

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Nuohoushöyryn käyttö soodakattilalaitoksessa

Soot blowing steam usage in kraft recovery boiler

Työn tarkastaja: Prof. Esa Vakkilainen

Työn ohjaaja: DI Alekski Nurmi

Lappeenranta 5.3.2019

Veli-Pekka Tikka

# TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Veli-Pekka Tikka

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: DI Aleksi Nurmi

Kandidaatintyö 2019

20 sivua, 6 kuvaa, 1 taulukko ja 1 liite

Hakusanat: Soodakattila, nuohous

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on tutkia soodakattilan likaantumista ja nuohousta. Likaantumiseen ja nuohoukseen liittyviin ilmiöihin ja laitteisiin on tutustuttu käymällä läpi aiheeseen liittyvää kirjallisuutta ja tutkimuksia. Kirjallisuusosan lisäksi työhön kuuluu laskentaosa, jossa selvitetään mahdollisia säästöjä nuohoushöyryn käytössä. Laskennan kohteena on UPM:n Kaukaan tehtailla sijaitsevan soodakattilan nuohousjärjestelmä.

Soodakattilan lämpöpinnat likaantuvat huomattavasti tavanomaisia voimakattiloita nopeammin johtuen suuresta lentotuhkan määrästä savukaasuissa. Onkin tavanomaista, että nuohous kuluttaa 3-12% kattilan tuottamasta korkeapainehöyrystä, joka voitaisiin muuten hyödyntää energiantuotannossa. Laskentaosiossa tarkastellaan, kuinka paljon höyrynkulutusta olisi mahdollista vähentää, mikäli nuohoushöyryvirtausta vähennettäisiin nuohoimia takaisin vedettäessä. Höyryvirran kuristamisen takana on ajatus siitä, että nuohoin irrottaa suurimman osan liasta jo sisäänmenomatkalla.

Laskennan tulosten pohjalta voidaan todeta, että jo kolmen usein käytetyn nuohoinparin höyryvirtauksen säätäminen vähentää höyrynkulutusta huomattavasti. Nuohoushöyryn käyttöä rajoitettaessa on kuitenkin varmistettava riittävä nuohousteho, koska lämpöpinnoille kertyvä lika heikentää kattilan toimintaa.

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>Tiivistelmä</b>	<b>2</b>
<b>Sisällysluettelo</b>	<b>3</b>
<b>Symboli- ja lyhenneluettelo</b>	<b>4</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>5</b>
<b>2 Talteenottoprosessi</b>	<b>6</b>
2.1 Haihduttamo .....	6
2.2 Soodakattila .....	6
2.2.1 Turbiini.....	8
2.3 Kaustistamo .....	8
2.3.1 Meesauuni .....	8
<b>3 Soodakattilan likaantuminen</b>	<b>9</b>
3.1 Nuohoimet .....	10
3.2 Nuohous.....	12
<b>4 Kaukaan Soodakattila</b>	<b>14</b>
4.1 Nykyinen nuohousohjelma.....	15
4.2 Nuohousohjelman säätäminen.....	16
4.3 Laskenta.....	17
<b>5 Pohdintaa nuohouksen säätämisen vaikutuksista</b>	<b>19</b>
<b>6 Yhteenveto</b>	<b>20</b>
<b>Lähdeluettelo</b>	<b>21</b>

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset aakkoset

$n$  ainemäärä mol

$P$  teho W

$p$  paine bar

$T$  lämpötila °C

$q_m$  massavirta kg/s

### Lyhenteet

tka tonnia kuiva-ainetta

## 1 Johdanto

Tämä kandidaatintyö koostuu kirjallisuusosasta ja laskentaosasta. Kirjallisuusosassa tarkastellaan soodakattilan likaantumista ja nuohousta. Soodakattila on osa sulfaattiselutehtaan talteenottoa, jossa sulfaattiselutteen jäteliemi, mustalipeä regeneroidaan takaisin käytettävään muotoon. Mustalipeää poltettaessa savukaasujen mukana kulkeutuu suuri määrä lämpöpinnoille kertyvää ainesta, joka heikentää lämmönsiirtoa, ja pahimmassa tapauksessa tukkii soodakattilan savukaasun virtausreitit. Kertymien poistamiseksi soodakattilaa on nuohottava huomattavasti tavanomaisesta voimakattilaa enemmän. Nuohouksessa käytetään höyrynuohoimia, jotka kuluttavat tyypillisesti 3-12% kattilan tuottamasta korkeapainehöyrystä, joka voitaisiin muuten hyödyntää energiantuotannossa. (Phobali et al. 2011)

Työhön kuuluvassa laskentaosassa tarkastellaan mahdollisesti säästettävän höyryn määrä, mikäli nuohoushöyryn määrää säädettäisiin nuohointa takaisin vedettäessä. Laskennan kohteena on UPM Kaukaan sellutehtaan osana toimiva soodakattilalaitos ja se suoritettiin Microsoft Excel-laskentaohjelmalla. Nuohousjärjestelmän höyrynkulutuksen laskennassa on tehtävä yksinkertaistuksia laskennan mahdollistamiseksi. Soodakattilan nuohoukseen on kiinnitetty paljon huomiota sen vaatiman suuren höyrymäärän takia. Todellisuudessa nuohousjärjestelmässä tapahtuu paljon hetkittäistä höyrynkulutuksen heilahtelua, jonka huomioiminen monimutkaistaisi laskentaa huomattavasti. Työssä ei keskitytä nuohouksen säätämisen vaikutuksiin lämpöpintojen likaantumisen kannalta, koska sen toteaminen vaatisi koeajoja kattilalla. Työn tarkoituksena on havainnollistaa, kuinka pienet muutokset nuohousjärjestelmässä voisivat vaikuttaa merkittävästi keskimääräiseen höyrynkulutukseen.

## **2 Talteenottoprosessi**

Talteenottoprosessi on osa sulfaattisellun valmistusprosessia, jossa sellunkeitossa syntynyt jäteliemi, mustalipeä, regeneroidaan takaisin uudelleen käytettävään muotoon valkolipeäksi. Valkolipeän lisäksi talteenottoprosessista saadaan erilaisia sivuainevirtoja, kuten mäntyöljyä, sekä sähköä ja höyryä tehtaan tarpeisiin. Talteenottoprosessi koostuu yksinkertaistetusti haihduttamosta, soodakattilasta, kaustistamosta ja meesauunista.

### **2.1 Haihduttamo**

Haihduttamon tehtävänä on nostaa keittämöltä tulevan mustalipeän kuiva-ainepitoisuutta haihduttamalla siitä pois vettä, jotta se sopisi poltettavaksi soodakattilassa. Haihduttamolle tullessa mustalipeän kuiva-ainepitoisuus on tyypillisesti 14-16% ja poistussa 70-85%. Haihduttamot ovat monivaiheisia, koska se mahdollistaa paremman energiatehokkuuden. Mustalipeän väkevöinnin lisäksi haihduttamalla saadaan erotettua mustalipeän seasta suopaa, metanolia ja tärpähtiä. (Seppälä 2002, 149)

### **2.2 Soodakattila**

Soodakattila on prosessikattila, jonka tehtävänä on osana talteenottoprosessia keittokemikaalien regenerointi, eli sulfaattisellun keittoprosessissa käytettyjen kemikaalien muuttaminen takaisin käytettävään muotoon. Samalla otetaan talteen mustalipeän sisältämän orgaanisen aineksen palamisesta vapautuva lämpö, ja tuotetaan sähköä ja prosessihöyryä tehtaan tarpeisiin. Soodakattilat ovat alikriittisiä luonnonkiertokattiloita, joissa on nykyään usein miten yksi lieriö. Soodakattiloiden tuorehöyryn arvot ovat tyypillisesti melko matalia, noin 85 bar ja 480 °C. Nykyisin on kuitenkin olemassa jo yli 100 bar ja 500 °C kattiloita. (Vakkilainen E. 2005, s. 1-6 & 1-10)

Soodakattilan polttoaineena käytetään haihduttamalla väkevöityä mustalipeää, vahvalivettä. Mustalipeä koostuu epäorgaanisista keittokemikaaleista, sellun keitossa puuaineksesta irronneista orgaanisista yhdisteistä sekä vedestä. Soodakattilaan syötettävän vahvalipeän koostumus voi vaihdella tehdaskohtaisesti paljonkin riippuen monista eri tekijöistä. Kuiva-ainepitoisuus vaihtelee 70-85% välillä, ja kuiva-aineesta

noin 60% on orgaanista ja 40% epäorgaanista ainesta. Apupolttoaineena kuorma- ja käynnistyspolttimissa käytetään joko öljyä tai kaasua. (Raiko et al. 2002, s. 525)

Mustalipeä syötetään kattilaan ruiskutusaukoista. Lipeäsuihku saadaan aikaan erityisen lusikkasuuttimen avulla. Lusikkasuuttimessa kuumaa mustalipeää syötetään paineella lusikan muotoista suutinpäätä kohti, jolloin lipeäsuihku hajoaa pisaroiksi. Lipeäpisaroiden tulisi olla riittävän pieniä, jotta reaktiopinta-alaa olisi riittävästi, mutta ei niin pieniä, että ne lähtisivät savukaasuvirran mukaan. Pisaroiden kokoa voidaan säätää lipeän ruiskutuspaineen ja lämpötilan avulla. (Raiko et al. 2002, s. 530)

Mustalipeä kertyy soodakattilan pohjalle keoksi, jossa tapahtuu kemikaalien kierrätyksen kannalta oleellisin reaktio, natriumsulfaatin pelkistyminen natrium sulfidiksi. Reaktio esitetty yhtälössä X. (Raiko et al. 2002, s. 543)



Pelkistymisreaktio tapahtuu tuomalla kekoon palamatonta hiiltä, yhtälön 1 mukaisesti. Pelkistymisreaktion tapahtumiseksi keossa on oltava noin 1000-1100 °C lämpötila, sekä vähähappinen ympäristö, joka saadaan aikaiseksi ilmajaon avulla. Pelkistymisreaktion onnistumista kuvataan reduktioasteella, joka on esitetty yhtälössä X. (Raiko et al. 2002, s. 543)

$$Reduktioaste (\%) = \frac{n_{Na_2S}}{n_{Na_2S} + n_{Na_2SO_4}} \quad (2)$$

missä  $n$  ainemäärä [mol]

Pelkistynyt sula kemikaalituhka poistuu soodakattilan pohjalla olevia sularännejä pitkin liuotussäiliöön, jossa se liukenee viherlipeäksi.

Soodakattilan palamisilma tuodaan kattilaan kolmessa tai useammassa tasossa. Alimpana tulipesässä sijaitsevien primääri-ilmojen avulla hallitaan kekoa, ja varmistetaan oikeanlaiset olosuhteet pelkistymisreaktiolle. Sekundääri-ilmoilla poltetaan kiinteä hiili, ja lipeästä haihtuneet hiiliyhdisteet. Tertiääri-ilmojen avulla saatetaan loppuun savukaasujen mukana kulkeutuvien orgaanisten aineiden palaminen. (Huhtinen et al. 2008, s. 72)

### 2.2.1 Turbiini

Soodakattilan yhteydessä on yleensä vastapaineturbiini, jolla tuorehöyryn paine saadaan laskettua tehtaan käyttötarkoituksiin sopiville painetasoille, hyödyntäen samalla sen sisältämä energia sähköntuotannossa. Tehtaan käyttämät höyryverkon painetasot ovat matalapainehöyry, eritasoiset välipainehöyryt, sekä korkeapainehöyry. Korkeapainehöyry tuotetaan ohittamalla turbiini ja matalapainehöyry paisuttamalla korkeapainehöyry kokonaan turbiinin läpi. Eritasoiset välipainehöyryt saadaan turbiinin välitoista. Turbiinin lisäksi korkeapainehöyryn paineenalennukseen eri painetasoille voidaan käyttää reduktioventtiileitä. Sähkön hinnan takia on kuitenkin kannattavaa ajaa turbiinin läpi mahdollisimman suuri osa korkeapainehöyrystä. Lauhdeturbiinin kyseessä ollessa höyry, jota ei oteta turbiinista välilottojen tai vastapaineyhteen kautta, johdetaan turbiinin lauhdeosaan, jossa se vapauttaa energiansa ensin sähköksi ja loput lauhduttimessa lämmöksi.

## 2.3 Kaustistamo

Kaustistamolla soodakattilalta saapuva viherlipeä ensin suodatetaan, jonka jälkeen sen sekaan sekoitetaan poltettua kalkkia. Reagoidessaan kalkin kanssa viherlipeä muodostaa ns. kalkkimaitoa, joka sisältää valkolipeää ja meesaa. Lopuksi kalkkimaito suodatetaan valkolipeäsuodattimilla, jolloin meesa ja valkolipeä saadaan erotettua. Meesa jatkaa matkaansa kalkkikierrossa ja suodatettu valkolipeä voidaan käyttää uudestaan sellun valmistuksessa. (Seppälä 2002)

### 2.3.1 Meesauuni

Meesauuni on osana kaustisointiprosessin kalkkikiertoa oleva uuni, jossa valkolipeäsuodattimilta tuleva meesa regeneroidaan takaisin poltetuksi kalkiksi. Meesa koostuu pääosin kalsiumkarbonaatista, joka hajoaa kuumassa lämpötilassa hiilidioksidiksi ja kalsiumoksidiksi eli poltetuksi kalkiksi. Reaktion vaatima korkea lämpötila tuotetaan tyypillisesti polttamalla uunissa maakaasua tai öljyä. Vaihtoehtoisina polttoaineina voidaan käyttää myös mm. mäntyöljyä, kaasutettua biomassaa, prosessien hajukaasuja, ligniiniä, metanolia tai petrokoksia. (Arpalahti 2000, 144) (Svedin et al. 2009, 11.24)

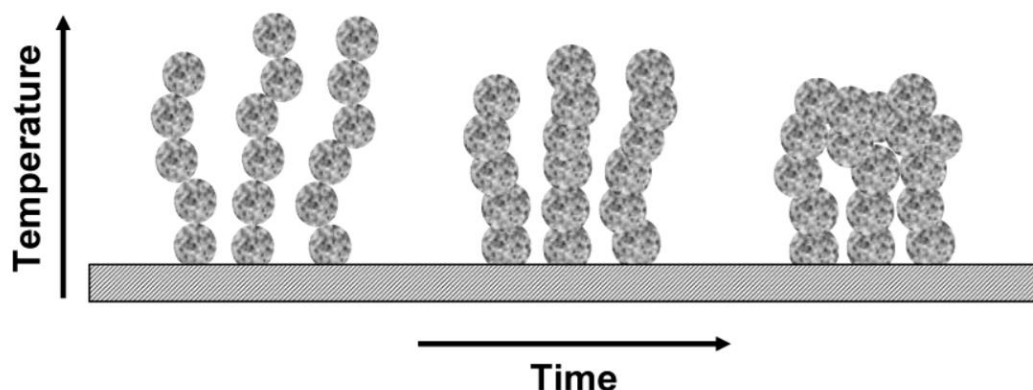


### 3 Soodakattilan likaantuminen

Soodakattiloiden savukaasujen mukana kulkeutuu huomattavia määriä lentotuhkaa, joka koostuu pääosin natriumsulfaattista, mutta sisältää myös vaihtelevia määriä natriumkarbonaattia, -kloridia ja kaliumia. Soodakattilan savukaasut sisältävät lentotuhkaa tyypillisesti 20-30 g/m<sup>3</sup>n, mikä on huomattavasti enemmän kuin biomassan poltossa. Lentotuhkan suuren määrän takia sitä myös kertyy lämpöpinnoille huomattavasti voimakattiloita enemmän, joten myös nuohoustarve on niitä suurempi. Puutteellinen nuohoaminen heikentää lämmönsiirtoa lämpöpinnoilla, lisää korroosiota, nostaa savukaasujen lämpötilaa sekä pahimmassa tapauksessa johtaa kattilan savukaasun virtausreittien tukkeutumiseen. (Vakkilainen 2019)

Soodakattilan likaantuminen on hyvin erityyppistä eriosissa kattilaa, ja tietyt kohdat, kuten ekonomaiserien sisäänmenot ovat erityisen herkkiä likaantumaan. Lämpöpinnoille kertyvä lika on erityyppistä kattilan eri osissa. Likakertymät ovat suurimmassa osassa kattilaa kovaa ja haurasta, mutta voi olla paikoitellen myös sitkeää ja tarttuvaa. (Phobali et al. 2011)

Kattilan lämpöpinnoille kertyvä lentotuhka tiivistyy ja kovettuu ajan kuluessa sintraantumisen takia. Sintraantuminen tarkoittaa huokoisen materiaalin tiivistymistä kuumuuden ja paineen vaikutuksesta, kuitenkin sulattamatta kappaletta. Sintraantumisen eteneminen on havainnollistettu kuvassa 1. Sintraantumisen nopeuteen vaikuttaa lämpötila ja sintraantuvan aineen kemiallinen koostumus. Materiaalit, joiden alin sulamislämpötila on matalampi sintraantuvat nopeammin. Lentotuhkan sintraantumisessa karbonaatti ja kaliumpitoisuuksilla on suuri vaikutus, koska ne laskevat lentotuhkan alinta sulamislämpötilaa. Sintraantuminen tapahtuu nopeimmin kattilan kuumimmilla alueilla kuten tulistimissa, ja hitaammin kattilan kylmemmillä alueilla kuten ekonomaisereissa. Sintraantuminen on otettava huomioon nuohouksen suunnittelussa, koska pitkälle sintraantunut kertymä ei välttämättä irtoa normaalissa nuohouksessa. (Frederick & Vakkilainen 2003, 1-2)



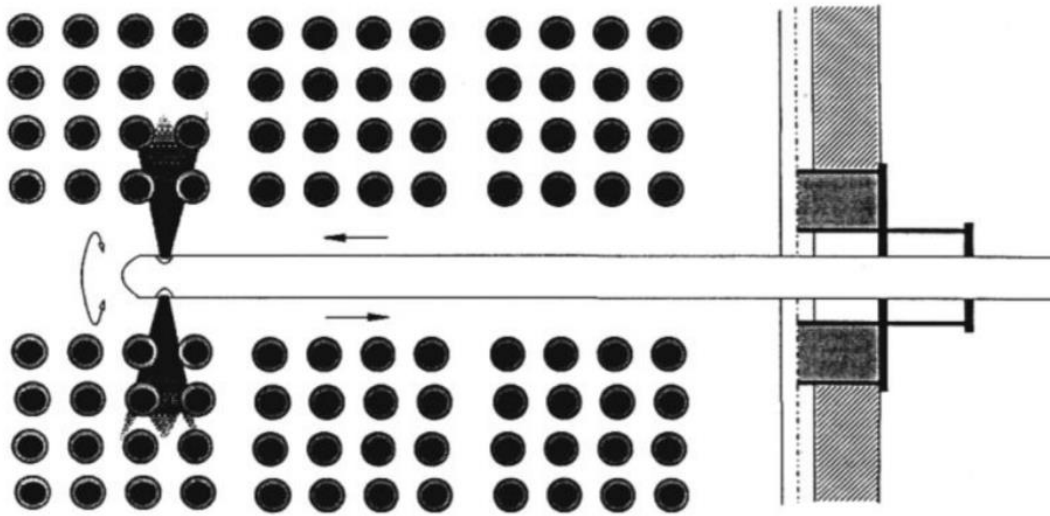
**Kuva 1.** Havainnekuva sintraantumisen etenemisestä (Frederick & Vakkilainen 2003, 8)

### 3.1 Nuohoimet

Soodakattila nuohoukseen käytetään yleisesti höyrynuohoimia, jonka eri tyyppejä ovat seinänuohoimet, ulosvedettävät nuohoimet, pyörivät monisuutinnuohoimet, haravanuohoimet ja pyörivien ilmanesilämmittimien nuohoimet. Nuohoimet toimivat keskenään samankaltaisella periaatteella, jossa suutinputkesta lähtee likaa irrottavia höyrysuihkuja. Ulosvedettävät nuohoimet ja seinänuohoimet koostuvat edestakaisin liikkuvasta pyörivästä suutinputkesta, jossa on kaksi suutinaukkoa. Monisuutin nuohoimet eivät liiku kattilan sisällä vaan ovat tuettuja kattilan seinistä tai lämpöpinnoista. (Huhtinen et al. 2000, s. 214-216)

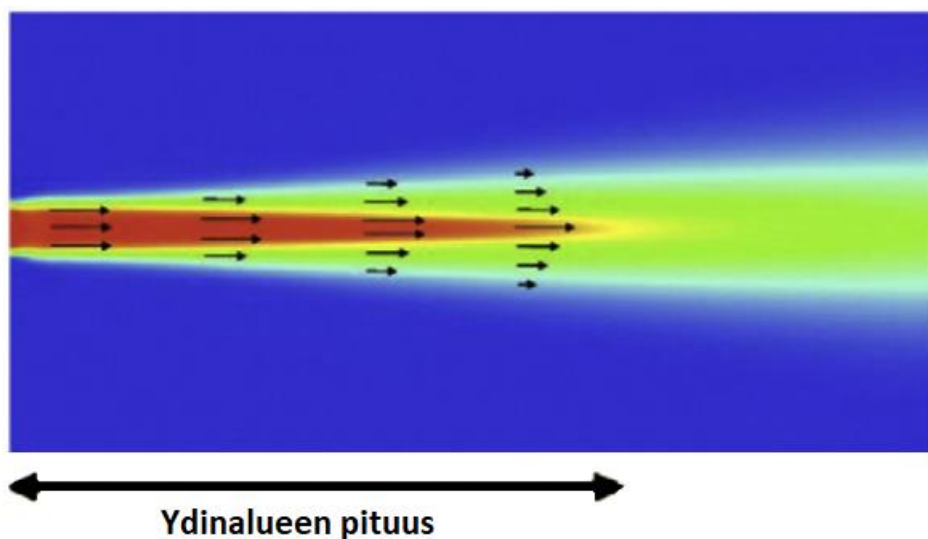
Nuohoimissa voidaan käyttää höyryn lisäksi paineilmaa, mutta se on harvinaista höyryn helpon saatavuuden takia. Nuohoushöyry otetaan joko suoraan tulistimilta ja lasketaan sopivaan paineeseen tai turbiinista sopivan välioton kautta. Nuohoushöyryn paine on tavallisesti 20-30 bar ja höyryn on oltava tulistunutta, koska pisarat aiheuttaisivat vahinkoa lämpöpinnoille. (Huhtinen et al. 2000, s. 214-216)

Yllä mainituista nuohoinlaitteista yleisimmin käytettyjä ovat ulosvedettävät nuohoimet. Ulosvedettävät nuohoimet sijaitsevat soodakattilan ulkopuolella suutinpäättä lukuun ottamatta ja ne työnnetään kattilan sisälle vain nuohouksen ajaksi, kuva 2. Nuohoinputkien liikuttamiseen käytetään pyörimisnopeussäädetyllä sähkömoottorilla toimivaa vaunua. Nuohoushöyrylinjan vesityksellä ja lämpötilamittauksella varmistetaan, ettei höyryn mukana tule pisaroita.



**Kuva 2.** Havainnekuva ulosvedettävän nuohoimen toiminnasta (Huhtinen et al. 2000, 215)

Nuohoimen suutinpäistä tuleva yläääninen höyrystuisku koostuu ydinalueesta sekä sitä ympäröivästä turbulentista alueesta. Kertymien poistamisen kannalta tehokkain kohta suihkusta on ydinalue, joka on yleisesti 10-15 kertaa suuttimen halkaisijan pituinen. Nuohoimien nuohoustehon vertailussa käytetäänkin suihkun keskiosassa vallitsevaa kokonaispainetta, jota kutsutaan nimellä peak impact pressure. Kertymän irrottamiseksi lämpöpinnoilta suihkun siihen kohdistaman paineen on oltava noin kaksinkertainen kertymän vetolujuuteen verrattuna. Nuohoinsuuttimet on suunniteltu toimimaan tietyllä höyrystypaineella, jolloin suihkun ydinalue on tasainen. Mikäli paine ei vastaa suunniteltua, suihkuun tulee heilahtelevia paineaaltoja. (Phobali et al. 2013, 69-70)



**Kuva 3.** Nuohoussuihkun nopeusjakauma (muokattu kohteesta Phobali et al. 2013, 70)

### 3.2 Nuohous

Soodakattilan nuohoimet toimivat ennalta määritetyn nuohousohjelman mukaan, joka on suunniteltu varmistamaan tehokas nuohoustulos. Nuohousohjelmia voi olla useampia, joista valitaan tilanteeseen sopiva, myös käsiajo on mahdollista. Herkemmin likaantuvilla alueilla sijaitsevat nuohoimet ovat toiminnassa useammin kuin vähemmän likaantuvilla alueilla. Ulosvedettävillä nuohoimilla on varottava, ettei ylempänä sijaitseva nuohoin irrota suurta kertymää alempana sijaitsevan nuohoimen päälle vahingoittaen sitä.

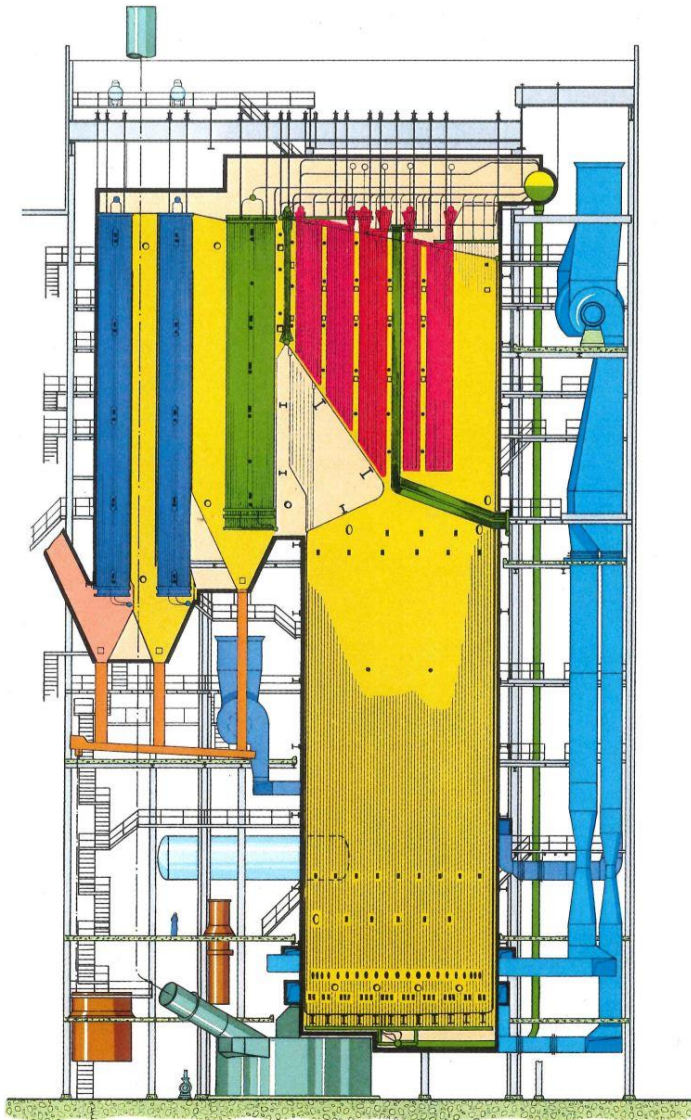
Lämpöpinnoille kertyvä lika on hyvin erityyppistä eripuolilla kattilaa, ja siksi nuohoimissa käytetään erilaisia suuttimia ja nuohouspaineita. Mikäli kertymät ovat hauraita, ne irtoavat hyvin nopeasti nuohousuihkun osuessa niihin. Siksi nuohousteho on hyvä tällaisilla nuohousalueilla, vaikka nuohoin liikkuisikin nopeasti lämpöpintojen ohi. Nuohoin myös poistaa sisäänmenomatkallaan suurimman osan kertymistä. Nuohoinhöyryä on siis mahdollista säästää liikuttamalla nuohointa nopeammin, tai vähentämällä nuohoushöyryn määrää nuohointa takaisin vedettäessä. (Kaliazine et al. 1997) (Vakkilainen 2018)

Nuohoustarpeen määrittäminen sopivaksi on ensiarvoisen tärkeää soodakattilan toiminnalle. Oikein määritetyn nuohoustarpeen avulla pystytään varmistamaan kattilan mahdollisimman tehokas toiminta ja säästämään nuohoushöyryä. Nuohoustarpeen

määrittämisen apuna käytetään prosessista saatavia mittaustuloksia. Käytettäviä mittareita ovat muun muassa vetohäviö lämmönsiirtopinnan yli, savukaasujen lämpötila sekä lämmönsiirtyminen lämpöpinnoilla. (Leviskä 1999, 108)

## 4 Kaukaan Soodakattila

Kaukaan sellutehtaan nykyinen soodakattila SK3 on käynnistynyt 1992, ja sen tuotantokapasiteettia ja höyryntuottoa on nostettu useaan kertaan alkuperäisestä, kuva 4. Alkuperäinen laitos kykeni käsittelemään 2700 tka/d mustalipeää tuottaen samalla 118kg/s tuorehöyryä. Nykyisin laitoksen vastaavat arvot ovat 4000 tka/d käsiteltyä mustalipeää ja 150 kg/s höyryä. Tässä kandidaatintyössä on tarkoitus tarkastella, kuinka paljon nuohoushöyryn käyttöä pystyisi vähentämään, mikäli nuohoushöyryn määrää kuristettaisiin nuohoimen takaisintulomatkan ajaksi.



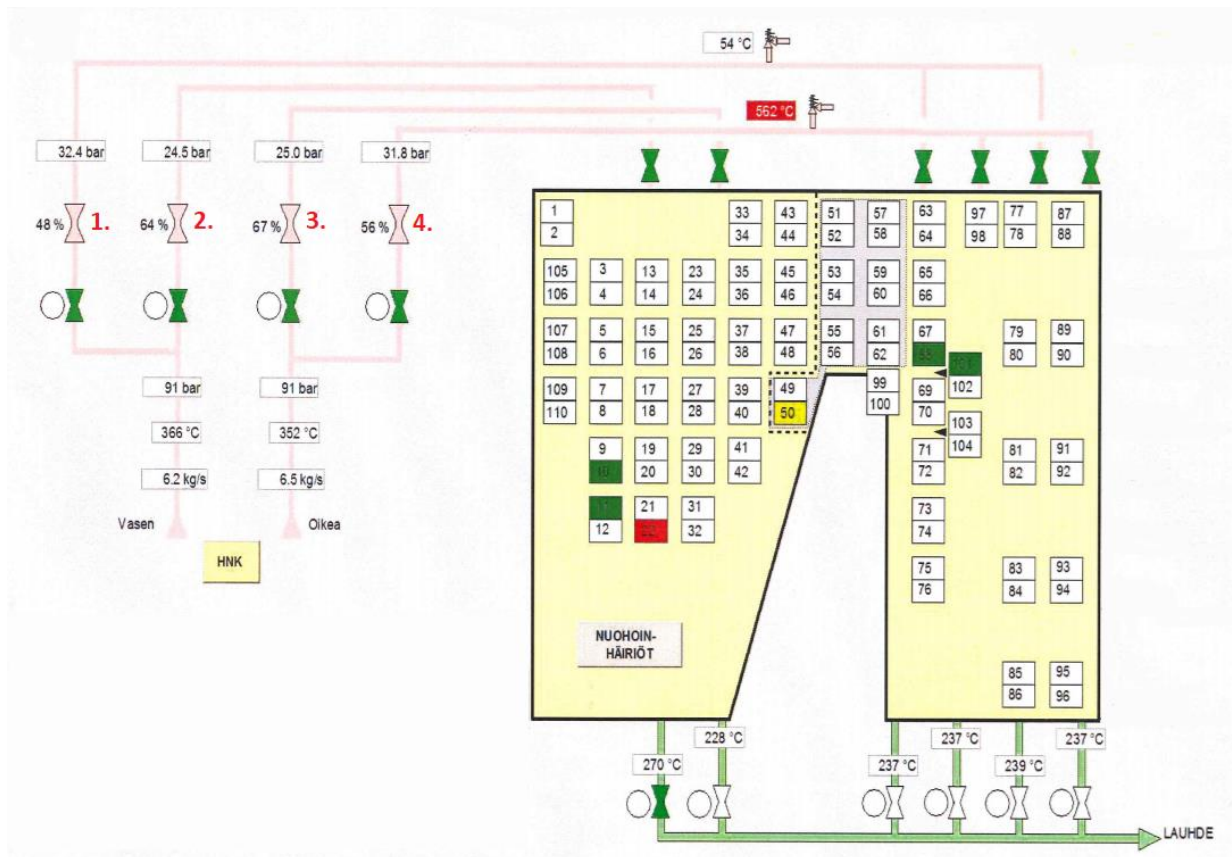
**Kuva 4.** Soodakattilalaitos SK3:n havainnekuva (Kaukas 1992)

Soodakattilalaitoksen nykyinen vastapaineturbiini TG9 on jäänyt pieneksi viimeisimpien kapasiteettinostojen takia, eikä se pysty vastaamaan tehtaan välipaihehöyryn tarpeeseen. Turbiinin jäätyä pieneksi, välipaihehöyryä joudutaan tekemään reduktioventtiilien avulla, jolloin korkeapaineisen höyryn sisältämää entalpiaa ei pystytä hyödyntämään sähköntuotannossa. Turbiinia ollaan kuitenkin tulevaisuudessa avartamassa, jolloin suurempi osa höyrystä pystytään ajamaan sen läpi sähkötehon kasvattamiseksi. Turbiinissa on kolme väliottoa, joista saadaan höyryä 12,5 bar ja 10,5 bar höyryverkkoihin. Turbiinia on tarkoitus avartaa siten, että 10,5 bar välioton maksimitilavuusvirta kasvaa 45 kg/s, kun se nykyisin on 25 kg/s. 12,5 bar maksimivirtaus pysyy samassa arvossa 5kg/s. Avarruksen jälkeen turbiinin sähköteho olisi maksimikuormalla 85 MW.

Mikäli nuohouksessa säästetty höyry joudutaan ajamaan reduktioventtiileille turbiinin sijaan, jää tavoiteltu säästö pienemmäksi. Suurin hyöty saadaan, kun turbiinin kapasiteetti riittää ottamaan vastaan säästetyn höyrymäärän, ja lisäämään siten sähköntuotantoa. Silloinkin saadaan säästettyyn nuohoushöyryyn sähkön kehityksen jälkeen jäänyt lämpöenergia talteen matalapaineiseksi höyryksi, sekä vähennetään lisäveden tarvetta.

#### **4.1 Nykyinen nuohousohjelma**

Kaukaan soodakattilan nuohousjärjestelmä koostuu 110:stä ulosvedettävästä höyrynuohoimesta. Nuohoimet toimivat nuohoinpareittain siten että oikean ja vasemman seinän nuohoimet toimivat aina peräjälkeen. Nuohous on jaettu kahteen osa-alueeseen, joista toinen kattaa tulistimien nuohoimet, ja toinen ekonamaiserien ja keittopintojen nuohoimet. Molemmilla osa-alueilla on itsenäiset nuohousohjelmat. Normaalisti neljä nuohointa on toiminnassa samanaikaisesti, siten että molemmilla nuohousalueilla on toiminnassa yksi vasemman ja yksi oikean puolen nuohoin. Nuohoinjärjestelmä on esitetty kuvassa 5.



**Kuva 5.** Kaukaan soodakattilan nuohousjärjestelmän prosessikuva. Nuohoushöyryn säätöventtiilit numeroituna 1-4. (Kaukas 2018)

Nuohoukseen käytetty höyry otetaan ensimmäisen tulistinvaiheen jälkeen kattilan molemmin puolin, ja sen paine lasketaan säätöventtiilien avulla sopivaan nuohouspaineeseen. Oikean puolen nuohoimet saavat höyrynsä oikealta puolelta, ja vasemman puolen nuohoimet vasemmalta.

## 4.2 Nuohousohjelman säätäminen

Nykyistä nuohousohjelmaa on tarkoitus säätää siten, että kolmen eniten kattilassa käyvän nuohoinparin höyryvirtausta kuristetaan murto-osaan normaalista, silloin kun nuohointa vedetään ulos kattilasta. Tarkoituksena on, että nuohoin saisi nuohottua lämmönsiirtopinnat riittävän hyvin jo sisäänmeno matkalla, jolloin ulos vedettäessä höyryvirtausta ei tarvitsisi muuhun kuin nuohoimen jäähdyttämiseen. Höyryvirtausta ei voida täysin sulkea ulosvedon ajaksi sillä kattilan sisällä vallitseva korkea lämpötila voisi vaurioittaa nuohoinputkea, mikäli nuohoimen sisällä kulkeva höyryvirtaus ei jäähdyttäisi



sitä. Nuohoushöyryn virtauksen säätämiseen käytettäisiin nuohouslinjoissa sijaitsevia säätöventtiileitä, jotka on merkitty kuvaan 5.

Kokeiluun valitut nuohoinparit ovat 77-78, 87-88 ja 97-98, ja sijaitsevat ekonomaisereiden yläosassa. Ne valikoituivat testaukseen, koska niitä käytetään lähes jatkuvasti ja ne myös sijaitsevat viileämmässä osassa kattilaa, jolloin korkea lämpötila ei uhkaa yhtä paljon nuohoimen vaurioitumista.

### 4.3 Laskenta

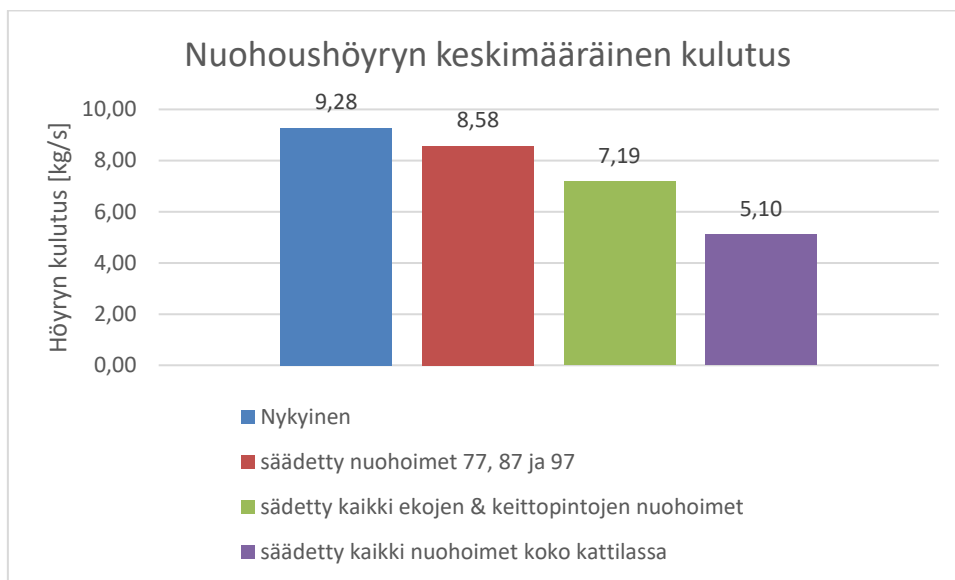
Laskenta aloitettiin nuohoushöyryn massavirroista, nuohousajoista, sekä valitsemalla tarvittava jäähdytyshöyryn määrä. Laskennassa tarvittavat arvot on saatu nuohousjärjestelmän historiatiedoista, jotka on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1.** Laskennassa käytettäviä alkuarvoja

Nuohoushöyryn keskikulutus oikea	4,28 kg/s
Nuohoushöyryn keskikulutus vasen	5,00 kg/s
Jäähdytyshöyryn määrä	10 %
Nuohousohjelman läpimenoaika	11 h 52 min 0 s

Säästettävän höyryn laskennassa oli tehtävä tiettyjä yksinkertaistuksia. Nuohoukseen kuluvan höyryn suuren hetkittäisen vaihtelun takia laskennassa käytetään höyryn kulutuksen kahdeksan tunnin keskiarvoja. On myös oletettava, että kaikki saman puolen nuohoimet kuluttavat yhtä paljon höyryä, sillä yksittäisten nuohointen höyrynkulutuksesta ei ole mittaustietoa. Todellisuudessa yksittäisten nuohointen höyrynkulutus saattaa vaihdella suuresti, riippuen käytetystä nuohoimesta ja nuohouspaineesta. Lisäksi oletetaan, että seuraava nuohoin lähtee välittömästi liikkeelle, kun edellinen lopettaa toimintansa. Pysähdyksen ajaksi loppunut höyrynkulutus kuitenkin kompensoituu, koska höyrynkulutuksesta käytetään kahdeksan tunnin keskiarvoa.

Laskenta toteutettiin Excelillä siten, että höyrynkulutus määritettiin nuohousohjelman jokaiselle hetkelle, sen mukaan mitkä nuohoimet ovat milläkin hetkellä toiminnassa. Lopuksi hetkittäisten höyrynkulutusten pohjalta määritettiin keskimääräinen nuohoukseen kuluva höyrymäärä. Laskut tehtiin erikseen neljälle eri tapaukselle. Ensin laskettiin nykyisen nuohousohjelman höyrynkulutus verrokiksi, jonka jälkeen laskettiin arvot järjestelmälle, jossa on säädetty nuohoinpareja 77-78, 87-88 ja 97-98. Lisäksi laskettiin arvot järjestelmille, jossa kaikki keittopintojen ja ekononomaisereiden nuohoimet ovat säädettyjä, sekä sellaiselle, jossa kaikki soodakattilan nuohoimet ovat säädettyjä. Laskennan tulokset on esitetty kuvassa 6.



**Kuva 6.** Nuohoushöyryn keskimääräinen kulutus eri määrillä säädettyjä nuohoimia

## 5 Pohdintaa nuohouksen säätämisen vaikutuksista

Nuohoushöyryn kuristaminen nuohointa takaisin vedettäessä vähentää selkeästi nuohoushöyryn kokonaiskulutusta. Jo kolmen eniten käytetyn nuohoinparin säätäminen vähentää nuohoushöyryn kokonaiskulutusta 7,8%. Mikäli useampia nuohoimia kuristetaan, vähenee nuohoushöyrynkäyttö jopa 45%.

Nuohoushöyryjen kuristamisella on mitä todennäköisimmin negatiivinen vaikutus nuohoustehoon, joten lämmönsiirto lämpöpinnoilla voi heikentyä. Pahimmassa tapauksessa kertymien lisääntyminen voi johtaa savukaasun virtausreittien tulppautumiseen. Suurin osa nuohouksen irrottamasta liasta irtoaa kuitenkin jo nuohoimen sisäänmenon aikana, joten negatiiviset vaikutukset voivat jäädä pieniksi.

Nuohoushöyry jäädyttää nuohointa sen ollessa kattilassa, joten höyryvirran kuristaminen takaisinvedon aikana heikentää nuohoimen jäähdystystä. Takaisinvedon ajaksi jätettävän pienen höyryvirran onkin oltava riittävän suuri turvaamaan nuohoimen riittävä jäähdytys. Nuohoushöyryn kuristamista kannattaa ensin kokeilla kattilan viileämmissä osissa oleviin nuohoimiin, jotta ylimääräisiltä nuohoinvaurioilta voitaisiin välttyä.

Nuohointen säätämisen vaikutuksia soodakattilan toimintaan on vaikea arvioida ennalta, joten todellisten vaikutusten kartoittaminen vaatisi pitkäkestoisia koeajoja kattilalla. Mikäli nuohoustehon katsottaisiin heikentyvän liikaa, heikentynyttä nuohoustehoa voisi kompensoida nopeuttamalla nuohoimen liikkumista kattilassa säätämällä nuohoinvaunun sähkömoottorin pyörimisnopeutta. Silloin nuohousohjelman läpimenoaika lyhenisi samoin kuin nuohouskertojen välinen aika. Nuohointen liikkumisen nopeuttaminen ei vaikuttaisi höyrynkulutukseen, mutta parantaisi nuohoustehoa, koska nuohouskertojen välinen aika lyhenisi. Nuohoimen nopeuttaminen ei vaikuta nuohoustehoon ainakaan niillä alueilla, joissa kertymät ovat hauraita. (Kaliazine et al. 1997)

## 6 Yhteenveto

Työn tarkoituksena oli tutkia soodakattilan likaantumista ja nuohousta. Soodakattilan likaantumisen ja nuohouksen teoriaa tarkasteltiin tutustumalla aiheesta kertovaan kirjallisuuteen sekä tutkimuksiin. Laskentaosassa selvitettiin, kuinka paljon UPM Kaukaan sellutehtaan nuohous kuluttaa höyryä, ja kuinka paljon sitä olisi mahdollista säästää, mikäli nuohoushöyryvirtausta kuristettaisiin nuohointa takaisin vedettäessä. Nuohoushöyryvirtauksen kuristamisen ajatuksen taustalla on se, että nuohoin saisi nuohottua lämpöpinnat tarpeeksi hyvin jo sisäänmenomatkalla.

Nuohoushöyryn kulutuksesta voidaan tarkastelun tuloksena todeta, että jo kolmen eniten käytetyn nuohoimen säätämällä pystytään nuohoushöyryn kokonaiskulutusta vähentämään merkittävästi. Mikäli jokaisen nuohoimen höyryvirtausta kuristettaisiin takaisin vedettäessä, nuohoukseen käytetyn höyryn määrä liki puolittuisi. Nuohointen säätämisessä on kuitenkin otettava huomioon nuohointen mahdollinen vaurioituminen, jäädytyksen ollessa heikompaa höyryvirtausta kuristettaessa.

Nuohoushöyryn säästäminen johtaa todennäköisesti heikentyneeseen nuohoustehoon, jonka vaikutuksia tulisi seurata mahdollisissa koeajoissa kattilalla. Heikentyntä nuohoustehoa voisi myös kompensoida nopeuttamalla nuohointen liikkumisnopeutta. Laskennassa on tehty useita yksinkertaistuksia, eikä se kerro yksittäisen nuohoimen tarkkaa höyrynkulutusta. Yksinkertaistuksista huolimatta se antaa hyvän kuvan nuohouksessa kuluvista höyrymääristä.

## LÄHDELUETTELO

Arpalahti, O. 2000 "White liquor preparation." Papermaking Science and Technology 6 (2000). Julkaisija: Paperi ja Puu Oy. Gummerus Oy, Jyväskylä. ISBN 978-952-5216-26-4.

Frederick J., Vakkilainen E. 2003 Sintering and Structure Development in Alkali Metal Salt Deposits Formed in Kraft Recovery Boilers. [verkkojulkaisu]. [viitattu 31.1.2019]. Saatavissa:

<http://apps.webofknowledge.com.ezproxy.cc.lut.fi/InboundService.do?customersID=ExLibris&mode=FullRecord&IsProductCode=Yes&product=WOS&Init=Yes&Func=Frame&DestFail=http%3A%2F%2Fwww.webofknowledge.com&action=retrieve&SrcApp=Primo1&SrcAuth=ExLibris&SID=C1BKVYLZH9Bcu4tYMXL&UT=WOS%3A000186735400015>

Huhtinen M., Kettunen A., Nurminen P & Pakkanen H. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. painos. Helsinki: Edita, Opetushallitus. ISBN 951-37-3360-2.

Kaliazine A., Piroozmand F., Cormack D., Tran H. 1997. Sootblower optimization II: Deposit and sootblower interaction. [verkkojulkaisu]. [viitattu 31.1.2019]. Saatavissa:

<http://apps.webofknowledge.com.ezproxy.cc.lut.fi/InboundService.do?customersID=ExLibris&mode=FullRecord&IsProductCode=Yes&product=WOS&Init=Yes&Func=Frame&DestFail=http%3A%2F%2Fwww.webofknowledge.com&action=retrieve&SrcApp=Primo1&SrcAuth=ExLibris&SID=C1BKVYLZH9Bcu4tYMXL&UT=WOS%3AA1997YF59100044>

Leiviskä K. 1999. Papermaking Science and Technology: Process Control. Book 14. Helsinki: Fapet Oy. ISBN 952-52-1600-4

Phobali A., Emami B., Bussmann M., Tran H. 2011. Studies on sootblower jet dynamics and ash deposit removal in industrial boilers. University of Toronto. [verkkojulkaisu]. [viitattu 31.1.2019]. Saatavissa:

<https://www-sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S037838201100155X?via%3Dihub>

Raiko R. Saastamoinen J., Hupa M. & Kurki-Suonio I. (toim.) 2002. Poltto ja palaminen. Toinen painos. Helsinki: International Flame Research Foundation- Suomen kansallinen osasto. ISBN 951-666-604-3.

Seppälä, M. Klementti, U. Kortelainen, V-M. Lyytikäinen, J. Siitonen, H. Sironen, R. 2002. Kemiallinen metsäteollisuus: Paperimassan valmistus. Saarijärvi: Opetushallitus

Svedin K., Ivarsson C., Lundborg R., 2009. Lime kiln modelling CFD & One-dimensional simulations. Rahoittaja: Värmeforsk Service AB. Stockholm. ISSN 1653-1248

Kaukas 2018. SK3 käyttöliittymä. [ei yleisessä jaossa]

Kaukas 1992. SK3 operaattorin ohjemateriaali. [ei yleisessä jaossa]

Vakkilainen E. 2005. Kraft recovery boilers – Principles and practice. Suomen Soodakattilayhdistys. ISBN 952-91-8603-7.

Vakkilainen Esa, 2019. Energiatekniikan Professori, LUT School of Energy Systems [Sanallinen tiedoksiänto 4.3.2019]

Vakkilainen Esa, 2018. Energiatekniikan Professori, LUT School of Energy Systems [Sanallinen tiedoksiänto 7.9.2018]

## LIITE 1. KUVIA LASKENNASSA KÄYTETTYÄ EXCEL TIEDOSTOSTA

	A	B	C	D
1				
2		Nuohoushöyryn keskipaino oikea	4,28	[kg/s]
3		Nuohoushöyryn keskipaino vasen	5,00	[kg/s]
4		jähdytyshöyryn määrä	0,1	[%]
5		Nuohoushöyryn keskipaino oikea säädetty per nuohoin	0,214	[kg/s]
6		Nuohoushöyryn keskipaino vasen säädetty per nuohoin	0,25	[kg/s]
7		Nuohousohjelman läpimenoaika	42720	[s]
8		nuohousaika yhteen suuntaan	133,5	[s]
9		Nuohoushöyryn paine	9339,00	[kPa]
10		Nuohoushöyryn lämpötila	356	[C]
11		Nuohoushöyryn entalpia	2968,329	[kJ/kg]
12		Veden tiheys	1000	[kg/m <sup>3</sup> ]
13				

2									
3									
4									
5			(vihr vasen nuohoin, kelt 2 nuohointa, oranssi oikea nuohoin)						
6		Nuohousvaihe	ajanhetki [s]	höyrynkulutus yhteensä [kg/s]	höyrynkulutus yhteensä säädetty 77, 87, 97 [kg/s]	Höyrynkulutus säädetty kaikki ekot & keittopinnat [kg/s]	Höyrynkulutus säädetty kaikki nuohoimet [kg/s]		
7	sisään	11	1	0	9,28	9,28	9,28	9,28	9,28
8	ulos	12	2	139,5	9,28	7,35	5,10	9,28	0,93
9	sisään	13	3	267	9,28	9,28	5,10	9,28	9,28
10	ulos	14	4	400,5	9,28	9,28	5,10	9,28	0,93
11	sisään	15	5	594	9,28	9,28	9,28	9,28	9,28
12	ulos	16	6	667,5	9,28	7,03	5,10	9,28	0,93
13	sisään	17	7	801	9,28	9,28	9,28	9,28	9,28
14	ulos	18	8	934,5	9,28	7,35	5,10	9,28	0,93
15	sisään	19	9	1068	9,28	9,28	9,28	9,28	9,28
16	ulos	20	10	1201,5	9,28	7,03	5,10	9,28	0,93
17	sisään	21	11	1335	9,28	9,28	9,28	9,28	9,28
18	ulos	22	12	1468,5	9,28	9,28	5,10	9,28	0,93
19	sisään	23	13	1602	9,28	9,28	9,28	9,28	9,28
20	ulos	24	14	1735,5	9,28	9,28	5,10	9,28	0,93
21	sisään	25	15	1869	9,28	9,28	9,28	9,28	9,28
22	ulos	26	16	2002,5	9,28	7,35	5,10	9,28	0,93
23	sisään	27	17	2136	9,28	9,28	9,28	9,28	9,28
24	ulos	28	18	2269,5	9,28	5,10	5,10	9,28	0,93
25	sisään	29	19	2403	9,28	9,28	9,28	9,28	9,28
26	ulos	30	20	2536,5	9,28	7,03	5,10	9,28	0,93
27	sisään	31	21	2670	9,28	9,28	9,28	9,28	9,28
28	ulos	32	22	2803,5	9,28	9,28	5,10	9,28	0,93
29	sisään	33	23	2937	9,28	9,28	9,28	9,28	9,28
30	ulos	34	24	3070,5	9,28	9,28	5,10	9,28	0,93
31	sisään	35	25	3204	9,28	9,28	9,28	9,28	9,28
32	ulos	36	26	3337,5	9,28	9,28	5,10	9,28	0,93
33	sisään	37	27	3471	9,28	9,28	9,28	9,28	9,28
34	ulos	38	28	3604,5	9,28	9,28	5,10	9,28	0,93
35	sisään	39	29	3738	9,28	9,28	9,28	9,28	9,28
36	ulos	40	30	3871,5	9,28	9,28	5,10	9,28	0,93
37	sisään	41	31	4005	9,28	9,28	9,28	9,28	9,28
38	ulos	42	32	4138,5	9,28	9,28	5,10	9,28	0,93
39	sisään	43	33	4272	9,28	9,28	9,28	9,28	9,28
40	ulos	44	34	4405,5	9,28	7,35	5,10	9,28	0,93
41	sisään	45	35	4539	9,28	9,28	9,28	9,28	9,28
42	ulos	46	36	4672,5	9,28	5,10	5,10	9,28	0,93
43	sisään	47	37	4806	9,28	9,28	9,28	9,28	9,28
44	ulos	48	38	4939,5	9,28	5,10	5,10	9,28	0,93
45	sisään	49	39	5073	9,28	9,28	9,28	9,28	9,28
46	ulos	50	40	5206,5	9,28	7,03	5,10	9,28	0,93

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2							
3							
4		Näkyinen	Höyryn keskinäätäinen kulutus [kg/s]	käytetty höyry vuorokaudessa [kg]	nuohouksesta johtuva lisäveden tarve [m <sup>3</sup> /d]	Nuohoushöyryn käytön väheneminen [%]	
5		säädety nuohoinet 77, 87 ja 97	9,28	801792	802	0,00	
6		säädety kaikki ekojen & keittopintojen nuohoinet	8,58	740906	741	7,59	
7		säädety kaikki nuohoinet koko kattilassa	7,19	621389	621	22,50	
8			5,10	440986	441	45,00	
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							
28							
29							
30							
31							

