



SUOMEN SOODAKATTILAYHDISTYS  
FINNISH RECOVERY BOILER COMMITTEE

**Suomen Soodakattilayhdistys ry**

**Ääninuohouksen mahdollisuudet  
soodakattiloissa**

**Santeri Peltola, Tampereen teknillinen  
yliopisto, 19.10.2015**

**Raportti 8/2015**

**16A0913-E0161**



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

SANTERI PELTOLA  
SOODAKATTILAN ÄÄNINUOHOUS

Kandidaatintyö

Tarkastaja: TkT Aino Leppänen  
Kemian ja biotekniikan laitos

## TIIVISTELMÄ

**Santeri Peltola:** Soodakattilan ääninuohous

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 44 sivua, 6 liitesivua

Huhtikuu 2015

Ympäristö- ja energiatekniikan tekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Energia- ja prosessitekniikka

Tarkastaja: TkT Aino Leppänen

**Avainsanat:** ääninuohous, soodakattila, tuhka, likaantuminen, lämmönsiirto

Tämän työn tavoitteena oli koota yhteen laitevalmistajien ja loppukäyttäjien ääninuohouksesta kerryttämää kokemusta soodakattilaprosessin yhteydessä. Soodakattilaa käytetään selluteollisuudessa energiantuotantoon ja sellunvalmistusprosessissa käytettävien kemikaalien talteenottoon. Ääninuohous puolestaan on menetelmä, jossa voimakattilan lämmönvaihtimiin ja rakenteisiin kiinnittyneitä tuhkakerrostumia pyritään poistamaan voimakasta ääntä tuottavien nuohouslaitteiden avulla. Ääninuohous ei ole vakiintunut menetelmä soodakattilaprosessin yhteydessä. Soodakattilan nuohominen on haastavaa, koska soodakattilassa polttoaineena käytettävä mustalipeä sisältää runsaasti kattilan lämmönvaihtimia likaavaa tuhkaa.

Työssä on esitelty tutkimuskäyttöön saatuja käyttökokemuksia ääninuohouksesta. Lisäksi työssä on käsitelty kirjallisuudessa esitettyjä tutkimustuloksia soodakattiloiden tuhkakerrostumien fysikaalisiin ominaisuuksiin liittyen. Työssä on myös tarkasteltu ääniaallon fysikaalisia ominaisuuksia ja äänentaajuuden vaikutusta ääninuohouksen tulokseen. Äänen käyttäytymisestä kattilaympäristössä ei ole julkista tutkimusaineistoa saatavilla.

Ääninuohouksen toimivuudesta ei ole tehty suurta määrää julkista tutkimusta. Tähän työhön koottu ääninuohouksen käyttökokemus perustuu suomalaisen laitevalmistajan jakamiin kokemuksiin ja mittaustuloksiin sekä useiden laitevalmistajien julkaisemiin käyttöraportteihin. Kerätyn aineiston perusteella ääninuohous vaikuttaisi toimivan useissa tapauksissa hyvin savukanavan alueilla, jossa savukaasun lämpötila on riittävän matala, jotta tuhka on kiinteässä olomuodossa. Ääninuohouksen käyttöönoton myötä useissa tapauksissa nuohoushöyryn kulutus ja likaantumisongelmat ovat vähentyneet.

Tutkimuksia soodakattilan tuhkan fysikaalisista ominaisuuksista on tehty, mutta ääninuohouksen vaikutusta tuhkakerrostumiin ei ole tutkittu. Tämän työn perusteella äänentaajuudella vaikuttaisi olevan selkeä yhteys äänen vaimentumiseen kattilassa. Äänen vaimentuminen rajoittaa ääninuohouksen tehokasta toiminta-aluetta. Taajuuden vaikutusta kattilarakenteisiin kohdistuvaan mekaaniseen rasitukseen tai tuhkan irtoamismekanismeihin ei kuitenkaan ole tutkittu tässä työssä. Tämän vuoksi työn perusteella ei

voida yksiselitteisesti todeta, mikä äänentaajuusalue on soveltuvien soodakattilan ääninuohoukseen. Tulevaisuudessa tutkimus voisi keskittyä edellä mainittuihin aiheisiin.

## SISÄLLYSLUETTELO

|       |                                                         |    |
|-------|---------------------------------------------------------|----|
| 1.    | JOHDANTO .....                                          | 1  |
| 2.    | MUSTALIPEÄN SYNTY JA POLTTO.....                        | 2  |
| 2.1   | Mustalipeän muodostuminen sellunkeitossa.....           | 3  |
| 2.2   | Mustalipeän palaminen soodakattilassa .....             | 4  |
| 3.    | SOODAKATTILAN LÄMMÖNSIIRTOPINTOJEN LIKAANTUMINEN.....   | 7  |
| 3.1   | Soodakattilan savukaasujen koostumus.....               | 7  |
| 3.1.1 | Natrium- ja rikkiyhdisteet .....                        | 7  |
| 3.1.2 | Kalium- ja klooriyhdisteet.....                         | 9  |
| 3.1.3 | Fume-hiukkaset soodakattilassa .....                    | 10 |
| 3.1.4 | Carry over -hiukkaset soodakattilassa.....              | 10 |
| 3.2   | Tuhkakerrostumat.....                                   | 11 |
| 3.2.1 | Carry over -tuhkan kerrostuminen .....                  | 12 |
| 3.2.2 | Fume-tuhkan aiheuttama kerrostuminen.....               | 13 |
| 3.2.3 | Tulistimien likaantuminen.....                          | 14 |
| 3.2.4 | Keittoputkien likaantuminen .....                       | 16 |
| 3.2.5 | Kerrostuman fysikaaliset ominaisuudet .....             | 17 |
| 3.3   | Likaantumisen vaikutus soodakattilan toimintaan .....   | 18 |
| 4.    | PERINTEISET LÄMMÖNSIIRTOPINTOJEN PUHDISTUSMENETELMÄT .. | 20 |
| 5.    | ÄÄNINUOHOUKSEN ..... 21                                 | 21 |
| 5.1   | Ääniaalto .....                                         | 21 |
| 5.2   | Resonointi .....                                        | 24 |
| 5.3   | Äänen vaimentuminen lämmönvaihtimessa .....             | 25 |
| 5.3.1 | Äänen absorboituminen savukaasussa .....                | 26 |
| 5.3.2 | Äänen absorboituminen tuhkakerrostumaan .....           | 27 |
| 5.4   | Ääninuohouksen periaate .....                           | 29 |
| 5.5   | Soodakattilan ääninuohouksen edellytykset.....          | 31 |
| 6.    | ÄÄNINUOHOUKSEN KÄYTTÖKOKEMUKSIA.....                    | 34 |
| 6.1   | Ääninuohous soodakattiloissa .....                      | 34 |
| 6.2   | Ääninuohous Suomenojan voimalaitoksella .....           | 35 |
| 6.3   | Ääninuohous muissa voimakattiloissa.....                | 37 |
| 7.    | YHTEENVETO JA POHDINTA .....                            | 38 |
|       | LÄHTEET .....                                           | 41 |

LIITE A: KESKUSTELU ÄÄNINUOHONVALMISTAJAN EDUSTAJIEN KANSSA

LIITE B: MITTAUSDATAA SUOMENOJAN VOIMALAITOKSELTA ÄÄNINUOHOUKSEN YHTEYDESSÄ

# 1. JOHDANTO

Soodakattilan ääninuohousta on kokeiltu 30 vuoden aikana paikallisten tukkeentumisongelmien ratkaisemiseen. Pysyviä ratkaisuja soodakattilan ääninuohouksessa ei kuitenkaan ole saavutettu. Soodakattilan ääninuohoaminen on erityisen vaativaa, koska soodakattilan polttoaineena käytettävä mustalipeä sisältää runsaasti epäorgaanista, tuhkaa muodostavaa ainesta.

Mustalipeän koostumus poikkeaa monista yleisistä polttoaineista. Lipeän kuiva-aineen tuhkapitoisuus on tyypillisesti noin 30 % ja suurimmillaan jopa 40–50 % [1][2][3][4], kun esimerkiksi kivihiilen tuhkapitoisuus on noin 10–15% [5]. Lisäksi mustalipeän tuhkan koostumus on tukkeentumisongelmien kannalta haastava. Mustalipeän tuhka sisältää runsaasti alkalisulfaatteja ja -klorideja, joiden sulamislämpötilat ovat matalia.

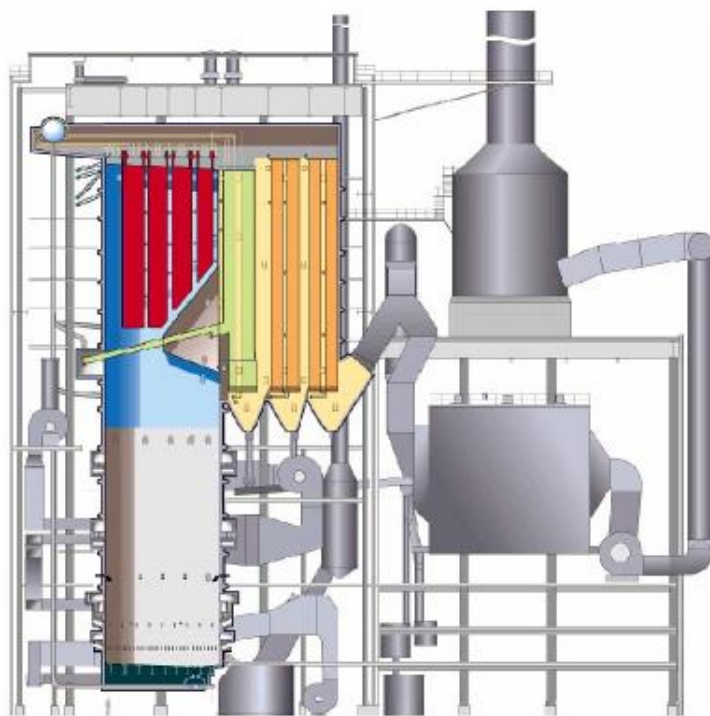
Työn tavoitteena on kartoittaa aiheesta jo tehtyä tutkimusta. Työhön on koottu ääninuohoinvalmistajien käyttökokemuksia ja tutkimustuloksia soodakattilan tuhkan koostumuksesta ja ominaisuuksista. Lisäksi työssä on käsitelty ääniaaltoa fysikaalisena ilmiönä ja pohdittu äänentaajuuden vaikutusta ääninuohouksen lopputulokseen.

Luvussa 2 on esitelty soodakattilan toimintaperiaate ja sellunvalmistuksen kemikaalikierto, johon mustalipeän polttaminen soodakattilassa kuuluu. Luvussa 3 on käsitelty tarkemmin mustalipeän tuhkan koostumusta, tulipesästä karkaavien lämmönsiirtopintoja likaavien yhdisteiden ominaisuuksia ja niiden kerrostumismekanismeja savukanavan eri alueilla. Luvussa 4 on esitelty perinteinen lämmönsiirtopintojen puhdistamismenetelmä, höyrynuohous.

Luvussa 5 on pohdittu ääniaallon fysikaalisia ominaisuuksia, äänentaajuuden ja äänen vaimentumisen välistä yhteyttä sekä pohdittu ääninuohouksen toimivuuden edellytyksiä savukanavan eri osissa. Lukuun 6 on koottu laitevalmistajien ja loppukäyttäjien ääninuohoukseen liittyvää käyttökokemusta. Luvussa 7 on tehty yhteenveto tutkimuksen tärkeimmistä havainnoista ja ehdotettu tulevaisuuden tutkimuskohteita.

## 2. MUSTALIPEÄN SYNTY JA POLTTO

Kemiallisessa metsäteollisuudessa sellua valmistetaan kemiallisen kuidutuksen menetelmillä. Tässä luvussa esitettyä sellunvalmistusmenetelmää kutsutaan sulfaattisellumenetelmäksi. Sellun valmistuksen raaka-aineena käytetään puuta, joka sisältää pääosin selluloosaa ja selluloosakuituja yhdistävää ligniiniä. Sellunvalmistuksessa puun selluloosa pyritään erottamaan muusta aineksesta liuottamalla puun ligniiniä lämpöenergian ja kemikaalien avulla. Sellunvalmistuksen sivutuotteena syntyy mustalipeää, joka sisältää liuennutta puuainesta ja prosessoinnissa käytettyjä kemikaaleja. Talteenotto tapahtuu polttamalla mustalipeää soodakattilassa, jolloin mustalipeän orgaanisen aineksen palassa vapautuva lämpöenergia hyödynnetään laitoksen sähkön- ja lämmöntuotannossa. Epäorgaaninen, keittokemikaaleja sisältävä sula tuhka puolestaan voidaan kerätä talteen uusiokäyttöä varten. Soodakattilan tehtävä onkin mustalipeän poltossa vapautuvan energian hyödyntäminen sekä natrium- ja rikkiyhdisteiden talteenotto. Kuvassa 2.1 on esitetty soodakattilan tyypillinen rakenne ja lämmönvaihtimet.



**Kuva 2.1.** Soodakattilan tyypillinen rakenne [2].

Tulipesäksi kutsutaan kattilan avointa aluetta, jossa varsinainen mustalipeän palaminen ja keittokemikaalien talteenotto tapahtuu. Tulipesän seinämät on päällystetty höyrystintupkillä. Soodakattilalle ominainen lämmönvaihdin on kuvassa 2.1 vihreällä merkitty

tulipesän yläpuolella poikittain oleva lämmönvaihdin, joka vähentää säteilylämmönsiirtoa tulistinalueelle. Näin rajoitetaan tulistinalueen lämpötilaa ja siten sulan tuhkan aiheuttamia likaantumisongelmia tulistinalueella. Lisäksi keittoputkien avulla voidaan vaikuttaa savukaasujen virtausnopeuteen ja -jakaumaan. [3]

Tulistimet on merkitty kuvaan 2.1 punaisella. Savukaasun virtaussuunnassa ensimmäisiä tulistimia kutsutaan säteilytulistimiksi, koska säteilyllä on suuri merkitys lämmönsiirrossa savukaasusta säteilytulistimissa virtaavaan höyryyn. Virtaussuunnassa seuraavia tulistimia kutsutaan konvektiotulistimiksi, koska pääasiallinen lämmönsiirtomekanismi on konvektiivinen lämmönsiirto. Keittoputkisto, jossa vettä höyrystyy, on merkitty kuvassa 2.1 vihreällä. Oranssilla merkityt lämmönvaihtimet ovat veden esilämmittimiä eli ekonomaisereita. Lisäksi soodakattilan savukanavassa on tyypillisesti ilman esilämmitin ja sähkösuodin, jotka ovat jäljempänä savukanavassa. Tuhkan aiheuttamia likaantumis- ja tukkeentumisongelmia esiintyy erityisesti lämmönvaihtimissa. Tuhkaa kerääntyy myös muille kattilapinnoille, mikä voi ahtauttaa savukanavaa ja aiheuttaa siten häiriöitä savukaasun virtaukseen.

## 2.1 Mustalipeän muodostuminen sellunkeitossa

Sellun valmistuksen tärkein raaka-aine on puu. Havupuut ovat Suomessa tärkein puutyyppi pitkien kuitujensa vuoksi, mutta myös lehtipuita voidaan käyttää raaka-aineena. Raaka-aineena käytettävän puun kuitujen pituus vaikuttaa paperin lujuuteen. [6]

Raaka-aineen koostumus vaikuttaa mustalipeän ominaisuuksiin ja siten myös soodakattilan tulipesän olosuhteisiin ja savukaasun koostumukseen. Koska prosessiketju puusta savukaasuksi on pitkä ja monivaiheinen, soodakattilan lämmönsiirtopintojen ohi virtaavien tuhkapartikkeleiden määrä ja laatu vaihtelevat jatkuvasti.

Ennen puuaineksen keittämistä puu kuoritaan, haketetaan ja seulotaan. Kuori ja huonosti sulava aines poistetaan, mikä parantaa sellun laatua. Hakettamalla keittoon saavutetaan hyvät olosuhteet niin kutsutuille keittokemikaaleille, eli natriumhydroksidille ( $NaOH$ ) ja natriumsulfidille ( $Na_2S$ ). Sellunkeitossa keittokemikaalit liuottavat puun ligniiniä, joka on puun selluloosakuituja yhdistävä sidosaie.

Keittovaiheessa hakkeen joukkoon lisätään valkolipeää, joka sisältää varsinaisten keittokemikaalien lisäksi natriumkarbonaattia, natriumsulfaattia ja pieniä määriä muita natriumyhdisteitä. Tuotettu valkolipeä on hyvin vahvaa. Sitä laimennetaan selluloosamasan pesuvaiheessa erotetulla laihalla mustalipeällä, jotta nestemäärä keitossa olisi riittävä. Kemikaalit muodostavat keittoon alkaliset olosuhteet. Liukenemista nopeuttaa keitossa käytettävä korkea lämpötila ja paine. [6]

Keittolipeässä puun ligniini ja osa hemiselluloosta liukenevat natrium- ja rikkiyhdisteiden kanssa muodostuvien moninaisten reaktioiden kautta erilaisiksi orgaanisiksi lignii-



nin yhdisteiksi ja karboksyylihappojen natriumsuoloiksi. Puuaineksen liukenemisen jälkeen selluloosa erotetaan muusta aineksesta ja pestään. Keitossa syntyvää jätelientä kutsutaan mustalipeäksi. Mustalipeä sisältää edellä mainittuja orgaanisia puusta liuenneita yhdisteitä ja epäorgaanisia keittokemikaalien muodostamia yhdisteitä. Mustalipeä sisältää myös runsaasti vettä, ja keiton jälkeinen kuiva-ainepitoisuus on 15–20 %. [6] Taulukossa 1 on esitetty tyypillinen mustalipeän kuiva-ainekoostumus.

**Taulukko 1.1.** Mustalipeän kuiva-ainekoostumus [7].

| Aine                         | massa-% kuiva-aineesta |
|------------------------------|------------------------|
| C                            | 35.0 %                 |
| H                            | 3.3 %                  |
| O                            | 35.7 %                 |
| Na                           | 19.7 %                 |
| K                            | 1.6 %                  |
| S                            | 4.0 %                  |
| Cl                           | 0.6 %                  |
| Inertit, Si, Al, Fe Ca, jne. | 0.1 %                  |

Taulukosta 1 nähdään, että epäorgaanisen, tuhkaa muodostavan aineksen määrä mustalipeän kuiva-aineesta on huomattava. Epäorgaanisia aineita ovat natrium, rikki, kalium, kloori ja inertit aineet. Orgaanisesta aineksesta noin viidesosa on tulipesän pohjalle kekoa muodostavaa jäännöshiiltä [3]. Loppuosa on haihtuvaa, palavaa ainesta. Massaosuudeltaan merkittävimmät epäorgaaniset yhdisteet ovat natriumkarbonaatti ( $Na_2CO_3$ ) ja natriumsulfaatti ( $Na_2SO_4$ ) [8].

## 2.2 Mustalipeän palaminen soodakattilassa

Keittovaiheen jälkeen mustalipeän kuiva-aineosuus on matala. Siksi lipeä viedään haihuttamolle ennen polttoa. Haihdutus tapahtuu soodakattilasta johdettavalla prosessihöyryllä. Mustalipeä väkevöidään 60–85 %:n kuiva-ainepitoisuuteen. Vesipitoisuuden laskeminen nostaa tulipesän lämpötilaa, tehostaa koksikeon pelkistysprosessia ja laskee savukaasun rikkidioksipitoisuutta. Toisaalta mustalipeän viskositeetti kasvaa samalla, mikä aiheuttaa ongelmia lipeän käsittelyyn ja ruiskutukseen. Siksi kuiva-ainepitoisuutta ei voida nostaa rajatta. Lämpötilan nostaminen laskee mustalipeän viskositeettiä, minkä vuoksi mustalipeää esilämmitetään käsittely- ja ruiskutusvaiheessa.

Mustalipeä ruiskutetaan tulipesään keskimäärin 2–3 mm:n kokoisina pisaroina, esilämmityksestä riippuen noin 150 °C:n lämpötilassa [8]. Pisarakoko voi vaihdella puolesta millimetristä viiteen millimetriin [7]. Palamisen ensimmäisessä vaiheessa mustalipeän

sisältämä vesi haihtuu. Kuivuneen mustalipeäpisan pyrolysoitumisvaiheessa pisan sisältämä haihtuva orgaaninen kaasuaaines palaa näkyvällä liekillä, ja samalla osa pisan sisältämistä epäorgaanisista yhdisteistä vapautuu savukaasuvirtaan. Pyrolysoitumisvaiheessa pisan halkaisija kasvaa, ja pisara jää leijumaan nousevassa kaasuvirtauksessa. Pyrolysoitumisen aikana pisan lämpötila kohoaa ruiskutuksen lämpötilasta tulipesän lämpötilaan, joka on nykyaikaisessa soodakattilassa tyypillisesti yli 1000 °C [8][3].

Kun haihtuvat kaasut ovat palaneet, jäljelle jäävä kiinteä koksijäännös jatkaa palamista, ja pisan lämpötila nousee edelleen [3]. Samalla pisan halkaisija pienenee ja pisara painuu alaspäin kohti koksikekkoa. Koksijäännös sisältää kiinteää, palavaa hiiltä ja sulassa olomuodossa olevia epäorgaanisia suoloja.

Tulipesän alaosissa vallitsevat pelkistävät olosuhteet [3]. Koksijäännöksen palamisessa tapahtuu pelkistysreaktioita, mikä on energiantuotannon ohella toinen soodakattilan päätehtävä. Hiili pelkistää natriumsulfaattia natriumsulfidiksi reaktioyhtälöiden (2.1) ja (2.2) mukaisesti. Rikin pelkistymistä tapahtuu putoamisvaiheessa kaasumaisen hiilen pelkistämänä sekä keossa kiinteän hiilen pelkistämänä. [8]



Pelkistysreaktion nopeus kasvaa, kun hiilen osuus keossa kasvaa [8]. Reduktioaste, eli sulfidin ja rikin kokonaismäärän välinen suhdeluku ( $\frac{Na_2S}{Na_2S + Na_2SO_4}$ ), kasvaa, kun tulipesän lämpötila nousee ja paikallinen ilmakerroin laskee. Palamisen loppuvaiheessa pelkistysreaktioiden jälkeen rikki on sitoutunut lähes kokonaan natriumsulfidiksi. Yli jäävä natrium on natriumkarbonaattina. [3]

Natriumsulfidi hapettuu helposti natriumsulfaatiksi, mikäli lipeäpisara palaa loppuun asti ennen kekoon laskeutumista. Siksi optimaalisessa tilanteessa pisara laskeutuu koksikeon pinnalle palavana [8]. Tällöin sulassa olomuodossa olevat natriumsulfidi ja natriumkarbonaatti valuvat tulipesän pohjalle ja kiinteä palava koksijäännös jää kekoon. Tulipesän pohjalta sula aine juoksutetaan kattilan ulkopuolelle liuotussäiliöön.

Todellisuudessa pisarakoko ja savukaasun virtausnopeus vaihtelevat paljon, ja osa mustalipeästä tempautuu virtauksen mukana tulipesän yläosiin. Toisaalta painavimmat lipeäpysarat voivat pudota kekoon vielä märkinä viilentäen kekkoa.

Natriumsulfidin uudelleenhapettumisen välttämiseksi keon pinnalla on jatkuvasti oltava riittävästi palavaa hiiltä, jonka kanssa happi voi reagoida. Käytännössä osa natriumsulfidista kuitenkin pääsee hapettumaan ilmassa tai keossa. [3]

Soodakattilasta sula tuhka johdetaan liuotussäiliöön, jossa kemikaalit liuotetaan veteen tai heikkoon valkolipeään [8]. Syntynyttä liuosta kutsutaan soodalipeäksi tai viherlipes-

äksi. Suurin osa sulasta aineksesta on natriumkarbonaattia ja noin kolmasosa on natriumsulfidia [6]. Soodalipeässä natriumsulfidi on jo sellaisenaan valmis uudelleenkäytettäväksi keitossa. Natriumkarbonaatti täytyy kuitenkin muuttaa natriumhydroksidiksi kaustisoimalla. Kaustisoinnin lopputuote on valkolipeä. Kaustisointia ei esitellä tässä työssä.

Osa keittokemikaaleista karkaa kierrosta regeneroinnin aikana. Hävikkiä tapahtuu jonkin verran soodakattilassa palamisen yhteydessä, kun osa natrium- ja rikkiyhdisteistä höyrystyy ja kulkeutuu savukaasun mukana ulos piipusta. Myös carry over -ilmiö aiheuttaa natriumin ja rikin karkaamista tulipesästä. Carry over -ilmiö esitellään luvussa 3.1.4.

### 3. SOODAKATTILAN LÄMMÖNSIIRTOPINTOJEN LIKAANTUMINEN

Mustalipeä sisältää runsaasti epäorgaanista ainesta, jota tulipesän korkeassa lämpötilassa höyrystyy ja kulkeutuu savukaasun mukana ulos tulipesästä. Likaantumisongelmat soodakattiloissa ovatkin huomattava ongelma. Merkittävimpiä tuhkan komponentteja ovat rikki ja kloori sekä alkalit natrium ja kalium. Savukaasujen mukana virratessaan höyrystynyt tuhka jäähtyy ja tiivistyy, jolloin tuhkahiukkasia takertuu lämmönsiirtopinnoille ja kattilarakenteisiin.

#### 3.1 Soodakattilan savukaasujen koostumus

Savukaasuvirtaus koostuu polttoilmasta, carry over -hiukkasista sekä mustalipeästä vapautuneista vesihöyrystä ja palamistuotteista. Palamisessa vapautuu sekä orgaanisia mustalipeän palavia kaasuja että epäorgaanista, tuhkaa muodostavaa ainesta. Tuhka voidaan jakaa syntymekanisminsa perusteella kahteen osaan: suuriin carry over -hiukkasiin ja hienojakoiseen fume-tuhkaan. Niitä on käsitelty tarkemmin alaluvuissa 3.1.3 ja 3.1.4.

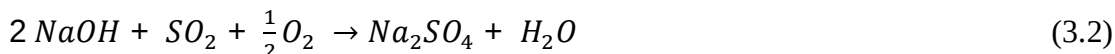
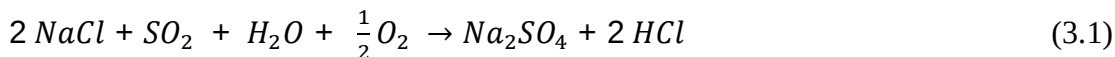
Soodakattilan savukaasun tuhka koostuu pääosin epäorgaanisista natriumyhdisteistä, joille tyypillistä on matala sulamislämpötila. Ennen sulamislämpötilaa on noin sadan asteen lämpötila-alue, jossa tuhka on tarttuvaa [3]. Osittain sula tuhka aiheuttaa ongelmia lämmönsiirtopinnoille kiinnittyessään. Savukaasun koostumukseen vaikuttavat pääasiassa tulipesän lämpötila, polttoilmansyöttö ja mustalipeän koostumus. Tyypillinen savukaasun kosteuspitoisuus on noin 10–15 % [8, s. 91–94].

Natrium ja kalium ovat alkalimetalleja, jotka reagoivat herkästi muodostaen alkalisuoloja. Natriumille seuraavassa luvussa esitetyt ominaisuudet voidaankin monin osin yleistää kaliumille. Natrium ja rikki muodostavat sellunkeittoprosessin aktiiviset yhdisteet, minkä vuoksi natrium ja kalium on käsitelty eri alaluvuissa.

##### 3.1.1 Natrium- ja rikkiyhdisteet

Natriumia ja rikkiä vapautuu tulipesän alaosissa savukaasuihin. Mustalipeässä alkalit esiintyvät suuressa määrin epäorgaanisina suoloina, joita haihtuu herkästi lipeäpisanan pyrolysoituessa [8, s. 16][4]. Mustalipeän natriumista noin 10 % höyrystyy tai kulkeutuu carry overin mukana savukaasuihin. Tyypillinen natriumin osuus mustalipeän kuiva-aineen massasta on noin 20 %. [7] Natriumia vapautuu savukaasuihin pisanan pyro-

lysoitumisessa pääosin alkuainenaatriumina, minkä jälkeen se nopeasti muuttuu kaasumaiseksi natriumhydroksidiksi ja -kloridiksi [9]. Tulipesän yläosissa lämpötilan laskiessa suurin osa natriumista muuttuu sulaksi natriumsulfaatiksi ja -karbonaatiksi reaktioyhtälöiden (3.1–3.3) mukaisesti [7].



Savukaasun edelleen jäähtyessä tulistinalueella natriumsulfaatti ja -karbonaatti jähmettyvät nopeasti. Puhtaan natriumkarbonaatin sulamislämpötila on 851 °C. Natriumsulfaatin sulamislämpötila on 884 °C. [10]

Pisaran pyrolysoitumisvaiheessa 10–20 % mustalipeän sisältämästä rikistä höyrystyy pelkistyneinä yhdisteinä, pääasiassa rikkivetynä ( $H_2S$ ), mutta lisäksi myös karbonyylisulfidina ( $COS$ ), metyyli-merkaptaanina ( $CH_3SH$ ) ja dimetyyli-merkaptaanina ( $(CH_3)_2S$ ) [7][8]. Lähes kaikki rikkivety hapettuu nopeasti rikkidioksidiksi [1]. Savukaasun jäähtyessä rikkivedyn hapettuminen nopeasti loppuu [3]. Pyrolysoitumisvaiheen lisäksi rikkiä karkaa carry over -hiukkasten mukana.

Natriumin ja rikin höyrystymisen ja siten häviöiden määrä on riippuvainen polton olosuhteista. Matala paikallinen ilmakerroin lisää rikin määrää savukaasuissa [3]. Korkea mustalipeän kuiva-ainepitoisuus johtaa korkeaan lämpötilaan, mikä voi vähentää rikkidioksidin määrää savukaasuissa kahdella tavalla. Lämpötilan nostaminen tulipesässä lisää natriumin höyrystymistä, jolloin lähes kaikki rikki sitoutuu natriumsulfaatiksi. Samalla syntyvän tuhkan määrä kasvaa. [7] Lämpötilan nostaminen voi myös suoraan vähentää rikin vapautumista lipeäpisan pyrolyysissä [7], mutta asiasta ei ilmeisesti ole yksiselitteistä näyttöä [11].

Rikkidioksidin määrä savukaasuissa on riippuvainen myös mustalipeän sulfiditeetista, eli natriumin ja rikin suhteesta ( $\frac{Na_2S}{NaOH + Na_2S}$ ). Kuten edellä todettiin, kuiva-ainepitoisuuden ja siten tulipesän lämpötilan nosto vähentää rikkiyhdisteiden vapautumista. Vapautunut rikkivety hapettuu tulipesän hapettavalla vyöhykkeellä lähes kokonaan rikkidioksidiksi ja edelleen natriumsulfaatiksi. Jos savukaasun  $\frac{Na_2}{S}$ -suhde on suurempi kuin yksi, lähes kaikki rikkidioksidi hapettuu natriumsulfaatiksi. Matala lämpötila tulipesässä vähentää natriumhydroksidin määrää ja lisää rikkivedyn määrää. Jos lisäksi mustalipeän sulfiditeetti on korkea, natriumia ei ole tarpeeksi sitomaan kaikkea rikkiä sulfaatiksi, vaan rikkidioksidia jää savukaasuihin. Edellä esitetyt reaktiot tapahtuvat tulipesän keski- ja yläosissa korkeassa lämpötilassa sulassa olomuodossa. [7]

Jäähtyvässä savukaasussa olevasta rikkidioksidista 1,3–2,5 % hapettuu rikkiatrioksidiksi [8]. Reagoidessaan natriumsulfaatin kanssa rikkiatrioksidi muodostaa vetysulfaattia ( $NaHSO_4$ ). Vetysulfaatti on hapanta, helposti lämmönsiirtopinnoille tarttuvaa ja se esiintyy putkien pinnoilla kiinteänä ja nestemäisenä. Se voi nopeasti aiheuttaa kerrostumia ja korroosiota savukaasukanavissa. [3] Reagoidessaan veden kanssa rikkidioksidi muodostaa rikkihappoa ( $H_2SO_4$ ), mikä aiheuttaa korroosio-ongelmia savukanavan viileämmillä alueilla [8].

Nykyaikaisessa soodakattilassa tulipesän lämpötila on korkea ja mustalipeän sulfiditeetti matala. Tällöin savukaasussa ei juurikaan esiinny rikkidioksidia eikä vetysulfaattia-kaan muodostu. Rikki on sitoutunut lähes kokonaan natriumsulfaattiin ja ylimääräinen natrium on natriumkarbonaattina. [7]

Suurin osa savukaasujen natrium- ja rikkiyhdisteistä erotetaan savukaasuista sähkösuodattimien ja tuhkasuppiloiden avulla. Kerätty natrium ja rikki palautetaan takaisin kemikaalikiertoon sekoittamalla tuhka väkevöityyn mustalipeään. Pieni osa keittokemikaaliyhdisteistä kuitenkin karkaa lopullisesti kierrosta savukaasujen mukana. Merkittävimmät karanteet rikki- ja natriumyhdisteet ovat rikkidioksidi ja natriumsulfaatti, tosin nykyaikaisessa soodakattilassa rikkidioksidiemissio on usein lähes olematon. [7] Poistoilman mukana karkaa myös pelkistyneitä rikkiyhdisteitä, lähinnä rikkivetyä ja merkaptaneja [3].

### 3.1.2 Kalium- ja klooriyhdisteet

Kalium ja kloori ovat likaantumisen kannalta tärkeimmät kemikaalikierron ulkopuoliset alkuaineet savukaasuissa. Mustalipeän kalium ja kloori ovat peräisin puusta, mutta klooria voi tulla kemikaalikiertoon myös sellunvalmistusprosessin muista vaiheista.

Kalium ja kloori alentavat tuhkan sulamislämpötilaa ja tekevät tuhkasta tarttuvaa. Tyypillinen kaliumpitoisuus suomalaisessa mustalipeässä vaihtelee välillä 1–4 massa-%. Klooripitoisuus on tyypillisesti 0,1–0,8 massa-%. [7][8, s 117]

Alkaliklorideja ( $NaCl$ ,  $KCl$ ) muodostuu välittömästi pyrolyysissä höyrystyvien alkalien vapauduttua pisarasta [11][12]. Kloridien sulamislämpötilat ovat matalia, minkä vuoksi ne aiheuttavat merkittäviä likaantumisongelmia [13]. Reaktioyhtälön (3.1) (sivu 8) mukaisesti rikkidioksidi muuttaa klooria vetykloridiksi ( $HCl$ ), joka ei tiivisty savukaasuissa eikä kerrostu lämmönsiirtopinnoille [14]. Rikin vähentyminen tulipesässä on lisännyt kloridien määrää tuhkassa, koska edellä esitetty kloridin muuttuminen sulfaatiksi on vähentynyt [8, s. 117–118]. Nykyaikaisessa kattilassa suuri osa kloorista sitoutuu lipeän palamisessa alkaliklorideiksi. Kloridit ovat tulipesän korkeissa lämpötiloissa kaasufaasissa. Lämpötilan laskiessa tulistinalueella suurin osa alkaliklorideista muuttuu alkalisulfaateiksi ja vetykloridiksi. Osa ylikylläisestä kaasumaisesta alkalikloridista tiivistyy tuhkauiukkasten pinnalle tehden siitä tarttuvaa. [13]

Pyrolyysissä höyrystyvä kalium reagoi pitkälti kuten natrium. Luvussa 3.1.1 esitetyt reaktioyhtälöt (3.1–3.3) on kirjoitettu natriumille, mutta pätevät myös kaliumille. Tutkimuksessa [12] mallinnettiin alkaliyhdisteiden koostumusta puuhakkeen poltossa. Tutkimuksen mukaan tulipesän alaosissa kalium on pääasiassa kaliumhydroksidina (60 %  $KOH$ ) ja kaliumkloridina (15 %  $KCl$ ). Tuloksia voitaneen verrata myös soodakattilaproessiin. Kuten natriumhydroksidi, kaliumhydroksidi hapettuu tertiääri-ilmassa tulipesän keski- ja yläosissa muodostaen kaliumsulfaattia ( $K_2SO_4$ ). Kalium on sitoutunut tuhassa myös kaliumkarbonaatiksi ( $K_2CO_3$ ) [12][15].

### 3.1.3 Fume-hiukkaset soodakattilassa

Fume-hiukkasilla tarkoitetaan englanninkielisessä kirjallisuudessa pientä, lähteestä riip-puen halkaisijaltaan 0,1–1  $\mu m$ :n tai alle 3  $\mu m$ :n kokoista kiinteää tuhkaa [13][12][11]. Tässä työssä fume-tuhka ei tarkoita lentotuhkaa, vaan lentotuhkan määritelmään sisältyy kaikki savukaasun mukana virtaava kiinteä aines. Fume-tuhka on tulipesässä höyrysty-nyttä epäorgaanista ainesta, joka tiivistyy jäähtyessään.

Tulipesässä höyrystyvistä yhdisteistä merkittävimpiä ovat natriumsulfaatti ja natriumkarbonaatti. Tulipesän jälkeen natriumkarbonaatti sulfatoituu nopeasti, jolloin jopa 90 % fume-tuhkasta on natriumsulfaattia. [7, s. 255] Sulfatoitumisen aste riippuu kuitenkin rikkidioksidin määrästä. Lisäksi fume-tuhkassa on kloorisuoloja ( $NaCl$ ,  $KCl$ ).

Fume-hiukkasen tiivistyminen voi tapahtua homogeenisesti tai heterogeenisesti. Homo-geeninen ydintyminen (nukleaatio) tapahtuu savukaasuvirrassa ilman tiivistymisalustaa, kun tiivistyvän kaasun kylläisen höyryn paine ylittyy moninkertaisesti. Heterogeeninen tiivistyminen tapahtuu joko suoraan lämmönsiirtopintojen seinämiin tai savukaasuvirtauksessa kulkeutuvan hiukkasen pintaan. [12]

Olosuhteet vaikuttavat siihen, kumpi mekanismi on vallitseva. Jos tiivistymispintoja, eli lämmönsiirtoputkien seinämiä ja tuhkapartikkeleita, on runsaasti, heterogeeninen tiivis-tyminen yleistyy. Lämpötilan, ja siten kylläisen höyrynpaineen, nopea lasku puolestaan suosii homogeenistä tiivistymistä. [12] Homogeenisen tiivistymisen merkitys on kuitenkin kyseenalainen, koska savukaasuvirtauksessa on inerttejä tuhka-hiukkasia, jotka voi-vat toimia tarttumispintana.

### 3.1.4 Carry over -hiukkaset soodakattilassa

”Carry over” on nimitys ilmiölle, jossa tulipesään ruiskutettu, osittain palanut mustali-peäpisara tempautuu polttoilman ja nousevien savukaasujen virtauksen mukana tuli-pesässä ylöspäin. Carry over -ilmiö aiheuttaa huomattavia ongelmia tulistimien ja mui-den lämmönsiirtopintojen toiminnassa. Pisarat aiheuttavat paksuja, tahmeita kerrostu-mia, jotka voivat aiheuttaa lämmönsiirron heikkenemisen ja painehäviön kasvun lisäksi teräspintojen korroosiota.

Merkittävimmät tekijät carry over -ilmiön esiintymisessä ovat mustalipeäpisan koko ja palamisilman syöttötapa. Liian pieneksi hajotetut lipeäpisarot kulkeutuvat helpommin tulipesän yläosiin, mutta liian suuri pisara ei ehdi palaa ennen koksikekoon laskeutumista. Samalla viskoosin mustalipeän hajottaminen täysin samankokoisiksi pisaroiksi on hankalaa.

Palamisilman syöttäminen aiheuttaa tulipesään epätasaisen pystysuuntaisen virtausjaukuman [3]. Virtausnopeuden huippukohdissa pisara tempautuu helpommin virtauksen mukaan. Palamisilmaa syötetään tulipesään useaan kerrokseen. Pisaroiden karkaamista voidaan rajoittaa syöttämällä mahdollisimman vähän ilmaa lipeäruiskujen alapuolelle, lähelle koksikekoa. Ilmaa tarvitaan kuitenkin koksen palamiseen, jotta riittävää lämpötilaa ja yleisesti prosessin tasapainoa voidaan pitää yllä.

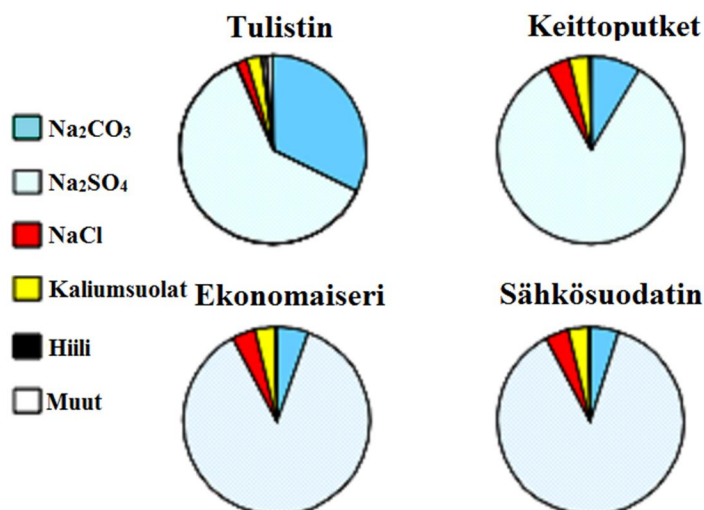
Carry over -hiukkanen koostuu pääasiassa natriumkarbonaatista ja -sulfaatista. Osittain sula hiukkanen takertuu helposti lämmönsiirtopinnoille. Carry over -hiukkaset ovat kooltaan noin 10–3000 µm. [13] Kloorin ja kaliumin määrä carry over -hiukkasessa on suoraan verrannollinen niiden määrään mustalipeässä [16].

### 3.2 Tuhkakerrostumat

Soodakattilan likaantumis- ja tukkeentumisongelmat ovat tapauskohtaisia. Tässä työssä likaantumisella tarkoitetaan tuhkan kerrostumista lämmönsiirtopinnoille ja muille kattilan sisäpinnoille. Tukkeentumisella tarkoitetaan kahden lämmönsiirtoputken välisen kanavan täydellistä tukkeutumista. Mustalipeän koostumus, tulipesän lämpötila ja kattilan ajotapa vaikuttavat savukaasun koostumukseen, ja siten tuhkakerrostumien nuohottavuuteen. Lämpötila savukaasukanavan eri vaiheissa vaihtelee kattiloiden välillä, mikä vaikuttaa tuhkapartikkeleiden jähmettymisalueisiin. Kaikki tekijät yhteensä vaikuttavat olosuhteisiin tuhkakerrostumien muodostumisen kannalta, ja tukkeentumisongelmia on tarkasteltava tapauskohtaisesti. Periaatteet kerrostuman syntymiselle ovat kuitenkin samat, ja tässä työssä kattilassa oletetaan vallitsevan nykyaikaisen soodakattilan tyypilliset olosuhteet.

Tuhkahiukkaset voidaan jakaa fume- ja carry over -hiukkasiin, kuten edellisessä luvussa 3.1 on esitetty. Ne tarttuvat lämmönsiirtopintoihin eri mekanismein, ja niiden aiheuttamilla kerrostumilla on omat piirteensä. Täysin näitä kahta ei voida kuitenkaan toisistaan erottaa, sillä samassa kerrostumassa on usein sekä fume- että carry over -tuhkaa. Carry over -tuhka on vallitseva kerrostumien aiheuttaja tulistinalueella, kun taas fume-tuhkaa on enemmän tulistimien jälkeisillä lämmönsiirtopinnoilla [13]. Kuvassa 3.1 on esitetty tyypillinen tuhkakerrostuman koostumus eri lämmönsiirtopinnoilla.





**Kuva 3.1.** Tuhkakerrostumien koostumus eri lämmönsiirtopinnoilla [4].

Kuvasta 3.1 nähdään, että natriumkarbonaatti sulfatoituu lähes kokonaan tulistinalueella. Kloori ja kalium rikastuvat tulistimien jälkeen, kun kloridit tiivistyvät savukaasun jäähtyessä. Hiiltä on vain tulistinalueella carry over -tuhkassa. Muiden aineiden osuus kerrostumissa on pieni, ja niitä voidaan pitää nuohouksen kannalta merkityksettöminä [13]. Kerrostuma ei ole homogeeninen, vaan yhdisteiden pitoisuudet vaihtelevat eri osissa kerrostumaa. Usein kerrostumasta voidaan erottaa selkeästi eri yhdisteistä koostuvia kerroksia, joiden fysikaaliset ominaisuudet poikkeavat toisistaan. [17]

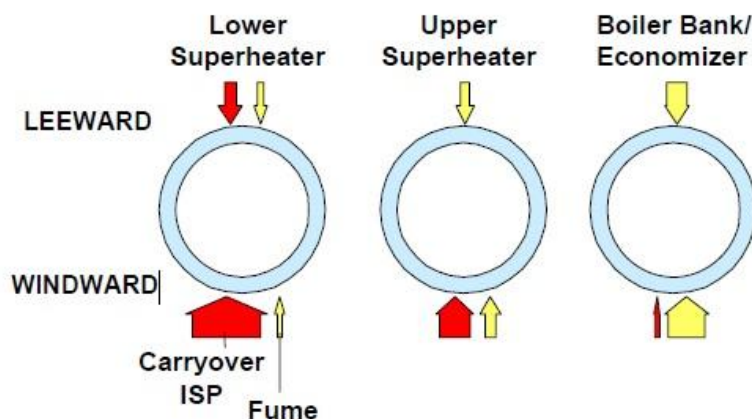
### 3.2.1 Carry over -tuhkan kerrostuminen

Carry over -hiukkanen on usein tahmea, osittain nestemäinen ja helposti tarttuva. Viileälle pinnalle iskeytyessään carry over -hiukkanen kiinteytyy ja muodostaa kovaa, pinnaltaan sulaa ja väriltään vaaleanpunaista tai harmaata kerrostumaa [13]. Carry over -hiukkaset aiheuttavat ongelmia eniten tulistinpinoilla.

Carry over -hiukkasen sulan aineksen osuuden täytyy olla välillä 15–70 %, jotta se tarttuu putken pintaan [18]. Kiinteä hiukkanen kimpoaa pois pintaan törmättyään ja täysin nestemäinen pisara vierii pintaa pitkin tarttumatta siihen. Kiinteä hiukkanen voi kuitenkin tarttua putkeen, jos kerrostuman pinta on tahmea [17]. Lämpötilan alarajaa, jossa hiukkanen on tahmea, merkitään tässä työssä symbolilla  $T_{15}$ . Vastaavasti tahmean alueen lämpötilan ylärajaa merkitään symbolilla  $T_{70}$ . Hiukkasen koostumus vaikuttaa tahmeaan lämpötila-alueeseen. Tuhkan kemialliset yhdisteet sulavat laajalla lämpötilavälillä, minkä vuoksi tahmea lämpötila-alue voi olla laaja. Luvussa 3.1.2 esitetyt kalium ja kloori alentavat tuhkan sulamislämpötilaa oleellisesti.

Kuvassa 3.2 on havainnollistettu, miten fume- ja carry over -tuhkan osuudet vaihtelevat eri lämmönvaihdivien kerrostumissa. ”Windward” tarkoittaa lämmönsiirtoputken puol-

ta, joka on savukaasuvirtauksen etupuolella. ”Leeward” tarkoittaa putkipintaa virtauksen jättöpuolella. ”ISP” on tuhka hiukkanen, joka muistuttaa ominaisuuksiltaan carry over -hiukkasta [4]. Tässä työssä ISP-hiukkasta (engl. intermediate size particle) ei käsitellä, koska sen merkitys ääninuohouksen kannalta lienee pieni.



**Kuva 3.2.** Tuhkan kertyminen lämmönsiirtoputken pinnalle [13].

Kuvasta 3.2 nähdään, että carry over -tuhka aiheuttaa merkittävimpiä ongelmia säteilytulistimissa. Fume-tuhkan määrä kerrostumassa lisääntyy konvektiotulistimissa ja sen jälkeen. Inertia vaikuttaa carry over -hiukkasten virtaukseen. Carry over -tuhka aiheuttaa kerrostumia törmätessään lämmönsiirtoputkien virtauksen puoleisille seinämille kuvan 3.2 mukaisesti [13][4]. Hiukkanen poikkeaa inertian vuoksi virtauksen suunnasta sitä helpommin, mitä painavampi se on. Virtausnopeus tulistimissa pidetään matalana, jotta tuhkan iskeytyminen lämmönsiirtopinnoille olisi mahdollisimman vähäistä [3]. Carry overin osuus kerrostumissa vähenee savukaasukanavassa eteenpäin mentäessä, koska jähmettyessään se ei enää painavana hiukkasena tartu helposti putken pinnoille. Carry over -tuhkan määrä savukaasuvirtauksessa vähenee myös sitä mukaa, kun carry over -hiukkasia kerrostuu lämmönsiirtopinnoille. [13]

### 3.2.2 Fume-tuhkan aiheuttama kerrostuminen

Fume-tuhkasta muodostuva tuhka kerrostuma on valkoista. Se muodostuu tiivistyneistä alkalisuoloista, jotka muodostavat hienojakoisesta tuhkasta koostuvaa huokoista kerrostumaa. Fume-tuhkaa ei välttämättä esiinny kuumimmilla tulistinpinoilla, jossa se on suureksi osaksi vielä kaasufaasissa. Inertia ei vaikuta merkittävästi kevyen hiukkasen lentorataan, minkä vuoksi fume kulkeutuu turbulentissa virtauksessa myös putkien takapuolelle kuvan 3.2 mukaisesti [13]. Fume-tuhkalla ei ole carry over -tuhkan kaltaista tarttuvan lämpötilan aluetta, koska kevyt hiukkanen tarttuu pinnoille sekä kiinteänä että nestemäisenä, jos esimerkiksi termoforeettinen voima vie sitä pintoja kohti.

Termoforeesi on vallitseva fume-tuhkan kiinnittymismekanismi soodakattilan lämmönsiirtopinnoilla [19][1]. Termoforeesissa hiukkanen ajautuu kohti lämmönsiirtoputken

pintaa, kun lämpöliikkeen aiheuttama voimaresultantti työntää hiukkasta kohti matalampaa lämpötilaa. Termoforeettinen kerrostuminen vähenee tuhkakerroksen kasvaessa, koska lämpötilagradientti savukaasuvirrassa pienenee, kun lämmönsiirtopinnalle syntyy eristävä kerros.

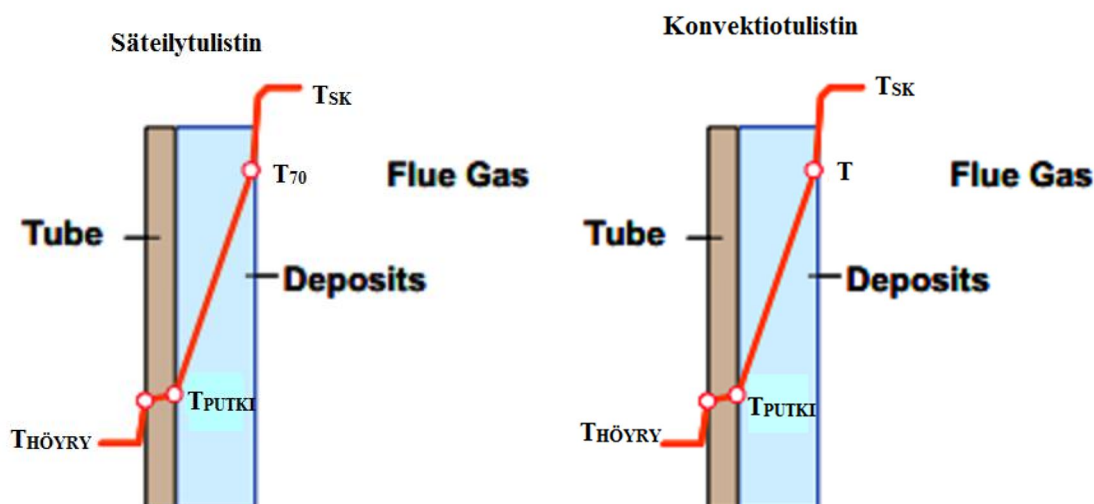
Kloorin määrä fume-tuhkassa kasvaa savukaasukanavassa eteenpäin mentäessä. Luvussa 3.1 esitettiin, kuinka kloridit tiivistyvät suhteellisen matalassa lämpötilassa tulipesän jälkeen lentotuhkan pinnalle, minkä jälkeen tahmeaa lentotuhkaa kerääntyy lämmönsiirtopinnoille. Eräässä väitöskirjassa [1] tehty klooripitoisuuden mallinnus kerrostumissa osoittaa, että tutkimuksen kohteena olleessa soodakattilassa kloorin määrä on suurin keittoputkissa. Tämä riippuu kuitenkin kattilan lämpötilakentästä ja mustalipeän klooripitoisuudesta. Sähkösuodattimen keräämä tuhka koostuu lähes yksinomaan fume-tuhkasta, kuten kuvasta 3.1 (s. 12) nähdään. Sen sijaan tulistin- ja keittoputkipintojen tuhkakerrostumissa kaliumia ja klooria esiintyy vähemmän. [13]

Pölymäinen fume-tuhka voi kovettua sintraantumalla. Sintraantumisessa tuhka hiukkasten väliset raot kuroutuvat umpeen. Tuhkan tiheys kasvaa merkittävästi, ja tuhka muuttuu lujemmaksi. Tuhkan sintraantuessa kerrostuma tarttuu voimakkaammin kiinni lämmönsiirtopintaan [20]. Sintraantuminen tapahtuu kiinteässä olomuodossa, kun tuhkan lämpötila on yli 300 °C. Lämpötilaa nostettaessa kohti tuhkan sulamislämpötilaa tuhka hiukkaset kiinnittyvät toisiinsa muodostaen yhtenäistä huokoista massaa. Sulamislämpötilan yläpuolella tuhka sulautuu täysin yhtenäiseksi, tiiviiksi massaksi [17]. Korkea lämpötila ja pieni hiukkaskoko nopeuttavat sintraantumista merkittävästi. Korkeassa lämpötilassa lähellä tuhkan sulamispistettä kerrostuman puristuslujuus voi monikymmenkertaisesti lähes maksimiarvoonsa jo tunnin aikana. Lähellä tuhkan sulamispistettä kiinteä kerrostuma on elastista, kun matalammassa lämpötilassa kerrostuma haurastuu. [13]

### 3.2.3 Tulistimien likaantuminen

Carry over -tuhka aiheuttaa eniten likaantumisongelmia tulistimissa. Tulistimessa savukaasun lämpötila on riittävän korkea ( $T_{SK} > T_{15}$ ), jotta tuhka on tarttuvaa. [13] Carry over -tuhkan tarttuvasta lämpötila-alueesta kerrottiin luvussa 3.2.1. Lämpötila-alue tulistinalueella on laaja, ja myös likaantumismekanismit vaihtelevat eri tulistimilla.

Kuvassa 3.3 on esitetty säteily- ja konvektiotulistimien kerrostumien lämpötilajakaumat sekä höyryn ( $T_{HÖYRY}$ ), lämmönsiirtoputken ( $T_{PUTKI}$ ) ja savukaasun ( $T_{SK}$ ) lämpötilat. Sininen väri kuvaa tuhkakerrostumaa ja harmaa väri lämmönsiirtoputkea. Punainen viiva havainnollistaa, kuinka lämpötila nousee kohti kerrostuman ulkopintaa.



**Kuva 3.3.** Lämpötilajakauma säteilytulistimen ja konvektiotulistimen tuhkerrostumis-  
sa [4].

Kuvassa 3.3 vasemmanpuoleiset lämpötila-arvot ovat tyypillisiä säteilytulistimissa, joissa savukaasu on kuumimmillaan. Oikeanpuoleinen tilanne on tyypillinen konvektiotulistimille, joissa savukaasun lämpötila on laskenut jonkin verran.

Säteilytulistimissa savukaasun lämpötila on niin korkea, että tuhka on suureksi osaksi nestettä ( $T_{SK} > T_{70}$ ). Tulistinalueelle tullessaan savukaasu on nykyaikaisessa soodakattilassa lähes 1000 °C:n lämpötilassa [8]. Putkissa virtaava höyry kuitenkin viilentää lämmönsiirtopintoja, minkä vuoksi tuhkaa kerrostuu säteilytulistimen pinnoille ( $T_{PUTKI} < T_{70}$ ). Kerrostuman kasvaessa sen ulkopinnan lämpötila nousee ja saavuttaa lopulta aseman, jossa kerrostuman kasvaminen loppuu ( $T = T_{70}$ ). Tällöin kerrostuman pinta on sulaa ja pinnalle osuva tuhahiukkanen valuu pois putken pinnalta, jolloin kerrostuma on saavuttanut suurimman mahdollisen paksuutensa. [13] Sen vuoksi nuohousta ei usein tarvita kuumimmilla pinnoilla.

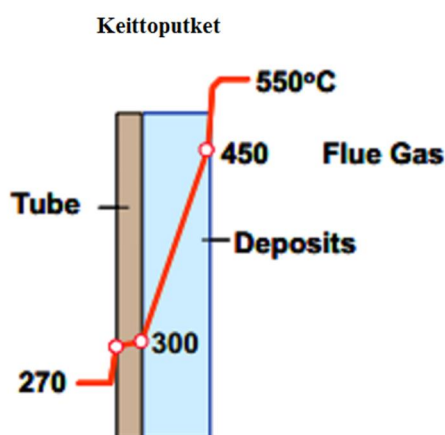
Savukaasuvirtauksen suunnassa seuraavissa tulistimissa savukaasun lämpötila on tuhkan tarttuvalla alueella ( $T_{15} < T_{SK} < T_{70}$ ). Kerrostuman pintaan osuva tuhahiukkanen on osittain nestemäinen ja tarttuu helposti tulistimen putkiin. Tuhkakerroksen paksuudella ei ole ylärajaa, vaan putkien väli voi jopa tukkeentua täysin. [13]

Nopeaa sintraantumista tapahtuu tulistimien kerrostumissa lämpötiloissa, joissa tuhka on kiinteää. Lämmönsiirtoputkissa virtaava höyry jäädyttää putkia, ja tulistinpinnat ovat aina riittävän matalassa lämpötilassa, jotta tuhka kiinteytyy tulistinkerrostuman sisäpinnalle. Tulistinalueen loppupäässä kerrostuma voi olla koko paksuudeltaan sintraantunutta, kun savukaasun lämpötila on jäähtynyt ja kerrostuman pinta on kiinteää ( $T_{SK} < T_{15}$ ). [13][20]

### 3.2.4 Keittoputkien likaantuminen

Tulistimien jälkeen savukaasu on jäähtynyt huomattavasti. Tarttuvan tuhkan määrä vähenee, kun tuhka alkaa jähmettyä täysin ( $T < T_{15}$ ). Korkea kaliumin ja etenkin kloorin määrä voi kuitenkin tehdä tuhkasta tarttuvaa vielä keittoputkien lämpötiloissa. Klooria on erityisesti fume-tuhkassa, kun alkalikloridit tiivistyvät tulipesän jälkeen kiinteiden lentotuhkahiukkasten pintaan. [13] Voidaan olettaa, että keittoputkien jälkeen kaikki kloridi on jähmettynyt, minkä jälkeen tuhka ei ole tahmeaa [1]. Kiinteää tuhkaa kerrostuu kuitenkin termoforeesin vaikutuksesta, kuten luvussa 3.2.2 on esitetty.

Kuvassa 3.4 on esitetty tyypillinen lämpötilajakauma keittoputkien tuhkakerrostumassa.



**Kuva 3.4.** Tyypillinen lämpötilajakauma keittoputkien tuhkakerrostumassa [4].

Runsaasti kaliumia ja klooria sisältävän tuhkan sulamislämpötila voi olla alle 500 °C [18]. Kuvasta 3.4 nähdään, että vain runsaasti klooria ja kaliumia sisältävä tuhka voi olla tahmeaa.

Carry over -tuhkan määrä keittoputkien tuhkakerrostumissa vähenee kahdesta syystä. Osa carry over -tuhkasta on jo törmännyt tulistinputkiin. Jäljelle jäänyt carry over -tuhka on jähmettynyttä, eikä siksi tartu keittoputkiin. Carry over -tuhka voi kuitenkin aiheuttaa likaantumista keittoputkissa, jos tulistimien lämmönsiirto on heikentynyt voimakkaasti. Tässä tapauksessa keittoputkiin tuleva savukaasu on vielä tuhkan tahmealla lämpötila-alueella ( $T_{15} < T_{SK} < T_{70}$ ). Carry over -tuhkan tarttumista keittoputkien pinnoille edesauttaa se, että savukaasun virtausnopeus kasvaa tulistimen jälkeen. Lisäksi soodakattilan lämmönsiirtoputket on usein aseteltu tiiviimmin keittoputkissa kuin tulistimissa. Keittoputkien sisääntuloalue on tyypillinen paikka, jossa tukkeentumista esiintyy sekä fume- että carry over -tuhkan vaikutuksesta. [13]

Tuhkan sintraantumista tapahtuu etenkin viimeisten keittoputkien kerrostumien ulkopinnoilla, kun kerrostuman ulkopinta on korkeassa lämpötilassa. Keittoputkissa kerrostuman sisäpinta on usein lämmönsiirtoputken vaikutuksesta matalassa lämpötilassa,

jolloin tuhka ei sintraannu. Kerrostuman kasvaessa sintraantuneen tuhkan määrä lisääntyy, kun lämpötila kerrostumassa nousee. [13][20]

### 3.2.5 Kerrostuman fysikaaliset ominaisuudet

Kerrostuman fysikaaliset ominaisuudet riippuvat kerrostuman koostumuksesta, kerrostumismekanismeista, lämpötilasta, paksuudesta ja huokoisuudesta [17]. Jo tehdyt tutkimukset tuhkan ominaisuuksiin liittyen on tehty pääasiassa höyrynuohouksen yhteydessä. Tuloksia voidaan kuitenkin hyödyntää ääninuohoukseen, vaikka ääninuohouksen kerrostumaan aiheuttamia voimia ei yksiselitteisesti tunneta. Voidaan kuitenkin olettaa, että samat kerrostuman fysikaaliset ominaisuudet vaikuttavat sekä höyry- että ääninuohouksen lopputulokseen.

Adheesiovoimalla tarkoitetaan kahden tuhkahiukkasen tai tuhkahiukkasen ja kiinnittymispinnan välistä vetovoimaa. Adheesiovoima on riippuvainen hiukkaskoosta, tarttumispinnan lämpötilasta ja epätasaisuudesta sekä kerrostuman kemiallisesta koostumuksesta [21]. Tutkimuksen [21] mukaan tuhkahiukkasten välinen adheesiovoima kasvaa nopeasti lämpötilan noustessa kohti tuhkan sulamispistettä. Adheesiovoima on suurempi pienillä hiukkasilla.

Tuhkan ja putkipinnan väliseen adheesiovoimaan vaikuttavat lämpötilan ja pinnan epätasaisuuden lisäksi käytettävän teräslaadun ominaisuudet [17]. Teräksen adheesio- ja pintaenergiavoimia on tutkittu runsaasti eri yhteyksissä. Tässä työssä lämmönsiirtopinnan vaikutuksia nuohottavuuteen ei tutkita.

Tutkimuksessa [17] kerrostuman hajoamiselle esitetään kaksi eri mekanismia. Kerrostuma voi hajota hauraasti (engl. brittle break-up), kun kerrostuman ulkopintaan kohdistuva rasitus rikkoo tuhkahiukkasten väliset sidokset. Toisaalta heikosti lämmönsiirtopintaan kiinnittynyt kerrostuma voi irrota putkesta (engl. debonding), jos kerrostuman ulkopintaan kohdistuva rasitus aiheuttaa kerrostuman sisäpinnan ja putken välille suuremman rasituksen kuin niiden välinen adheesiovoima.

Adheesiovoima kerrostuman ja putkipinnan välillä on pienin silloin, kun kerrostuman sisäpinnalla putkipintaa vasten oleva tuhkakeros on huokoista tai hienojakoista [17][13][20]. Tällainen tilanne on tyypillisesti keittoputkissa ja sen jälkeisissä lämmönvaihtimissa, missä lämmönsiirtoputki on riittävän viileä, jotta tuhkan sintraantumista ei tapahdu. Nuohouksen mahdollisesti aiheuttama putkien värähtely voi heikentää kerrostuman ja pinnan välistä adheesiovoimaa, mikä voi edesauttaa kerrostuman irtoamista. Tutkimuksen [21] mukaan yli 450 °C lämpötilassa kerrostuman ja putken välinen adheesiovoima on huomattavasti pienempi kuin sintraantuneen tuhkan murtolujuus, mikä viittaa siihen, että kerrostuma irtoaa putkipinnasta todennäköisimmin kokonaan.

Tutkimuksessa [22] tutkittiin soodakattilan sähkösuotimen keräämän tuhkan sintraantumista ja sintraantumisen vaikutusta tuhkakerrostuman ominaisuuksiin. Tutkimuksessa havaittiin, että lämpötilan noustessa tuhkan huokoisuus alkaa vähentyä, kuten myös kirjassa [13] on esitetty. Tutkimuksen mukaan tuhkakerrostuman lujuus kasvaa huokoisuuden vähentyessä. Lujuus on korkeimmillaan, kun kerrostuman lämpötila lähestyy tuhkan sulamispistettä. Lujuus laskee nopeasti, kun tuhka alkaa sulaa. Osittain sula kerrostuma on kuitenkin elastinen, eikä se hajoa helposti. Sula kerrostuma on tiivis, sitkeä ja hankala nuohota [17][23]. Tutkimuksessa [21] esitetään, että sintraantuneen kerrostuman murtolujuus riippuu ainoastaan huokoisuudesta. Kuten edellä on todettu, huokoisuus puolestaan riippuu lämpötilasta.

Kerrostuma on hauras matalassa lämpötilassa. Kun lämpötila alkaa lähestyä tuhkan sulamispistettä, joka kloori- ja kaliumpitoisuudesta riippuen on tyypillisesti noin 550–800 °C, kerrostuma alkaa muuttua elastisemmaksi. [17] Kloorin vaikutus kerrostuman nuohottavuuteen on yksittäisistä aineista merkittävin [23]. Kloori alentaa lämpötilaa, jossa kerrostuma alkaa muuttua hauraasta sitkeäksi [22]. Tutkimuksen [22] mukaan jonkin verran klooria sisältävä kerrostuma muuttuu sitkeäksi lämpötilassa 500–550 C. Kalium on tuhkan ominaisuuksien kannalta merkittävä aine, koska se alentaa kloorin tavoin tuhkan sulamislämpötilaa. Natriumkarbonaatilla ei ole merkittävää vaikutusta kerrostuman nuohottavuuteen. [23]

### 3.3 Likaantumisen vaikutus soodakattilan toimintaan

Tuhkakerrostumat lämmönsiirtoputkien pinnalla heikentävät lämpövirtaa savukaasusta höyryyn. Samalla kattilan hyötysuhde laskee, kun suurempi osa polttoaineen lämpötehosta karkaa savukaasujen mukana. Likaantuminen vähentää lämpövirtaa kahdella tavalla. Kerrostuma lämmönsiirtopinnalla vähentää merkittävästi lämmönsiirtoa savukaasusta höyryyn, koska tuhkakerrostumiin lämmönsiirtokertoimet ovat pieniä verrattuna putkimateriaalien lämmönsiirtokertoimiin. Samalla tuhkakerrostuma ahtauttaa virtauskanavia, jolloin savukaasun virtausnopeus kasvaa ja savukaasu ei ehdi luovuttaa lämpöenergiaansa riittävästi. [8] Likaantuminen ja etenkin tukkeutuminen voivat häiritä virtauskenttää koko kattilan alalta, kun virtaus ohjautuu vähemmän likaantuneille alueille. Tällöin lämmönsiirto on epätasaista lämmönvaihtimen eri lämmönsiirtoputkissa. Ahtaunut savukaasukanava toimii siis kuristimen tavoin, jonka seurauksena paine pienenee ja virtausnopeus kasvaa.

Likaantumista havainnoidaan usein mittaamalla savukaasun painehäviötä lämmönvaihtimen yli. Kuten edellä on esitetty, likaantuminen kasvattaa savukaasun virtausnopeutta ja paine-eroa. Paine-eron kasvua voidaan kompensoida savukaasupuhaltimen avulla. Savukaasukanavan loppupäähän sijoitettu puhallin aiheuttaa kanavaan alipaineen, mikä aikaansaa savukaasun virtaamisen eteenpäin. Jos paine-ero lämmönvaihtimessa kasvaa, savukaasun virtausnopeus hidastuu lämmönvaihtimen jälkeen. Puhaltimen tehoa lisää-

mällä alipainetta voidaan kasvattaa, jotta riittävä savukaasun virtausnopeus saavutetaan. Samalla kuitenkin puhaltimen tehonkulutus kasvaa. [8]

Lämmönsiirtopintojen likaantumisen seurauksena heikentynyt lämmönsiirto laskee tuorehöyryn lämpötilaa ja siten vähentää soodakattilan sähköntuotantoa. Kattilan kuormitusta voidaan joutua vähentämään, jos savukaasu virtaa liian nopeasti eikä ehdi jäähtyä. Liian kuuma savukaasu voi myös aiheuttaa ongelmia materiaalien kestämisen kannalta. Kuumuutta kestävät materiaalit ovat kalliita, minkä vuoksi savukanavan komponentteja ei ole mitoitettu kestämaan huomattavasti kohonneita savukaasun lämpötiloja. Toisaalta likaantuminen rajoittaa koko sellutehtaan tuotantokapasiteettia, jos kattilan kuormaa joudutaan rajoittamaan. [8]

Lämmönsiirtopintojen korroosio aiheuttaa huoltokustannuksia. Merkittävimmät korroosiota aiheuttavat yhdisteet sisältävät klooria ja rikkiä. Etenkin kloorin määrä vaihtelee mustalipeässä, ja on tapauskohtaista, kuinka voimakkaita korroosio-ongelmia kattilassa esiintyy. Kloorin yhdisteet natriumin ja kaliumin kanssa aiheuttavat korroosio-ongelmia korkeissa lämpötiloissa tulistimissa, kun höyryn lämpötila ylittää 480–500 °C. Höyryn lämpötila joudutaankin tyypillisesti rajoittamaan tähän arvoon soodakattiloissa. Syöpyminen voi olla nopeaa varsinkin, jos kerrostuma on sulassa olomuodossa. [8]

Likaantumisongelmien vuoksi soodakattila voidaan joutua ajamaan säännöllisesti alas perusteellisen puhdistamisen ajaksi [24]. Alasajon aikana sähkönmyynnistä saatavat tulot menetetään. Koska soodakattila on osa tuotantoprosessia, koko tehtaan selluntuotanto keskeytyy. Etenkin kattilan suunnittelematon alasajo aiheuttaa huomattavia tulonmenetyksiä.



## 4. PERINTEISET LÄMMÖNSIIRTOPINTOJEN PUHDISTUSMENETELMÄT

Perinteisesti lämmönsiirtopintoja on puhdistettu höyryn avulla. Höyrynuohouksessa käytetään kattilan tuottamaa korkeapaineista höyryä. Höyry ohjataan kattilan sisään muutaman metrin pituisella eteenpäin liikkuvalla, pyörivällä höyrynuohouslaitteella. [13]

Höyrynuohouksen tehokkuus on riippuvainen höyryn dynaamisesta paineesta [13]. Höyrynuohous kohdistaa voiman kerrostuman pintaan, mikä rikkoo kerrostuman rakenteen tai aiheuttaa kerrostuman irtoamisen putkipinnasta [17]. Höyrynpaine suuttimessa on tyypillisesti 1–3 MPa, ja metrin etäisyydellä suuttimesta paine on laskenut muutama sataan kilopascaliin. Vastaavasti nopeus nousee höyryn laajentumisen vuoksi yläääniseksi. [13] Kiinteiden kerrostumien tehokas nuohousetäisyys on muutaman metrin luokkaa, mutta höyrynuohouksen teho ei riitä irrottamaan sulia tulistinalueen kerrostumia [3]. Tyypillisesti nuohoukseen käytetään 2,5–12 % tuotetusta höyrystä [8][13]. Nuohoushöyryn tarve vaihtelee kattiloiden ja savukanavan eri alueiden välillä.

Höyrynuohous vähentää kattilan sähköntuotantoa, mikä on ristiriidassa sen kanssa, että sähköntuotanto on noussut yhä tärkeämmäksi tehtäväksi nykyaikaisessa soodakattilaprosessissa. Höyry irrottaa tuhkaa ainoastaan ensimmäisestä pinnasta johon höyrystuisku osuu, minkä vuoksi höyrynuohouksen toimivuus on rajoittunutta tiiviissä lämmönvaihtimissa. Lisäksi höyrynuohous voi aiheuttaa korroosio-ongelmia, kun höyry tiivistyy teräspinoille.

Höyrynuohous toimii pitkällä toimintaväleillä verrattuna ääninuohoukseen. Tällöin tuhkaa ehtii kerrostua ja sintraantua enemmän nuohouskertojen välillä. Pitkän nuohousvälin vuoksi suuri määrä tuhkaa irtoaa lyhyessä ajassa savukaasuvirtaukseen. Tuhkasuodattimet kykenevät suodattamaan vain rajallisen määrän tuhkaa, minkä vuoksi höyrynuohous aiheuttaa emissiopiikkejä savukaasupäästöihin. Lisäksi suuret irtoavat tuhkakerrostumat voivat juuttua myöhempien lämmönsiirtoputkien väleihin.

Likaantumisongelmien vuoksi joissain tapauksissa soodakattila ajetaan säännöllisesti alas perusteellisen puhdistamisen ajaksi [24][25]. Huoltoseisokin aikana kerrostumia poistetaan mekaanisesti. Höyrynuohoimilla voidaan ruiskuttaa myös vettä alasajon aikana.

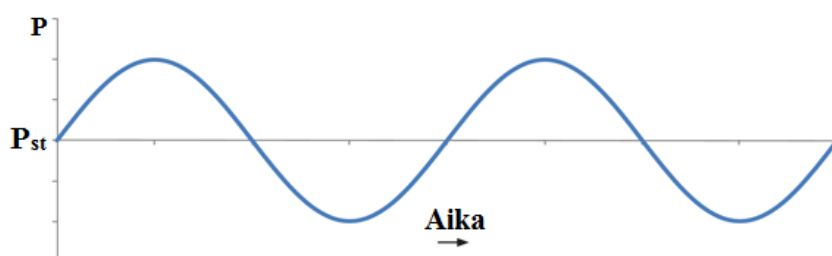
## 5. ÄÄNINUOHOUK

Ääninuohous on höyrynuohoukseen verrattuna vähän käytetty menetelmä lämmönsiirtopintojen puhdistuksessa. Uuteen kattilaan suunnitellaan yleensä höyrynuohousjärjestelmä. Höyrynuohoinlaitteiden rikkoutuessa tai laiteuusintoja tehdessä ääninuohous on kuitenkin vaihtoehtoinen menetelmä. Kokeiluja soodakattilan ääninuohoamisesta on tehty jo pitkään, mutta menetelmä ei ole vakiintunut höyrynuohouksen korvaajana. Tuhkan koostumus on soodakattilaprosessin kehityksen myötä muuttunut ja ääninuohouslaitteet ovat kehittyneet, minkä vuoksi ääninuohouksen soveltuvuutta soodakattilaprosessin yhteyteen on syytä tutkia edelleen.

Julkista tutkimusmateriaalia ääninuohouksesta soodakattilaprosessin yhteydessä ei ole saatavilla. Tässä luvussa aihetta on käsitelty laitevalmistajien välittämiin tietoihin perustuen. Lähteinä on käytetty lisäksi yleisiä fysiikan ja akustiikan teoksia, joiden tietoa on pyritty tässä työssä soveltamaan ääninuohousprosessiin. Luvussa 5.5 on käsitelty, millä soodakattilan savukanavan alueilla ääninuohouksen voidaan olettaa toimivan.

### 5.1 Ääniaalto

Mekaanisella värähtelyllä tarkoitetaan kappaleen tai väliaineen edestakaista liikettä. Paineilmalla toimivissa ääninuohoimissa värähtelyn saa tyypillisesti aikaan värähtelevä metallikalvo [24]. Kalvon värähtely aiheuttaa väliaineen molekyyliden edestakaista liikettä, minkä seurauksena syntyy pientä painevaihtelua. Tämä äänenpaine määritellään ilman staattisen paineen ja hetkellisen paineen erotuksena  $P = P_{huippu} - P_{st}$ . Mekaaninen värähtely kuullaan äänenä, mikäli värähtely tapahtuu kuuluvan äänen alueella (yli 20 Hz). [26] Kuvassa 5.1 on havainnollistettu värähtelyn aiheuttamaa paineenmuutosta väliaineessa.



**Kuva 5.1.** Paineenvaihtelu havainnointipisteessä ajan funktiona.

Värähtely on sinimuotoista, jos värähtely tapahtuu vain yhdellä taajuudella, kuten tilanne on kuvassa 5.1 [26]. Vaaka-akseli on staattinen paine  $P_{st}$  eli ympäristössä vallitseva

paine. Pitkittäin etenevä tasoaalto nostaa havainnointipisteessä paineen sen suurimpaan arvoonsa värähtelyn aallonpituuden mittaisin välimatkoin. Tasoaaltojen huippujen välissä paine on vastaavasti alhaisimmillaan. Paine-ero aiheuttaa molekyylien liikettä matalamman paineen suuntaan. Kun havainnointipisteen paine kasvaa, väliaineen molekyylit työntyvät eteenpäin. Painehuipun kohdalla väliaineen molekyyli saavuttaa suurimman etäisyytensä  $x/2$  tasapainoasemastaan. Painehuipun jälkeen molekyyliin kohdistuu paine-eron aiheuttama voima, joka siirtää molekyylin etäisyydelle  $x/2$  tasapainoasemastaan. Molekyylin liikepoikkeama on siis  $x$ .

Värähtelyn aallonpituuden  $\lambda$  kasvaessa myös molekyylin liikepoikkeama  $x$  kasvaa, kun äänenpaine  $P$  pysyy vakiona. Molekyylin liikepoikkeamalla  $x$  ja äänivärähtelyn taajuudella on kaavan

$$v = 2\pi f x \quad (5.1)$$

mukainen yhteys, jossa  $v$  on molekyylin liikenopeus. Kaava (5.1) pätee, kun värähtely tapahtuu vain yhdellä taajuudella. Liikenopeuden ja -poikkeaman arvot ovat molekyylin värähtelyn huippuarvoja. Molekyylin liikenopeus vaikuttaa äänenpaineeseen kaavan

$$P = v\rho c \quad (5.2)$$

mukaisesti, jossa  $c$  on äänen etenemisnopeus väliaineessa ja  $\rho$  on väliaineen tiheys. Äänen etenemisnopeudella, äänentaajuudella ja äänivärähtelyn aallonpituudella on kaavan

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (5.3)$$

mukainen yhteys. [26] Yhdistämällä kaavat (5.1), (5.2) ja (5.3) päästään muotoon

$$P = 2\pi\rho \frac{c^2}{\lambda} x, \quad (5.4)$$

josta nähdään, että molekyylin liikepoikkeama kasvaa lineaarisesti aallonpituuden kasvaessa, kun äänenpaine on vakio.

Kaavat (5.1) ja (5.2) ovat yksinkertaistuksia, jotka pätevät sinimuotoiselle tasoaallolle. Kattilaympäristössä värähtelyä tapahtuu laajalla taajuuskaistalla [27], ja värähtelyn matemaattinen käsittely on monimutkaista. Ääniaalto ei myöskään ole tasoaalto, vaan ääniaalto leviää torven suulta edetessään. Yksinkertaistuksilla voidaan kuitenkin havainnollistaa, miten äänentaajuus vaikuttaa äänen fysikaaliseen käyttäytymiseen. Kattilaolosuhteissa torven suulla väliaineen molekyylin liikepoikkeama  $x$  saa kaavojen (5.3), (5.4), (5.7) ja (5.9) perusteella arvoja väliltä 0,5–7 mm, kun äänenpaine torven suulta mitattuna on 632 Pa, savukaasun lämpötila on 500 °C, savukaasun tiheys on  $1,35 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  ja äänentaajuus vaihtelee välillä 20–250 Hz. Lämmönsiirtoputkien halkaisijat ovat tyypillisesti

kymmeniä millimetrejä [3]. Liikepoikkeaman arvo pienenee etäisyyden kasvaessa torven suulta, koska äänenpainetaso laskee.

Äänenpainetaso ilmoitetaan usein logaritmista desibeli-asteikkoa käyttäen. Äänenpainetaso  $L_p$  desibeleinä mittauspisteessä 1 voidaan ratkaista kaavasta

$$L_p = 20 \lg \frac{P_1}{P_0}, \quad (5.5)$$

jossa  $p_1$  on äänenpainetaso pisteessä 1 ja  $p_0$  on kansainvälisesti sovittu referenssiarvo, joka on 20  $\mu\text{Pa}$  [26]. Kaavaa muokkaamalla voidaan äänenpainetasoksi pisteessä 1 ratkaista

$$P_1 = P_0 10^{\frac{L_p}{20}}. \quad (5.6)$$

Kun äänenpainetaso desibeleinä on valmistajan ilmoittama 150 dB [24], voidaan painetasoksi ratkaista

$$P_1 = 632 \text{ Pa}. \quad (5.7)$$

Tällöin paine-ero tasoaltorintaman yli on 1,26 kPa. Logaritmisen asteikon vuoksi 10 desibelin muutos tarkoittaa äänen intensiteetin kaksinkertaistumista.

Usean äänilähteen tuottama kokonaisäänepaine voidaan laskea suoraan osatekijöidensä summana. Tällöin on kuitenkin käytettävä pascalleiksi muutettuja yksiköitä. 150 dB vastaa kaavan (5.7) mukaan 632 pascalin äänenpainetta. Kaksi yhdistettyä 632 pascalin äänilähdettä tuottaa siis yhteensä 1264 pascalin paineen, joka kaavan (5.5) mukaan on noin 156 dB. Ääninuohoimia käytetään usein pareittain kattilan vastakkaisille seinille asennettuna. Suuremman äänenpaineen lisäksi pareittain asennetuilla nuohoimilla saavutetaan symmetrisempi puhdistustulos. Usean äänilähteen vaikutusta äänikenttään ja nuohoustulokseen ei tutkita tässä työssä.

Väliaineen lämpötila  $T$  ja moolimassa  $M$  vaikuttavat äänennopeuteen kaavan

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (5.8)$$

mukaisesti, jossa  $R = 8,31447 \text{ kJ/kmolK}$  on kaasuvakio ja  $\gamma$  on ominaislämpöjen suhde eli adiabaattivakio [28][29]. Savukaasun moolimassa on riippuvainen veden määrästä. Riittävän tarkkaan lopputulokseen päästään käyttämällä ilman ominaisuuksia. Ilmalle moolimassa  $M = 28,97 \text{ g/mol}$  ja adiabaattivakio  $\gamma = 1,4$  [29]. Kaava voidaan yksinkertaistaa muotoon

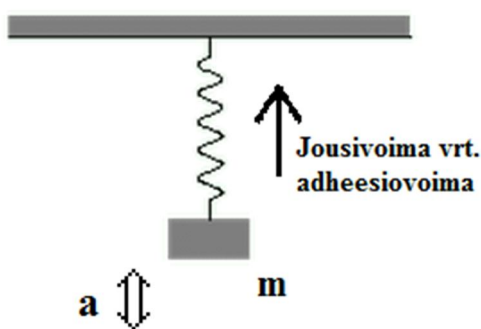
$$c = c_0 \sqrt{\frac{T}{273 \text{ K}}}, \quad (5.9)$$

jossa  $c_0$  on äänennopeus ilmassa lämpötilassa  $0^\circ\text{C}$ , joka on  $331,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  [26]. Kaavasta huomataan, että äänennopeus viileässä ilmassa on huomattavasti matalampi, kuin kuumassa savukaasussa. Jos värähtelyn taajuus pysyy vakiona, aallonpituus  $\lambda$  kasvaa äänennopeuden  $c$  kasvaessa.

Aallonpituus 20 Hz:n ääninuohoimella on kymmenkertainen verrattuna 200 Hz:n ääninuohoimeen, kuten kaavasta (5.3) nähdään. Jos äänentaajuus vaihtelee välillä 20–250 Hz ja väliaineen lämpötila välillä 500–1000 K, aallonpituus voi vaihdella välillä 2–30 m. Suuri vaihteluväli korostaa sitä, että kattilan olosuhteilla ja ääninuohoimen tuottaman äänen ominaisuuksilla on hankalasti ennakoitava vaikutus ääninuohouksen toimivuuteen. Äänentaajuus 250 Hz kuulostaa matalalta ääneltä, mutta tämän työn yhteydessä sitä käsitellään korkeana äänentaajuutena.

## 5.2 Resonointi

Resonanssilla tarkoitetaan värähtelyä, jossa värähtelijään kohdistuvan ulkoisen voiman suunta vaihtelee värähtelijän ominaistajuuksella. Värähtelijään vaikuttaa harmoninen voima, eli voima kohdistuu aina samaan suuntaan kuin värähtelijän liikesuunta. Yksinkertaistuksena ilmiöstä käytetään useissa yhteyksissä jousi-massa-systeemiä [26][30], joka on esitetty kuvassa 5.2.

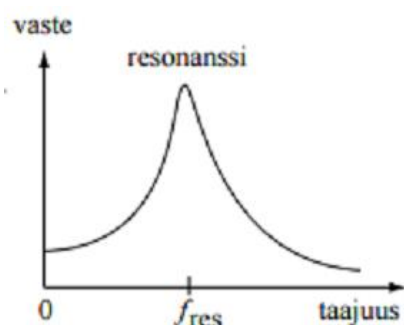


**Kuva 5.2.** Jousi-massa-systeemi, joka värähtelee systeemin ominaisvärähtelytaajuudella.

Kappaleella on massa  $m$  ja siihen kohdistuu jousivoiman aiheuttama kiihtyvyys  $a$ . Jousen varassa roikkuva punnus alkaa värähdellä ominaistajuuksellaan, kun se poikkeutetaan tasapainoasemastaan. Ominaisaajuus  $f_0$  voidaan laskea kaavasta

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (5.10)$$

jossa  $k$  on jousivakio ja  $m$  on punnuksen massa. [26] Systeemillä voidaan havainnollistaa myös tuhka hiukkasen värähtelyä. Jousivakio vastaa tuhka hiukkasesta pintaan kiinnittävää adheesiovoimaa. Kaavasta voidaan todeta, että suuremmalla tuhka hiukkasella on matalampi ominaisvärähtely- eli resonanssitaajuus. Toisaalta mitä voimakkaampi adheesiovoima hiukkasen ja pinnan välillä vallitsee, sitä suurempi on ominaisvärähtelytaajuus. Esitetyllä systeemillä on vain yksi liikesuunta ja ominaisvärähtelytaajuus. Todellisuudessa tilanteessa tuhka hiukkanen voi liikkua useaan suuntaan, minkä vuoksi resonanssitaajuuksia on useita. Kuvassa 5.3 on havainnollistettu resonoinnin merkitystä värähtelijän liikepoikkeaman suuruuteen.



**Kuva 5.3.** Vasteen suuruus taajuuden funktiona [31].

Jos havainnollistamiseen käytetään jousi-massa-systeemiä, kuvassa 5.3 vasteella tarkoitetaan punnuksen liikepoikkeamaa, joka kasvaa moninkertaiseksi resonanssitaajuuden lähellä. Jos ääninuohous aiheuttaa tuhkan värähtelyä resonanssitaajuudella, irtoamisen todennäköisyys pinnasta kasvaa.

Mikäli ääninuohous aiheuttaa lämmönsiirtoputkien värähtelyä resonanssitaajuudella, rakenteet voivat altistua mekaaniselle rasitukselle. Julkisia dokumentteja ääninuohouksen aiheuttamista vaurioista ei kuitenkaan ole tiedossa. Putkien ominaisvärähtelytaajuutta tai ääninuohouksen mahdollisesti aiheuttamaa rasitusta kattilarakenteisiin ei käsitellä tässä työssä.

### 5.3 Äänen vaimentuminen lämmönvaihtimessa

Ääni vaimenee kattilassa nopeasti. Vaimenemista aiheuttaa äänen absorboituminen savukaasuun ja tuhkaan. Lisäksi torven suulta lähtevä ääniaalto leviää edetessään, jolloin äänen intensiteetti pienenee etäisyyden kasvaessa torven suulta. Tätä äänen leviämisen vaimennusta voidaan pitää merkittävänä äänen vaimenemismekanismina. Leviämisen vaimennus on riippuvainen kattilan akustisesta geometriasta. Jos ääni etenee ahtaassa tilassa, äänen suuntavaikutus vähenee. Sen sijaan avoimessa tilassa äänen suuntavaiku-

tus lisääntyy ja leviämisabsorptio voimistuu. Leviämisvaimennuksen vaikutusta ei ole tutkittu tässä työssä.

### 5.3.1 Äänen absorboituminen savukaasussa

Väliaineen absorptiovaikutus on riippuvainen äänentaajuudesta sekä väliaineen ominaisuuksista. Molekyylivaimennus (engl. molar relaxation) on merkittävin absorptiomekanismi huoneilmassa, ja se johtuu väliaineen molekyylien välillä tapahtuvista energiasiirtymistä. Ilmassa molekyylivaimennus johtuu pääasiassa veden ja hapen välisestä vuorovaikutuksesta. [26] Savukaasussa on huomattavasti enemmän vesihöyryä kuin ilmassa [8]. Savukaasussa on sen sijaan vähemmän vapaata happea, koska suurin osa palamisilman mukana tulleesta hapestä reagoi kattilassa muodostaen eri yhdisteitä. Savukaasussa on lisäksi merkittäviä määriä sellaisia yhdisteitä, joita ilmassa ei ole. Nämä yhdisteet voivat mahdollisesti lisätä molekyylivaimennuksen määrää. Tässä työssä molekyylivaimennusta savukaasussa ei tutkita.

Muita väliaineen absorptiomekanismeja ovat viskositeettivaimennus ja lämmönsiirtymästä johtuva vaimennus, jotka ovat pieniä huoneilmassa [26]. Kattilaympäristössä näiden absorptiomekanismien vaikutusten voidaan olettaa olevan pieniä, koska kuuman savukaasun viskositeetti ja lämmönjohtavuus eivät poikkea merkittävästi ilman ominaisuuksista.

Teoreettisen absorptiokertoimen määrittäminen heterogeeniselle kaasulle on hankalaa [32, s. 148]. Käytännössä ääninuohouksen tehokasta toimintaetäisyyttä voidaan arvioida mittaamalla äänenpainetasoja kattilaympäristössä. Liitteessä A on esitetty, että laitevalmistajan kokemuksen mukaan 100–250 Hz taajuutta käytettäessä tehokas nuohousetäisyys on noin 2–7 metriä etäisyyden lyhentyessä nopeasti äänentaajuutta nostettaessa. Nuohousetäisyyttä rajoittaa äänen vaimenemisen lisäksi äänen heijastuminen. Ääniaalto heijastuu lämmönsiirtoputkesta, jos putken läpimitta on äänivärähtelyn aallonpituuden luokkaa [26]. Siksi matalataajuisen äänen voidaan olettaa etenevän lämmönvaihtimessa pidemmälle. Äänen heijastumista on käsitelty seuraavassa alaluvussa.

Liitteessä A on epäilty, että tehokas nuohousetäisyys heikentyy savukaasun lämpötilan noustessa. Tutkimuksen [33] perusteella vaikuttaa, että äänen absorboituminen ilmassa vähentyy lämpötilan noustessa, mikä parantaisi äänen etenemistä. Tutkittu lämpötila-alue on kuitenkin hyvin matala (–10–30 °C) verrattuna savukaasun lämpötiloihin. Lisäksi tutkittu väliaine on ilma. Absorptiokertoimen laskemiseen ilmakehässä on kehitetty menetelmä [34], jonka mukaan sekä lämpötilan että taajuuden nousu alentavat absorptiokerrointa. Menetelmän soveltuvuutta savukaasussa korkeissa lämpötiloissa on vaikeaa arvioida.

Kirjallisuuden [26][33] ja edellä esitellyn laskentamenetelmän [34] mukaan absorptiokertoimet ilmassa ovat hyvin pieniä, eikä absorptiovaimennuksella ole juuri merki-

tystä äänen vaimentumisessa lyhyillä etäisyyksillä. Laitevalmistajat ovat esittäneet väliaineen absorption kuitenkin merkittävänä tekijänä äänen vaimenemisessa [liite A][35]. On mahdollista, että kuuma savukaasu absorboi ääntä enemmän kuin ilma. Tässä työssä savukaasun aiheuttamaa äänen absorboitumista ei kuitenkaan käsitellä enempää, ja väliaineen absorption vaikutuksen oletetaan olevan pieni kattilan ääninuohouksessa.

### 5.3.2 Äänen absorboituminen tuhkakerrostumaan

Äänen vaimenemista tapahtuu väliaineen lisäksi rakenteeseen. Kun ääniaalto osuu lämmönsiirtoputken pinnalla olevaan tuhkakerrostumaan, osa äänitehosta heijastuu pois pinnasta ja osa kulkee tuhkakerroksen sisään vaimentuen eli absorboituen samalla. Osa äänitehosta voi edetä koko kerrostuman läpi heijastuen putkipinnasta takaisin. Putkipinta heijastaa ääntä lähes täydellisesti. [36]

Äänen absorptiosuhde  $\alpha$  tarkoittaa rakenteen pinnan läpäisevän intensiteetin eli rakenteeseen absorboituvan intensiteetin  $I_i - I_r$  ja koko rakenteen pintaan osuvan intensiteetin  $I_i$  suhdetta [36]

$$\alpha = \frac{I_i - I_r}{I_i}, \quad (5.11)$$

jossa  $I_r$  on rakenteen pinnasta heijastuvan äänen intensiteetti. Äänen intensiteetillä ja äänenpaineella on yhteys

$$I = \frac{p^2}{z}, \quad (5.12)$$

jossa  $z$  on väliaineen aaltovastus [26].

Rakenteen pinnasta heijastuvan äänen intensiteetti on oleellinen suure, kun tarkastellaan äänen vaimentumista kattilan sisällä. Mitä pienempi absorptiosuhde  $\alpha$  on, sitä enemmän ääniteho heijastuu tuhkakerrostuman pinnasta. Tässä työssä absorptiolla viitataan ensisijaisesti äänen heijastumisen määrään, koska se vaikuttaa ääninuohouksen tehokkaaseen toimintaetäisyyteen. Äänen absorboitumisella tarkoitetaan myös ääniaallon energian muuttumista lämpöenergiaksi, kun ääniaalto etenee kerrostuman sisällä. Työssä ei oteta kantaa siihen, kuinka suuri äänen intensiteetti voi edetä kerrostuman läpi ja heijastua putkipinnasta takaisin savukaasuun.

Heijastumisen määrää rakenteen pinnassa määrittää materiaalin virtausvastus eli impedanssi. Mitä suurempi tuhkan virtausvastus on, sitä suurempi osa äänitehosta heijastuu. Myös äänen tulokulma vaikuttaa absorptiosuhteeseen siten, että vinosti pintaan osuva ääniaalto heijastuu enemmän. [26]



Tuhkan huokoisuus kasvattaa virtausvastusta, koska ääniaalto saa huokosissa olevat kaasumolekyylit värähtelemään, jolloin äänienergiaa muuttuu kitkan vaikutuksesta lämpöenergiaksi [36]. Absorptio voimistuu etenkin, jos huokoset ovat yhteydessä toisiinsa [26]. Hyvin hienojakoinen tuhka voi olla tiivistä, koska hyvin pienten tuhkahiukkasten välissä ei ole merkittävästi ilmaa ja tuhkan huokoisuus on matala. Sintraantuminen vähentää samalla tavalla tuhkan huokoisuutta. Tällöin tuhkan virtausvastus voi olla matala ja absorptiokerroin suuri, jolloin suuri osa tuhkakerrostuman pintaan osuvasta äänen intensiteetistä etenee tuhkaan. Toisaalta pienen virtausvastuksen vuoksi vain pieni osa kerrostuman sisällä etenevän ääniaallon energiasta absorboituu eli muuttuu lämpöenergiaksi, jolloin ääniaalto voi heijastua putkipinnasta ja edetä takaisin savukaasuun menettäen vain pienen osan energiastaan. Kattilaympäristössä ääni heijastuu tehokkaimmin silloin, kun lämmönsiirtopinnat ovat puhtaina tai kerrostunut tuhka on huokoista. Tässä työssä absorption ja heijastumisen määrää ei pyritä määrittämään.

Äänen heijastuminen rakenteen pinnasta riippuu aineen virtausvastuksen lisäksi äänentaajuudesta. Ääninuohouksen taajuusalueella (15–250 Hz) korkean äänentaajuuden absorboituminen voi olla moninkertaisesti voimakkaampaa kuin matalan äänentaajuuden absorptio. Lisäksi kerrostuman kasvu lisää oleellisesti absorboitumisen määrää. [26]

Kun ääniaalto etenee tuhkakerrostuman läpi ja heijastuu lämmönsiirtoputkesta, värähtelevän hiukkasen liikenopeus saa suurimman arvonsa etäisyydellä  $\lambda/4$  putken seinämästä. Mikäli äänentaajuus on korkea ja putken pinnalla oleva tuhkakerrokset paksu, voi liikenopeus kasvaa suureksi kerrostuman sisällä. Tällaisessa tilanteessa kaasumolekyylit värähtelevät voimakkaasti kerrostuman huokosissa, ja absorptio on voimakkaimmillaan. [26] Näin voidaan selittää, miksi korkeataajuinen ääni absorboituu rakenteessa enemmän. Kun rakenteen paksuus on pieni  $d \ll \lambda/4$ , värähtelyn liikenopeuden magnitudi kerrostumassa on pieni. Tilannetta voidaan havainnollistaa lisäämällä kuvan 5.1 käyrälle peilikuva, jolloin kohtaan  $\lambda/4$  muodostuu kupu, jonka kohdalla liikenopeus on voimakkaimmillaan. [36] Todellisessa kattilaympäristössä nuohottavalla alueella tuhkakerrostumiin paksuudet eivät kuitenkaan saavuta arvoja  $\lambda/4$  (0,35–7 m) äänentaajuuksilla 25–250 Hz. Yli 1 kHz:n äänentaajuuksilla arvo  $\lambda/4$  on jo hyvin pieni, jolloin edellä kuvattu liikenopeuden suurin arvo voidaan saavuttaa, mikä tukee tutkimuksen [27] havaintoja, jossa hyvin korkeat äänentaajuudet vaimenevat voimakkaasti.

Ääni heijastuu, kun ääniaallon reitillä olevan esteen koko on äänen aallonpituuden luokkaa [26]. On mahdollista, että korkeataajuiseen ääneen verrattuna matalataajuinen ääni etenee lämmönvaihtimessa helpommin törmäämättä putkiin, jolloin heijastumista tai absorptiota ei tapahdu. Tällä ilmiöllä voitaisiin perustella erään laitevalmistajan [35] väite, jonka mukaan hyvin matalataajuinen ääni etenee kattilassa huomattavasti pidemmälle kuin korkeataajuinen ääni.

Tutkimuksessa [27] havaittiin, että ääni heijastuu tehokkaasti tutkitussa lämmönvaihtimessa. Toisaalta tutkitussa kattilassa 150 dB:n ja 100 Hz:n ääninuohoin ei havaintojen

mukaan tuottanut riittävää äänenpainetta kerrostuman irrottamiseen edes torven suulla. Tutkimuksessa ei kommentoitu väliaineen absorptio tai leviämismuutoksen vaikutusta. Mittaustulokset antavat kuitenkin viitteitä siitä, että väliaineen absorptio ja leviämismuutoksen yhdistettynä vaimentavat ääntä enemmän kuin tuhkan aiheuttama absorptio.

Tutkimuksessa [37] selvitettiin kivihiili- ja öljypolton pohjatuhkan ääneneristysominaisuuksia. Tutkittu tuhka koostui pääasiassa piioksidista ja alumiinioksidista. Eristeeseen oli lisätty 20 % sementtiä. Seosaineena käytetyn sementin absorptio-ominaisuudet ovat tutkimuksen mukaan lähellä käytetyn pohjatuhkan ominaisuuksia. Tutkimuksen tuloksia voitaneen vertailla äänen vaimenemiseen soodakattilan tuhkakerrostumissa. Tutkimuksessa havaittiin, että matalilla äänentaajuuksilla (alle 250 Hz) eristeen absorptiokerroin eristeen huokoisuudesta riippumatta oli alle 0,1. Alle 100 Hz:n taajuuksilla absorptiosuhde oli hyvin pieni. Yli 500 Hz:n taajuuksilla tiiviin eristeen (huokoisuus 12 %) absorptiosuhde tasaantui noin 0,2:een. Huokoisempien eristeiden (huokoisuus 28–37 %) absorptiosuhde kasvoi yli 500 Hz:n taajuuksilla nopeasti yli arvon 0,4. Myös eristeen paksuudella havaittiin selkeä yhteys absorptiokertoimen kasvuun. Ääninuohouksen kannalta tällä ei kuitenkaan liene merkitystä, koska toimiva ääninuohous ehkäisee paksumien kerrostumien muodostumisen.

Kaavasta (5.12) voidaan laskea, että absorptiosuhteella 0,1 äänenpaine laskee heijastuksen aikana noin 5 %. Kaavan (5.6) mukaan 130 dB vastaa 63 Pa:n äänenpainetta. Jos tämä äänenpaine vaimenee 5 %:lla, äänenpainetasoksi saadaan 129,6 dB. Voidaan todeta, että hyvin heijastava kerrostuma ei ratkaisevasti vähennä äänenpainetta yhden heijastuksen aikana. Kymmenen heijastusta vastaavassa tilanteessa vähentää äänenpaineen arvoon 125,4 dB. Neljän desibelin vaimennus voi olla ratkaiseva ääninuohouksen toimivuuden kannalta. Lämmönvaihtimessa lämmönsiirtoputket on asennettu tiheästi, ja edetessään muutaman metrin matkan etenkin korkeataajuinen ääni heijastuu useita kertoja. Näin voidaan perustella, miksi ääninuohoimen tehokas toiminta-alue voi olla vain muutamien metrien luokkaa. Jotta riittävä äänenpainetaso saavutetaan sisemmällä putkipinnoilla, äänen on heijastuttava tehokkaasti lämmönvaihtimissa. Tämä edellyttää joko puhtaita putkipintoja tai hyvin heijastavia tuhkakerrostumia.

## 5.4 Ääninuohouksen periaate

Ääninuohoin tuottaa voimakkaita, matalataajuisia ääniaaltoja. Ääniaaltojen vaikutus tuhkakerrostumien irtoamiseen ei ole yksiselitteinen. Ääniaalto aiheuttaa savukaasuvirtauksessa kulkeutuvan tuhkahiukkasen värähtelyä estäen suurien hiukkasrykelmien muodostumista [38]. Toisaalta jo kerrostumassa olevan tuhkahiukkasen mahdollinen värähtely rasittaa kerrostuman rakennetta ja voi aikaansaada kerrostuman murtumisen. Samalla ääniaallon aiheuttama painegradientti aiheuttaa voimaresultantin kerrostuman pintaan, kun paine kerrostuman sisäpinnalla on korkeampi kuin sen ulkopinnalla [17]. Eräs laitevalmistaja [38] on esittänyt, että ääniaalto ohentaa virtauksen rajakerrosta ker-

rostuman pinnalla, mikä altistaisi kerrostuman pinnalla olevan tuhkahiukkasen tempautumaan savukaasuvirtaukseen. Yleisesti voidaan todeta, että tuhkahiukkanen irttaa kiinnittymispinnastaan, jos ääniaallot kohdistavat hiukkaseen suuremman voiman pois päin kerrostumasta kuin mikä hiukkasta kerrostumaan sitovien voimien suuruus ovat. Ääninuohousta voidaan kuvailla tuhkan kerrostumista ehkäisevänä menetelmänä.

Ääninuohoin toimii joko paineilmalla tai nestekaasulla. Yksinkertainen paineilmalla toimiva ääninuohoin koostuu torvesta, generaattorista ja kompressorista. Generaattoriin syötetään korkeapaineista ilmaa, mikä aiheuttaa generaattorin sisällä olevan metallikalvon värähtelyä. Värähtelyssä syntyvä ääniaalto ohjataan torviosan läpi kattilan sisälle. Torven pituus määrittää äänentaajuuden siten, että matalampi taajuus saavutetaan pidemmällä torviosalla. Kaasulla toimivat nuohoimet ovat rakenteeltaan huomattavasti monimutkaisempia. Nestekaasulla toimivassa kaasupulssinuohoimessa pieni määrä kaasua poltetaan laitteen polttokammiossa. Kaasupulssinuohoimella saavutetaan perinteistä paineilmaa käyttävää ääninuohointia korkeampia äänenpainetasoja. [24] Nuohouksessa käytetään tyypillisesti lyhyitä, 10–15 sekunnin jaksoja 5–10 minuutin välein. Jaksojen ja taukojen pituudet vaihtelevat, ja ne optimoidaan tapauskohtaisesti. [24][38]

Ääninuohous soveltuu kiinteiden kerrostumien irrottamiseen [24][38]. Myös savukaasun ja kerrostuman kosteuspitoisuus vaikuttaa nuohottavuuteen [27]. Kosteus sitoo tuhka-hiukkasia yhteen, mikä voi heikentää ääninuohoamisen vaikutusta. Savukaasuvirtauksen on oltava riittävän voimakas, jotta irronnut tuhka siirtyy pois lämmönsiirtopinnalta. [38]

Ääninuohouksessa käytetään matalataajuisia ääntä. Ääninuohouksessa käytettävät äänentaajuudet ovat yleisesti välillä 15–250 Hz [24][38][25]. Matalataajuinen ääni absorboituu väliaineessa ja rakenteessa korkeataajuisia ääntä vähemmän. Lisäksi matalataajuinen ääni diffraktoituu eli taipuu paremmin. [26]

Infraäänien äänentaajuus on kuuluvan äänen taajuutta matalampi. Laitevalmistajan [35] mukaan infraäänitaajuuksia käyttämällä voidaan saavuttaa monia etuja kuuluvaan äänentaajuuteen verrattuna. Laitevalmistajan mukaan infraäänien käyttäminen vähentää kuultavaa melua. [35] Fysikaalisesti voidaan perustella, että diffraktoituminen paranee ja äänen absorboituminen väliaineessa vähenee, kun äänentaajuus pienenee [26][32]. Haittapuolena on esitetty liitteessä A, että infrataajuinen ääni voi aiheuttaa kattilarakenteiden värähtelyä ja altistaa siten rakenteet mekaaniselle rasitukselle.

Kuten on todettu, kuuluvan äänen taajuusalueella toimiva ääninuohous on tehokasta vain muutamien metrien etäisyydellä nuohoimesta. Laitevalmistajan [35] väitteen mukaan infraääninuohouksen tehokas nuohousetäisyys voi olla huomattavasti laajempi. Kuten luvussa 5.3 on todettu, infraääni absorboituu väliaineeseen ja rakenteisiin vähemmän kuin kuuluva ääni. Lisäksi äänen taipuminen ja heijastuminen vaikuttavat siihen, kuinka hyvin ääni kantautuu sokkeloissa lämmönvaihtimissa.

Pidemmän aallonpituuden käyttäminen lisää savukaasun molekyylien liikepoikkeamaa, eli aiheuttaa voimakkaampaa savukaasun edestakaista virtausta, mikä on perusteltu luvussa 5.1 kaavoilla (5.1–5.4). Erään laitevalmistajan [35] mukaan suuri liikepoikkeama lisää ääninuohouksen tehokkuutta. Valmistajan mukaan pidempi liikepoikkeama voi lisätä virtauksen turbulenssia lämmönsiirtoputkien virtauksen takapuolella ehkäisten tuhkan tarttumista kerrostuman pintaan. Lisäksi voidaan todeta, että pidemmän aallonpituuden vuoksi kerrostuman ja kaasun välinen paine-ero kohdistaa voiman suuremmalle alalle ja voi siten edesauttaa kerrostuman irtoamista.

Akustinen geometria lämmönvaihtimissa on monimutkainen, ja äänenpainetasojen laskeminen teoreettisesti on hankalaa. Laitevalmistaja [35] ilmoittaa käyttävänsä tietokonemallinnusta äänen käyttäytymisen arviointiin. Tehokkaan nuohousetäisyyden ja vaadittavien äänenpainetasojen selvittämiseen vaaditaan kuitenkin käytännön havaintoja.

## 5.5 Soodakattilan ääninuohoamisen edellytykset

Soodakattilan tuhkakerrostumat ovat ääninuohoamisen kannalta haastavia. Korkea kloorin ja kaliumin määrä voivat tehdä tuhkasta tarttuvaa laajalla lämpötila-alueella. Kuten liitteessä A on todettu, ääninuohous ei ole tehokas menetelmä osittain sulan kerrostuman poistamiseen. Ääninuohousta sovelletaankin lähinnä täysin kiinteiden kerrostumien poistamiseen.

Vapaan rikkidioksidin määrä savukaasuissa on vähentynyt useissa moderneissa soodakattiloissa lähes olemattomaksi [3]. Samalla vetysulfaatin muodostumisesta on pääosin päästy eroon, kuten luvussa 3.1.1 on esitetty. Toisaalta vapaan rikkidioksidin puute voi johtaa alkalikloridien määrän kasvuun, kuten luvussa 3.1.2 on esitetty. Aiemmin vetysulfaatti aiheutti likaantumisongelmia etenkin keittoputkien loppuosien ja ekonomaiserin viileillä pinnoilla [13]. Tämä ongelma lienee vähentynyt, mutta nykyaikaisissa soodakattiloissa kloridit voivat aiheuttaa tahmeita kerrostumia tulistimissa ja keittoputkissa. Erään tutkimuksen [39] mukaan kaliumin ja kloorin määrä on useimmissa ruotsalaisissa soodakattiloissa matala, minkä vuoksi kloori- ja kaliumyhdisteet ei aiheuta merkittäviä likaantumisongelmia.

Kerrostuma on tehokkaimmin ääninuohottavissa alueilla, joissa tuhka on kiinteää [38]. Kuten on todettu, tuhkan sulamislämpötila riippuu kloorin ja kaliumin määrästä. Savukaasun lämpötilat ovat riippuvaisia myös kattilan kuormitusasteesta ja likaantumisen tasosta. Savukaasu ei jäähdy likaantuneessa lämmönvaihtimessa suunniteltuun lämpötilaan. Yksiselitteisesti ei voidakaan todeta, millä soodakattilan alueella tuhka muuttuu tahmeasta kiinteäksi. Voidaan kuitenkin olettaa, että tuhka on täysin kiinteää keittoputkien jälkeen.

Kuten luvussa 3.2.2 on esitetty, viileillä pinnoilla (alle 300 °C) sintraantumista ei juuri tapahdu, ja fume-tuhka on lämmönsiirtopinnalla hienojakoisena pölynä. Sintraantuma-

ton tuhka on pölymäistä ja hienojakoista niillä pinnoilla, joiden lämpötila on tuhkan sulamislämpötilan alapuolella. Näillä alueilla nuohoustuloksen voidaan olettaa olevan hyvä. Sen sijaan tulistimissa ja mahdollisesti keittoputkissa, missä savukaasun lämpötila on tuhkan sulamispisteen yläpuolella, on tahmeaa tuhkaa, joka voi muodostaa nopeasti tiiviitä ja sitkeitä kerrostumia.

Sintraantuminen voimistuu lämpötilan kohotessa, ja sintraantuminen kasvattaa tuhkan ja lämmönsiirtoputken välisiä adheesiovoimia [13]. Siksi ääninuohouksen voidaan olettaa toimivan parhaiten keittoputkien jälkeisillä alueilla, missä savukaasun lämpötila on matala ja sintraantuminen ei ole voimakasta tai sitä ei tapahdu ollenkaan. On huomattava, että lämmönvaihtoputket ovat savukaasua matalammassa lämpötilassa putkien sisällä virtaavan höyryn viilentäessä lämmönsiirtopintoja. Tuhka voi sintraantua viilentämättömällä savukanavan pinnoilla, vaikka lämmönsiirtopinnoille tarttunut tuhka olisi sintraantumaton.

Kuten luvussa 3.2 on esitetty, lämpötilan noustessa ja tuhkan sintraantuessa kerrostuman huokoisuus alkaa vähentyä, mikä parantaa sen lujuutta. Kerrostuman muuttuessa lujemmaksi ääninuohous ei välttämättä pysty yhtä tehokkaasti aiheuttamaan kerrostuman murtumista tuhkauiukkasten välillä. Sen sijaan voidaan olettaa, että kerrostuman irtoaminen putkipinnalta yleistyy, kun sidokset sisäpinnan ja putken tai kahden tuhka-kerroksen rajapinnalta rikkoutuvat.

Ääninuohouksen toimintasykli on tiheä, ja voidaankin olettaa, että nuohoukertojen välissä kerrostuma ei ehdi kasvaa paksuksi. On kuitenkin epäselvää, kuinka paljon tuhka sintraantuu nuohoukertojen välissä, ja on mahdollista, että tuhka ehtii sintraantua huomattavasti jo muutaman minuutin aikana. On myös mahdollista, että gravitaation vaikutuksesta kerrostuma irtoaa vasta, kun se on saavuttanut riittävän paksuuden. Tuhkan sintraantumisenopeutta on syytä tutkia tarkemmin, jotta nuohousvälin pituus voitaisiin optimoida.

Käytännön kokemus liitteessä A osoittaa, että hyvin hienojakoinen tuhka on joissain tapauksissa vaikeasti ääninuohottavaa. On mahdollista, että hyvin hienojakoinen tuhka muodostaa tällaisia vaikeasti nuohottavia tiiviitä kerrostumia, vaikka sintraantumista ei tapahtuisikaan. Sen sijaan selkeästi sulamislämpötilaansa viileämmät suurempikokoiset tuhkauiukkaset voivat sintraantuessaan muodostaa huokoista, haurasta massaa, jonka lujuus on matala, kuten luvussa 3.2.5. on esitetty. Joissakin tapauksissa sintraantunut, hauras kerrostuma voi mahdollisesti olla tehokkaammin nuohottavissa kuin hyvin hienojakoinen, sintraantumaton tuhka.

Tutkimuksessa [27] ääninuohousta on kokeiltu jo likaantuneille pinnoille. Laitevalmistajan mukaan ääninuohous on kuitenkin tehokkainta, kun lähtötilanteessa lämmönsiirtopinnat ovat puhtaat [24]. Eräs selitys tähän voi olla sintraantumisen aiheuttama kerrostuman kovettuminen.

Voidaan olettaa, että carry over -tuhkaa ei keräänny merkittävästi ekonomaiseriin, koska suuret hiukkaset tarttuvat lämmönsiirtopinnoille tulistimessa. Lisäksi painavammat hiukkaset eivät kiinteänä kerrostu helposti. Siksi ekonomaiserin tuhkan voidaan olettaa olevan hienojakoista. Lämmönsiirtoputkien matalan lämpötilan vuoksi tuhka ei sint-raannu kerrostuman sisäpinnalla, ja adheesiovoimat kerrostuman ja putken rajapinnalla ovat todennäköisesti heikommat kuin kerrostuman sisällä. Kerrostuman voidaankin olettaa irtoavan ekonomaiserin lämmönsiirtoputken pinnasta kokonaan.

Pienet tuhka hiukkaset törmäilevät savukaasuvirrassa muodostaen suurempia hiukkasia. Siksi hienojakoisen fume-tuhkan hiukkaskoko kasvaa savukanavassa eteenpäin mentäessä. Hiukkaskoon kasvaessa hiukkasten väliset adheesiovoimat heikkenevät ja kerrostuman huokoisuus kasvaa, minkä vuoksi tuhka voi olla helpommin nuohottavaa kohti savukanavan loppupäätä.

Luvussa 5.2 esitetyn jousi-massa-systeemin avulla voidaan pohtia adheesiovoimien ja yksittäisen hiukkasen koon vaikutusta resonanssitaajuuteen. Kuten kaavasta (5.10) nähdään, jousivoiman kasvattaminen nostaa systeemin resonanssitaajuutta. Täten voidaan epäillä, että sintraantuneiden, lujasti toisiinsa kiinnittyneiden tuhka hiukkasten resonanssitaajuus on suurempi. Vastaavasti pieni hiukkaskoko ja siten pieni massa nostaa resonanssitaajuutta. Esimerkiksi keittoputkistossa oleva sintraantuneesta hienojakoisesta tuhasta koostuva kerrostuma voi irrota parhaiten korkeammilla taajuuksilla. Heinolan soodakattilan tulistimessa parhaan nuohoustuloksen tuottaakin matalataajuisemman nuohoimen sijaan 100 Hz:n ääninuohoin, kuten liitteessä A on esitetty.

## 6. ÄÄNINUOHOUKSEN KÄYTTÖKOKEMUKSIA

Ääninuohousta ei ole käytetty soodakattilaprosessin yhteydessä runsaasti, ja tutkimustietoa on saatavilla rajoitetusti. Tämän työn ääninuohouskokeilut soodakattiloissa perustuvat valmistajien julkaisemiin raportteihin. Aineistona on myös Suomenojan hiilivoimalaitoksella suoritettujen mittausten tuloksia, joita on esitetty luvussa 6.2 ja liitteessä B.

### 6.1 Ääninuohous soodakattiloissa

Ääninuohouslaitteiden valmistajat ovat julkaisseet raportteja ääninuohouksen toiminnasta soodakattilaprosessin yhteydessä [24][35]. Lisäksi tässä luvussa viitataan liitteessä A esitettyihin laitevalmistajan kokemuksiin.

Suomessa ääninuohousta on käytetty soodakattilaprosessin yhteydessä Heinolassa ja Uimaharjulla. Laitevalmistajan mukaan Heinolassa ääninuohousta käytetään tulistimissa sekä sähkösuodinta edeltävillä jakovirtauslevyillä ja savukaasuhaihduttimessa (harppa). Kyseisessä soodakattilassa on kokeiltu eritaajuisia nuohoimia. Toimivammaksi nuohoimeksi tulistimessa on todettu 100 Hz:n taajuista ääntä tuottava nuohoin. Savukaasuhaihduttimessa (harppa) toimivaksi on havaittu kaasupulssinuohoin [24]. Ääninuohousta on käytetty laitevalmistajan mukaan noin 20 vuotta. Liitteessä A on esitetty lisätietoja tapauksesta.

Uimaharjun sellutehtaalla käytetään ääninuohousta soodakattilan sähkösuotimen ja savukaasupuhaltimen välisissä kahdessa lämmönvaihtimessa. Nuohoimet on asennettu vuonna 2014, ja kirjoitushetkellä nuohoimista on vain suuntaa-antavia kokemuksia. Painemittausten perusteella nuohoimet vaikuttavat kuitenkin toimivan, eikä nuohoimien asentamisen jälkeen ole koettu tukkeentumiseen liittyviä ongelmia. [40]

Ääninuohousta on käytetty soodakattiloissa myös ulkomailla. Kanadassa Windsorissa ääninuohous on ollut käytössä noin kymmenen vuotta. Kuiva tuhka aiheutti ennen ääninuohouksen käyttöä likaantumisongelmia ekonomaisierissa. Liitteessä A on esitetty lisätietoja tapauksesta.

Ruotsissa Frövin tehtaan soodakattilassa laitevalmistajan raportin [35] mukaan tuhkan kerääntymisen vuoksi keittoputkien ja ekonomaisierin välistä savukanavan osaa jouduttiin nuohoamaan höyryllä ja pesemään säännöllisesti alasajon aikana, mikä aiheutti korroosiota teräspinoilla. Lisäksi savukaasupuhaltimen tehonkulutusta jouduttiin lisäämään, koska painehäviö lämmönvaihtimien yli kasvoi. Laitevalmistajan mukaan yhden

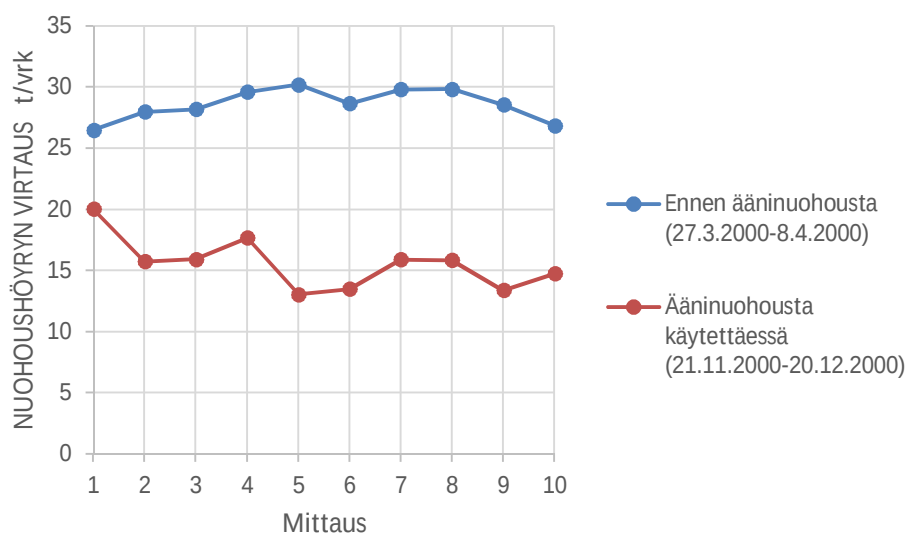
infraäänitaajuisten nuohojen asentamisen jälkeen pesun tarve hävisi, nuohoushöyryn kulutus vähentyi ja painehäviö lämmönvaihtimen yli pieneni. Laitevalmistajan tietojen mukaan nuohous on ollut onnistuneesti toiminnassa vuodesta 2007 lähtien [41].

Yhdysvalloissa Stevensonin tehtaan soodakattilassa käytetään laitevalmistajan raportin [35] mukaan samanlaista infraääninuohointia kuin Ruotsissa Frövissä. Raportin mukaan happaman tuhkan kerääntyminen sähkösuodinta edeltävään savukanavan mutkaan aiheutti ongelmia sähkösuotimen toiminnassa, mikä johti kattilan viikoittaiseen alasajoon ja siten heikentyneeseen käyttöasteeseen. Valmistajan mukaan ääninuohojen käyttöönoton jälkeen sähkösuotimen toiminta parantui sekä päästöjen määrä ja alasajojen tarve savukanavan puhdistamista varten vähentyi.

## 6.2 Ääninuohous Suomenojan voimalaitoksella

Suomenojan hiilivoimalaitoksella käytetään ääninuohoimia ekonomaisissa ja ilman esilämmittimessä. Liitteessä B on Suomenojan voimalaitoksen henkilökunnan tekemien mittausten tuloksia vuodelta 2000. Tässä luvussa esitetyt lukuarvot ovat nähtävissä kyseisessä liitteessä.

Kuvassa 6.1 on esitetty nuohoushöyryn kulutus Suomenojan voimalaitoksella. Sininen käyrä kuvaa nuohoushöyryn kulutusta ennen ääninuohouksen käyttöönottoa ja punainen käyrä nuohoushöyryn kulutusta ääninuohouksen käyttöönoton jälkeen.



**Kuva 6.1.** Nuohoushöyryn kulutus Suomenojan voimalaitoksella.

Kuvasta 6.1 nähdään, että nuohoukseen käytettävän höyryn kulutuksen keskiarvo laski vertailuajanjaksolla huomattavasti, noin 45 %. Ääninuohous aiheutti siis merkittäviä kustannusetuja vähentyneen höyrynkulutuksen vuoksi, kun säästyneellä höyryllä tuotettu sähköenergia voidaan myydä.



Nuohoushöyryn kulutus on ainoa mittausarvo, joka muuttui oleellisesti mittausajanjak-solla. Pieniä muutoksia kaikkien mittauskertojen keskiarvoissa voidaan havaita myös ekonomaiserin ja ilman esilämmittimen alueilla. Lämpötilaero ekonomaiserin yli kasvoi ääninuohouksen myötä 1,7 °C. Parantunut lämmönsiirto viittaa puhtaampana pysyviin lämmönsiirtopintoihin.

Taulukkoon 6.1 on koottu savukaasun mittausarvoja ilman esilämmittimen vasemman ja oikean puolen yli ajanjaksoilta ennen ja jälkeen ääninuohouksen käyttöönoton. Luvut ovat ajanjaksojen keskiarvoja, jotka on laskettu liitteessä B esitetyn taulukon lukuarvo-jen perusteella.

**Taulukko 6.1.** Savukaasun mittausarvoja Suomenojan voimalaitoksella ilman esiläm-mittimen yli.

|                                                             | Ennen ääninuohousta (kes-<br>kiarvo ajalta 27.3.2000-<br>8.4.2000) |                | Ääninuohousta käytettäessä<br>(keskiarvo ajalta 21.11.2000-<br>20.12.2000) |             |
|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------|
|                                                             | Vasen puoli                                                        | Oikea<br>puoli | Vasen puoli                                                                | Oikea puoli |
| Paine-ero il-<br>man esiläm-<br>mittimen yli                | 11,0 mbar                                                          | 9,0 mbar       | 9,6 mbar                                                                   | 9,2 mbar    |
| Savukaasun<br>lämpötilaero<br>ilman esiläm-<br>mittimen yli | 220,0 °C                                                           | 225,4 °C       | 220,6 °C                                                                   | 227,0 °C    |

Taulukon 6.1 perusteella ennen ääninuohouksen käyttöönottoa paine-ero kasvoi ekonomaiserin vasemman puolen yli enemmän kuin oikean puolen yli, mikä johtuu mahdollisesti vasemman puolen likaantumisesta. Ääninuohouksen käyttöönoton jälkeen paine-erot ovat tasoittuneet. Lisäksi savukaasun lämpötila on laskenut hieman enem-män, mikä viittaa parantuneeseen lämmönsiirtoon.

Suomenojan tapauksessa ääninuohouksen vaikutukset näkyvät erityisesti nuohous-höyryn kulutuksen puolittumisessa. Jos nuohoukseen käytettäisiin prosessihöyryä ar-voilla 10 bar ja 200 °C, höyryn entalpia olisi noin  $2830 \frac{kJ}{kg}$ . Jos nuohoushöyry lauhdutet-taisiin arvoon  $2400 \frac{kJ}{kg}$ , vuorokaudessa säästyneen höyryn lämpöenergia olisi höyrynkul-utuksella  $10 \frac{t}{vrk}$

$$(2830 - 2400) \frac{kJ}{kg} * 10000 kg = 4300 MJ \quad (6.1)$$

eli 1,2 MWh. Tämä lämpöenergia voitaisiin käyttää energiantuotantoon. Paineilmalla toimivan ääninuohouksen päiväkohtaiset käyttökustannukset ovat hyvin pieniä.

### 6.3 Ääninuohous muissa voimakattiloissa

Ääninuohousta on käytetty pitkään erityyppisissä voimakattiloissa. Eniten tutkimustietoa löytyy fossiilisia polttoaineita polttavien kattiloiden ääninuohouksesta. Bioperäisiin polttoaineisiin, kuten mustalipeään, verrattuna fossiiliset polttoaineet sisältävät vähän tuhkaa ja tuhka sulaa tyypillisesti korkeammissa lämpötiloissa.

Puolassa tehdyssä tutkimuksessa [27] kiertoleijupetikattilan tulistimien kerrostumia pyrittiin poistamaan paineilmalla toimivilla ääninuohoimilla seisokin aikana. Polttoaineena kattilassa käytettiin fossiilisia polttoaineita. Tutkimuksessa ääninuohouksella ei saavutettu riittävää äänenpainetasoa kerrostumien irrottamiseen kymmenen metrin etäisyydellä nuohoimesta. Äänenpainetaso pieneni tällä matkalla huomattavasti, ja äänentaajuus hajaantui nopeasti torven suulta usean kilohertsin kaistalle. Kuten luvussa 5.4 ja liitteessä A on esitetty, ääninuohous on tarkoitettu ennaltaehkäisemään tuhkan kerrostumista. Kyseisessä tutkimuksessa pinnat olivat kuitenkin lähtötilanteessa likaantuneita. Tutkimuksessa todetaan, että puhdistamiseen tarvittaisiin yli 130 dB:n äänenpainetasoja yhdellä äänentaajuudella mitattuna. Tässä työssä ei tutkita, miten äänen hajaantuminen laajalle taajuuskaistalle vaikuttaa puhdistustulokseen.

Tutkimuksen [42] mukaan Salmisaaren hiilivoimalaitoksella ääninuohousta käytetään rikinpoistojärjestelmässä puhdistamaan kalsiumsulfaatin ja -sulfiitin aiheuttamia kerrostumia. Tutkimuksen mukaan ääninuohous toimii kohteessa hyvin. Tutkimuksen [43] mukaan Kymijärven hiilikattilassa ääninuohousta käytetään ekonomaisierissa, jossa ääninuohous on korvannut höyrynuohouksen kokonaan.

Ääninuohousta on käytetty myös Kiinalaisissa kivihiihivoimaloissa, joista ääninuohoinvalmistaja on julkaissut kaksi käyttöraporttia [25]. Raporteissa esitetyt tiedot ovat vajaavaisia. Ne antavat kuitenkin viitteitä ääninuohouksen myötä parantuneesta lämmönsiirrosta, mikä pienissäkin määrin saa vuositasolla aikaan suuria säästöjä.

## 7. YHTEENVETO JA POHDINTA

Tässä luvussa on esitetty yhteenveto työn havainnoista. Lisäksi luvun loppuun on koottu ehdotuksia jatkotutkimuksen aiheiksi. Ehdotettuja aiheita ei tutkittu tässä työssä tai niihin ei löydetty yksiselitteisiä vastauksia.

Tutkimuksen ensisijaisena tavoitteena oli kerätä soodakattilan ääninuohoukseen liittyviä kokemuksia ja kartoittaa tuhkakerrostumien koostumukseen ja ominaisuuksiin liittyvää tutkimusta. Käyttökokemusten perusteella ääninuohouksen käyttö on joissain tapauksissa vähentänyt nuohoukseen käytettävän höyryn määrää ja siten lisännyt kattilan sähkön- tuotantoa. Ääninuohous voi höyrynuohoukseen verrattuna mahdollisesti tuottaa paremman puhdistustuloksen sokkeloisissa lämmönvaihtimissa, koska ääni heijastuu lämmönsiirto-putkista. Merkittävä mahdollinen ääninuohouksen aiheuttama hyöty onkin tukkeutumisen ja siitä seuraavan odottamattoman kattilan alasajon välttäminen.

Soodakattilan kerrostumat ovat haastava kohde ääninuohoukselle. Laajalla lämpötila-alueella sulassa olomuodossa oleva tuhka rajoittaa ääninuohouksen käyttömahdollisuuksia. Ääninuohous soveltunee kuitenkin viileämpien pintojen, missä tuhka on kiinteää, puhdistamiseen soodakattilassa yhtä hyvin kuin muissakin voimakattilatyypeissä.

Ääninuohouksen etuina höyrynuohoukseen voidaan pitää erityisesti sen matalia käyttö- kustannuksia ja tiheää toimintasykliä. Tiheän toimintasyklin tavoitteena on irrottaa tuhka- huiukset nopeasti kiinnittymisen jälkeen, jolloin paksun tuhkakerrostuman muodostuminen ehkäistään kokonaan. Ääninuohouksen heijastumisen ja taipumisen vuoksi ääninuohous soveltunee höyrynuohousta paremmin sokkeloisten lämmönsiirto-putkien nuohoamiseen. Voidaan tosin kyseenalaistaa, riittääkö heijastuneen äänen paine irrottamaan kerrostumia.

Mustalipeän kuiva-ainepitoisuuden nousu on johtanut vapaan rikkidioksidin vähenemiseen soodakattilan savukaasuissa. Samalla huomattavia likaantumisongelmia aiheuttavan vetyhapon muodostuminen on vähentynyt oleellisesti. Toisaalta rikkidioksidin väheneminen on johtanut kloridien rikastumiseen tuhkassa, minkä vuoksi fume-tuhka on tahmeaa laajemmalla lämpötila-alueella kuin aiemmin. Mustalipeän kloori- ja kaliumpi- toisuus on kuitenkin joissakin tapauksissa hyvin matala, jolloin ne eivät vaikuta merkittävästi tuhkan jähmettymiseen. Onkin tapauskohtaista, missä lämpötiloissa ja millä kat- tilan alueilla tuhka muuttuu tahmeasta kiinteäksi.

Tuhkan sintraantumista tapahtuu, kun kerrostuman lämpötila on yli 300 °C. Sintraantu- misen voidaan olettaa heikentävän nuohoustulosta, koska kerrostuman sintraantuessa

sen huokoisuus vähenee. Tällöin kerrostuman lujuus kasvaa. Lämpötilan noustessa sintraantuminen nopeutuu ja kerrostuma muuttuu elastisemmaksi, mikä vaikeuttaa kerrostuman nuohoamista. Lisäksi sintraantunut tuhka mahdollisesti heijastaa ääntä vähemmän, jolloin ääni vaimenee nopeammin lämmönvaihtimessa. Pinnaltaan sintraantunut kerrostuma voi kuitenkin irrota putkipinnan ja kerrostuman rajapinnasta, jossa adheesiovoimat ovat heikommät kuin tuhkahiukkasten välillä. Toisaalta ääninuohous toimii tiheällä syklillä, jolloin tuhka ei mahdollisesti ehdi sintraantua merkittävästi nuohoukertojen välillä. Tuhkan sintraantumisnopeutta lyhyellä aikavälillä ei tunneta tarkasti.

Tuhkan aiheuttamat likaantumismekanismit soodakattilan savukanavan eri vaiheissa tunnetaan melko hyvin. Lisäksi yleisimpien tuhkan kemiallisten yhdisteiden fysikaalisia ominaisuuksia on tutkittu runsaasti. Aiheita on käsitelty luvussa 3. Tuhkakerrostuman matala huokoisuuden taso ja pieni hiukkaskoko sekä korkea lämpötila tekevät kerrostumasta lujemman ja elastisemman, mikä heikentää ääninuohouksen tulosta. Varmoja johtopäätöksiä asiasta ei kuitenkaan voida tehdä, koska tutkimusta tuhkakerrostumien ominaisuuksista on tehty vain höyrynuohouksen yhteydessä. Myöskään ääninuohouksen tuhkaa irrottavat mekanismit eivät ole yksiselitteisiä.

Laitevalmistajat esittävät useita ääninuohouksen vaikutusmekanismeja, joista eräs on tuhkahiukkasen värähtelystä johtuva kerrostuman hajoaminen. Ääninuohous aiheuttaa tuhkakerrostuman ja lämmönsiirtoputkien värähtelyä. Mikäli yksittäisen tuhkahiukkasen tai tuhkakerrostuman värähtely tapahtuu ominaisvärähtelytaajuudella, nuohouksen lopputulos saattaa parantua oleellisesti. Toisaalta lämmönsiirtoputkien voimakas värähtely ja resonointi voi aiheuttaa rakenteisiin mekaanista rasitusta. Ominaisvärähtelytaajuus voi selittää, miksi ääninuohouksen toimivuutta ja soveltuvaa äänentaajuutta on hankalaa ennakoida. Tässä työssä äänentaajuuden vaikutusta tuhkan irtoamiseen ja kattilarakenteisiin kohdistuvaan rasitukseen ei ole käsitelty enempää.

Äänen fysikaalisia ominaisuuksia on käsitelty luvussa 5. Ääninuohouksessa käytetään äänentaajuuksia laajalla taajuusalueella, ja äänentaajuudella näyttäisi olevan keskeinen vaikutus äänen vaimenemiseen. Matalampi ääni kantautuu kattilassa huomattavasti pidemmälle. Ei kuitenkaan ole varmaa, mikä äänentaajuus aiheuttaa parhaiten tuhkan irtoamisen lämmönsiirtopinnalta. Tähän työhön kerätyn kokemuksen perusteella voidaankin epäillä, että on tapauskohtaista, mikä äänentaajuus tuottaa parhaan puhdistustuloksen.

Ääni vaimenee kattilassa, kun äänienergiaa absorboituu tuhkaan ja savukaasuun. Nuohouksessa käytettävällä äänentaajuudella vaikuttaisi olevan huomattava vaikutus äänen etenemiseen kattilan sisällä siten, että korkeampi äänentaajuus vaimenee enemmän. Työssä esitellyt tutkimukset antavat viitteitä, että etenkin matalataajuinen ääni voi heijastua tuhkakerrostumasta hyvin, jolloin äänenpaine ei ratkaisevasti heikkene yhdestä heijastuksesta. Tiheässä lämmönsiirtoputkistossa etenkin korkeataajuinen ääni heijastuu

kuitenkin lyhyen etenemän aikana useita kertoja. Tämä voi selittää, miksi laitevalmistajan kokemuksen mukaan korkeataajuinen ääni menettää nuohousteihonsa jo muutaman metrin etäisyydellä. Voidaan myös epäillä, että hyvin matalataajuinen ääni etenee lämmönvaihtimessa törmäämättä lämmönsiirtoputkiin, minkä vuoksi matalataajuinen ääni etenee kattilassa hyvinkin pitkälle vaimentumatta.

Väliaineen absorption merkitystä ei työssä kyetty selvittämään, mutta kirjallisuuden perusteella sen voidaan olettaa olevan pieni. Merkittävänä äänen vaimentumismekanismi voidaan sen sijaan pitää äänen leviämismekanismista. Leviämismekanismien vaikutusta ei tutkittu tässä työssä.

Jatkotutkimuksessa voitaisiin tutkia äänen käyttäytymistä kattilaympäristössä ja kattilarakenteiden akustiikkaa, jotta ääninuohouksen toimivuutta voitaisiin ennakoita ja nuohoustulokseen vaikuttavia tekijöitä, kuten äänentaajuutta ja nuohoimien sijoituspaikkaa, optimoida. Äänenpaine hajaantuu kattilassa laajalle taajuuskaistalle, minkä vaikutus nuohoustulokseen on tuntematon. Lisäksi äänentaajuuden vaikutus äänen etenemiseen savukanavassa ja heijastumiseen kerrostumasta on epävarma. Myös äänen eri absorptiomekanismien merkitys äänen vaimentumiseen kattilaympäristössä on tuntematon.

Eräs keskeinen ääninuohouksen kehittämistä hidastava tekijä vaikuttaa olevan epätietoisuus ääninuohouksen kattilarakenteille aiheuttamasta rasituksesta. Jatkossa myös tätä aihetta on syytä tutkia.

Jatkotutkimuksessa voitaisiin myös pyrkiä selvittämään, miten ääninuohous aiheuttaa tuhkakerrostuman irtoamisen. Jos ääninuohouksen aiheuttamat tuhkakerrostuman hajoamismekanismi olisivat tiedossa, olisi helpompaa arvioida, miten tuhkakerrostuman fysikaaliset ominaisuudet ja äänen ominaisuudet vaikuttavat kerrostuman irtoamiseen. Myös tuhkan sintraantumisenopeutta on syytä tutkia tarkemmin, jotta nuohousvälin pituus voitaisiin optimoida ja tuhkan sintraantuminen nuohouskertojen välillä välttää. Kaikkiaan ääninuohouksen tulokseen vaikuttavia tekijöitä on runsaasti ja niiden vaikutuksia ei täysin tunneta, minkä vuoksi ääninuohouksen kehittäminen vaatii tutkimusta todellisessa soodakattilaympäristössä.

## LÄHTEET

- [1] Leppänen, A., Modeling Fume Particle Dynamics and Deposition with Alkali Metal Chemistry in Kraft Recovery Boilers, Tampere University of Technology, Publication 1273, 2015, 64 p.
- [2] Vakkilainen, E. K., Kraft Recovery Boilers – Principles and practice, Suomen Soodakattilayhdistys, Helsinki, 2005, 242 s.
- [3] Raiko, R., Saarenpää, I., Höyrytekniikka, TTY Energia- ja prosessitekniikan laitos, 254 s.
- [4] Tran, H., Recovery fireside deposits and plugging prevention, Pulp & Paper Centre and Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry University of Toronto, 13 s.
- [5] Xianglin, S., Ying C., Haibin, L., Research on the Melting Points of some Chinese Coal Ashes, Kluwer Academic Publishers, New York, 1999, s. 433-440.
- [6] Konttinen, J., Teollisuuden prosessit, TTY Energia- ja prosessitekniikan laitos, 165 s.
- [7] Hupa, M., Kraft recovery boilers – Chapter 2: Recovery Boiler Chemistry, TAPPI Press, New York, 1997, s. 46-60.
- [8] Tikka, P., Papermaking Science and Technology, Chemical Pulping Part 2, Recovery of Chemicals and Energy, Paper Engineer's Association/Paperi ja Puu Oy, Jyväskylä, Finland, 2008, 387 s.
- [9] Jokiniemi, J. K., Pyykkönen, J., Mikkanen, P., Kauppinen, E., Modelling fume formation and deposition in kraft recovery boilers, TAPPI Journal, Vol 79(7), 1996, s. 171-181.
- [10] Työterveyslaitos, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 8.3.2015): <http://kappa.ttl.fi/kemikaalikortit>.
- [11] Mikkanen, P., Kauppinen, E. I., Pyykönen, J., Jokiniemi, J. K., Aurela, M., Vakkilainen, E. K., Alkali Salt Ash Formation in Four Finnish Industrial Recovery Boilers, Energy&Fuels, Vol 13(4), 1999, s. 778-795.
- [12] Doshia, V., Vuthalurub, H. B., Korbeec, R., Kiel, J. H. A., Development of a modeling approach to predict ash formation during co-firing of coal and biomass, Fuel Processing Technology, 2009, Vol 90(9), s. 1148-1156.

- [13] Tran, H., Kraft recovery boilers – Chapter 9: Upper Furnace Depositioning and Plugging, TAPPI Press, New York, 1997, s. 247-184.
- [14] Aho, M., Ferrer, E., Importance of coal ash composition in protecting the boiler against chlorine deposition during combustion of chlorine-rich biomass, *Fuel*, Vol 84(2-3), 2005, s. 201-212.
- [15] Bernatha, P., Siquefielda, S., Baxtera, L., Sclippaa, G., Rohlfinga, C., Barfield, M., In situ analysis of ash deposits from black liquor combustion, *Vibrational Spectroscopy*, Vol 16(2), 1998, s. 95-103.
- [16] Tran, H., Khalaj-Zadeh, A., Composition of Carryover in Kraft Recovery Boilers, *Suomen Soodakattilayhdistys*, 2009, s. 157-166.
- [17] Zbogar A., Frandsen, F., Jensen, P., Glarborg, P., Shedding of ash deposits, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009, Vol 35(1), s. 31-56.
- [18] Backman, R., Hupa, M., Skrifvars, B. J., Predicting Superheater Deposit Formation in Boilers Burning Biomass, Kluwer Academic Publishers, New York, 1999, s. 405-414.
- [19] Cameron J. H., Goerg-Wood, K., Role of thermophoresis in the deposition of fume particles resulting from the combustion of high inorganic containing fuels with reference to kraft black liquor, *Fuel Processing Technology*, Vol 60(1), 1999, s. 49-68.
- [20] Tran, H. N., Barham, D., Reeve, D. W., Sintering of Fireside Deposits and its Impact on Plugging in Kraft Recovery Boilers, *Tappi Journal*, Vol 70(4), 1988, s. 109–113.
- [21] Kaliazine, A., Tran, H., Cormack, D. E., The Mechanisms of Deposit Removal in Kraft Recovery Boilers, *Journal of Pulp and Paper Science*, Vol 25(12), 1999, s. 418–424.
- [22] Piroozmand, F., Tran, H., Kaliazine, A., Cormack, D., Strength of Recovery Boiler Fireside Deposits at High Temperatures, *Proceedings of the TAPPI International Engineering Conference*, Miami, Florida, 13-17 syyskuuta, 1998, s. 169–179.
- [23] Mao, X., Tran, H., Cormack, D. E., Effects of Chemical Composition on the Removability of Recovery Boiler Fireside Deposits, *Tappi Journal*, Vol 84(6), 2001, s. 68.
- [24] Nirafon, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.3.2015):  
<http://www.nirafon.com>.

- [25] Sound Blast, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 11.3.2015):  
<http://www.sound-blast.com>.
- [26] Borenus, J., Lampio, E., Pesonen, K., Jauhiainen, T., Nuotio, J., Pyykkö, I., Akustiikan perusteet, Insinööritieto Oy, 1981, 176 s.
- [27] Mirek, P., Field Testing of Acoustic Cleaning System Working in 670 MWTH CFB Boiler, Chemical and Process Engineering, Vol 34(2), 2013, s. 283-291.
- [28] Carvalho, M. G., Fiveland, W. A., Lockwood, F. C., Papadopoulos, C., Clean Combustion Technologies Part 2, OPA N. V., Amsterdam, 1999, 1153 s.
- [29] Cengel, Y. A., Boles, M. A., Thermodynamics – An Engineering Approach, McGraw-Hill, New York, 2011, 978 s.
- [30] Kolhinen, A., Characterizing the Ash Samples and the Removal of Ash by Acoustic Cleaning in Energy Technical Applications, Tampere University of Technology, Master of Science Thesis, 2004, 103 s.
- [31] Karjalainen, M., Hieman akustiikkaa, Teknillinen korkeakoulu, 2000, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 25.3.2015):  
<http://www.cs.tut.fi/sgn/arg/akusem/akuintro.pdf>.
- [32] Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., Sanders, J. V., Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, USA, 1982, 480 s.
- [33] Harris, C. M., Absorption of Sound in Air versus Humidity and Temperature, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol 40(1), 1966, s. 148-159.
- [34] Bass, H. E., Sutherland, L. C., Zuckerwar, A. J., Blackstock, D. T., Hester, D. M., Atmospheric Absorption of Sound, Journal of the Acoustic Society of America, Vol 97, 1995, s. 680-683.
- [35] Infrafone, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 10.3.2015):  
<http://www.infrafone.se/?lang=en>.
- [36] Hongisto, V., Meluntorjunta, Aalto-yliopisto Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos, 2013, 213 s.
- [37] Arenas, C., Leiva, C., Vilches, L. F., Cifuentes, H., Use of Co-combustion Bottom Ash to Design an Acoustic Absorbing Material for Highway Noise Barriers, Waste Management, Vol 33(11), 2013, s. 2316–2321.



- [38] Kockum Sonics, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 10.3.2015):  
<http://www.kockumsonics.com>.
- [39] Svedin, K., Wallin, E., Ahlroth, M., Sotningsmetoder och Sotångförbrukning i Svenska Sodapannor, Värmeforsk Service AB, Stockholm, 2008, 63 s.
- [40] Kolehmainen, J., Stora Enso Oyj, Uimaharju. Haastattelu 26.3.2015.
- [41] Ellebro, M., Director Engineering, Infracore AB, Sundbyberg, Sweden. Haastattelu 9.2.2015.
- [42] Niinikoski, O. M., Salmisaaren Voimalaitoksen Rikinkoistolaitoksen Pitkääntähtäimen Kunnossapito- ja Kehityssuunnitelma, Insinööritoimisto, Metropolia, 2009, 52 s.
- [43] Salonen, S., Pääkattilan Nuohouksen Optimointi Kymijärven Voimalaitoksella, Opinnäytetyö, Lahden ammattikorkeakoulu, 2009, 50 s.

## LIITE A: KESKUSTELU ÄÄNINUOHONVALMISTAJAN EDUSTAJIEN KANSSA

Vierailu Nirafonin toimistolla Lahdessa 5.3.2015. Vierailulla mukana oli kirjoittajan lisäksi tämän työn ohjaaja TkT Aino Leppänen. Tapaamisessa Nirafonia oli edustamassa Sales- / Project Manager Kimmo Savolainen, Research and Development Worker Jussi Leivo sekä Managing Director Sirkka Junikka. Vierailun aikana keskusteltiin ääninuohouksesta sooda- ja muiden voimakattiloiden yhteydessä. Esille nousseita asioita on listattu alle. Liitteen on oikolukenu Jussi Leivo.

### Nirafonin ääninuohoimet

Paineilmaa käyttävät nuohoimet tuottavat torven suulta mitattuna noin 150 dB äänenpaineen taajuudella 60, 100 tai 250 Hz.

Kaasupulssinuohoin tuottaa torven suulta mitattuna noin 170 dB äänenpaineen leveällä äänentaajuuskaistalla. Kaasupulssinuohointa käytetään nouhoussyklissä, jossa pamautetaan noin 2–10 pulssia sekunnissa (käyttötaajuus n. 10 Hz). Sykli kestää noin 10–20 sekuntia. Nuohoussyklin toistoväli optimoidaan tapauskohtaisesti.

### Miten ääninuohous toimii pitkällä aikavälillä?

Ääninuohoimia on ollut käytössä jo pidemmän aikaa muun muassa Stora Enson Heinolan tehtaan soodakattilassa ja Kanadassa Domtarin sellutehtaan soodakattilassa Windsorin kaupungissa.

Heinolassa ääninuohousta on käytetty jo parikymmentä vuotta. Ääninuohoimet puhdistavat tulistimia, sähkösuodatinta edeltäviä jakovirtauslevyjä ja savukaasuhaihdutinta (harppa). Tulistimeen kokeiltiin ensin kaasupulssinuohointa, jonka oletettiin toimivan parhaiten. Kaasupulssinuohojen jälkeen kokeiltiin 60 Hz:n nuohointa. Toimivimmaksi osottautui kuitenkin 100 Hz:n nuohoin. Harpassa (matalampi lämpötila) on kokeiltu kaikki paineilmaikäyttöiset nuohoimet (60 Hz, 100 Hz ja 250 Hz), mutta kaasupulssinuohoin toimii harpassa parhaiten. Ennako-oletusten mukaan tulistinalueen kertymät ovat vaikeampia poistaa, minkä vuoksi voimakkaampaa äänenpainetta tuottavan kaasupulssinuohojen voisi olettaa toimivan tulistimissa parhaiten. Näin ei kuitenkaan käytännön kokemusten mukaan ole. Eräs selitys tulistimen yllättävään tulokseen on se, että viimeisissä tulistimissa lämpötila voi olla laskenut riittävästi (<800°C), jolloin vähän kaliumia ja klooria sisältävät kerrostumat eivät ole tahmeita. Syy, miksi Heinolassa kaasupulssinuohojen puhdistusteho tulistimissa ei ollut riittävä, on tuntematon.

Windsorissa neljä ääninuohointa on ollut käytössä kymmenisen vuotta. Käyttäjän raportin mukaan ongelmana on ollut kuivan tuhkan kerrostuminen ekonomaiserin loppupuo-  
lella. Tuhka on koostunut pääosin natriumsulfaatista, ja sisältänyt myös natriumkarbo-

naattia. Raportissa ilmoitetun mustalipeän kalium- ja klooripitoisuudet ovat melko korkeita (4,7 % K; 0,8 % Cl). Windsorissa ongelmien ratkaisemiseksi kaksi nuohointa on sijoitettu ekonomaiseriin, missä savukaasun lämpötila on noin 440 °C. Lisäksi kaksi nuohointa on sijoitettu tuhkasuppiloon, missä savukaasun lämpötila on noin 300 °C. Näissä lämpötiloissa tuhkan voidaan olettaa olevan kiinteää korkeista kalium- ja klooripitoisuuksista huolimatta, ja siten helpommin nuohottavissa olevaa.

Ääninuohousta on kokeiltu myös Äänekoskella Metsä-Botnian (nykyinen Metsä Fibre) soodakattilan ekonomaiserin jälkeisen tuhkasuppilon nuohoamisessa. Kokeiluissa törmättiin kuitenkin odottamattomaan ongelmaan, kun tuhkaa alkoi nopeasti kerrostua nuohoimen torven pinnoille. Syy ilmiöön jäi tuntemattomaksi. Syitä voidaan kuitenkin pohtia jälkikäteen. Yleisesti voitaneen olettaa, että torven pinnalle kertynyt tuhka irtoaa tehokkaasti ääninuohouksen aktivoituttua. Erikoista onkin, miksi tässä tapauksessa näin ei tapahtunut. Torviosa on kattilan sisällä savukaasuvirrassa, ja sen vuoksi kuuma. Torveen syötettävä paine-ilma on kuitenkin kylmää, mikä voi viilentää torven pintaa. Jos torvi olisikin huomattavasti savukaasuvirtausta viileämpi, hienojakoista fume-tuhkaa voi kerääntyä termoforeesilla torven pintaan, kuten luvussa 3.2.2 on esitetty. Lisäksi mikäli savukaasussa on vetysulfaattia, sen happokastepiste voisi ylittyä kylmän torven pinnalla, minkä seurauksena tahmeaa vetysulfaattia voisi kerrostua torven pinnalle. Paikanpäällä otetuissa kuvissa ei kuitenkaan näy selkeitä viitteitä vetysulfaatista. Toisaalta hienojakoista valkeaa pölyä voisi helposti tarttua tahmean vetysulfaattikerroksen päälle. Voidaan myös pohtia, onko tapauksessa savukaasun virtaus ollut poikkeuksellisen pyörteilevä kuljettaen hienojakoista tuhkaa torven sisään.

Myös Stora Enson Uimaharjun soodakattilaan on asennettu Nirafonin ääninuohoimet. Nuohoimet asennettiin kahteen uuteen sähkösuodattimen jälkeiseen ekonomaiseriin.

Nirafonin nuohoimia käytetään pääasiassa muissa voimakattilatyypeissä.

### **Mitkä ovat soodakattilan ääninuohouksen edellytykset verrattuna muihin voimakattiloihin?**

Nirafon ei ole varsinaisesti tutkinut soodakattiloiden ääninuohousta tehdasympäristössä. Kokemusta joistain soodakattiloista kuitenkin on, kuten edellä on esitetty.

### **Tehokas nuohousetäisyys**

130 dB:ä voidaan karkeasti pitää rajana, joka vaaditaan tuhkan irrottamiseen. Tätä rajaa voidaan kutsua tehokkaaksi nuohousetäisyydeksi. Väliaineen lämpötila vaikuttaa oleellisesti tehokkaaseen nuohousetäisyyteen, kun lämpötilan noustessa väliaine harvenee ja ääniaallon absorboituminen lisääntyy. Myös äänen taajuus vaikuttaa merkittävästi tehokkaaseen etäisyyteen. Lisäksi kerrostumat absorboivat ääniaaltoja merkittävästi. Kokemuksen perusteella tuhannen asteen lämpötilassa 250 Hz (150 dB) aallon tehokas

nuohousetäisyys on 2–3 metriä. Tehokas etäisyys 100 Hz aallolle 7–8 metriä. Aihetta on lähestytty myös fysikaalisesta näkökulmasta luvussa 5.

Kokemus on osoittanut, että useampi lähekkäin sijoitettu nuohoin voi irrottaa kerrostumia oleellisesti paremmin kuin yksittäinen nuohoin.

### **Äänentaajuuden vaikutus**

Äänentaajuuden suora vaikutus tuhkan irrottamiseen on tuntematon. Kokemus osoittaa, että optimaalista äänentaajuutta on hankalaa arvioida ennen käytännön kokeiluja. Erot nuohoustuloksessa eri taajuutta käyttävien nuohointien välillä voivat olla suuria: samassa kohteessa tuhkaa ei välttämättä irtoa juuri ollenkaan tietyllä taajuudella, kun taas toinen taajuus poistaa suuren osan tuhkasta. Eräs selitys ilmiöön voi olla tuhkahiukkasen ominaisvärähtelytaajuuden löytyminen.

### **Millaisen kerrostuman nuohoamiseen ääninuohous soveltuu?**

Ääninuohous toimii parhaiten, kun tuhka on kiinteässä olomuodossa ja sintraantumaton. Optimaalinen tilanne onkin aloittaa nuohous puhtaalta putkipinnalta, jolloin tuhka ei pääse kovettumaan. Jos tuhka sintraantuu, sen nuohoaminen hankaloituu. On kuitenkin todettava, että putkien pinnoilla lienee aina jonkin paksuinen kerrostuma, vaikka pinta olisikin nuohottu hyvin. Ääninuohousta päästäänkin todennäköisesti käyttämään täysin puhtaalle putkipinnalle ainoastaan, kun lämmönvaihdin on uusi.

Ääninuohous ei kokemusten mukaan toimi, jos kerrostuma on osin sulaa. Tällaisia kerrostumia on tyypillisesti tulistinpinoilla. Viileämmillä tulistinpinoilla kerrostumat saattavat kuitenkin olla täysin kiinteitä, joten ääninuohousta voidaan käyttää (ja on käytetty) soodakattiloissa tulistimissakin.

Kokemusten mukaan jotkin aineet, kuten silikaatit, tekevät tuhkan ääninuohoamisesta hyvin hankalaa, vaikka tuhka olisikin hienojakoista, pölymäistä ja oletettavasti nuohottavissa. Syytä tähän ei tunneta. Hiukkasten agglomeraatio ja sähköinen varaus voivat vaikuttaa nuohottavuuteen.

Myös hiukkaskoon on epäilty vaikuttavan nuohoustulokseen. Joissakin tapauksissa hyvin pienijakoinen tuhka ei irtoa hyvin.

### **Ääninuohouksen edut höyrynuohoukseen verrattuna**

Säästöt käyttökustannuksissa ovat ilmeisiä. Höyryn käyttäminen nuohoukseen vähentää sähköntuotantoa.

Ääninuohoimet ovat huomattavasti höyrynuohoimia pienikokoisempia.

Höyrynuohous voi aiheuttaa eroosio-ongelmia, kun höyryvirtaan liittyy kiinteitä hiukasia. Soodakattilassa eroosio-ongelmat eivät kuitenkaan todennäköisesti ole suuria. Lisäksi höyry voi aiheuttaa korroosio-ongelmia tai joissakin tapauksissa tuhkan kovettumista.

### **Aiheuttaako ääninuohous mekaanista räsitystä kattilarakenteisiin?**

Ääninuohous aiheuttaa putkien värähtelyä, mutta kuuluvan äänen taajuuDET ovat todennäköisesti rakenteiden ominaisvärähtelytaajuuksia korkeampia. Rakenteet eivät todennäköisesti ala resonoida nuohouksen vaikutuksesta. Teoriassa lienee todennäköisempää, että infraääninuohous (äänentaajuus kuuluvan äänen taajuusalueella matalampi) aiheuttaa räsitysongelmia, koska nuohouksen äänentaajuuDET voivat olla samalla taajuusalueella rakenteiden ominaisvärähtelytaajuuden kanssa. NirafoN ei teekään infraäänitaajuudella toimivia nuohoimia.

Suhtautuminen ääninuohoamiseen soodakattilaprosessin yhteydessä metsäteollisuuden yritysissä on usein epäileväistä. Eräs syy tähän lienee pelko ääninuohouksen mahdollisesti aiheuttamista mekaanisista vaurioista.

### **Miten ääninuohouksen toimivuutta mitataan/havainnoidaan?**

Toimivuutta arvioidaan erilaisia kattilan mittausparametreja seuraamalla (savukaasun ja höyryn massavirtaus, lämpötila, paine-ero, nuohoushöyryn määrä ja niin edelleen). Pitkän aikavälin tulosten analysointi on pitkälti nuohouslaitteiden tilaajan vastuulla. Julkisia mittauSTuloksia ei juurikaan ole saatavilla. Tämän työn aineistoksi saatiin mittauSTuloksia Espoon Sähkön SuomenoJan voimalaitokselta. Aineistoa on esitetty liitteessä B ja sitä on käsitelty luvussa 6.2.

### **Minkä suuruisia ovat ääninuohouksen kustannukset?**

Ääninuohointen hinnat ovat alle 10 000 € ja kaasupulssinuohoimen kokonaishinta 30 000–40 000 €. Käyttökustannukset ovat kohtuullisia verrattuna höyrynuohoukseen.

## **LIITE B: MITTAUSDATAA SUOMENOJAN HIILIVOIMALAITOKSELTA ÄÄNINUOHOUKSEN YHTEYDESSÄ**

Kuvassa 7.1 on esitetty ääninuohoinvalmistajan luovuttamia mittaustuloksia Suomenojan voimalaitokselta. Laitoksen henkilökunta on toteuttanut mittaukset. Aikavälillä 27.3.2000–8.4.2000 kattilassa ei käytetty ääninuohousta. Aikavälillä 21.11.2000–20.12.2000 ääninuohous oli käytössä. Kuva 6.1 (sivu 35) on laadittu alla esitetyn taulukon pohjalta.

Kuva 7.1 Mittaustuloksia Suomenojan voimalaitokselta.

| Äänihuuhous 1.tul. lämpöteho                |       | 27.3.2000 | 28.3.2000 | 29.3.2000 | 30.3.2000 | 3.4.2000 | 4.4.2000 | 5.4.2000 | 6.4.2000 | 7.4.2000 | 8.4.2000 | 21.11.2000 | 23.11.2000 | 25.11.2000 | 26.11.2000 | 27.11.2000 | 28.11.2000 | 16.12.2000 | 17.12.2000 | 18.12.2000 | 20.12.2000 |
|---------------------------------------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                                             |       | 1         | 2         | 3         | 4         | 5        | 6        | 7        | 8        | 9        | 10       | 11         | 12         | 13         | 14         | 15         | 16         | 17         | 18         | 19         | 20         |
| SAVUKAASUN LITENNETYÖA C                    | 443,1 | 441,2     | 442,3     | 443,2     | 439,8     | 441,4    | 443,1    | 441,5    | 441,0    | 442,5    |          | 435,3      | 439,1      | 441,9      | 441,1      | 441,0      | 438,2      | 440,7      | 440,6      | 439,8      | 439,0      |
|                                             | 362,9 | 361,9     | 363,0     | 363,6     | 361,9     | 362,1    | 362,8    | 362,6    | 362,2    | 363,4    |          | 356,0      | 358,6      | 360,6      | 359,7      | 359,6      | 358,2      | 358,8      | 358,9      | 358,5      | 357,3      |
|                                             | 43,9  | 43,7      | 43,8      | 43,6      | 45,8      | 42,6     | 42,8     | 42,6     | 42,6     | 43,0     |          | 42,0       | 42,2       | 42,9       | 42,9       | 42,7       | 41,8       | 41,8       | 42,0       | 42,3       | 41,8       |
|                                             | 11,5  | 11,4      | 11,5      | 11,5      | 11,1      | 11,3     | 11,5     | 11,2     | 11,2     | 11,3     |          | 11,5       | 11,7       | 11,9       | 11,9       | 11,8       | 11,5       | 11,4       | 11,6       | 11,4       | 11,4       |
|                                             |       |           |           |           |           |          |          |          |          |          |          |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| K1 Polttoaineheho MW                        |       | 260,4     | 259,8     | 261,7     | 260,9     | 259,1    | 257,5    | 256,2    | 257,3    | 255,3    | 256,2    | 259,5      | 259,7      | 260,1      | 259,7      | 260,3      | 258,1      | 255,8      | 257,1      | 256,9      | 255,5      |
|                                             |       |           |           |           |           |          |          |          |          |          |          |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| SK-virtaus ennen luoja kg/s                 |       | 128,2     | 128,7     | 129,4     | 129,3     | 128,1    | 127,5    | 127,9    | 127,5    | 126,7    | 127,1    | 129,6      | 130,3      | 131,0      | 130,8      | 130,2      | 128,3      | 125,8      | 126,4      | 125,9      | 124,7      |
| Savukaasun lämpöteho, eko                   |       | 80,2      | 79,3      | 79,3      | 79,6      | 77,9     | 79,3     | 80,3     | 78,9     | 78,8     | 79,1     | 79,3       | 80,5       | 81,3       | 81,4       | 81,5       | 80,0       | 80,8       | 81,7       | 81,3       | 81,7       |
|                                             |       |           |           |           |           |          |          |          |          |          |          |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Ekon lämpöteho                              |       | 11,5      | 11,4      | 11,5      | 11,5      | 11,1     | 11,3     | 11,5     | 11,2     | 11,2     | 11,3     | 11,5       | 11,7       | 11,9       | 11,9       | 11,8       | 11,5       | 11,4       | 11,6       | 11,4       | 11,4       |
| Paine-ero SAVUK. LUVON VASEN YLI mbar       |       | 10,9      | 10,8      | 11,1      | 11,3      | 11,2     | 11,0     | 11,3     | 11,0     | 10,8     | 10,9     | 9,5        | 9,7        | 9,9        | 10,0       | 9,8        | 9,6        | 9,5        | 9,5        | 9,4        | 9,2        |
| Paine-ero SAVUK. LUVON OIKEA YLI mbar       |       | 9,0       | 8,9       | 8,9       | 9,0       | 9,0      | 9,0      | 9,2      | 8,9      | 8,8      | 8,8      | 9,2        | 9,3        | 9,4        | 9,3        | 9,3        | 9,0        | 9,3        | 9,3        | 9,1        | 8,8        |
|                                             |       |           |           |           |           |          |          |          |          |          |          |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| SAVUKAASUVIRTAUS ENNEN SK-LUVOA, VASEN kg/s |       | 64,2      | 64,3      | 64,8      | 65,0      | 64,6     | 64,1     | 64,5     | 64,4     | 63,9     | 63,7     | 64,8       | 65,0       | 65,3       | 64,9       | 65,0       | 65,4       | 64,4       | 64,6       | 64,3       | 63,8       |
|                                             |       |           |           |           |           |          |          |          |          |          |          |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| SAVUKAASUVIRTAUS ENNEN SK-LUVOA, OIKEA kg/s |       | 64,1      | 64,4      | 64,7      | 64,3      | 63,6     | 63,4     | 63,5     | 63,1     | 62,8     | 63,4     | 64,8       | 65,3       | 65,7       | 65,9       | 65,2       | 62,8       | 61,4       | 61,8       | 61,5       | 60,9       |
|                                             |       |           |           |           |           |          |          |          |          |          |          |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| LMA SK-LUVO 1 JÄLKEEN XD-N KA.(EIVHD.) C    |       | 324,9     | 323,8     | 326,2     | 327,1     | 324,8    | 324,8    | 325,8    | 325,5    | 324,7    | 325,1    | 314,2      | 316,7      | 317,7      | 318,3      | 317,9      | 318,8      | 319,0      | 318,1      | 318,2      | 317,5      |
| LMA ENNEN SK-LUVO 1 XD-N KA. C              |       | 33,5      | 33,6      | 34,1      | 35,8      | 34,2     | 34,7     | 35,9     | 35,8     | 37,2     | 36,8     | 34,0       | 35,0       | 35,6       | 34,8       | 34,9       | 34,3       | 36,7       | 35,5       | 33,7       | 32,4       |
| LMA SK-LUVO 2 JÄLKEEN XD-N KA.(EIVHD.) C    |       | 315,8     | 313,5     | 314,2     | 315,7     | 313,6    | 314,1    | 314,9    | 314,0    | 313,2    | 313,8    | 304,1      | 304,6      | 306,4      | 304,8      | 305,2      | 303,4      | 306,1      | 304,7      | 304,8      | 304,1      |
| LMA ENNEN SK-LUVO 2 XD-N KA. C              |       | 37,1      | 36,9      | 37,5      | 39,1      | 37,4     | 37,9     | 39,2     | 39,1     | 40,4     | 39,9     | 35,4       | 36,5       | 36,2       | 36,0       | 36,3       | 36,8       | 36,7       | 36,7       | 36,0       | 35,2       |
| SAVUKAASUN LITEKON JÄLKEEN C                |       | 362,9     | 361,9     | 363,0     | 363,6     | 361,9    | 362,1    | 362,8    | 362,6    | 362,2    | 363,4    | 356,0      | 356,6      | 360,6      | 359,7      | 359,6      | 359,2      | 358,8      | 358,9      | 358,5      | 357,3      |
| SAVUK-N KORJ.LOPPU LÄMPÖTLA, VASEN C        |       | 141,9     | 141,0     | 143,5     | 144,5     | 141,9    | 141,6    | 143,0    | 142,9    | 142,7    | 143,8    | 137,1      | 138,2      | 139,3      | 140,6      | 139,7      | 139,2      | 139,8      | 136,7      | 136,7      | 136,1      |
| SAVUK-N KORJ.LOPPU LÄMPÖTLA, OIKEA C        |       | 138,9     | 135,6     | 136,4     | 138,8     | 136,4    | 137,4    | 138,5    | 137,3    | 136,9    | 136,4    | 131,9      | 132,1      | 132,1      | 130,6      | 131,3      | 129,7      | 134,1      | 132,5      | 132,3      | 131,1      |
|                                             |       |           |           |           |           |          |          |          |          |          |          |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| LMA-N LÄMPÖTLAERO LUVON VASEN YLI           |       | 291,3     | 290,2     | 292,1     | 291,4     | 290,5    | 290,0    | 289,9    | 289,7    | 287,5    | 288,3    | 280,2      | 281,7      | 283,1      | 283,5      | 283,0      | 284,5      | 283,2      | 282,6      | 284,5      | 285,1      |
|                                             |       |           |           |           |           |          |          |          |          |          |          |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| LMA-N LÄMPÖTLAERO LUVON OIKEA YLI           |       | 278,8     | 276,6     | 276,6     | 276,5     | 276,2    | 276,3    | 275,7    | 274,8    | 272,8    | 273,9    | 268,6      | 268,1      | 270,2      | 268,8      | 268,9      | 267,6      | 267,4      | 267,9      | 268,8      | 268,8      |
|                                             |       |           |           |           |           |          |          |          |          |          |          |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| SAVUKAASUN LÄMPÖTLAERO LUVON VASEN YLI      |       | 221,0     | 220,9     | 219,5     | 219,2     | 220,0    | 220,6    | 219,8    | 219,7    | 219,5    | 219,6    | 218,9      | 220,5      | 221,4      | 219,1      | 219,8      | 219,0      | 222,0      | 222,2      | 221,8      | 221,3      |
|                                             |       |           |           |           |           |          |          |          |          |          |          |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| SAVUKAASUN LÄMPÖTLAERO LUVON OIKEA YLI      |       | 223,9     | 226,3     | 226,5     | 224,8     | 225,6    | 224,7    | 224,3    | 225,3    | 225,4    | 227,0    | 224,1      | 226,5      | 226,5      | 229,1      | 228,3      | 228,5      | 225,7      | 226,4      | 226,2      | 226,3      |
|                                             |       |           |           |           |           |          |          |          |          |          |          |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| NUOHOSHÖYRYN VIRTAUS tiwK                   |       | 26,4993   | 28,0056   | 28,1918   | 29,6142   | 30,2282  | 28,6689  | 29,8220  | 29,8515  | 28,7198  | 26,8887  | 20,0532    | 15,7691    | 15,9392    | 17,6786    | 13,0754    | 13,5050    | 15,9121    | 15,8673    | 13,3919    | 14,7688    |
|                                             |       |           |           |           |           |          |          |          |          |          |          |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| NUOHOSHÖYRYN KULUTUKSEN LASKU tiwK          |       |           |           |           |           |          |          |          |          |          |          | 6,4        | 12,2       | 12,3       | 11,9       | 17,2       | 15,2       | 13,9       | 14,0       | 15,2       | 12,1       |

SUOMEN SOODAKATTILAYHDISTYS RY  
RAPORTTISARJA

- 1/2014 Suomen Soodakattilayhdistys ry  
Konemestaripäivä 13.2.2014, esitelmät  
Scandic Vierumäki, Stora Enso Oyj, Heinolan tehdas  
(16A0913-E0147) 13.2.2014
- 2/2014 Suomen Soodakattilayhdistys ry  
Soodakattilan sähkösuodintuhkan hyötykäyttömahdollisuudet,  
Osahanke V: Sähkökemiallinen käsittely  
Kurt Siren, Oy Sirra Ab  
(16A0913-E0148) 10.3.2014
- 3/2014 Suomen Soodakattilayhdistys ry  
Soodakattila-alan yhteistoiminta  
Vuosikertomus 2013  
(16A0913-E0149) 24.4.2014
- 4/2014 Suomen Soodakattilayhdistys ry  
Soodakattila-alan yhteistoiminta  
Pöytäkirja. Vuosikokous 24.4.2014, Radisson Blu Plaza hotelli, Helsinki  
(16A0913-E0150) 24.4.2014
- 5/2014 Suomen Soodakattilayhdistys ry  
Soodakattilapäivä 30.10.2014  
Cumulus Koskikatu, Tampere  
(16A0913-E0151) 30.10.2014
- 6/2014 Suomen Soodakattilayhdistys ry  
UV-laitteiston TOC-mittaukset  
Metsä Fibre Kemi  
Jaakko Pellinen, JP-analysis  
(16A0913-E0152) 20.11.2014
- 7/2014 Suomen Soodakattilayhdistys ry  
Polttoperäisten päästöjen ja nano-hiukkasten  
haitallisuuden määrittäminen uudella tutkimusmenetelmällä (POPE)  
Itä-Suomen Yliopisto  
(16A0913-E0153) 3.12.2014



SUOMEN SOODAKATTILAYHDISTYS RY  
RAPORTTISARJA

- 1/2015 Suomen Soodakattilayhdistys ry  
Konemestaripäivä 29.1.2015, esitelmät  
Hotelli Cumulus, Rauma, Metsä Fibre Oy, Rauman tehdas  
(16A0913-E0154) 29.1.2015
- 2/2015 Suomen Soodakattilayhdistys ry  
Aktiivihiilen mitoituksen varmistus ja optimointi sekä TOC-reduktion  
varmistaminen  
(16A0913-E0155) 29.1.2015
- 3/2015 Suomen Soodakattilayhdistys ry  
Soodakattilan käynnistys-, pysäytys- ja häiriöjaksojen määrittely  
(16A0913-E0156) 14.4.2015
- 4/2015 Suomen Soodakattilayhdistys ry  
CFD Modeling of Reduced Lignin Black Liquor Combustion  
Markus Engblom ja Nikolai DeMartini, Åbo Akademi  
(16A0913-E0157) 14.4.2015
- 5/2015 Suomen Soodakattilayhdistys ry  
Understanding Low Temperature Corrosion in Black Liquor Combustion  
Niklas Vähä-Savo, Emil Vainio, Nikolai DeMartini, Patrik Yrjas & Mikko Hupa  
Åbo Akademi  
(16A0913-E0158) 14.4.2015
- 6/2015 Suomen Soodakattilayhdistys ry  
Soodakattila-alan yhteistoiminta  
Vuosikertomus 2014  
(16A0913-E0159) 23.4.2015
- 7/2015 Suomen Soodakattilayhdistys ry  
Soodakattila-alan yhteistoiminta  
Pöytäkirja. Vuosikokous 23.4.2015, Top Lounges, Helsinki  
(16A0913-E0160) 23.4.2015
- 8/2015 Suomen Soodakattilayhdistys ry  
Ääninuohouksen mahdollisuudet soodakattiloilla  
Santeri Peltola, Tampereen teknillinen yliopisto  
(16A0913-E0161) 19.10.2015