämpötila on 273,15 K ja paine 101,3 kPa, kun savukaasujen vesihöyrypitoisuutta koskevat korjaukset on tehty.

Savukaasun raja-arvot standardoidaan 11 prosentin happipitoisuuteen, ellei kyseessä ole direktiivin 2008/98/EY 3 artiklan 3 kohdassa määritellyn mineraalijäteöljyn polttaminen, jolloin ne standardoidaan 3 prosentin happipitoisuuteen, kuten myös 6 osan 2.7 kohdassa tarkoitetuissa tapauksissa. (2010/75/EU, Liite VI 3 Osa)

Edellä mainitun liitteen VI 3 osan sisältämät päästöjen raja-arvot ovat samat kuin Valtioneuvoston asetuksessa 151/2013 (kappale 3.1).

3.3 YVA-menettely ja ympäristölupa

Riikinvoiman ympäristölupaa varten on tehty ympäristövaikutusten arviointimenettely vuoden 2012 marraskuussa (YVA). Riikinvoiman ympäristöluvassa edellytetään seuraavia asioita savukaasupäästöjen tarkkailun osalta:

Savukaasupäästöjen tarkkailu ja päästömittausten laadunvarmistus

– *jatkovatoimiset päästömittaukset (NO_x, CO, hiukkaset, TOC, HCl, HF, SO₂)*

– *jatkovatoimiset apusuuremittaukset (lämpötila, paine, kosteus, happi) -päästörajoihin verrannollisten pitoisuuksien laskenta ja keskiarvottaminen päästörajojen noudattamisen seuraamiseksi*

– *kertamittaukset (raskasmetallit sekä dioksiinit ja furaanit)*

– *päästömittauslaitteiden käytettävyyden tarkkailu*

-jatkovatoimisten päästömittausten laadunvarmistus standardin SFS-EN 14181 mukaisesti sisältäen määrävuosina tehtävät QAL2-vertailumittaukset, AST-menettelyn mukaiset vuosittaiset laadunvarmistustestit sekä käytönaikaisen QAL3-laadunvarmistuksen. (Riikinvoiman ympäristölupa... 2013, 33)

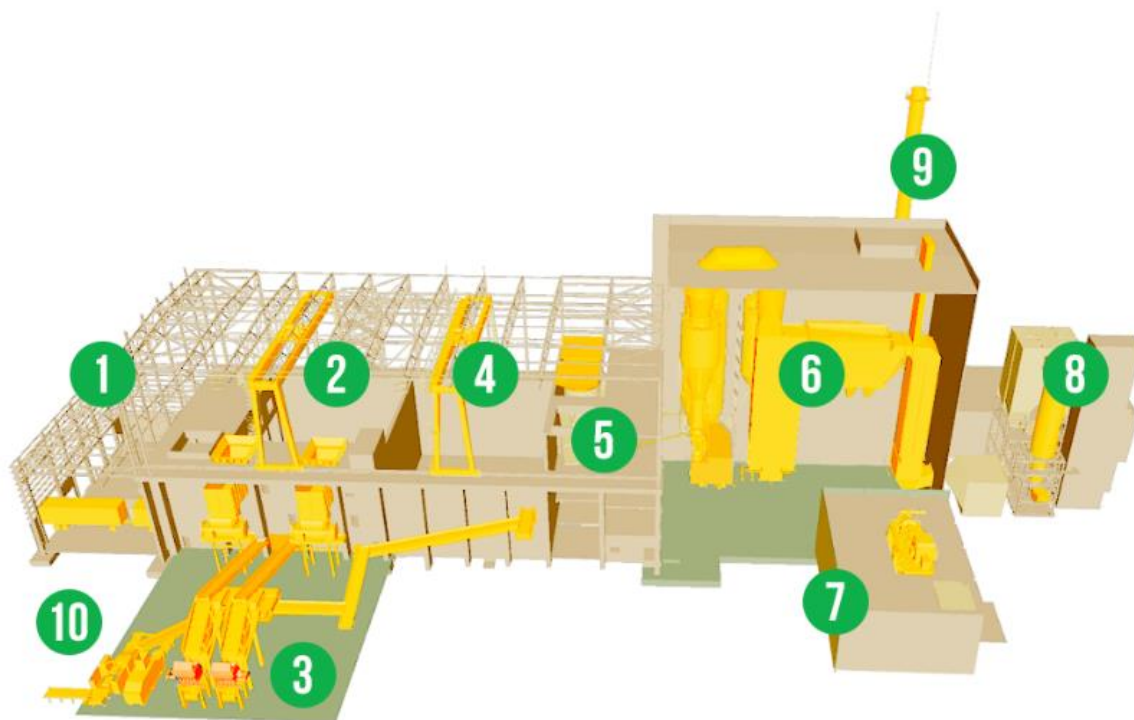
Jatkovatoimisten mittausten mittausjärjestelmä on kalibroitava ulkopuolisen asiantuntijan tekemin mittauksin ainakin kerran kolmessa vuodessa. Lisäksi mittausjärjestelmän toimivuus on tarkastettava vähintään kerran vuodessa. (Riikinvoiman ympäristölupa... 2013, 58)

4 SAVUKAASUJEN PUHDISTUS

Ennen suunnitelman laatimista perehdyttiin tarkemmin Riikinvoiman savukaasujen puhdistukseen. Savukaasujen puhdistusjärjestelmään perehtymisen avulla pystytään ymmärtämään paremmin selvittävän ongelman mahdollista syytä ja syntyä.

4.1 Voimalaitos

Riikinvoiman ekovoimalaitos tuottaa sähköä ja kaukolämpöä polttamalla sekajätettä käyttäen kiertopetiteknikkaa. Sekajätettä 145 000 tonnia polttava Riikinvoiman ekovoimalaitos tuottaa vuodessa noin 180 GWh kaukolämpöä ja 90 GWh sähköä. Laitoksen polttoaineteho on 45 MW. Voimalaitos koostuu jätteen vastaanotosta ja -käsittelystä, kattilasta, savukaasujen puhdistuksesta sekä turbiinilaitoksesta. (Riikinvoima.fi)

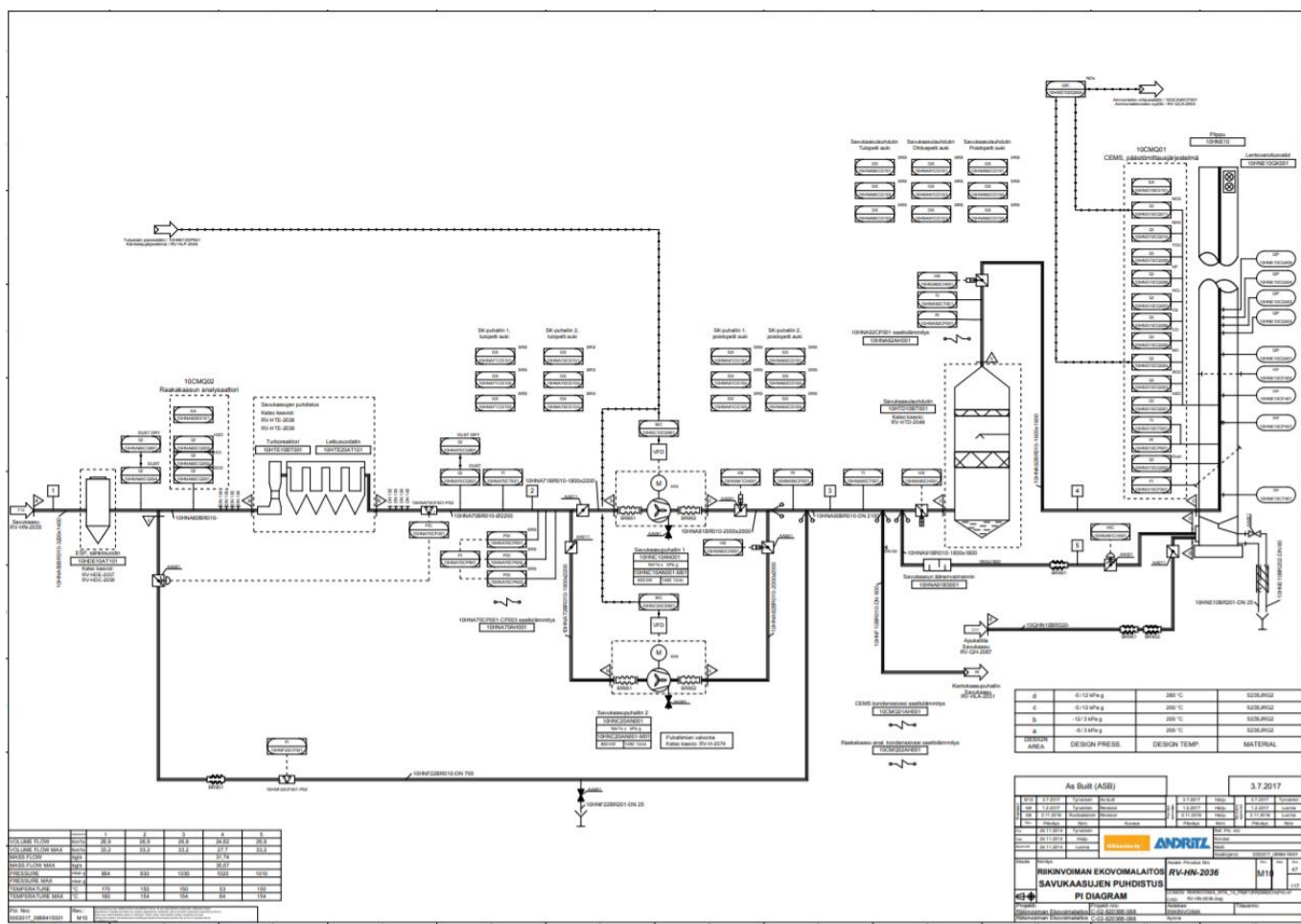


1. Jätteen vastaanotto
2. Saapuneen jätteen varasto
3. Jätteenkäsittelylaitteisto
4. Käsitellyn jätteen varasto
5. Polttoaineen syöttölaitteisto
6. Kiertopetikattila
7. Höyryturbiini ja kaukolämmönvaihtimet
8. Savukaasun puhdistuslaitteisto
9. Piippu
10. Käsitellyn jätteen paalaus

Kuva 2. Voimalaitoksen osat (Riikinvoima.fi)

4.2 Riikinvoiman puolikuiva savukaasujen puhdistusjärjestelmä

Riikinvoiman kiertopetikattilalaitoksen puolikuiva savukaasujen puhdistamisjärjestelmä koostuu sähkösuotimesta sekä Turbosorp-savukaasunpuhdistuslaitoksesta (Kuva 3). Kaiken kaikkiaan sen pääosat ovat turboreaktori, letkusuodatin, reaktiotuotteen kuljetusjärjestelmä, lisäaineen syöttöjärjestelmä, prosessivesijärjestelmä sekä savukaasukanavisto savukaasukierrätyksineen. Järjestelmään kuuluu lisäksi savukaasulauhdutin. On tärkeää ymmärtää Riikinvoiman savukaasunpuhdistuksen toimintaperiaate, jotta voidaan tehdä päätelmiä selvitettävän ongelman syistä.



Kuva 3. Savukaasujen puhdistusjärjestelmä (Väänänen 2017, Liite 1)

4.2.1 Puolikuivan kaasujen poistolaitoksen toimintaperiaate

Puolikuiva savukaasujen puhdistus tarkoittaa sitä, että puhdistuksessa savukaasujen happamat- ja rikkiyhdisteet sidotaan kalkkimaitoon eli hydroksidi-vesi-lietteeseen suihkupesurissa. Prosessin on mitoitettu sillä tavalla, että liete kuivuu savukaasuvirrassa ja reaktiotuotteet muodostuvat pölyksi, joka poistuu pesurista savukaasuvirran mukana. Muodostunut pöly erotetaan savukaasusta letkusuotimen avulla. Suodin on lisäksi prosessissa kemiallisesti aktiivisena puhdistimena. Tämä tarkoittaa sitä, että savukaasu kulkee reagoimattoman kalsiumhydroksidi pölykerroksen läpi, joka on erotunut suotimessa. Savukaasuun puhalletaan lisäksi aktiivihiltä dioksiiniyhdisteiden ja elohopean sitomista varten tai se tuodaan prosessiin kalkkimaitoon sekoitettuna. Typen oksidit voidaan poistaa niiden katalyyttisellä pelkistyksellä puolikuivassa prosessissa, polttoteknisillä keinoilla tai ammoniakki-ruiskutuksella tulipesässä (RAIKO, KIRVELÄ, TOLVANEN, PÄÄKKÖNEN 2017, 216).

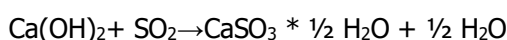
Riikinvoimalla aktiivihiltä sekä kalkki syötetään yhdessä turboreaktoriin. Riikinvoiman puolikuivaan savukaasujen puhdistukseen ei kuulu typen oksidien katalyyttistä pelkistystä, vaan typen oksidit poistetaan polttoteknisesti sekä lisäksi ne pelkistetään tulipesässä ammoniakki-ruiskutuksella. Ennen puolikuivaa savukaasujen puhdistusjärjestelmää sijaitsee sähkösuodin, joka erottelee lentotuhkaa savukaasusta.

Puolikuivassa savukaasujen puhdistusprosessissa ei synny ollenkaan jätevettä vaan kiinteää jätettä, jota syntyy vastaavasti enemmän kuin märkäprosesseissa. Tällainen prosessi on usein käytössä laitoksilla, joissa epäpuhtauksien pitoisuuksissa ei ole suurta vaihtelua syntyvässä savukaasussa. (RAIKO ym., 217)

Happamat komponentit

Alla olevat reaktiot ovat välttämättöä happamien komponenttien puhdistusprosessille 135-145°C:ssa. Happamat komponentit sitoutuvat savukaasuista sammutettuun kalkkiin ja reagoidesaan muodostavat kiinteää ainetta (reaktioyhtälöt 1 – 7).

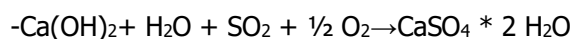
1. Sammutettu kalkki ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reagoi rikkidioksidin (SO_2) kanssa muodostaen kalsiumsulfittia (CaSO_3)



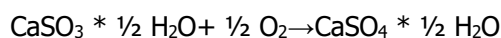
2. Sammutettu kalkki ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reagoi rikkitrioksidin (SO_3) kanssa muodostaen kalsiumsulfaattia (CaSO_4)



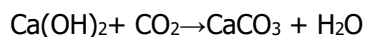
3. Sammutettu kalkki ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), vesi, happi ja rikkidioksidi (SO_2) reagoivat keskenään ja muodostavat kalsiumsulfaattia (CaSO_4)



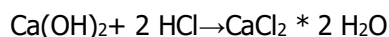
4. Kalsiumsulfitti (CaSO_3) hapettuu kalsiumsulfaatiksi (CaSO_4)



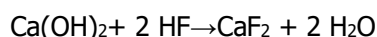
5. Sammutetun kalkin ja hiilidioksidin (CO_2) reagoiessa keskenään muodostuu kalsiumsulfittia (CaSO_3)



6. Sammutetun kalkin ja suolahapon reagoiessa keskenään muodostuu kalsiumkloridia (CaCl_2)



7. Sammutetun kalkin ja fluorivedyn reaktiossa taas kalsiumfluoridia (CaF_2)



(VÄÄNÄNEN 2017, 18)

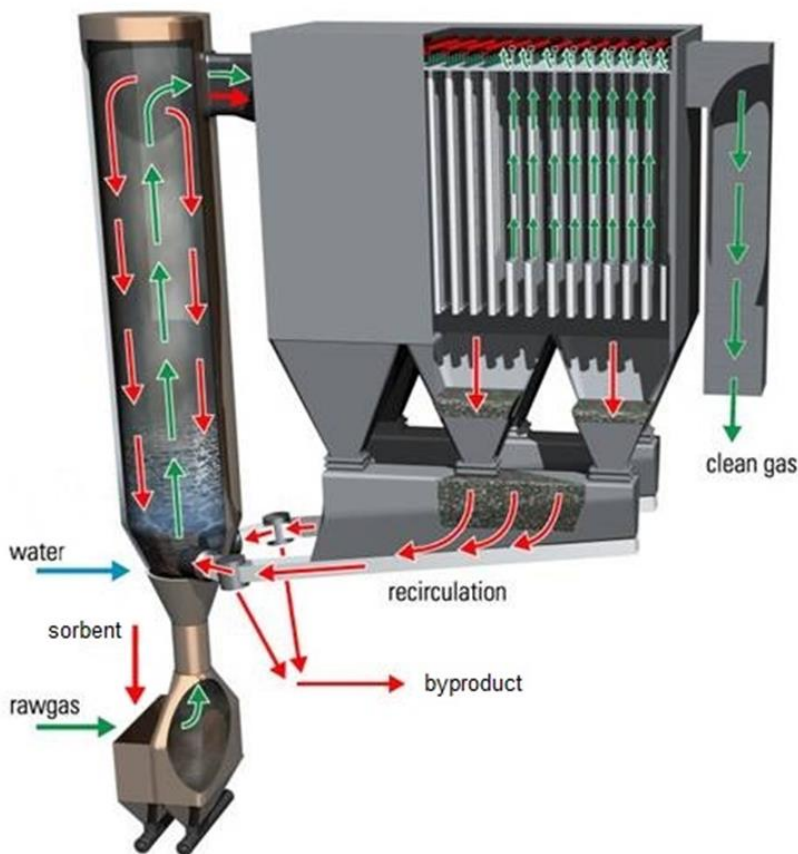
Dioksiinit, furaanit sekä raskasmetallit

Dioksiinit, furaanit, elohopea ja raskasmetallit poistetaan savukaasusta aktiivihiihen avulla. Se tapahtuu adsorboimalla kaasu aktiivihiihen. Aktiivihiihen suuri ominaispinta-ala ja sen huokoskoon jakautuminen tekevät siitä parhaan vaihtoehdon edellä mainittujen epäpuhtauksien poistoon. Aktiivihii-liadsorptio vaatii riittävän pitkän viipymäajan toimiakseen. Se saavutetaan reaktorin jälkeen olevan letkusuodattimen suodatuskakuilla sekä reaktiotuotteiden kierrolla turboreaktorissa. (VÄÄNÄNEN 2017, 19)

Savukaasut virtaavat suodatuskakan läpi homogeenisen säteittäisesti ulkoa sisäpuolelle, ja raskasmetallit, dioksiinit, furaanit ja happamat yhdisteet (SO_2 , SO_3 , HCl) erottuvat savukaasusta kemiallisesti absorptio ja adsorptio avulla. (VÄÄNÄNEN 2017, 19)

4.2.2 Turbosorp-savukaasunpuhdistuslaitos

Turbosorp-savukaasunpuhdistuslaitos (kuva 5) on Riikinvoimalla käytettävä puolikuiva savukaasujen puhdistusjärjestelmä. Siihen kuuluvat turboreaktori, letkusuodatin, reaktiotuotteen kuljetusjärjestelmä sekä savukaasukanavisto savukaasukierrätyksineen. Ennen kuin kattilalta tuleva savukaasu saapuu järjestelmään, se kulkee sähkösuotimen läpi, jossa siitä poistetaan lentotuhka. Sähkösuotimen jälkeen savukaasut johdatetaan turboreaktoriin. Turboreaktorissa savukaasusta erotetaan happamat yhdisteet HCl, SO₂, SO₃ ja HF. Turboreaktorissa on kiertoleijukerros, joka muodostetaan letkusuodattimelta palaavasta kierrätetystä reaktiotuotteesta. Prosessin olosuhteet optimoidaan prosessivedellä, jota suihkutetaan turboreaktoriin. Happamien yhdisteiden poistamiseksi turboreaktoriin syötetään sammutettu kalkkia, Ca(OH)₂. Sammutetun kalkin lisäksi turboreaktoriin syötetään aktiivihiiltä, joka sitoo savukaasuista dioksiinit, furaanit sekä raskasmetallit. Savukaasut sekä turboreaktorissa syntyneet reaktiotuotteet siirtyvät seuraavaksi letkusuodattimeen. Letkusuodattimessa erotellaan lisää happamia yhdisteitä sekä poistetaan pöly savukaasusta. Erottelu tapahtuu suodattimen pinnalle muodustuneen aktiivisen suodatuskakun avulla. Letkusuodattimen läpi kulkenut puhdas savukaasu jatkaa matkaansa savukaasupuhaltimen kautta piippuun. Letkusuodattimen suodatinmateriaalin suodatuskakut puhdistetaan säännöllisesti. Suurin osa puhdistuksesta irtoavasta reaktiotuotteesta kierrätetään takaisin turboreaktoriin ja vain pieni osa (1-2%) reaktiotuotteesta poistuu prosessista reaktiotuotteen tuhkasiilon. (VÄÄNÄNEN 2017, 10-11)



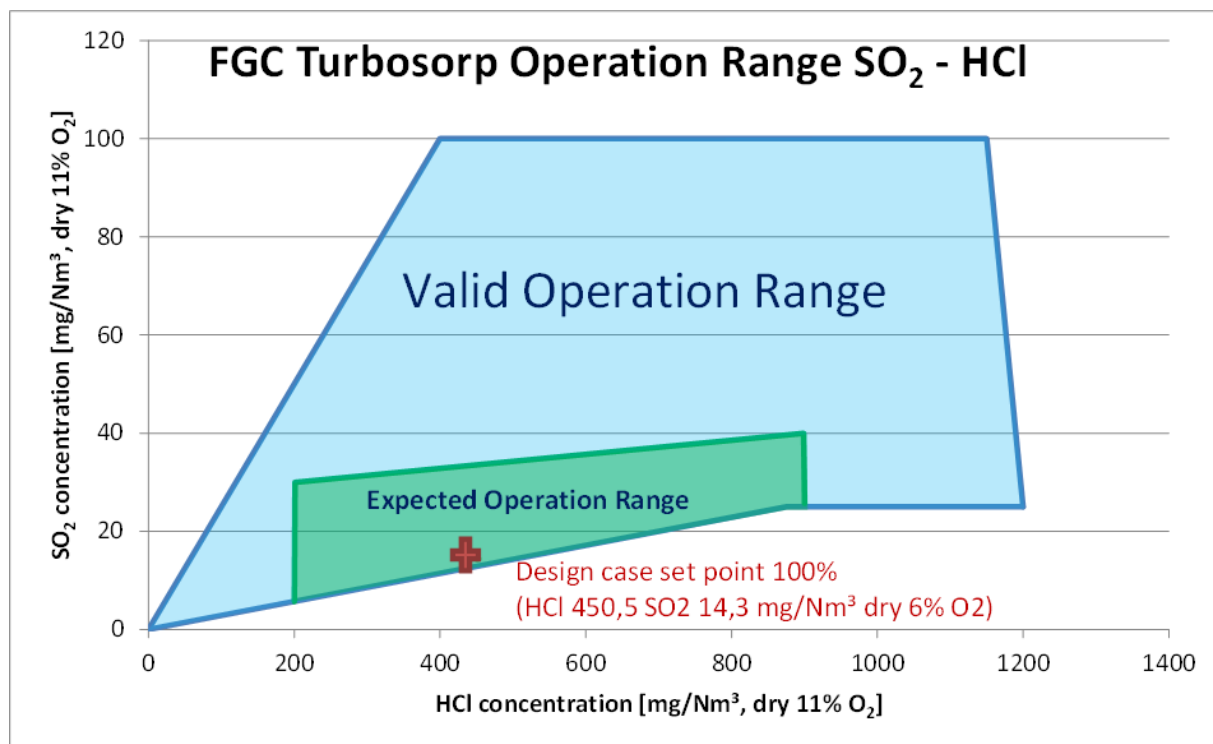
Kuva 4. Turbosorp-savukaasunpuhdistuslaitoksen toimintaperiaate (VÄÄNÄNEN 2017, 16)

Taulukkoon 3 on koottu Riikinvoiman savukaasunpuhdistuksen mitoitusarvot. Kuvassa 5 on nähtävissä Turbosorp-savukaasun puhdistuslaitoksen toimintaparametrit. Optimaalinen toiminta-alue on HCl:n osalta n. 200-900 mg/Nm³, dry 11% O₂ ja SO₂:n osalta n. 5-40 mg/Nm³, dry 11% O₂.

Taulukko 3. Riikinvoiman savukaasunpuhdistuksen mitoitusarvot (VÄÄNÄNEN 2017, 12)

Parametri	Yksikkö	Mitoitustapa us 100 %	Enimmäistap aus 110 %	Vähimmäista paus 67 %
Savukaasuvirtaus, märkä	Nm ³ /h	103 100	114 400	59 900
Savukaasuvirtaus, todellinen	m ³ /h	175 761	201 350	98 232
Lämpötila	°C	170	180	160
Paine	kPa	96,4	95,5	98,0
H ₂ O	til.-%	18,5	21,3	11,1
O ₂ , kuiva	til.-%	5,52	5,52	11,95
SO ₂ , kuiva 11 % O ₂	mg/Nm ³	14,3	Kuvaajan mukainen	Kuvaajan mukainen
HCl, kuiva 11 % O ₂	mg/Nm ³	450,5	Kuvaajan mukainen	Kuvaajan mukainen
HF, kuiva 11 % O ₂	mg/Nm ³	2,65	2,9	5,4
Pöly, kuiva 11 % O ₂ ⁽¹⁾	g/Nm ³	1,1	> 2,5	> 1,1

(1) Kuutiometrit [Nm³] NTP olosuhteiden mukaisesti.



Kuva 5. SO₂- ja HCl-suodatuksen toiminta-alue (VÄÄNÄNEN 2017, 13)

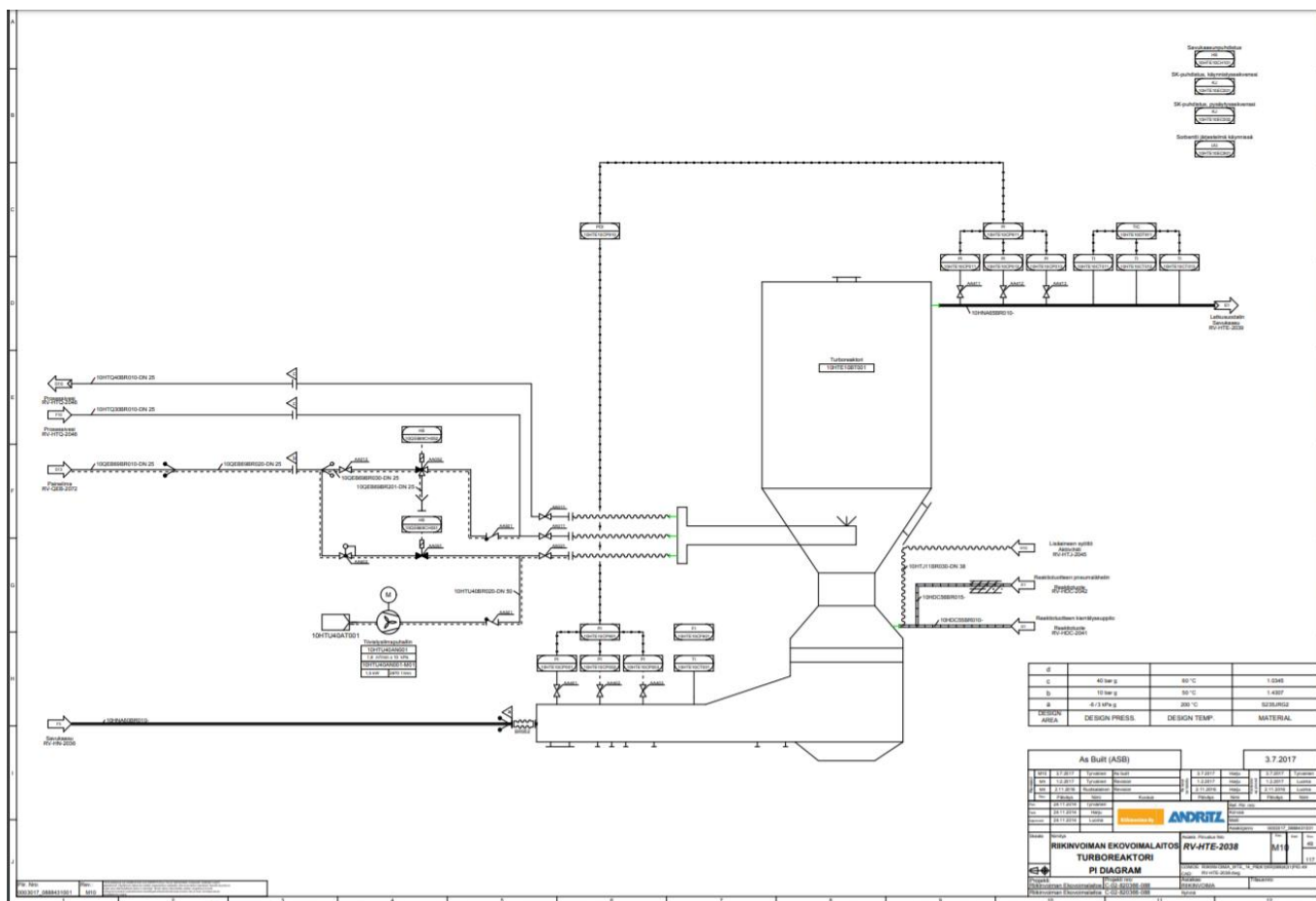
4.2.3 Turboreaktorin toiminta

Savukaasu johdetaan sähkösuotimen läpi turboreaktorin alaosaan, jossa se on kosketuksissa lisäaineiden, prosessiveden sekä kierrätetyn reaktiotuotteen kanssa. Lisäaineina turboreaktorissa käytetään sammutettua kalkkia ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sekä aktiivihiliä. Lisäaineiden avulla savukaasusta poistetaan happamat yhdisteet esim. SO_2 , HCl , HF ja SO_3 . Happamien yhdisteiden poisto tapahtuu kappaleessa 4.2.1 esitettyjen yhtälöiden mukaisesti. Aktiivihillen tehtävänä on poistaa dioksiinit, furaanit ja raskasmetallit savukaasusta. Niiden poistaminen on tarkemmin selitettynä kappaleessa 4.2.1. Turboreaktorin optimi lämpötila on n. 135-145 °C välillä. Optimi lämpötila saadaan aikaan, kun turboreaktoriin saapuvaan savukaasuun ruiskutetaan prosessivettä suoraan leijukerroksessa. Samaan aikaan kun lämpötila laskee halutulle tasolle savukaasuun vesihöyrypitoisuus kasvaa ja pölyhiukkasten pintaan muodostuu nestemäinen pintakalvo. Tämän ansiosta prosessi erottaa epäpuhtauksia tehokkaasti. Kiintoaineista suurin osa erottuu turboreaktorin yläosassa, jolloin ne virtaavat alaspäin turboreaktorin seinämiä pitkin. Savukaasu jatkaa matkaansa yläosasta kohti letkusuodatinta, jossa savukaasuista erotetaan pöly, osittain reagoanut lisäaine sekä reaktiotuote. Eroteltu aines laskeutuu reaktiotuotteiden kierrätyspölyyn, joka on eristetty sekä saattolämmitetty. (VÄÄNÄNEN 2017, 17)

Letkusuodattimessa eroteltu kiintoainekkierrätetään suurelta osin turboreaktoriin (98-99%). Kierrätys tapahtuu reaktiotuotteiden kierrätyksen ilmaliun ja annostelurullan kautta. Ne syötetään takaisin turboreaktoriin venturisuuttimen alapuolelle. Turboreaktorissa käytetty lisäaine syötetään yhdessä savukaasun kanssa venturisuuttimien kautta. Ne syötetään noin 69 m/s leijukerrokseen. Tällä tavoin pölypitoisuus turboreaktorin ja letkusuodattimen välillä kasvaa jopa n. 500 g/Nm³:n arvoon. (VÄÄNÄNEN 2017, 17)

Kiintoainekki, joka ei lähde takaisin kiertoon siirretään savukaasunpuhdistuksen tuhkasiilon. Turboreaktori ja kiertoleijukerros saavat aikaan erittäin pitkiä viipymäaikoja. Pitkät viipymäajat tehostavat puhdistuskykyä sekä lisäaineen käyttöä. Kierrätetyn kiintoaineiden määrää säädetään reaktorin tulon ja lähdön välillä mitattuun painoeroon sekä savukaasun tilavuusvirtaan. Tämä tarkoittaa sitä, että leijukerroksen aiheuttama painohäviö pidetään vakiona.

Turboreaktori vaatii riittävän korkean savukaasun tilavuusvirran leijutusta varten. Savukaasuvirtauksen määrän ollessa pieni, alle 60% nimellisestä savukaasu virtauksesta, osa puhdistetusta savukaasusta joudutaan kierrättämään takaisin turboreaktoriin. Tällöin kiertokaasukanavan ohituspelti aukeaa, jolloin puhdistettu savukaasu virtaa takaisin ja sekoittuu raakakaasuun ennen reaktoria. Näin toimimalla turboreaktorissa saadaan pidettyä yllä riittävän suuri savukaasun tilavuusvirta, jotta leijutus saadaan aikaan.



Kuva 6. Turboreaktori kaaviokuva (VÄÄNÄNEN 2017, Liite 2)

4.2.4 Letkusuodatin

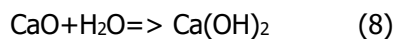
Letkusuodatin sijaitsee puhdistusjärjestelmässä turboreaktorin jälkeen. Savukaasut kulkevat suodattimen läpi savukaasupuhaltimen avulla, joka imee savukaasut letkusuodattimen läpi. Letkusuodatin on neliosainen kammiosuodatin. Siinä on pystysuuntaiset suodatinelementit. Turboreaktorilta tuleva savukaasu johdetaan kapenevan raakakaasukanavan kautta suodattimeen, jossa se jakautuu tasaisesti suodattinkammioihin. Jokaiselle suodattinkammioille on raakakaasun sulkupelti. Suodattimella olevat jakopellit varmistavat sen, että savukaasu jakautuu tasaisesti suodatinpusseihin. Pöly erottuu savukaasusta suodatinpussien ansiosta ja se muodostaa suodatuskakun sen pintaan, joka mahdollistaa hienon pölyn erottamisen. Savukaasun viertaus kohdistuu suodatinpussien ulkopuolelta sisäpuolelle. Sisäpuolelta savukaasu päättyy kaasunpuhdistuksen tai hienon pölyn erotuksen jälkeen suodattinkammioiden puhtaan kaasun kanavaan. Suodattinkammioiden puhtaan kaasun erotusmekanismina toimivat puhtaan kaasun sulkupellit. Puhtaan kaasun kanavasta savukaasu virtaa puhtaan kaasun sulkupeltien kautta suodatinjärjestelmän yhteiseen kaasunkerukanavaan, josta se virtaa edelleen savukaasupuhaltimelle. (VÄÄNÄNEN 2017, 21).

Letkusuodattimen suodatinsuppiloihin kertyvä poistettu pöly tyhjennetään reaktiotuotteiden kierrätysjärjestelmään. Suodatinkotelot sekä -suppilot ovat lämpöeristettyjä. Suodatinsuppilot ovat lisäksi saattolämmitettyjä. Tämä ehkäisee lämpötilojen laskun savukaasujen kastepisteen alapuolelle. Kiintoaineet, jotka ovat kierrätetty kaasunpuhdistuksesta letkusuodattimiin, ohjataan reaktiotuotteiden kierrätyspuppiloon. (VÄÄNÄNEN 2017, 25).

4.3 Savukaasujen puhdistuslaitoksen lisäainejärjestelmä

Lisäainejärjestelmä koostuu poltetun kalkin siilosta, kalkinsammuttimesta, syöttöjärjestelmällä varustetusta sammutetun kalkin siilosta ja syöttöjärjestelmällä varustetusta aktiivihilisiilosta. Lisäainejärjestelmä syöttää poltettua kalkkia kalkinsammuttimeen. Kalkinsammuttimessa poltettu kalkki CaO hydratoidaan sammutetuksi kalkiksi Ca(OH)₂. Sammutettu kalkki varastoidaan omaan siiloonsa, josta sitä syötetään turboreaktorin alaosaan aktiivihilen kanssa. (VÄÄNÄNEN 2017, 25).

Savukaasujen puhdistukseen käytettävät lisäaineet ovat sammutettu kalkki ja aktiivihili. Laitoksen sammutetun kalkin valmistukseen käyttämä poltettu kalkki kuljetetaan kuorma-autoilla. Kuorma-autot purkavat poltetun kalkin CaO-varastosiiloon. CaO-varastosiilo toimii hydratointilaitoksena ja sen varastokapasiteetti on 100 m³. CaO-siilosta poltettu kalkki annostellaan annostelusäiliöön, josta se syötetään sulkusyötintä käyttäen punnitsevalle ruuvikuljettimelle. Ruuvikuljetin annostelee poltetun kalkin hydratointilaitokseen. Hydratointilaitos muodostuu esihydraattorista ja hydraattorista. Ruuvikuljetin syöttää poltetun kalkin esihydraattoriin, johon poltettu kalkki annostellaan. Hydratointi tapahtuu seuraavan reaktion mukaan:

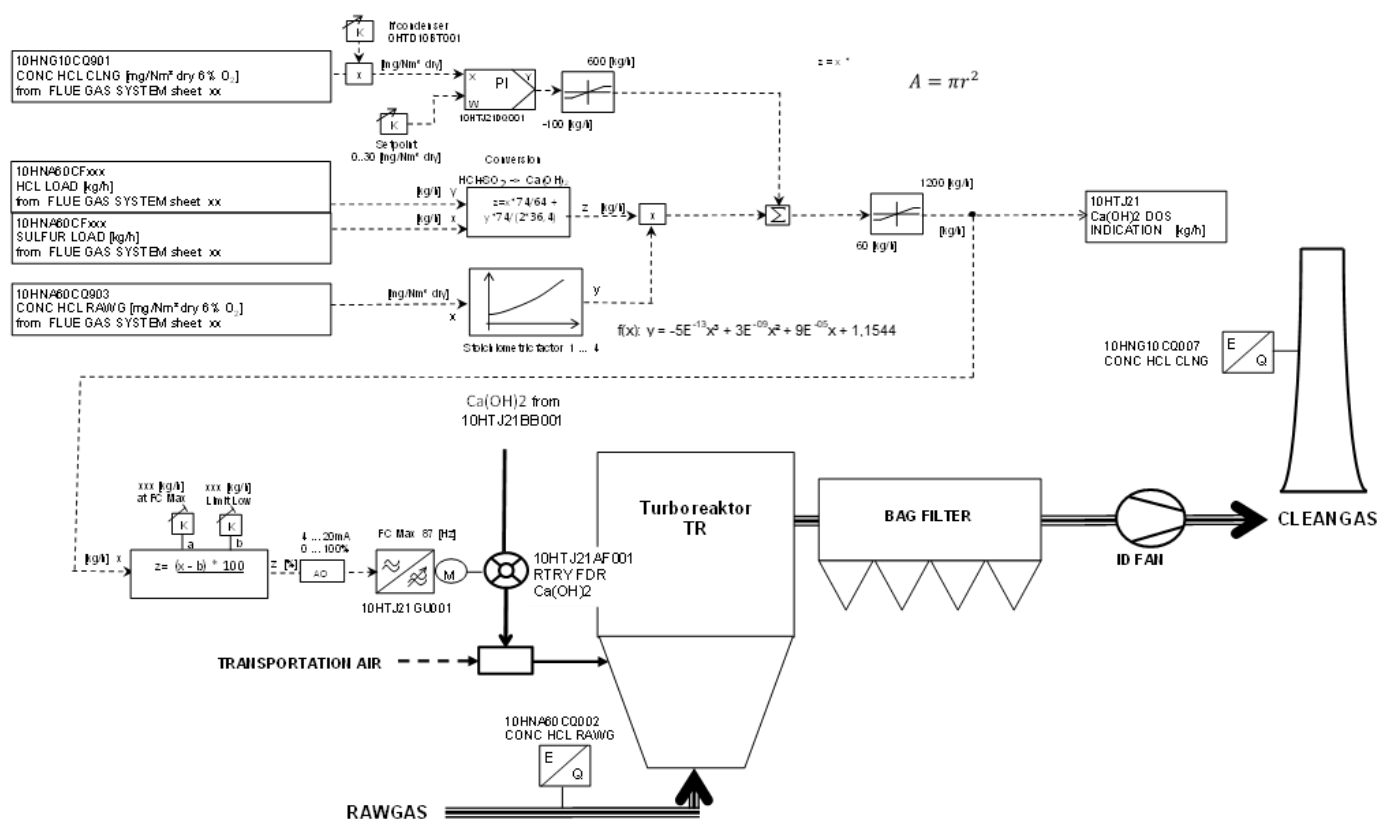


(VÄÄNÄNEN 2017, 26).

Yhden kalkkikilon (100 % CaO) sammutukseen vaaditaan stoikimetrisesti 0,32 kg vettä. Osa sammutusvedestä kuitenkin poistuu prosessista höyrynä reaktion (8) eksotermisyyden vuoksi. Tämän takia prosessivettä käytetään n. kaksinkertainen määrä stoikimetriseen kertoimeen nähden. Prosessivettä suihkutetaan esihydraattoriin ja sen vesivirtaa säädellään hydraattorin lämpötilan mukaan, jotta materiaali pysyy kuivana koko sammutuksen ajan. Lämpötilan mittaus tapahtuu päähydraattorin kolmella erilaisella lämpöparilla ja esihydraattorin jatkuva vesiruiskutus säätelee keskilämpötilaa. Sammutusveden ja poltetun kalkin sekoitus tapahtuu kauhasekoittimella hydratointikammiossa. Hydratointilaitoksen valmistama kuiva ja pulverimainen sammutettu kalkki siirretään säilöön Ca(OH)₂-siiloon. (VÄÄNÄNEN 2017, 26-27).

Ca(OH)₂ – syötön säätö

Ca(OH)₂ eli sammutetun kalkin syötön avulla savukaasuista puhdistetaan happamia kaasukomponentteja. Syötön ohjaus muodostuu kahdesta osasta, HCl-säätö ja myötäkytkentäosa (kuva 7). Myötäkytkentäosa laskee Ca(OH)₂-virtausarvon. Siihen vaikuttavat kloridin ja rikin määrä. Rikkikuorma lasketaan turboreaktorin yläosan savukaasuvirrasta sekä SO₂-pitoisuuden tulevan ja lähtevän erosta. Rikkikuorma kerrotaan stoikiometrisen kertoimen funktiolla. Kloridikuorma lasketaan turboreaktorin yläosan savukaasuvirrasta sekä HCl-pitoisuuden tulevan ja lähtevän erosta. HCl-kuorma kerrotaan stoikiometrisen kertoimen funktiolla. HCl-pitoisuutta reaktorin jälkeen ylläpidetään säädöllä, jonka lähdöllä (-100...600 kg/h) korjataan myötäkytkentäosan laskemaa asetusarvoa. Tämä säädin saa takaisinkytkentänsä piipun HCl-mittauksesta. Kun piipussa mitattu HCl-arvo on suurempi kuin sen asetusarvo, säätimen lähtö kasvaa. Normaalisti säädintä käytetään A/I-tilassa. Sen asetusarvo annetaan käsin (oletus 7 mg/m³n (ref 11% O₂)). Sammutetun kalkin virtausasetus voi olla maksimissaan 1200 kg/h ja minimissään 60 kg/h. Sammutetun kalkin virtausasetus muunnetaan sulkyöttimen nopeudeksi. (VÄÄNÄNEN 2017, 37)



Kuva 7. Ca(OH)₂ - syötön säätö (VÄÄNÄNEN 2017, 37)

4.4 Reaktiotuotteiden kierrätysjärjestelmä

Reaktiotuotteiden kierrätysjärjestelmä kerää letkusuodattimessa poistetun pölyn ja sivutuotteet reaktiotuotteiden kierrätyspölypölyyn, josta ne siirretään ilmaliulla turboreaktorin alapuolella oleviin syöttökanaviin. Kierrätetyn reaktiotuotteen määrää säädellään ilmaliussa olevien annostelurullien avulla. (VÄÄNÄNEN 2017, 20).

Turboreaktorista lähtevä pölypitoinen savukaasu kulkee letkusuodattimelle, jossa savukaasusta erotellaan pöly. Eroteltu pöly laskeutuu suodatinsuppiloon, joka on eristetty ja saattolämmitetty. Suodatinsuppilolta pöly johdetaan ilmaliukujen avulla reaktiotuotteiden kierrätyspölypölyyn. Suurin osa kiertävästä reaktiotuotteesta siirretään takaisin kiertoan turboreaktoriin. Osa erotetusta kiintoaineksesta poistetaan kierrosta. Ne johdetaan takaisin turboreaktoriin ilmaliu'ulla varustetulla leijutuspuhaltimella. Kierrätysmäärää säädellään annostelurullalla. Käytettävä leijutuspuhaltin, joita on kaksi ja joista toinen on aina valmiustilassa. Reaktiotuotteiden kierrätysjärjestelmän hätäpysäytystä varten ilmaliu'ussa on myös sulkupelti. (VÄÄNÄNEN 2017, 20).

4.5 Savukaasujen prosessivesijärjestelmä

Prosessivesijärjestelmä optimoi turboreaktorin olosuhteet suihkuttamalla prosessiveden turboreaktoriin. Ruiskutus tapahtuu korkeapaineisella prosessivesipumpulla korkeapainesuuttimien kautta. Prosessivesijärjestelmän osat ovat prosessivesitulon sulkupelti, prosessivesitankki, prosessivesipumput, turboreaktorin prosessiveden säätöventtiili, turboreaktoriin asennettu prosessivettä suihkuttava vesilanssi. (VÄÄNÄNEN 2017, 30).

Vesi ruiskutetaan turboreaktoriin käyttämällä korkeapaineista paluuvirtaussuutinta, joka on kiinnitetty suutinlanssiin. Yksi pumppu on aina valmiustilassa, jotta se voi alkaa toimimaan ongelman satuttaessa käytössä olevaan pumppuun. Pumppujen jälkeen on virtausmittaus. Pumput kasvattavat veden paineen yli 35 bariin suihkutusta varten. Vesilanssi on liitetty korkeapainepumppujen syöttövesiputkistoon ja prosessivesijärjestelmän paluuvirtaputkistoon. Vesilanssi on kiinnitetty vaakasuuntaisesti turboreaktoriin ja sen suuttimen suihkukuvio on ontto kartio ja suihkutuskulma 90°. Prosessiveden säätöventtiili, joka sijaitsee paluuvirtaputkistossa, säätelee turboreaktoriin suihkutettavan prosessiveden määrää. Säättely perustuu turboreaktorin lämpötilan pitämiseen tasaisena ja sen asetusarvo on 135-145°C. Ruiskutetun veden määrä myös esilasketaan savukaasuvirtauksen ja savukaasun tulolämpötilan ja turboreaktorin lämpötilan asetusarvon eron perusteella. Virtausmittaus sijaitsee ennen prosessiveden säätöventtiiliä. Turboreaktoriin ruiskutetun veden määrä lasketaan pumppujen virtauksen ja prosessiveden säätöventtiilin erotuksen perusteella. (VÄÄNÄNEN 2017, 30).

4.6 Savukaasulauhdutin

Savukaasulauhdutin lisää voimalaitoksen kaukolämmöntuotantoa. Se tapahtuu lauhduttamalla vesi-höyryä savukaasuista ennen piippua. Savukaasulauhdutin poistaa tehokkaasti happamia komponenttejä sekä kiintoainesta savukaasuista. Savukaasulauhduttimen muita tehtäviä ovat syntyvän lauhteen neutralointi, lauhteen kiintoaineen erotus ja syntyneen lietteen pumppaaminen kattilalle. Koko savukaasun lauhdutuslaitos koostuu savukaasun lauhduttimesta, kaukolämmönvaihtimesta, jätevedenkäsittelystä sekä niihin liittyvistä prosessiputkista, venttiileistä ja mittauksista. Savukaasut tulevat lauhduttimeen sen alaosasta ja ne lauhdutetaan suihkuttamalla vettä lauhdutintornin yläosassa olevista suuttimista. Suihkutuksen ansiosta savukaasut jäähtyvät kastepisteeseensä, jolloin niiden sisältämä kosteus tiivistyy pisaroiksi kaasuvirrassa oleviin hiukkasiin. Nämä muodostuneet pisarat erotetaan savukaasusta pisaranerottimella. Pisaranerotin sijaitsee lauhduttimen yläosassa. Lauhde kertyy lauhduttimen alaosaan, josta se pumpataan kaukolämmönvaihtimeen. Siellä lauhde jäähdytetään kaukolämpöveden avulla ja johdetaan takaisin ruiskutettavaksi lauhduttimen yläosaan. Ylimääräinen lauhdevesi poistetaan kierrosta, kun säädetään lauhduttimen pinnankorkeutta. Sääto tapahtuu säätoventtiilin avulla. Se johdetaan lietesäiliöön, jossa se selkeytetään ja sieltä pH:n tasaussäiliöön. Lauhde neutraloidaan pH:n tasaussäiliössä 50-prosenttisella NaOH-liuoksella. (VÄÄNÄNEN 2017, 6). Savukaasulauhduttimen mitoituksen lähtötiedot sekä mitoitusarvot löytyvät alla olevista taulukoista 4 ja 5.

Taulukko 4. Lauhduttimen mitoituksen lähtötiedot (VÄÄNÄNEN 2017, 11)

Tulevan savukaasun mitoituslämpötila	°C	156
Tulevan veden lämpötila mitoitusasteessa enintään	°C	50
Veden virtaus lauhduttimen kierrossa enintään	kg/s	150
Laskettu lämmön talteenotto mitoitusasteessa	MW	6,79

Taulukko 5. Savukaasulauhduttimen mitoitusarvot (VÄÄNÄNEN 2017, 14)

Savukaasuvirtaus, maks.	m ³ /h	149 000
Tulevan savukaasun lämpötila*, maks.	°C	200
Kaasun pölypitoisuus, maks.	mg/m ³ n	10
Lauhduttimen veden lämpötila, maks.	°C	65
Painehäviö, maks.	Pa	1 000
Suutinpaine, maks.	bar	0,9

*Savukaasujen pääsy lauhduttimeen tässä lämpötilassa on estetty turvatoimin.

4.7 Savukaasuanalysointilaitteet

Työn kannalta oleellimmat analysointilaitteet laitoksella ovat raakakaasuanalysointilaitteet sekä CEMS-analysointijärjestelmä. Raakakaasuanalysointilaitteet sijaitsevat ennen turboreaktoria ja CEMS-analysointijärjestelmä piipussa.

Raakakaasuanalysointilaitteet – MCS300P

Riikinvoiman ekovoimalaitoksen raakakaasuanalysointilaitteet on MCS300P-mallinen näytettäottava prosessifotometri. Se mittaa IR- ja VIS-aktiivisia komponentteja (Sick.com). MCS300P on ei dispersiivinen analysointilaitteet. Se mittaa HCl, SO₂ sekä H₂O-pitoisuuksia ennen turboreaktoria. HCl- ja SO₂-pitoisuuksia ennen turboreaktoria tarvitaan kalkin syötön säädössä (kappale 4.3).

Infrapunaspektrometria perustuu siihen, että kaikki kaasut, lukuun ottamatta jalokaasuja ja kaksiatomisia, samanytimisiä kaasuja (esim. O₂, N₂), absorboivat infrapunasäteilyä kullekin kaasullespesifisillä aallonpituuksilla. IR-tekniikalla mitataan mm. CO, CO₂, SO₂, NO ja HCl. Käytetyt mittalaitteet voidaan jakaa ei-dispersiivisiin ja dispersiivisiin analysointilaitteisiin. Ei-dispersiivisissä analysointilaitteissa aallonpituuskaista valitaan optista suodatinta käyttäen mitattavalle kaasulle sopivaksi ja laitteet ovat pääsääntöisesti ns. yksikomponenttianalysointilaitteita. Dispersiivisissä analysointilaitteissa puolestaan analysoidaan laajempi aallonpituuskaista ja tällainen analysointilaitteet on mm. FTIR-analysointilaitteet. (VTT 2007. Päästömittausten käsikirja Osa 1, 28)

CEMS – MCS100FT

Riikinvoimalla CEMS-MCS100FT- analysointijärjestelmä sijaitsee piipussa. Se mittaa laitoksen piipusta lähtevän savukaasun HCl, HF, CO, NO₂, NO_x, SO₂, CO₂, H₂O, O₂, CH₄ ja NH₃-pitoisuuksia sekä painetta ja lämpötilaa. Mittauksilla ylläpidetään laitoksen optimaalista toimintaa sekä luparajojen noudattamista. Esimerkiksi HCl-päästön säätö, takaisin kytkentä, tapahtuu piipunmittauksen avulla. Turboreaktoriin syötettävän kalkin määrä säätyy piipunmittauksen ilmoittaman HCl-pitoisuuden ja asetusarvon mukaan (kappale 4.3).

CEMS on FTIR-tekniikalla toimiva analysointijärjestelmä. Tekniikka soveltuu erittäin hyvin kohteisiin, joissa on tarkoituksena mitata jatkuvatoimisesti useiden eri yhdisteiden pitoisuuksia.

FTIR-analysointilaitteilla voidaan määrittää jatkuvatoimisesti useiden eri yhdisteiden pitoisuuksia. FTIR-tekniikalla voidaan esimerkiksi määrittää HCl-pitoisuus jatkuvatoimisena kertanäytteenoton sijasta. Analysointi FTIR-tekniikalla tapahtuu kosteista savukaasuista, jolloin vesi on yksi mitattavista suureista ja täten näytekaasua ei tarvitse kuivata. Tämä estää mahdolliset mittausvirheet, jotka voivat syntyä kaasujen kuivauksessa. FTIR-tekniikalla on mahdollista mitata useampia eri suureita kuin perinteisillä mittausmenetelmillä. Mahdollisia mitattavia suureita ovat esim. HCl, HF, CO, NO₂, NO_x, SO₂, CO₂, H₂O, O₂, CH₄ ja NH₃. (VTT 2007. Päästömittausten käsikirja Osa 1, 29)

Infrapunatekniikassa on myös ongelmansa, jotka opinnäytetyön ongelman selvityksessä otetaan huomioon:

Infrapunatekniikassa kaasun absorptioon vaikuttaa lämpötila ja paine, mikä nykyisissä analysaattoreissa on otettu huomioon jo valmistusvaiheessa. Ongelmana IR-tekniikassa on se, että jotkut kaasut absorboivat valoa samalla aallonpituusalueella kuin mitattava kaasu. Esimerkiksi savukaasuissa vesi ja hiilidioksidi häiritsevät hiilimonoksidin mittausta. (VTT 2007. Päästömittausten käsikirja Osa 1, 29)

5 KOESARJAN SUUNNITELMA JA MITTAUSJÄRJESTELYT

Tämä opinnäytetyö on tutkimustyö, jossa selvitetään kohdelaitoksella esiintyvään savukaasunpuhdistukseen liittyvä ongelma. Koesuunnitelmaa varten kerättiin teoretietoa (luvuissa 3 ja 4).

5.1 Näytteenotot

Kun savukaasulauhdutin on käytössä, HCl-pitoisuudet ovat alhaiset. Savukaasulauhduttimen alasajossa kuitenkin HCl-pitoisuudet nousevat nopeasti ja puolen tunnin luparaja ylittyy. Epäilyksenä on, että turboreaktorissa ei ole tarpeeksi sammutettua kalkkia kierrossa ennen alasajoa. Tämä johtuu siitä, että savukaasulauhdutin puhdistaa savukaasuista tehokkaasti suolahappoa, joten puhdistusjärjestelmä ei syötä uutta sammutettua kalkkia kiertoa lähellekään yhtä paljon kuin ilman savukaasulauhdutinta ajettaessa. Kun pesuri ajetaan alas niin sammutettua kalkkia ei ole tarpeeksi kierrossa, josta todennäköisesti kyseinen HCl-piikki johtuu. Järjestelmä ei ehdi syöttää tarpeeksi uutta reaktiivista sammutettua kalkkia kiertoa, jotta se pystyisi itsestään estämään HCl-piikin. Tämä johtuu siitä, että savukaasujärjestelmän päästömittaukset sijaitsevat ennen turboreaktoria sekä piipussa, joihin kalkinsyötön säätö perustuu. Kalkinsyötön säätö on esiteltynä kappaleessa 4.3. Kalkinsyöttö reagoi kasvattamalla tai vähentämällä kalkinsyötön määrää piipunmittauksen ilmoittaman arvon ja asetusarvon eron perusteella.

Tarkoituksena on saada reaaliaikaista tietoa savukaasun HCl-pitoisuudesta turboreaktorin ja letkusuodattimen jälkeen ennen pesuria, pesurin ollessa ajossa. Tiedon saamiseksi letkusuodattimen ja savukaasulauhduttimen välissä olevaan pystysuoraan savukaasukanavaan asennetaan päästömittauslaite ja suoritetaan koeajoja. Tämä tiedon avulla on mahdollista syöttää sammutettua kalkkia tarpeeksi kiertoa turboreaktoriin ennen kuin pesuri ajetaan alas. Mittauksen avulla saadaan selville, milloin savukaasun HCl-pitoisuus on alle päästörajan letkusuotimen jälkeen, jolloin pesuri voidaan ajaa alas ilman luparajan ylitystä. Koeajojen avulla saadaan tietoa HCl-pitoisuuksista ennen savukaasulauhdutinta sekä mahdollisesti tehtyä ajo-ohje operaattoreille savukaasulauhduttimen alasajoa varten. Koeajoilla selvitetään myös piipussa sijaitsevan mittalaitteen toiminta vertaamalla sitä koeajojen ajaksi asennettuun mittalaitteeseen.

Mittausten aikana otetaan näytteitä laitoksen valmistamasta kalsiumhydroksidista sekä kiertävästä reaktiotuotteesta. Tarkoituksena on varmistaa savukaasujen puhdistuksessa käytettävän kalsiumhydroksidin laatu sekä selvittää kuinka paljon kiertävän reaktiotuotteen laatu heikkenee savukaasulauhduttimen ollessa käytössä.

Ennen koeajojen alkua tulee varmistaa, että kattilalaitos on normaaliajossa eikä mitään poikkeavaa ole aloitushetkellä. Savukaasujen puhdistusprosessin toimivuuden varmistamiseksi tulee tehdä seuraavat toimenpiteet: Turboreaktorin vesilanssin puhdistaminen, varmistaa riittävä sammutetun kalkin määrä, pitää pesuri riittävän aikaa ajossa sekä varmistaa lisäaineen syöttöletkujen puhtaus.

5.2 Savukaasujen mittausjärjestelyt

Mittalaite

Koeajojen aikana käytössä oleva mittalaite on Gasetin DX 4000 FTIR-savukaasuanalysointilaite. Sen mukaan kuuluu ZrO₂ happianturi PSP- 4000H näytteenottosondi. Savukaasuanalysointilaitea operoidaan tietokoneella Calcmet-ohjelmistoa käyttäen. Mittalaite saadaan käyttöön Savonia-ammattikorkeakoulun energiatutkimukselta. Savonian energiatutkimuksen toimihenkilöt huolehtivat laitteiston asennuksesta sekä muista oikean toimivuuden takaavista toimenpiteistä.

Mittauspaikka

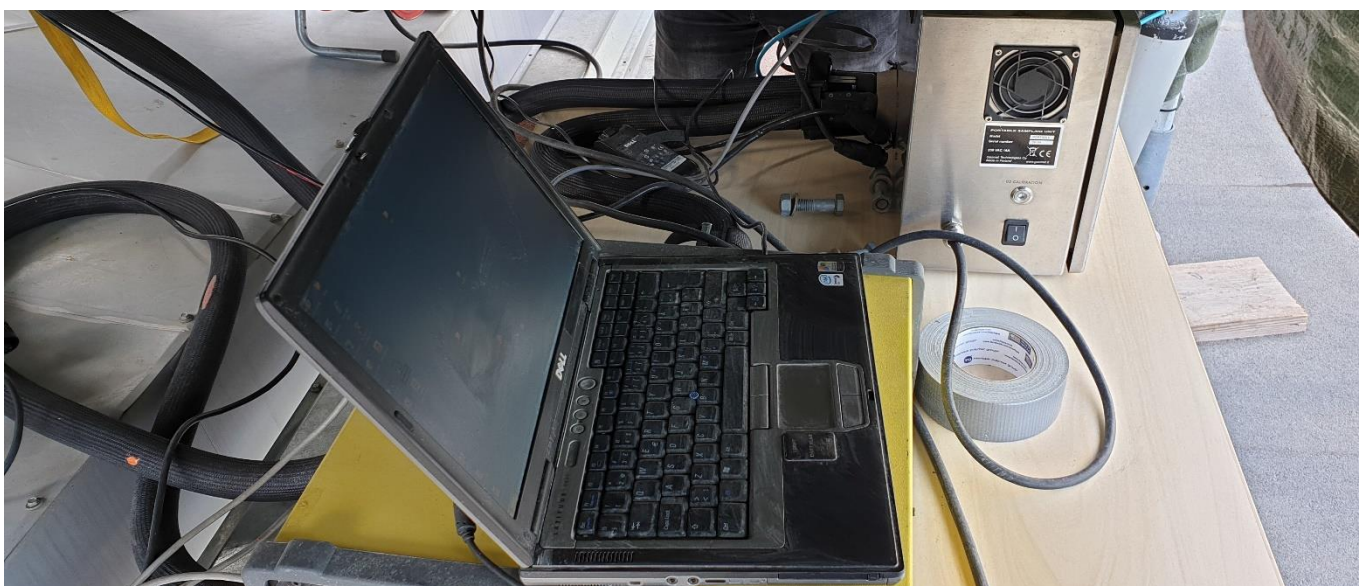
Mittauspaikka, josta mittaukset suoritetaan, sijaitsee savukaasupuhallinhuoneen katolla ulkona, jonne on pääsy hissillä kattilahuoneen neljännen kerroksen kautta. Mittauspaikka on pystysuora savukaasukanavan kohta, joka tulee letkusuodattimelta savukaasupuhaltimelle. Savukaasuvirtaus kanavassa liikkuu ylhäältä alaspäin. Savukaasukanavan halkaisija on 2200mm sekä sen pituus on 16 606mm. Näyttöönottopaikalta häiriötöntä etäisyyttä ylöspäin on 11 247mm ja alaspäin 2437mm. Kanavassa on useita laippayhteitä, josta mittauksen voi suorittaa. Laippayhteiden putken koko on DN100 (Kuva 8.). Mittauspaikalla sijaitsee myös laitoksen omia mittauksia, kuten pölynpitoisuusmittaukset. Tarkemmat tiedot savukaasukanavasta löytyvät liitteestä 1. Mittauspaikalle rakennettiin telineet, jotka peitettiin pressuilla mittalaitteiden suojaamiseksi sääolosuhteilta. Laitteet sijoitettiin pöydän päälle, jottei valuvat sadevedet kastelisi niitä (Kuvat 9. ja 10.).



Kuva 8. Mittauspaikan laippayhteet (Miro Lilja)



Kuva 9. Mittaussondi (kaasumaiset komponentit) savukaasukanavassa (Miro Lilja)



Kuva 10. Mittauslaitteistoa (Miro Lilja)

Savukaasun kosteus ja lämpötila

Savukaasulauhduttimen tulevan savukaasun mitoitustilänpötila on 156°C (Kappale 4.4). Savukaasulauhduttimen ollessa käytössä, turboreaktorin lämpötilasäätöä ei saada laskettua alle 145°C. Savukaasulauhduttimen ollessa käytössä piipusta poistuvan savukaasun lämpötila on n. 40-50°C. Savukaasulauhduttimen ollessa pois käytöstä, piipusta lähtevien savukaasujen lämpötilä kohoaa n.90°C

(40-50°C→135-145°C) ja kosteus kasvaa muutaman prosentin verran. Tarkoituksena on selvittää, onko kosteuden ja lämpötilan muutoksella hetkellistä vaikutusta mittalaitteen toimintaan. Tämä saadaan selville koeajon avulla. Jos piipusta mitatut tulokset ovat yhteneviä savukaasukanavan tuloksiin ei näillä tekijöillä ole vaikutusta. Jos tulos on päinvastainen, asiaa tulee selvittää. Mittalaitetoimittajan edustajan mukaan savukaasujen lämpötilan ja kosteuden muutos eivät ole aiheuttaneet mittalaitteen toiminnassa häiriötä. Analysaattorilla näytteenottolinjalla on vakaa 180°C lämpötila, joten lämpötilan muutoksella ei ole vaikutusta analyysituloksiin. Riikinvoimalla on tehty QAL 2- sekä AST-mittaukset ja muut asiaan kuuluvat huollot ja kalibroinnit onnistuneesti. Tästä syystä epäily mittalaitteen virheellisestä toiminnasta on häviävän pieni, mutta sekin saadaan varmistettua koeajojen avulla.

HCl-mittauksen IR-spektri

HCl-mittaus jatkuvatoimisesti perustuu FTIR-menetelmään. Jos piipun mittauksessa todetaan olevan ongelma, IR-spektrin häiriöiden merkitys tulee selvittää. Selvitetään, onko jollain toisella aineella samankaltainen Ir-spektri, josta virhe voisi johtua. Selvitetään myös, mistä ja miksi kyseistä ainetta ajautuu savukaasulauhduttimen alasajon jälkeen piipun mittaukseen. Selvitetään aiheuttaako jokin häiriötä HCl:n mittaukseen IR-tekniikalla.

5.3 Sammutetun kalkin laadunvarmistus

Tarkoituksena on varmistaa laitoksen valmistaman sammutetun kalkin laatu. Selvitetään, onko kalkin hydratoinnissa ongelma, jolloin kalkinsammutuslaitos ei tuota riittävän hyvälaatuista sammutettua kalkkia. Jos kalkki on huonolaatuista, puhdistusprosessista tulee näin ollen tehottomampaa, joten sammutettua kalkkia joudutaan syöttämään prosessiin enemmän. Tämä aiheuttaa viivettä pitoisuuksien hallintaan etenkin äkillisissä tilanteissa. Se lisää myös kustannuksia, kun kalkkia joudutaan kulluttamaan suurempi määrä. Sammutetulle kalkille on annettu laatuvaatimukset, joita sen tulee noudattaa puhdistuksen optimaalisen toiminnan takaamiseksi (Taulukko 6.).

Taulukko 6. Sammutetun kalkin laatuvaatimukset (VÄÄNÄNEN 2017, 13)

Sammutettu kalkki $\text{Ca}(\text{OH})_2$	Yksikkö	Alue	Suositus
Irtotiheys	kg/m^3	430 - 540	
Vapaa, reaktiivinen $\text{Ca}(\text{OH})_2$	[%]	80 - 90	> 90
$\text{CaO} + \text{MgO}$			> 92 %
MgO			< 1 %
Kosteus	[%]	< 2	< 1
Ominaispinta-ala (BET-menetelmä)	[min.]	15 - 20	> 20
Partikkelikoko		> 0,2 mm, seulontajätettä < 2 % > 0,09 mm, seulontajätettä < 7 %	
Keskimääräinen partikkelikoko (>50 %)	[μm]		< 5

Sammutetun kalkin laadun varmistamiseksi siitä tulee ottaa näytteitä. Näytteet lähetetään laboratorioille analysoitaviksi ja tulosten perusteella nähdään, vastaavatko ne laitetoimittajan savukaasunpuhdistuksen toimintakuvauksessa annettuihin ohjearvoihin (Taulukko 6.). Kalkin laadun perusteella voidaan päätellä Riikinvoiman kalkinsammutuslaitoksen oikeanlainen toimivuus. Näyte sammutetusta kalkista otetaan hydraattorilla sijaitsevasta näytteenottopisteestä. Näyte tulisi ottaa aina silloin, kun uutta sammutettua kalkkia valmistetaan. Näytteitä otetaan useampi kappale ja ne lähetetään kaikki kerralla analysoitaviksi. Näytteisiin merkitään näytteenotto päivämäärä.

Kiertävästä reaktiotuotteesta otetaan myös näytteet. Näytteenotto tapahtuu savukaasulauhduttimen ollessa käytössä, koska näytteenoton tarkoituksena on tarkkailla puhdistusjärjestelmässä kiertävän sammutetun kalkin laadun muutoksia. Näytteet lähetetään laboratorioon, jossa näytteistä analysoidaan niiden sisältämä reagoivan kalkin määrä.

5.4 Prosessivesi sekä turboreaktorin lämpötila

Vesiruisutus turboreaktoriin lisää lisäaineen reaktiivisuutta, joten periaatteessa mahdollisimman alhainen lämpötila turboreaktorissa olisi optimaalista. Kuitenkin turboreaktorin käyttö liian alhaisella lämpötilalla aiheuttaa CaCl_2 :n paakkuuntumista. (VÄÄNÄNEN 2017, 39). Turboreaktorin toiminnalle optimaalinen lämpötila on 135-145°C välillä.

Turboreaktorin lämpötila-asetuksia ja niiden vaikutuksia suolahapon poistoon testataan koeajojen aikana. Prosessin tulisi toimia tehokkaammin alhaisemmalla lämpötilalla, jolloin prosessiin syötettävän veden määrä on suurempi.

Prosessiveden laatu tulee varmistaa, jotta turboreaktorissa tapahtuva savukaasujen puhdistus tapahtuu optimaalisella tavalla. Vesi on raakavettä, joka tulee Keski-Savon vedeltä. Keski-Savon vedeltä saadaan selvitettyä tulevan raakaveden laatuparametrit. Näitä tietoja verrataan laitetoimittajan toimintakuvauksesta löytyvään prosessiveden laadun ohjearvoihin (Taulukko 7). Selvitetään myös, voidaanko prosessin toimintaa parantaa käyttämällä lämpimämpää vettä. Tällöin reaktoriin syötettävä veden määrä on suurempi ja sen myötä puhdistuksen tulisi tehostua.

Vesi saadaan lämpimämmäksi savukaasulauhduttimen puhdistetun lauhdeveden avulla. Ongelmana on, ettei lauhteen syöttämiseen prosessivesisäiliöön käytettävä pumpppu toimi. Jos pumpun saa toimimaan, koeajo voidaan toteuttaa. Koeajo ei kuitenkaan ole välttämätön opinnäytetyön tavoitteen kannalta, mutta sillä saataisiin säästöä laitokselle vähemmän raakaveden tarpeen takia sekä se saattaisi tehostaa turboreaktorin toimintaa. Suurin hyöty kyseisen pumpun toimintaan ottamisesta on selvästi sen tuomat säästöt vedenkulutukseen.

Taulukko 7. Prosessiveden ohjearvot (VÄÄNÄNEN 2017, 14)

Parametri	Yksikkö	Arvo
Lämpötila	°C	< 30
pH-arvo	-	6,5–9
Johtokyky	µS/cm	~ 500–1250
p-arvo	mmol/l	0
m-arvo	mmol/l	~ 5–5,5
Kovuus	°dH	< 20
Koostumus		
Kiintoainepitoisuus	mg/l	< 50
SiO ₂	mg/l	~ 8,4
Cl ⁻	mg/l	< 70
SO ₄ ²⁻	mg/l	< 200
Fe	mg/l	~ 1
Liukenevat suolat	mg/l	~ 400–600
KMnO ₄ - kulutus	mg/l	~ 8–9
NH ₄ ⁺	mg/l	~ 1

6 KOEAJOT

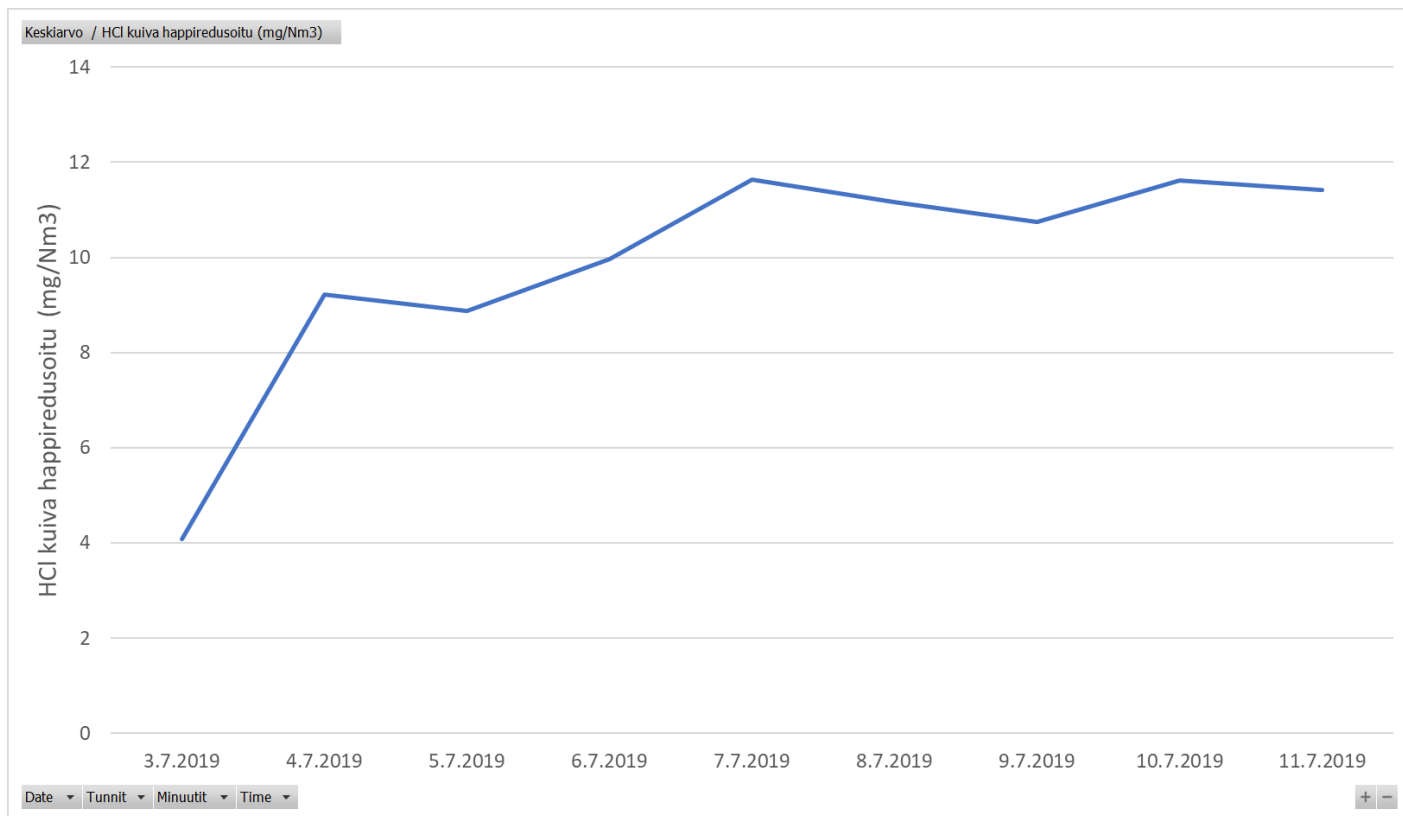
Koeajot suoritettiin 1.7.2019–31.7.2019. Tarkoituksena oli suorittaa mahdollisimman monta koeajoa erilaisilla säädöillä ongelman selvittämiseksi. Koeajoista tiedotettiin laitoksen henkilökunnalle sisäisen viestintäjärjestelmän kautta, jolla varmistettiin laitoksen savukaasunpuhdistuksen oikeanlainen käyttö koeajoja varten. Mittalaitteelta seurattiin koajojen aikana HCl-pitoisuuksia, kosteusprosenttia sekä happiprosenttia. Tuloksia otettiin talteen muistitikulla ja ne tuotiin exceliin. Excelissä mittalaitteen antamista tuloksista laskettiin HCl-pitoisuudet oikeaan muotoon ($\text{ppm} \rightarrow \text{mg}/\text{Nm}^3 \text{ dry } 11\% \text{ O}_2$), joista muodostettiin kuvaaja. Tällä keinolla oli mahdollista tarkkailla HCl-pitoisuuden kehittymistä tuloksista tehdyn kuvaajan avulla. Koeajoja suoritettiin kokeilu periaatteella. Seuraavan koeajon suunnitelma syntyi aina edellisestä koeajosta tehtyjen havaintojen perusteella. Tällä tavoin huomattiin tärkeimmät tekijät koeajojen onnistumisen varmistamiseksi sekä voitiin poissulkea vähemmän tärkeät tekijät.

6.1 HCl-mittalaitteen asennus

Ensimmäiseksi testattiin koeajojen ajaksi asennetun HCl-mittalaitteen toimivuus vertaamalla sitä laitoksen oman mittalaitteen antamiin tuloksiin. Mittalaitte asennettiin aluksi mittaamaan laitoksen piipunmittauksen kanssa samasta paikasta. Kun mittalaitteen toimivuus ja tulosten paikkansa pitävyys oli varmistettu, asennettiin mittalaitte kappaleessa 5.2 esiteltyyn paikkaan.

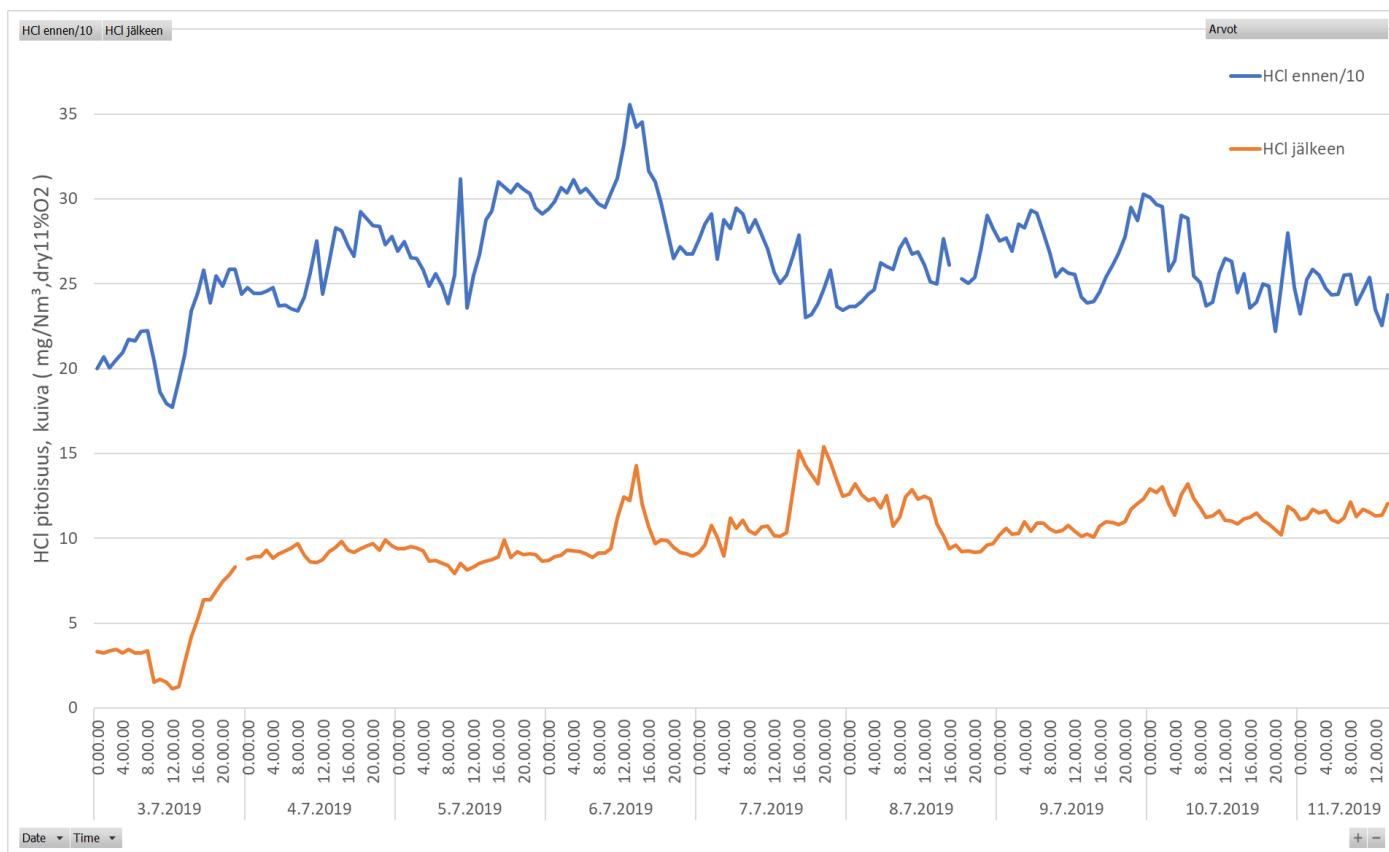
6.2 Ensimmäinen koeajo

Koeajot aloitettiin 3.7.2019 klo 14:20, jolloin laitoksen savukaasunlauhdutin otettiin käyttöön. Koeajon aikana mitattiin HCl-pitoisuuksien määrää ennen savukaasunlauhdutinta. Ensiksi tutkittiin kuinka korkeaksi HCl-pitoisuudet kasvavat savukaasulauhduttimen ollessa käytössä (kuva 11.). Koeajo kesti 11.7.2019 klo 15:50 saakka. Tuloksia haettiin mittalaitteelta päivittäin, jotta niiden seuranta olisi tarpeeksi aktiivista. Koeajon aikana kiertävästä reaktiotuotteesta otettiin näytteet päivittäin.



Kuva 11. HCl-pitoisuudet (mg/Nm³) 3.7.–11.7.2019

Tuloksia tarkastelemalla huomattiin, että HCl-pitoisuudet tasoittuvat muutaman vuorokauden kuluessa savukaasulauhduttimen käyttöönotosta. Tuloksia verrattiin raakakaasun, eli savukaasunpuhdistusjärjestelmään tulevan kaasun kanssa (Kuva 12.). Kuvassa raakakaasun HCl-pitoisuuden arvo on jaettu kymmenellä kuvaajan selkeyttämiseksi. Kuvaajia vertaamalla huomattiin, että HCl-pitoisuuden tasoittumisen jälkeiset muutokset johtuvat raakakaasun HCl-pitoisuuden määrän muutoksista. Mittaustuloksia verrattiin myös piipun vastaavaan mittalaitteeseen, jolloin huomattiin niiden eroavan. Pitoisuus piipun vastaavaan nähden on n. 1-2 mg/m³ suurempi, joka piti ottaa huomioon alasajon ajoittamisessa. Kuvaajat olivat kuitenkin samanmuotoisia, joten tulosten voidaan olettaa pitävän paikkansa. Kuvaajan perusteella päätettiin, että savukaasulauhduttimen tulisi olla vähintään 4 päivää käytössä ennen alasajokokeita. Savukaasulauhdutin käytössä ajettiin keskimäärin n. viikko ennen kutakin alasajoa. Perusteluna tällä menettelyllä oli se, että ongelma tilanne syntyy silloin, kun savukaasulauhdutin on ollut ajossa pidemmän aikaa, viikkoja tai kuukausia. Ensimmäisen koeajon perusteella tehty kuvaaja tuki tätä perustelua.



Kuva 12. HCl-pitoisuus ennen ja jälkeen turboreaktorin

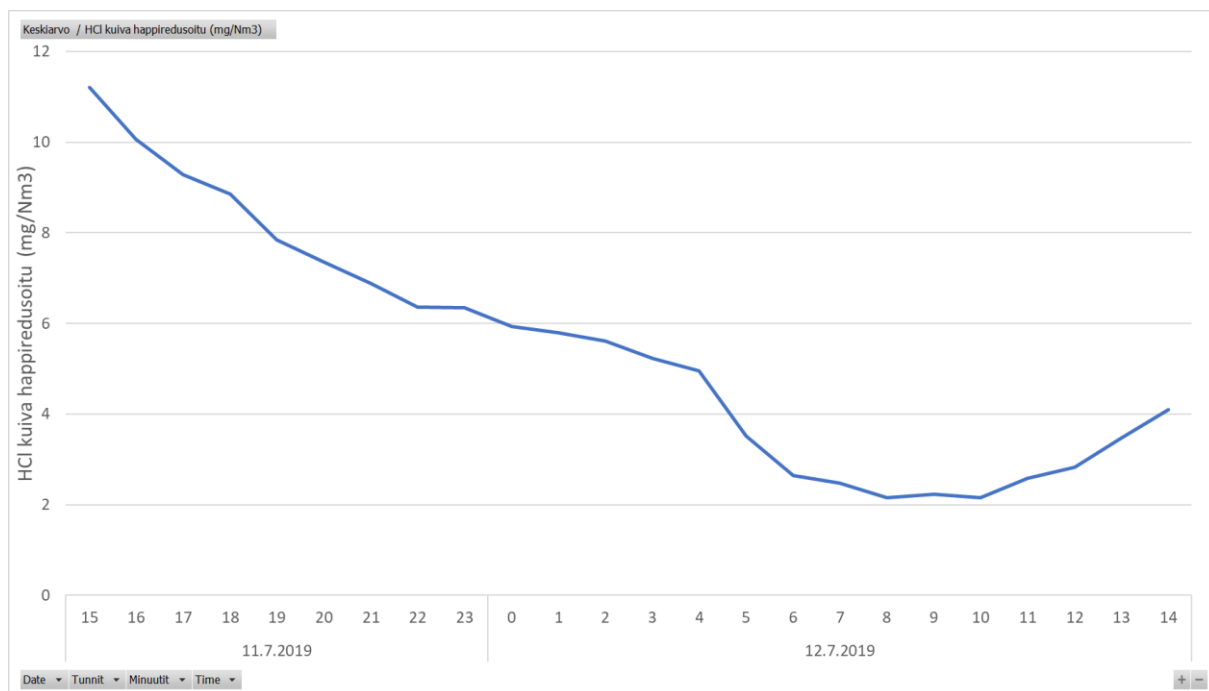
6.3 Ensimmäisen kokeen alasajo

Savukaasulauhduttimen alasajo alkoi 11.7.2019. Ennen kuin savukaasulauhdutin voidaan ajaa alas, täytyy HCl-pitoisuudet saada laskemaan riittävän alhaisiksi mittauspisteessä. Alasajon yhteydessä kokeiltiin erilaisen kalkinsyötön määrän vaikutuksia HCl-pitoisuuden pienenemisen nopeuttamiseksi. Reaktorin lämpötilasäädin ei ollut päällä, joten lämpötila oli alasajon alkaessa n. 152°C. Kalkinsyötön asetukset koeajon aikana näkyvät alla olevasta taulukosta 8. Kalkinsyöttö aloitettiin rauhallisella nopeudella ja sitä oli tarkoitus nostaa niin nopeaksi kuin mahdollista. Testin aikana huomattiin, että suurella nopeudella lisääineensyöttöjärjestelmän paineet nousevat liikaa sekä tukkeutumiseriski kasvaa. Vaikka koeajo suoritettiin loppuun sulkusyötötimen 90 % nopeudella, päätettiin seuraava koeajo suorittaa 80 % nopeudella edellä mainittujen ongelmien välttämiseksi.

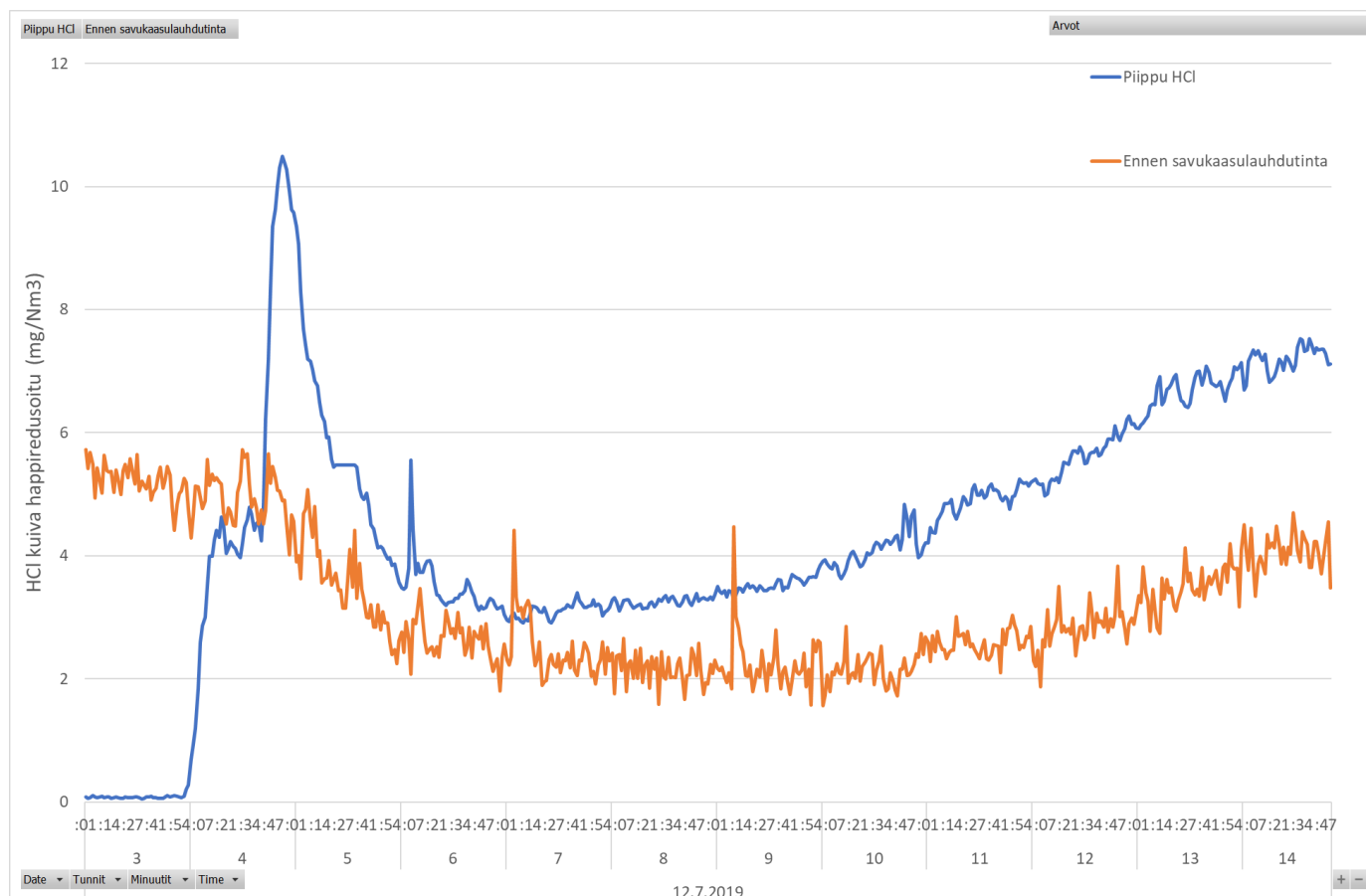
Taulukko 8. Kalkinsyöttö koeajo 1

Kellonaika	Sulkusyötötimen pyörimisnopeus (%)
15:50	50
17:50	80
21:20	100
21:23	95
21:25	90

12.7.2019 kello 03:50 päätettiin aloittaa savukaasukanavan jakopellin raottaminen. Tällöin HCl-pitoisuus oli laskenut n. 5,2 mg/Nm³ pelkästään kalkinsyöttöä lisäämällä. Jakopellin avulla savukaasu johdetaan joko savukaasulauhduttimelle tai kiertokanavan kautta suoraan piippuun. Raottamalla peltiä yritettiin saada savukaasuja kulkeutumaan yhtäaikaaisesti kumpaakin kanavaan. Tällä tavalla menettelemällä pyrittiin selvittämään, onko savukaasukanavaan jäänyt joitain epäpahtauksia, jotka liikkeelle lähtiessään aiheuttaisivat HCl-pitoisuuden kasvua. Samalla kokeiltiin pääsisikö kalkinsyöttö automaattisesti mukaan päästöjen hallintaan alasajon aikana, ilman että sen arvoa tarvitsisi manuaalisesti asettaa. Jakopelti aukaistiin hitaasti n. 1h aikana kokonaan auki. Testillä huomattiin, ettei sillä ole mitään tekemistä pitoisuuksien kasvussa. Myöskään kalkinsyötön säätöön siitä ei ollut apua, koska savukaasut pyrkivät helpompaa reittiä ohituskanavan kautta, eivätkä jakaudu tasaisesti kanaviin. Loppujen lopuksi suurin osa savukaasusta olisi kulkenut ohituskanavan kautta piippuun, jolloin pellin avaaminen olisi turhaa. Tällä tavoin menettelemällä lopputulos tulos olemaan sama kuin savukaasulauhduttimen alasajolle, joten se ei toisi mitään uutta hyötyä. Ideana oli saada HCl-säätö reagoimaan, kun ohituskanavan kautta HCl-pitoista savukaasua pääsisi piipunmittaukseen. Ohituspellin raottamisen kokeilun perusteella, päätettiin ettei seuraavissa koeajoissa kyseistä keinoa käytettäisi. Seuraavissa koeajoissa alasajo tapahtuisi pelkästään savukaasulauhduttimen pysäytyssekvenssiä käyttämällä.

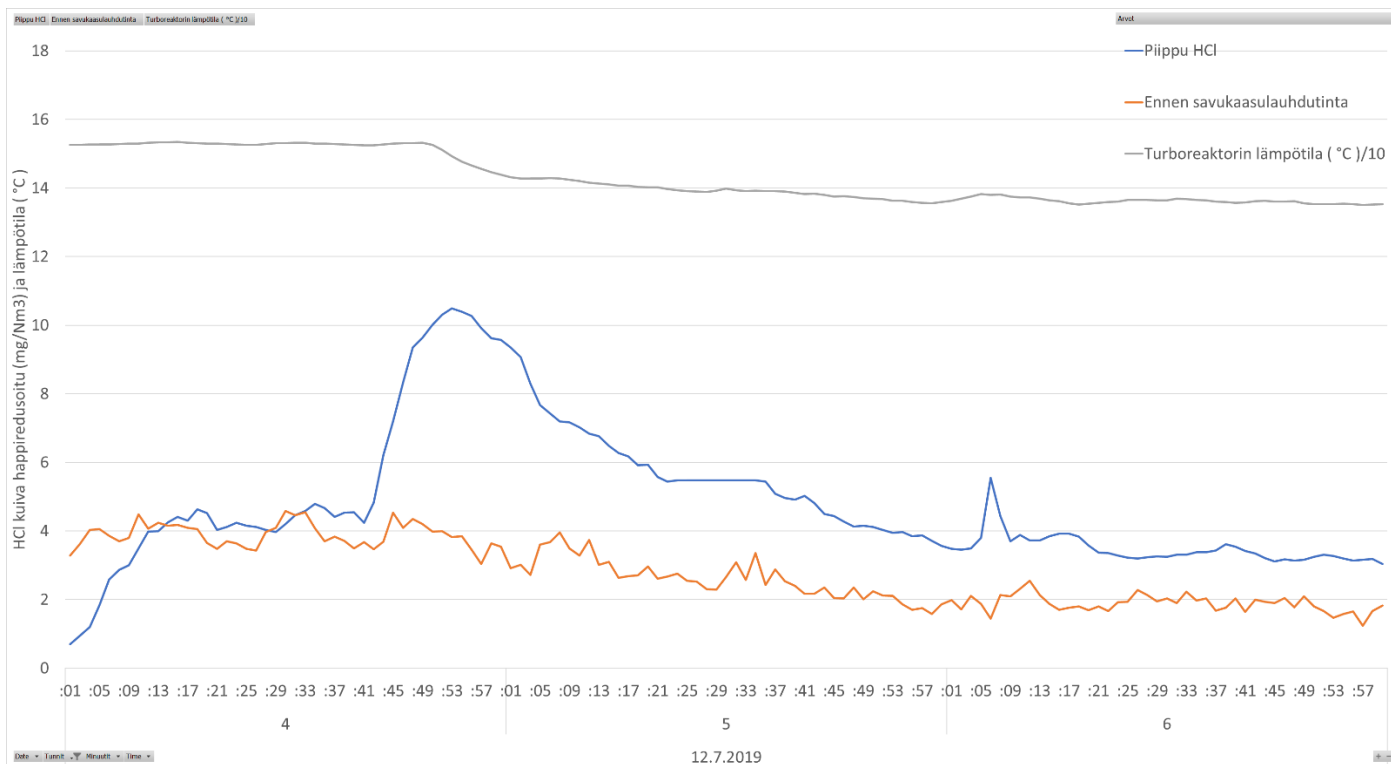


Kuva 13. Koeajon 1 HCl-pitoisuus ennen savukaasulauhdutinta



Kuva 14. Koeajon 1 HCl-pitoisuudet piipussa ja ennen savukaasulauhdutinta

Kello 4:42 savukaasulauhdutin ajettiin alas, laittamalla sen alasajosekvenssi käyntiin. HCl-pitoisuudet olivat nousseet n. 4,5 mg/Nm³ ohituspellin ollessa kokonaan auki. Kun pesuri oli ajettu alas, pitoisuudet piipussa lähtivät jyrkkään nousuun. Koeajoja varten asennetussa mittalaitteessa kyseistä piikkiä ei esiintynyt ollenkaan (Kuvat 13. ja 14.). Samalla huomattiin, että turboreaktorin lämpötilasäätö ei kytkeytynyt päälle automaattisesti alasajon yhteydessä. Lämpötila turboreaktorissa oli n. 152°C alasajon alkaessa. Lämpötilasäätöasetus asetettiin manuaalisesti 137°C n. klo 4:50. Tällöin huomattiin, että HCl-pitoisuuden piikki alkoi taittumaan rajusti lämpötilan laskiessa (Kuva 15.). HCl-pitoisuus laski kahden tunnin aikana melko alhaiseksi, n. 3,5 mg/Nm³ piipussa, ja pysyi siellä usean tunnin ajan hitaasti taittuen kohti 6,5 mg/Nm³ asetusravoa. Koeajon aikana ei ylitetty luparajoja hetkellistä heilahdusta lukuun ottamatta. Savukaasunpuhdistus asetettiin toimimaan säädöillä, kun huomattiin että HCl-pitoisuus pysyi tasaisena.

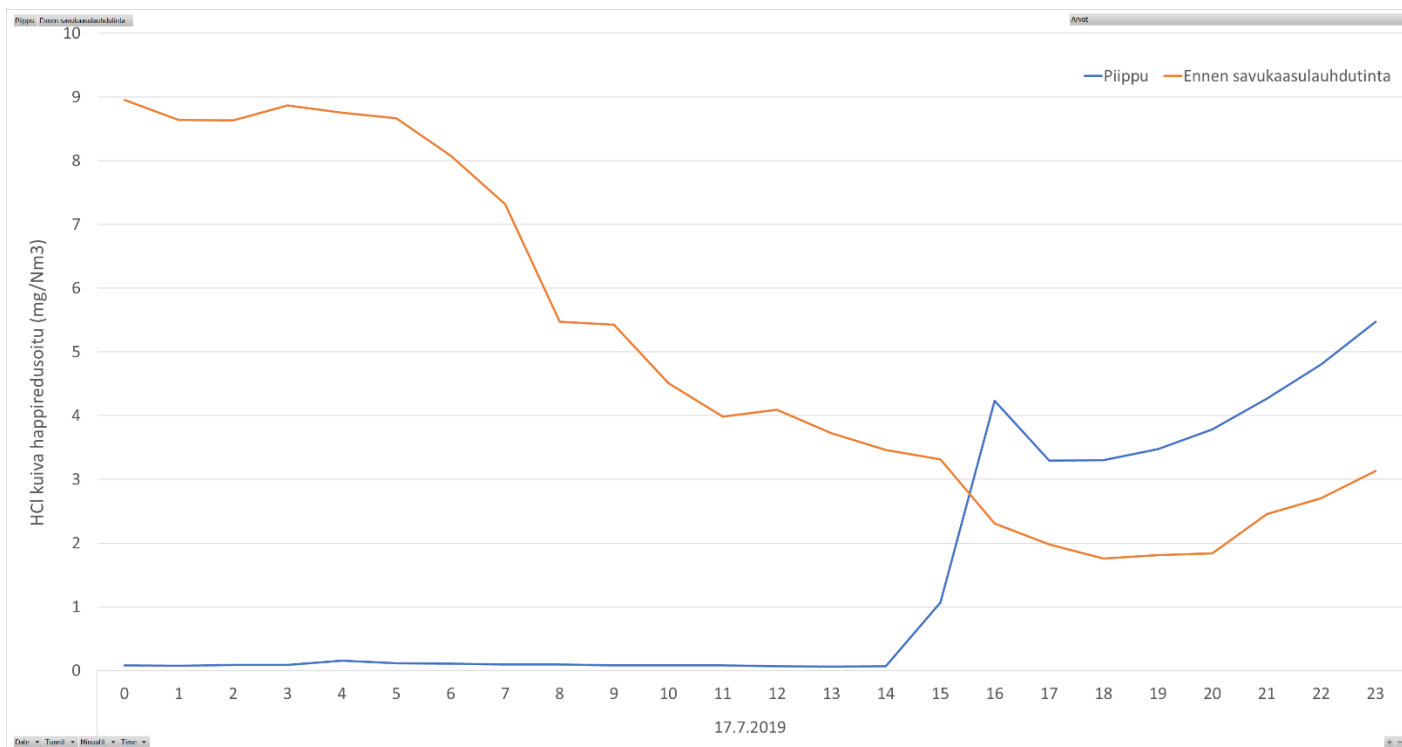


Kuva 15. Koeajo 1 HCl-pitoisuudet ja turboreaktorin lämpötila

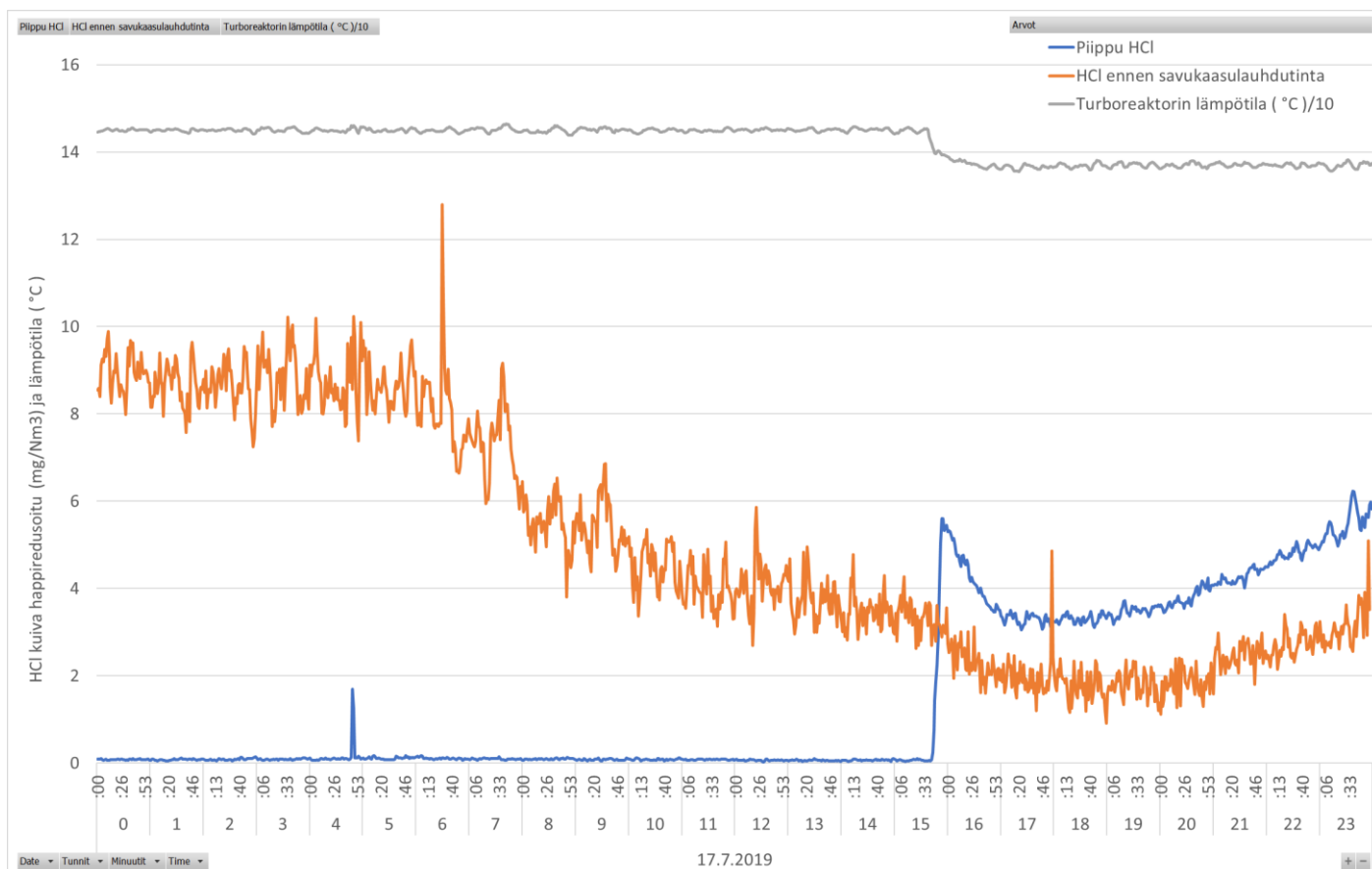
Ensimmäinen koeajo oli suhteellisen onnistunut. Koeajon aikana saatiin tietoa HCl-pitoisuuksista sekä niiden noususta savukaasulauhduttimen ollessa käytössä. Todettiin myös, ettei savukaasukanavan ohituspellin raottamisella ole käytännön merkitystä sekä kalkinsyötön nopeus saatiin sopivaksi. Merkittävin oppi koeajosta oli lämpötilasäädön suuri merkitys. Koeajon aikana huomattiin, ettei mittalaitteet näyttäneet samoja lukemia, mutta kuitenkin kuvaajien muodot olivat samanlaiset. Huomattiin että ns. HCl-piikki ei välttämättä olekaan mikään häiriöpiikki, vaan se on HCl:n todellinen pitoisuustaso prosessissa. Jos se olisi häiriöpiikki, vain piipun mittauksen ilmoittama HCl-pitoisuus lähtisi laskuun, kun taas koeajoja varten asennetun mittalaitteen ilmoittama HCl-pitoisuus pysyisi tasaisena. Tämä huomattiin tulkitsamalla kuvaajia (Kuvat 14 ja 15), kun tarkkailee lämpötilan ja HCl-pitoisuuksien muutoksia. Kummatkin HCl-pitoisuudet lähtevät samanmuotoisesti laskemaan, kun lämpötila turboreaktorissa laskee. Kyseistä HCl-pitoisuuden laskua ei selitä mikään muu tekijä kuin lämpötila. Tuona hetkenä mikään muu tekijä ei muuttunut prosessissa kuin lämpötila, esim. kalkin syöttö pysyi koko ajan vakiona. Seuraaviin koeajoihin otettiin pääkohdaksi lämpötila-asetuksen optimaalinen käyttö. Täten koeajoja päätettiin jatkaa. Savukaasulauhdutin otettiin uudelleen käyttöön 12.7.2019 klo 17:00.

6.4 Toinen koeajo

Laitosta ajettiin savukaasulauhdutin päällä 17.7.2019 saakka. Klo 6:00 kalkinskyötön sulkusyötin asetettiin 80 %:n nopeudelle. Kuitenkin jo klo 6:10 se pudotettiin 75 %:n nopeuteen. Näin kalkinskyöttö toimi sujuvammin, eikä tukkoisuus ongelmia ilmennyt. Turboreaktorin lämpötila oli koko koeajon ajan 145°C toisin kuin ensimmäisen koeajon aikana se oli poissa päältä. Edellä mainitut säädöt pysyivät samana aina savukaasulauhduttimen alasajoon saakka. Kalkinskyötön säätämistä lähtien asennutelta mittalaitteelta haettiin tietoja excel-ohjelmistoon n. 30 min välein. HCl-pitoisuutta tarkkailtiin asennetulla mittalaitteella siihen saakka, kunnes se olisi riittävän alhainen alasajoa varten. Tarkoitus oli, että HCl-pitoisuus ennen alasajoa olisi alhaisempi kuin edellisessä koeajossa. Klo 15:36 aloitettiin savukaasulauhduttimen alasajo, HCl-pitoisuuden ollessa n 3,3 mg/Nm³ asennetussa mittalaitteessa. Poiketen ensimmäisestä koeajosta, turboreaktorin lämpötilasäätö asetettiin 137 °C samaan aikaan kuin savukaasulauhduttimen pysäytyssekvenssi käynnistettiin. Alasajossa piipun mittauksen ilmoittama HCl-pitoisuus ei noussut yhtä korkeaksi kuin aikaisemmassa koeajossa. Alasajo sujui edellä mainituilla toimenpiteillä itsestään ilman ongelmia ja savukaasunpuhdistusjärjestelmä pystyttiin asettamaan säädölle pian alasajon jälkeen. Alla olevassa kuvaajassa (Kuva 16) esiintyvä pitoisuuden nousu, on todennäköisesti HCl-pitoisuuden todellinen taso, josta se alkoi alentumaan turboreaktorin lämpötilan laskiessa.



Kuva 16. Koeajo 2 HCl-pitoisuudet piipussa ja ennen savukaasulauhdutinta (Miro Lilja)



Kuva 17. Koeajo 2 HCl-pitoisuudet ja turboreaktorin lämpötila (Miro Lilja)

Savukaasulauhduttimen alasajo onnistui erittäin hyvin. Piipun mittauksen mukaan HCl-pitoisuus kohosi n. 5,2 mg/Nm³, josta se laski alhaisempaan arvoon ja alkoi tasoittua. Yllä olevasta kuvaajasta (Kuva 17.) huomataan, että jälleen turboreaktorin lämpötilan laskiessa HCl-pitoisuudet alenevat. HCl-pitoisuuden myöhempi nousu johtuu siitä, että savukaasun puhdistus asetiin toimimaan säädöllä, jolloin se nostaa pitoisuutta kohti sen asetusarvoa, joka on 6,5 mg/Nm³. HCl-pitoisuuden mittarien arvojen kuvaajat ovat samanmuotoisia, joka tukee tehtyä päätelmää. Lämpötila sekä kalkin reagointi suuremman vesimäärän ja matalamman lämpötilan kanssa saavat estettyä HCl-pitoisuuden nousun.

6.5 Kolmas koeajo

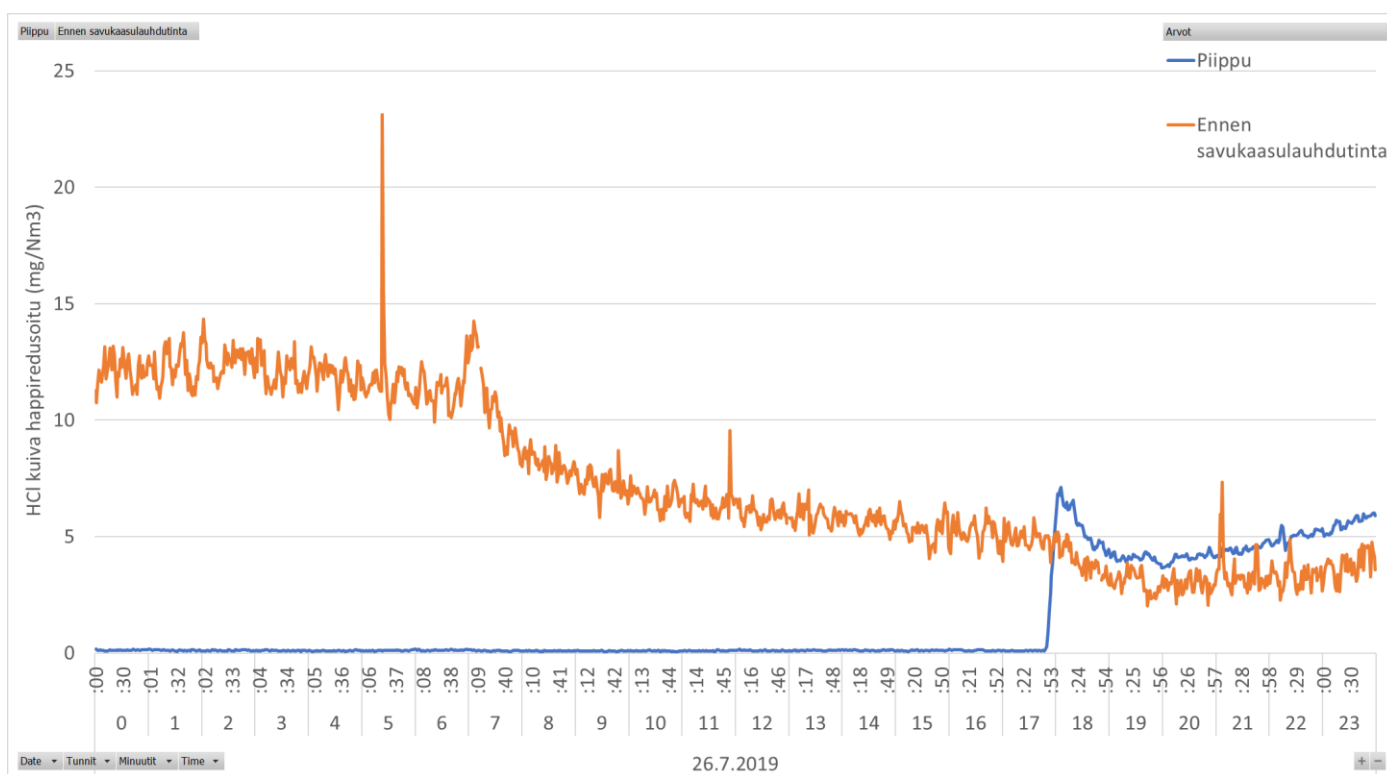
Savukaasulauhdutin otettiin uudestaan käyttöön 18.7.2019 toisen koeajon jälkeen. Tarkoituksena oli edellisen onnistuneen alasajon jälkeen kokeilla, kuinka pidempi aikaväli savukaasulauhdutin päällä ajaessa vaikuttaa alasajoon. Tällainen kokeilu olisi erittäin hyödyllinen, koska tutkittava ongelma esiintyy aina talven jälkeen kesätilaan siirtyessä. Tällöin savukaasulauhdutin päällä on ajettu useita viikkoja tai kuukausia, jolloin mahdollisimman pitkän koeajon avulla saataisiin vertailukelpoisempaa tietoa.

Alasajo aloitettiin 26.7.2019 klo 7:03, jolloin kalkinsyötön sulkusyötin asetiin pyörimään 75% nopeudella. Tällä hyväksi havaitulla kalkinsyötön määrällä ajettiin aina pesurin alasajoon saakka. Lisäksi kiertävän reaktiotuotteen määrä lisättiin muuttamalla paine-eron asetusarvoa. Turboreaktorin

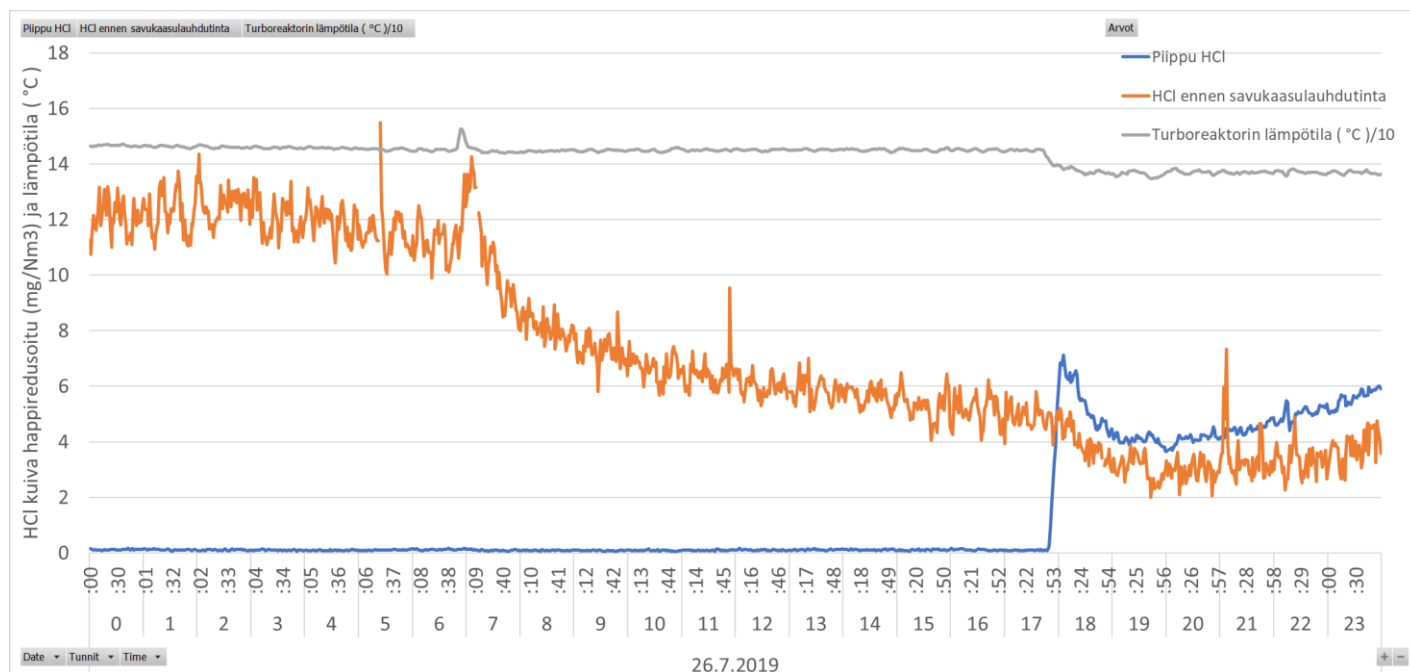
lämpötila-asetus muutettaisiin myös samalla tavalla 137 asteeseen pesurin alasajon alkaessa kuin edellisessäkin koeajossa.

Savukaasulauhduttimen alasajosekvenssi käynnistettiin 26.7.2019 klo 17:45 HCl-pitoisuuden ollessa n. 4,8-5 mg/Nm³ koeajoa varten asennetussa mittalaitteessa. Samaan aikaan turboreaktorin lämpötila-asetus asetettiin 137 C. HCl-pitoisuus piipun mittalaitteessa kohosi klo 18:05 asti, jolloin se oli korkeimmillaan hetkellisesti n. 7 mg/Nm³, jonka jälkeen HCl-pitoisuus alkoi alenemaan. HCl-pitoisuus tasoittui n. 3,9 mg/Nm³:aan, jolloin savukaasunpuhdistusjärjestelmä asetettiin toimimaan jälleen säädöillä (Kuva 18.).

Koeajo oli kaiken kaikkiaan onnistunut. Kiertävän reaktiotuotteen määrän lisäämisestä ei ollut ainaakaan näennäisesti mitään hyötyä. Lämpötilasäädön muuttaminen 137 asteeseen sekä sitä kautta veden määrän lisääminen turboreaktoriin näyttäisi olevan tehokkain keino HCl-pitoisuuden liian korkean tason estämiseksi (Kuva 19.). Tietenkin se vaatii kalkin määrän lisäämistä turboreaktoriin ennen kuin alasajo aloitetaan. Koeajo vahvisti edellisistä koeajoista tehtyjä johtopäätöksiä.



Kuva 18. Koeajo 3 HCl-pitoisuudet piipussa ja ennen savukaasulauhdutinta (Miro Lilja)



Kuva 19. Koeajo 3 HCl-pitoisuudet ja turboreaktorin lämpötila (Miro Lilja)

6.6 Muut näytteenotot koeajojen aikana

Koeajojen aikana toteutettiin näytteenottoja alustavan suunnitelman mukaan.

Kiertävästä reaktiotuotteesta otettiin joka päivä näyte ensimmäisen koeajon aikana 3.7.-10.7.2019. Näyte otettiin APC-tuhkan lähettimeltä 1 litran vetoisiin näytteenottoastioihin. Näytteenottoa varten valmistettiin ohjeet, sekä informoitiin henkilökuntaa laitoksen sisäisen tiedotusjärjestelmän kautta. Tarkoituksena oli tarkkailla järjestelmässä kiertävän kalkin laadunmuutosta savukaasulauhduttimen ollessa käytössä. Näytteet ovat Riikinvoiman hallussa. Näytteet on tarkoitus lähettää laboratorioon analyysia varten, missä niistä tutkitaan niiden sisältämä reagoivan kalkin määrä.

Laitoksen valmistamasta sammutetusta kalkista otettiin myös näytteitä. Näytteet otettiin laitoksen hydraattorin jälkeen asennetusta näytteenotto paikasta ennen sammutetun kalkin siloa. Näytteet otettiin 1 litran näytteenottoastioihin. Näytteenottoa varten valmistettiin ohjeet, sekä informoitiin henkilökuntaa laitoksen sisäisen tiedotusjärjestelmän kautta. Näytteitä otettiin yhteensä 3 kappaletta ja aina silloin kun laitoksen hydraattori valmisti kalkkia. Näytteet ovat Riikinvoiman hallussa. Näytteet on tarkoitus lähettää laboratorioon analyysia varten, missä niistä tutkitaan täyttävätkö ne sammutetun kalkin laatuvaatimukset (Taulukko 6.).

Selvitettiin myös veden laatuparametrien täytyminen laitoksen käyttämän veden osalta. Laitoksen turboreaktori käyttää talousvettä, jonka toimittaa Keski-Savon vesi. Turboreaktorin veden laatuvaatimuksia (Taulukko 7.) verrattiin Keski-Savon vedestä tehtyihin vedenlaadun määrittäisiin (taulukko 9.). Vedenlaadun määrittäykset oli tehty 27.6.2019 Savo-Karjalan Ympäristö Oy:n toimesta. Veden laadun määrittäysten perusteella voidaan todeta, että laitokselle tuleva vesi täyttää laatuvaatimukset eivätkä ongelmat johdu ainakaan tästä syystä.

Taulukko 9. Keski-Savon Veden talousvesitutkimus (keskisavonvesi.fi)

MÄÄRITYSTULOKSET / NÄYTTEET

Määrittäminen	Yksikkö	14357	14358	14359	**STM 1352
Lämpötila	oC	5,7	10,7		
Haju			Ei todettu		
Maku			Ei todettu		
Escherichia coli*	pmy/100 ml		0		<1 (V)
Koliformiset bakteerit*	pmy/100 ml		0		<1 (T)
Enterokokit *	pmy/100 ml		0		<1 (V)
Heterotrof. pesäkeluku 22 °C *	pmy/ml		0		
pH *			7,8		«9,5, »6,5 (T)
Sähkönjohtavuus 25 °C *	µS/cm		160		<2500 (T)
Sameus *	FNU		0,15		
Väriiluku *	mg/l Pt		<5		
Hapettuvuus (COD-Mn, O2) *	mg/l		<0,5		«5 (T)
Permanganaattiluku *	mg/l KMnO4		<2		«20 (T)
Ammonium (NH4+) *	mg/l		<0,006		«0,50 (T)
Nitriitti (NO2-) *	mg/l	<0,007	<0,007		«0,50 (V)
Nitraatti (NO3-) *	mg/l	2,1			«50,0 (V)
Rauta *	µg/l		14		«200 (T)
Mangaani *	µg/l		1,8		«50 (T)
Alumiini *	µg/l	1,8			«200 (T)
Antimoni *	µg/l		<0,1		«5 (V)
Arseeni *	µg/l	0,79			«10 (V)
Kadmium *	µg/l		<0,01		«5 (V)
Kromi *	µg/l		0,33		«50 (V)
Kupari *	mg/l			0,019	«2 (V)
Lyijy *	µg/l			0,10	«10 (V)
Nikkeli *	µg/l			<0,05	«20 (V)
Natrium *	mg/l	3,1			«200 (T)
Fluoridi *	mg/l	0,061			«1,5 (V)
Kloridi *	mg/l	1,6			«250 (T)
Sulfaatti *	mg/l	7,3			«250 (T)
Elohopea*	µg/l	<0,005			«1 (V)

Merkintöjen selityksiä: P = määrittäminen kesken, E = ei tehty, ~ = noin, < = pienempi kuin, « = pienempi tai yhtäsuuri kuin, > = suurempi kuin, » = suurempi tai yhtäsuuri kuin.

**STM 1352 = Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousvedet

Menetelmätiedot viimeisellä sivulla, * = akkreditoitu menetelmä, (A) = alihankintamäärittäminen

7 KOEAJOJEN TULOSTEN POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Ongelman selvittämiseksi tehty koajojakso sujui onnistuneesti. Koeajoissa huomattiin, että turboreaktorin puhdistusteho laskee huomattavasti savukaasulauhduttimen ollessa käytössä, koska lisäaineensyöttöjärjestelmä ei syötä tarpeeksi kalkkia turboreaktoriin. Tämä johtuu kalkinsyötön säätöjärjestelmästä (kappale 4.3.5), koska piipunmittauksen ilmoittama HCl-pitoisuus on erittäin alhainen savukaasulauhduttimen puhdistustehokkuudesta johtuen. Tällöin lisäaineensyöttöjärjestelmä syöttää minimaalisen määrän kalkkia turboreaktoriin, jolloin HCl-pitoisuus pääsee kasvamaan ennen savukaasulauhdutinta. Syy HCl-pitoisuuden äkilliseen nousuun savukaasulauhduttimen alasajon jälkeen on juurikin tässä. Koska kalkinsyöttö säätyy piipunmittauksen mukaan, ei turboreaktori voi ehtiä ajoissa laskemaan HCl-pitoisuutta riittävän alhaiselle tasolle. Ongelman välttämiseksi on kalkinsyötön määrää lisättävä manuaalisesti ennen savukaasulauhduttimen alasajoa. Kalkinsyötön todellista tarvittavaa määrää on vaikea arvioida ilman mittausta turboreaktorin ja savukaasulauhduttimen välillä.

Pelkkä kalkinsyötön lisääminen ei kuitenkaan riitä. Lisäksi täytyy säätää turboreaktorin lämpötilaa eli lisätä vedensyöttöä turboreaktoriin. Turboreaktorin optimaalinen toiminta-alue on 135-145 C välillä (kappale 4.2.3). Mitä matalampi lämpötila tällä välillä on, sitä tehokkaammin puhdistus toimii. Koeajojen aikana huomattiin, että lämpötilan säätö alhaisemmaksi välittömästi savukaasulauhduttimen alasajon jälkeen estää luparajan ylittävän nousun. Nämä tekijät yhdessä huomattiin tärkeimmiksi heti ensimmäisen koeajon suorituksen jälkeen. Varsinkin lämpötilan säätäminen oli erittäin tärkeä koeajojen onnistumisten kannalta. HCl-pitoisuutta saatiin laskettua riittävästi vasta lämpötilasäätöä matalammalla (Koeajo 1). Lämpötilan vaikutus vaikuttaa laskevan pitoisuuksia niin alhaiselle tasolle, että todennäköisesti lyhyempikin aika manuaalista kalkinsyöttöä riittäisi.

Koeajoissa 2 ja 3, savukaasulauhdutin saatiin ajettua alas ilman ongelmia eikä luparajan ylittyminen ollut lähelläkään. Tässä onnistuttiin alhaisemmalla lämpötilan säädöllä sekä sopivammalla kalkinsyötön määrällä. Lämpötilasäätö asetettiin mahdollisimman alhaiseksi savukaasulauhduttimen ollessa käytössä. Alin lämpötila oli tällöin 145 C. Lämpötila-asetus muutettiin välittömästi alhaisimpaan mahdolliseen, joka oli 137 C, kun savukaasulauhdutin ajettiin alas. Koeajojen 2 ja 3 kuvaajista huomataan, että lämpötilan laskiessa HCl-pitoisuus alkaa myös laskemaan eikä luparajojen ylitys käy lähelläkään. Jo 145°C ja 137°C välillä on suuri merkitys. HCl-pitoisuus taittui joka koeajolla matalammaksi vasta turboreaktorin lämpötilan laskiessa kohti 137°C.

Koeajojen, näytteenottojen sekä teoreettisen tutkimuksen avulla huomattiin tärkeimmiksi tekijöiksi kalkinsyötön lisääminen sekä lämpötilan säätäminen. Muiden tekijöiden osalta todettiin, ettei niillä ole ollenkaan vaikutusta tai ainakaan suurempaa vaikutusta ongelman syntyyn tai sen estämiseen. Ongelma johtuu turboreaktorin riittämättömästä toiminnasta savukaasulauhduttimen ollessa käytössä, sillä sen ei tarvitse toimia silloin täydellä teholla. Vaikka ongelma onkin selvillä ei sille ole ratkaisua äkillisissä tilanteissa, kuten savukaasulauhduttimen häiriötapauksissa. Tällöin säädöllä oleva

lisäaineensyöttö ei ehdi mukaan äkilliseen muutokseen, sillä sen HCl-säädön takaisinkytkentä tapahtuu piipunmittauksen ilmoittaman pitoisuuden perusteella.

Kalkinsyötön määrän lisääminen turboreaktoriin savukaasulauhduttimen ollessa käytössä ei ole ratkaisu ainakaan kustannusten kannalta. Jatkuva kalkin ”turha” syöttö lisäisi laitoksen käyttökustannuksia eikä tällainen ratkaisu ole kannattavaa. Lisäksi ei ole järkevää pitää turboreaktorin tehokkaaseen toimintaan tarvittavaa lämpötilaa yllä jatkuvasti savukaasulauhduttimen ollessa ajossa, koska se saattaa aiheuttaa ongelmia liian matalalämpöisen poistuvan savukaasun muodossa. Turboreaktorin seinämiin kertyisi tämän normaalista lisääntyneen kalkinsyötön vuoksi enemmän ainekertymiä kuin aikaisemmin, mikä saattaa haitata sen toimintaa. Äkillisen ongelman aiheuttamaa tilannetta voidaan kuitenkin lieventää lisäämällä välittömästi kalkinsyöttöä turboreaktoriin sekä säätämällä sen lämpötila-asetus mahdollisimman alhaiseksi. Tätä varten voidaan luoda pikatoiminto operaattorille ohjausjärjestelmään tai vielä parempi vaihtoehto olisi se, että se tapahtuisi automaattisesti kyseisten tilanteiden sattuessa.

Hallittu alasajo on mahdollista saada toimimaan ilman ongelmia. Paras ratkaisu on uuden mittalaitteen hankkiminen ja asentaminen samaan sijaintiin kuin koeajon aikana käytetty. Tämä mittalaite mittaisi jatkuvatoimisesti päästöjä savukaasulauhduttimen ollessa käytössä. Näin saataisiin tietoa HCl- sekä muidenkin päästöjen pitoisuuksista, jollaista ei tällä hetkellä laitoksella ole. Mittauksen ansiosta tiedettäisiin jatkuvasti HCl-pitoisuuden taso ja sitä voitaisiin säätää tehokkaammin. Mittauksen avulla voidaan luoda alasajoa varten oma sekvenssi. Ennen alasajoa operaattori painaisi savukaasulauhduttimen alasajosekvenssin käyntiin, jolloin savukaasunpuhdistusjärjestelmän lisäaineensyötön säätö toimisi uuden mittauksen ilmoittamien pitoisuuksien mukaan piipunmittauksen sijaan. Näin HCl-pitoisuus saataisiin tarkasti haluttuun arvoon ennen savukaasulauhduttimen alasajoa. Kun pitoisuus on tarpeeksi alhainen, sekvenssi aloittaa savukaasulauhduttimen alasajon ja säätää turboreaktorin lämpötila-asetuksen mahdollisimman alhaiseksi. Tällaisella säädöllä helpotettaisiin huomattavasti operaattorin työtä savukaasulauhduttimen alasajossa ja vältettäisiin turhat luparajojen ylitykset tai niiden riskit, eikä enää tarvitsisi arvailla HCl-pitoisuuden määrää. Lisäksi tämä säätö olisi erittäin hyödyllinen myös äkillisissä tilanteissa. Kun ongelma tulee, niin järjestelmä siirtyy toimimaan automaattisesti edellä selitetyllä säädöllä, jolloin se alkaisi välittömästi toimimaan tilanteen vaatimalla tavalla. Lisäaineensyöttöjärjestelmä alkaisi syöttää heti oikean määrän kalkkia turboreaktoriin eikä piipunmittauksen kanssa esiintyvää viivettä olisi ollenkaan. Lisäksi lämpötila-asetuksen säätö tapahtuisi tässä tilanteessa automaattisesti ilman viivettä. Tämä toiminto lieventäisi äkillisen ongelman aiheuttamia vaikutuksia.

Todennäköisesti savukaasulauhduttimen pystyisi ajamaan nopeammin alas kuin mitä koeajoissa. Mittalaitteiden ilmoittamien HCl-pitoisuuksien eron sekä lämpötilan muutoksen vaikutuksen vaikea arviointi aiheutti koeajojen pitkän keston. Alasajosta olisi mahdollista karsia useita tunteja tarkemman mittauksen sekä turboreaktorin lämpötilan muutoksen vaikutuksen tarkemmalla selvittämisellä. Koeajojen aikana kalkkia syötettiin todennäköisesti liikaa. Alasajo olisi voinut onnistua aiemminkin, koska turboreaktorin lämpötilan madaltamisella 145-137°C vaikutti olevan suuri merkitys. Kalkin syötön määrä alasajossa on mahdollista optimoida lisätutkimuksilla.

8 OPINNÄYTETYÖN MERKITYS

Opinnäytetyön tulokset auttavat jatkossa merkittävästi Riikinvoiman savukaasupäästöjen hallintaa. Happamista päästöistä on määrätty luparajat, jotka tulee alittaa. Vuorokaudessa on mahdollista hylätä enintään viisi puolen tunnin keskiarvoa ja vuodessa saa hylätä enintään kymmenen vuorokausikeskiarvoa mittausjärjestelmän toimintahäiriön tai huollon vuoksi (Riikinvoiman ympäristölupa... 2013, 50). Ongelman selvittäminen edesauttaa edellä mainitun määräyksen noudattamista, ettei ylityksiä tulisi ainakaan tästä syystä. Työn avulla saatiin selville mikä aiheuttaa ongelman tai vähintään saatiin poissuljettua osa mahdollisista aiheuttajista. Koeajojen yhteydessä saatiin selville kalkin sammutuslaitoksen tuottaman kalkin laatu, piipun mittalaitteen toiminta tilanteen aikana ja savukaasulauhduttimen alasajoon ohjeet. Operaattorin ajo-ohjeen myötä säästetään kalkin kulutusta sekä vältetään puolen tunnin luparajan ylittyminen, kun tiedetään, kuinka tulee toimia ennen pesurin alasajoa.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

Riikinvoima.fi [verkkoaineisto]. [viitattu 2019-06-21] Saatavissa: <http://riikinvoima.fi/>

Varkaudenalueelampo.fi [verkkoaineisto]. [viitattu 2019-12-21] Saatavissa: <https://www.varkauden-alueelampo.fi/fi/energiatuotanto/riikinvoima/>

VALTIONEUVOSTON ASETUS JÄTTEEN POLTTAMISESTA 14.2.2013/151, Finlex. Lainsäädäntö. [verkkoaineisto] Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130151>

EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON DIREKTIIVI 2010/75/EU, [verkkoaineisto] Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=celex%3A32010L0075>

Riikinvoiman ympäristölupa (ISAVI/17/04.08/2013), Aluehallintovirasto [verkkoaineisto] Saatavilla: http://www.avi.fi/documents/10191/56910/isavi_paatos_106_2013_1-2013-11-29.pdf/e06307a4-abf2-417e-8e81-9c9e84d951d2

RAIKO, Risto, KIRVELÄ, Katriina, TOLVANEN, Henrik, PÄÄKKÖNEN, Anna, 2017. KEB-40000 Energia-tekniikan perusteet. Luentomoniste. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto (verkkoaineisto) Saatavilla: <https://tuppu.fi/wp-content/uploads/2017/02/Energiatekniikan-perusteet.pdf>

VÄÄNÄNEN, V 2017. Savukaasun puhdistusjärjestelmä. Riikinvoiman omat tiedostot.

VÄÄNÄNEN, V 2017. Savukaasun lauhdutuslaitoksen prosessikuvaus. Riikinvoiman omat tiedostot.

Sick.com [verkkoaineisto] [viitattu 2019-06-01] Saatavissa: <https://www.sick.com/fi/fi/analysointiratkaisut/prosessiratkaisut/mcs300p-hw/c/g261751> Polku: <https://www.sick.com/fi/fi/> Tuotteet. Analysointiratkaisut. Prosessiratkaisut. Tuoteperhe MCS300P HW

VTI 2007. Päästömittausten käsikirja Osa 1: Päästömittaustekniikan perusteet. [verkkoaineisto] [viitattu 2019-06-02] Saatavissa: <https://ilmansuojeluyhdistys.files.wordpress.com/2015/05/osa1.pdf>

Keskisavonvesi.fi [verkkoaineisto]. [viitattu 2019-08-21] Saatavissa: <http://keskisavonvesi.fi/download.php?id=19>