

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikan koulutusohjelma

Ville Mäntylä

SAVUKAASUPESURIN HANKINNAN KANNATTAVUUDEN TARKASTELU
MARTINLAAKSON VOIMALAITOKSELLA

2014

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikan koulutusohjelma

MÄNTYLÄ, VILLE

Savukaasupesurin hankinnan kannattavuuden tarkastelu

Martinlaakson voimalaitoksella

Opinnäytetyö

48 sivua + liitteet 3 sivua

Työn ohjaaja

Tuntiopettaja Hannu Sarvelainen

Toimeksiantaja

Vantaan Energia Oy

Marraskuu 2014

Avainsanat

Savukaasupesuri, lämmöntalteenotto, lauhtuminen,
lämpöpumppu, kastepiste

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli selvittää savukaasupesurin hankinnan kannattavuus Martinlaakson voimalaitoksella. Savukaasupesurilla normaalisti hukkaan menevistä kosteista savukaasuista on mahdollista ottaa energiaa talteen ja nostaa kattilan hyötysuhdetta savukaasujen puhdistuessa samalla.

Hiilikattilan ollessa täydellä teholla pesurin talteen ottamalla lämpöteholla korvataan lämpökeskusten maakaasulla tuottamaa kaukolämpötehoa, jolloin investoinnin tuotto muodostuu pääasiassa korvatun maakaasun määrästä. Kattilan ollessa osateholla pesuri nostaa kattilan hyötysuhdetta, jolloin hiilen kulutus pienenee ja vuotuiset polttoainekulut vähenevät.

Hankinnan kannattavuus selvitettiin laskemalla voimalaitoksen hiilikattilan savukaasuista savukaasupesurilla talteen otettavissa olevan lämpöenergian määrä, ja paljonko siitä on siirrettävissä kaukolämpöveden lämmitykseen.

Tässä työssä ei tarkastella savukaasupesurin vaikutusta savukaasujen puhdistukseen, vaan ollaan kiinnostuneita lämpötehosta, joka savukaasuista on pesurilla otettavissa talteen.

Työn lopputuloksena on laskelma savukaasupesurin vuosituotosta ja investoinnin takaisinmaksuaika.

Investointi osoittautui taloudellisesti kannattavaksi Vantaan Energian määrittelemän takaisinmaksuaikavaatimuksen mukaisesti. Investoinnin kustannus- ja tuottolaskelmat ovat luokiteltu luottamuksellisiksi, joten niitä ei julkaista tässä versiossa.

ABSTRACT

KYMENLAAKSO AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Energy Engineering

MÄNTYLÄ, VILLE

Profitability Study of Flue Gas Condenser Investment in
Martinlaakso Power Plant

Bachelor's thesis

48 pages + 3 pages of appendices

Supervisor

Hannu Sarvelainen, lecturer

Comissioned

Vantaan Energia Oy

November 2014

Keywords

Flue gas condenser, heat recovery, condensing, heat pump,
dew-point

The objective of this thesis was to examine the profitability of a flue gas condenser investment in Martinlaakso power plant.

Flue gases contain a lot of wasted heat energy and some of this heat energy can be recovered by means of a flue gas condenser. This thesis primarily focuses on calculation of the properties of flue gas and the amount of heat energy that could possibly be transferred into district heat water heating by using a flue gas condenser.

Investment profitability depends on the amount of saved natural gas when the boiler is in full power. In partial power the efficiency of the boiler will rise because of a flue gas condenser, at the same time decreasing the annual coal consumption. Flue gas condenser also has a cleaning effect for flue gases, but main focus this study is the amount of energy that can be recovered from flue gases.

The annual profit of flue gas condenser together with payback time calculations are presented at the end of this thesis.

The result of this study indicates that the investment will be profitable and the payback time within the set limits. Profit and cost calculations include confidential information that is not made available in this public version.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1 JOHDANTO	6
2 VANTAAN ENERGIA	7
2.1 Organisaatio	7
2.2 Martinlaakson voimalaitos	8
2.2.1 Maakaasukattila	8
2.2.2 Hiilikattila	8
2.2.3 Kaasuturbiini ja lämmöntalteenottokattila	9
2.2.4 Turbiinilaitos	10
2.3 Polttoaineet	10
2.3.1 Lämpöarvo ja kosteus	11
3 SAVUKAASUT	11
3.1 Savukaasujen muodostuminen ja ominaisuudet	11
3.2 Savukaasujen puhdistaminen ennen pesuria	12
3.2.1 Sähkösuodatin	12
3.2.2 Rikinpoistolaitos	13
3.4 Kastepiste	15
3.5 Rikkihappokastepiste	15
4 SAVUKAASUPESURI	15
4.1 Savukaasujen peseminen	16
4.2 Savukaasujen lämmön talteenotto pesurilla	17
4.3 Pesurin rakenne	18
5 SAVUKAASUJEN SISÄLTÄMÄ ENERGIA JA LÄMMÖNTALTEENOTTO	19
5.1 Hiilikattilan tunnin aikana tuottama energia ja siihen kulunut polttoaine	19
5.2 Kostean polttoaineen mukana tulevan veden massa	19
5.3 Kuivan polttoaineen massa	20
5.4 Palamisreaktioyhtälöt	20

5.5 Polttoaineen sisältämän vedyn palamisessa muodostuvan veden massa	21
5.6 Stökiometrinen palamisilman tarve	21
5.7 Savukaasujen jäännöshappi ja palamisen ilmakerroin	23
5.8 Palamisilman mukana savukaasuihin päätyvä kosteus	24
5.9 Savukaasuihin päätyvän vesihöyryn kokonaismassa	26
5.10 Kuivan savukaasun massa	26
5.11 Savukaasujen vesihöyryn lauhtumisessa vapautuva lämpöteho	30
5.12 Savukaasun jäähtymisestä vapautuva lämpöteho	31
5.13 Pesukierron veteen siirtyvä lämpöteho	31
6 SAVUKAASUPESURIN TUOTTAMA TEHO	32
6.1 Lämpöpumppu	39
7 INVESTOINNIN KANNATTAVUUS	43
8 YHTEENVETO	45
LIITTEET	
Liite 1. Pesurin toimintamalli	
Liite 2. Investoinnin kannattavuuslaskelma	
Liite 3. Polttoaineen elementaarianalyysi	

1 JOHDANTO

Tämän insinööriyön tarkoituksena on selvittää savukaasupesurin hankinnan taloudellinen kannattavuus Vantaan Energian Martinlaakson voimalaitoksella. Tehtäväkseni annettiin selvittää savukaasupesurilla talteen otettavissa olevan energian määrä piippuun menevistä savukaasuista sekä kuinka paljon tästä tällä hetkellä hukkaan menevästä lämpötehosta on siirrettävissä laitoksen kaukolämpöveden lämmitykseen.

Täydellä kattilateholla pesurin tuottamalla kaukolämpöteholla on tarkoitus korvata lämpökeskusten kaasulla tuottamaa kaukolämpöä, ja osakuormalla parantaa hiilikattilan hyötysuhdetta. Investoinnin taloudellinen kannattavuus määräytyy siis korvatun kaasun määrästä sekä kattilan hyötysuhteen noususta aiheutuvasta polttoaineenkulutuksen vähentymisestä. Tässä työssä ei tarkastella savukaasupesurin vaikutuksia laitoksen savukaasupäästöihin, vaan ollaan kiinnostuneita pesurin talteen ottamasta lämpötehosta.

Työssä tarkastellaan myös Vantaan energiaa organisaationa sekä sen rakennetta. Martinlaakson voimalaitoksesta kerrotaan sen eri blokeista ja niiden toiminnasta, sekä käytössä olevista polttoaineista. Työssä tarkastellaan myös laitoksen sähkön- ja lämmöntuotantoprosessia. Savukaasujen ominaisuudet ja niiden puhdistaminen ennen savukaasupesuria käydään myös läpi, jonka jälkeen lasketaan Martinlaakson hiilikattilan lämmöntuotantoprosessissa muodostuvien savukaasujen koostumus polttoaineen elementaarisanalyysin pohjalta.

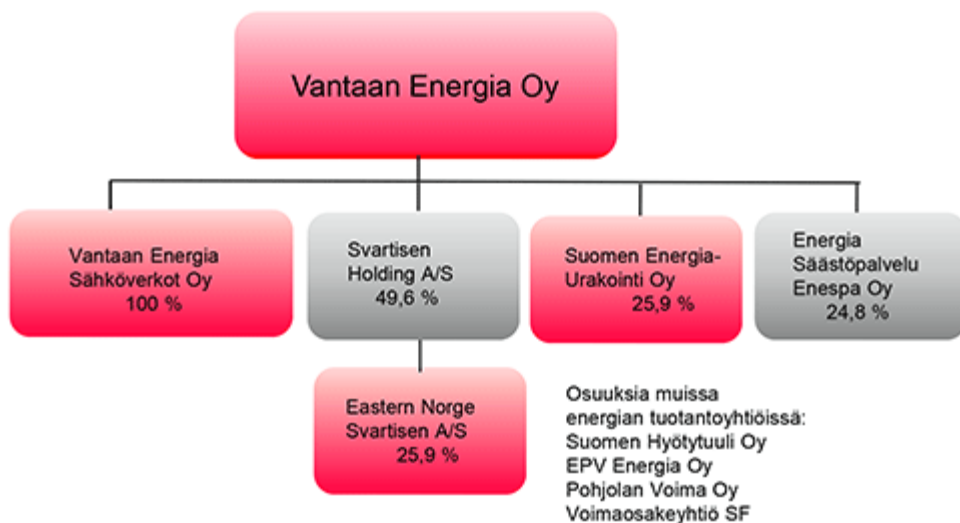
Kun lukijalle on selvinnyt perusasiat laitoksen toiminnasta, siirrytään savukaasupesurin rakenteen ja lämmön talteenottomenetelmän tarkasteluun. Lukijalle selitetään myös lämpöpumpun toiminnan perusteet ja sen tärkeimmät komponentit.

2 VANTAAN ENERGIA

2.1 Organisaatio

Vantaan Energia Oy on Suomen suurimpia kaupunkienergiayhtiöitä ja sen omistavat yhdessä Vantaan kaupunki 60 % ja Helsingin kaupunki 40 %. Yhtiö myy asiakkailleen kaukolämpöä ja sähköä, joista suurin osa tuotetaan Martinlaakson voimalaitoksella energiatehokkaasti sähkön ja lämmön yhteistuotantona hiiltä ja maakaasua polttoaineina käyttäen. Vantaan Energia Oy vastaa kaukolämpöverkkonsa rakennus- ja huoltotöistä, kun taas sen sähköverkoista vastaa tytäryhtiö Vantaan Energia Sähköverkot Oy. Vantaan energia on rakentanut Jätevoimalan Itä-Vantaalle Långmossebergeniin, joka kattaa lähes puolet Vantaan kaupungin nykyisestä kaukolämmöntarpeesta ja leikkaa yhtiön vuosittaisia päästöjä 20 %. Samalla uusiutumattomien polttoaineiden käyttö tuotannossa pienentyi 30 %. Jätevoimala siirtyi kaupalliseen käyttöön syksyllä 2014.

Vantaan energian kaikesta toiminnasta huokuu vastuullisuus ympäristöstä ja se onkin toiminut ISO-14001 ympäristöstandardin mukaisesti jo 15 vuotta. Vantaan energian liikevoitto oli 37,8 miljoonaa euroa vuonna 2013, joka oli kymmenen prosenttia yrityksen liikevaihdosta. Yhtiön palveluksessa työskenteli samaisena vuonna 369 henkilöä. (Tietoa konsernista. 2014.)



Kuva 1. Vantaan Energian organisaatiokaavio (Tietoa konsernista. 2014)

2.2 Martinlaakson voimalaitos

Martinlaakson voimalaitoksella sähkö ja lämpö tuotetaan niiden yhteistuotantona, jolloin voimalaitoksesta voidaan käyttää nimitystä CHP-laitos (Combined Heat and Power). Yhteistuotannolla tarkoitetaan sähköntuotannon jälkeisen lauhdelämmön käyttämistä esimerkiksi kaukolämpöveden lämmittämiseen. Yhteistuotannolla prosessin hyötysuhde saadaan nousemaan yli 90 % sen ollessa pelkkää sähköä tuotettaessa korkeintaan 40%. (CHP teknologia 2014.)

Martinlaakson voimalaitos tuottaa suuren osan yhtiön myymästä sähköstä ja kaukolämmöstä. Molempiin blokki 1:een ja blokki 2:een kuuluu höyrykattila ja turbiini. Lisäksi laitoksen prosessiin on liitetty kaasuturbiini ja lämmön talteenottokattila. Kokonaissähköteho on 195 MW ja kaukolämpöteho 330 MW. (Tehokas yhteistuotanto 2014.)

2.2.1 Maakaasukattila

Laitoksen vanhemmasta osasta eli blokki 1:stä löytyy maakaasukäyttöinen lieriöllä varustettu Tampellan luonnonkiertokattila, jonka varapolttoaineena toimii raskas polttoöljy. Höyrykattila otettiin käyttöön vuonna 1975. Kattilan tuorehöyryn määrä on mitoitettu 73 kg/s ja 117 bar höyrynpaineelle. Tuorehöyryn lämpötila on 535 °C astetta kuten hiilikattilassakin. (Vantaan Sähkölaitos Oy. 1975.)

2.2.2 Hiilikattila

Laitoksen uudempi osa eli blokki 2 muodostuu vuonna 1982 valmistuneesta Ahlströmin luonnonkiertokattilasta, jossa pääpolttoaineena käytetään kivihiiltä ja tukipolttoaineena maakaasua. Varapolttoaineena on raskas polttoöljy. Luonnonkierrossa veden kierto kattilaputkistossa perustuu veden tiheyden pienenemiseen sen kuumentuessa. Syöttövesipumppu pumppaa syöttövettä lieriön kautta kattilan keittoputkiin syöttövesiventtiilin yli mitatun paine-eron mukaisesti. Lieriössä vesi ja höyry erottuvat tiheyseron mukaan. Kattilan tuorehöyrymäärä on mitoitettu 80kg/s paineen ollessa tällöin 117 bar. (Ahlström. 1982.)

Syöttöveden lämpötila ekonomaiserin jälkeen on noin 272 °C astetta ja lieriön jälkeisen kylläisen höyryn lämpötila on 328 °C astetta, josta se jatkaa matkaansa kolmivaiheiseen tulistukseen. Ensimmäinen tulistin on säteilytulistin ja kaksi jälkimmäistä on konvektiotulistimia. Tulistetun höyryn lämpötilaa säädellään vesiruisikutuksella. Tulistetun höyryn päähöyryventtiilin jälkeinen lämpötila on 535 °C ja 117 bar ja ne pyritään pitämään vakioina kaikilla kattilakuormilla. (Ahlström. 1982.)

Tulistettu höyry ohjataan joko reduktiolämmönvaihtimelle tai turbiinille. Reduktiolämmönvaihtimia käytetään reduktiolämmön tuottamiseen sähkön hinnan ollessa alhainen sekä kattilan ylösajoissa höyryn ollessa liian kostea turbiinille. Tulistetun höyryn saavuttaessa 535 °C asteen lämpötilan voidaan reduktioventtiili sulkea ja höyry ohjata ykkös- tai kakkosturbiinille. (Ahlström. 1982.)

Kattilat on suunniteltu samanlaisille höyrynarvoille eli kaikilta höyrykattiloilta voidaan ajaa höyry joko ykkös- tai kakkosturbiinille. Lämmönvaihtimissa höyry lauhtuu takaisin vedeksi syöttövesisäiliöön, josta se pumpataan ekonomaiserin kautta uudelleen kattilan vesihöyrykiertoon. Kattilassa on neljä jousitoimista varoventtiiliä, jotka pitävät kattilapaineen turvallisena esimerkiksi turbiinin tripatessa. (Ahlström. 1982.)

2.2.3 Kaasuturbiini ja lämmöntalteenottokattila

Blokki 4 muodostuu kaasuturbiinista sekä lämmöntalteenottokattilasta. ABB:n vuonna 1995 toimittama GT8C kaasuturbiini on sähköteholtaan 57 MW. Kaasuturbiinin polttokammiossa maakaasun energia vapautuu ja muuttuu lämpöenergiaksi, joka taas muuttuu turbiinia pyörittäväksi mekaaniseksi energiaksi, joka vaihteiston avulla siirretään generaattoriyksikön akselille. Kaasuturbiinin kuumat 500 – 530 °C asteiset pakokaasut ohjataan kahdella lieriöllä varustettuun lämmöntalteenottokattilaan, jossa jälkipoltolla pakokaasujen lämpötila on mahdollista nostaa aina 750 °C asteeseen. LTO-kattilan tuottama höyry syötetään lisätehona höyryn korkeapaineputkistoon kombikytkentänä. (ABB Power generation Ltd. 1994.)

2.2.4 Turbiinilaitos

Martinlaakson voimalaitoksesta löytyy kaksi höyryturbiinia. Niistä vanhempi on vuonna 1975 käyttöön otettu puolalaisvalmisteinen Zamech/Dolmel T1 höyryturbiini. Kaksipesäinen ilmajäähdytteinen kaukolämpövastapaineturbiini tuottaa sähkötehoa 60 MW ja kaukolämpöteho 120 MW. T2 turbiini on yhdellä pesällä ja viidellä väliotolla varustettu vastapaineturbiini. Lang/BBC turbiini on vetyjäähdytteinen ja sen sähköteho on 80 MW ja kaukolämpöteho 135 MW. (Vantaan energia Oy. 2010.)

2.3 Polttoaineet

Martinlaakson voimalaitoksella käytetään polttoaineina kivihiihtä ja maakaasua. Raskasta ja kevyttä polttoöljyä käytetään ainoastaan laitoksen varapolttoaineina. Kivihiihellä tuotettiin yli 64 % vuotuisesta polttoaine-energiasta vuonna 2013. Martinlaakson voimalaitokselle hiili tulee hiilikuljetinta pitkin laitoksen omalta hiilikentältä kattilan hiilisiiloihin, joita on yhteensä kolme kappaletta, yksi jokaiselle hiilimyllylle. Hiilikentälle hiiltä kuljetetaan satamasta, jonne sitä tuodaan laivoilla monista eri valtioista, kuten esimerkiksi Venäjältä ja Puolasta. (ABB Fläkt Oy. 1993.)

Hiilisiiloista hiili kulkeutuu hiilen jakajien kautta hiilimyllyihin, joissa hiili murskataan pölypoltoon sopivan hienoksi. Hiilimyllyn päälle olevalla lajittimella säädellään hiilipölyn hienoutta. Sen jälkeen se puhalletaan hienona pölynä kantoilman avulla kattilan hiilipolttimille, jotka sijaitsevat kattilan nurkissa. Ensimmäinen hiilimylly jauhaa hiilen alimmalle poltintasolle, toinen keskimmaiselle ja kolmas ylimmälle. Täydellä kuormalla kaikki kolme myllyä ovat käytössä. (Ahlström. 1982.)

Voimalaitoksella käytettävä Maakaasu tulee voimalaitokselle Gasumin 40 Bar jakeluverkosta voimalaitoksen pihalla sijaitsevalle paineenalennusasemalle, jossa paine alennetaan 8 Bar suuruiseksi kattiloiden käyttöön sopivaksi. Ainoastaan kaasuturbiinille maakaasu syötetään 24 Bar paineella. (ABB Power generation Ltd. 1994.)

Maakaasu koostuu pääosin metaanista CH_4 , joten palaessaan se reagoi hapen kanssa muodostaen palamistuotteina hiilidioksidia ja vettä. Koska maakaasun vetypitoisuus on korkea, muodostuu savukaasuihin paljon kosteutta. Yksi kilo vetyä tuottaa

palaessaan yhdeksän kiloa vettä. Palamiskertoimen ollessa yksi on maakaasun palamisesta muodostuvien savukaasujen kastepiste noin 59 °C. (Maakaasun ominaisuudet. 2014)

2.3.1 Lämpöarvo ja kosteus

Polttoaineen merkittävimpana ominaisuutena voidaan pitää sen lämpöarvoa. Lämpöarvo ilmoitetaan muodossa MJ/kg. Tehollisella eli alemmalla lämpöarvolla tarkoitetaan tietyn määrän polttoaineen palamisessa vapautuvaa lämpö määrää, jolloin kaiken veden oletetaan höyrystyvän pois palaessa. Ylemmstä lämpöarvosta käytetään nimitystä kalorimetrinen lämpöarvo. Kalorimetrinen lämpöarvo mitataan polttamalla polttoainetta kalorimetripommissa ja polttoaineessa oleva vesi ja vedyn palamisesta muodostuva veden oletetaan olevan palamisen lopuksi nesteinä. Tehollisen ja kalorimetrin lämpöarvon erona on, että kalorimetrinen lämpöarvo on polttoaineen sisältämän veden höyrystymiseen vaadittavan energiamäärän verran alempaa lämpöarvoa korkeampi. (Raiko, ym. 2002. 123.)

Polttoaineen kosteus vaikuttaa suoraan teholliseen lämpöarvoon sitä laskien. Biopolttoaineiden kosteus on noin 50 – 60 %, kun kivihiilen ainoastaan noin 10 %. (Huhtinen, ym. 2000. 39.)

3 SAVUKAASUT

3.1 Savukaasujen muodostuminen ja ominaisuudet

Savukaasut ovat polttoaineen palamisessa syntyviä kuumia kaasuja. Ne sisältävät pääasiassa hiilidioksidia, hiilimonoksidia, rikkidioksidia ja typenoksideja. Savukaasut sisältävät myös paljon kosteutta vesihöyryn muodossa. Kosteus savukaasuihin tulee polttoaineen sekä palamisilman mukana tulevasta kosteudesta, sekä polttoaineen sisältämän vedyn palamisesta muodostuvasta vedestä. Täydellisen palamisen saavuttamiseksi palamistilaan on syötettävä lisäilmaa stökiometrisen ilmamäärän ollessa käytännössä riittämätön täydelliselle palamiselle. Kun ilmakertoimeksi asetetaan yksi, on savukaasujen happipitoisuus nolla. Kiinteät polttoaineet kuten hiili tarvitsevat suuremman ilmakertoimen kuin esimerkiksi nestemäinen öljy. Palamisilman mukana savukaasuihin tulee myös typpeä 3,76 kertainen määrä

tarvittavaan palamisilmamäärään nähden. (Huhtinen, ym. 2000, 86 - 87)

Taulukko 1. Voimalaitosten tyypillisiä ilmakertoimia (Huhtinen, ym. 2000. 86).

Kattilan polttoaine	Ilmakerroin
Hiili	1,15 - 1,35
Kaasu	1,02 - 1,10
Raskasöljy	1,03 - 1,10
Turve	1,15 - 1,35
Puujäte	1,15 - 1,50
Jätelipeä	1,15 - 1,25

3.2 Savukaasujen puhdistaminen ennen pesuria

Martinlaakson voimalaitoksen hiilikattilassa on käytössä sähkösuodatin, joka ottaa savukaasuissa olevan lentotuhkan talteen. Lentotuhkan määrä sähkösuodattimien jälkeen vaikuttaa olennaisesti rikinpoistolaitoksen kalkinkäytön hyötysuhteeseen. Rikinpoistolaitoksella rikkiä poistetaan savukaasuista puolikuivalla rikinpoistomenetelmällä. Sähkösuodattimien ohi pääsevä jäännöslentotuhka jää rikinpoistolaitoksen suodatinsukkiin, joista se päättyy kiertopölyn mukana prosessiin huonontaen kiertopölyn aktiivisuutta. Martinlaakson voimalaitoksen rikinpoistomenetelmä on kalsiumhydroksidin valmistamista lukuun ottamatta samantyyppinen kuin Hanasaaren, Salmisaaren ja Suomenojan voimalaitoksissa. Martinlaaksossa ja Hanasaarella liete sumutetaan pyörivän sumuttimen avulla, kun taas Salmisaarella ja Suomenojassa liete suihkutetaan savukaasuihin pneumaattisesti suuttimien avulla. (ABB Fläkt Oy. 1993.)

3.2.1 Sähkösuodatin

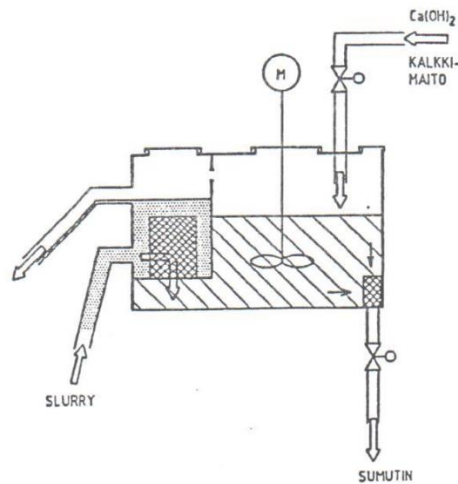
Sähkösuodattimessa savukaasussa olevat pienhiukkaset kuten lentotuhka varataan negatiivisesti ja ne tarttuvat positiivisesti varattujen sähkösuodattimen sisällä olevien levyjen, eli erotuselektrodien pintaan. Levyjen pinnasta pienhiukkaset putoavat ravistamalla tuhkanerujärjestelmään. Sähkösuodattimet kestävät korkeita jopa 420 °C lämpötiloja ja niillä saadaan erotettua jopa alle 1 µm kokoisia pienhiukkasia savukaasuista. (Huhtinen, ym. 2000. 252 – 253.)

Sähkösuodatin on taloudellinen menetelmä puhdistaa suuriakin savukaasuvirtoja pölyhiukkasista. Sähkösuodattimesta aiheutuva painehäviö on alhainen ja sen tehonkulutus on pientä. (Huhtinen, ym. 2000. 253.)

3.2.2 Rikinpoistolaitos

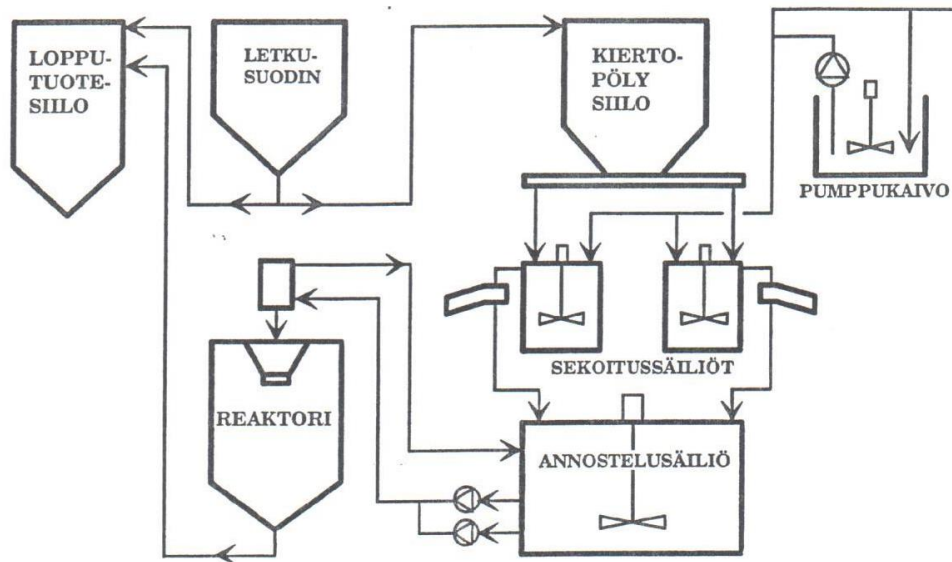
Rikinpoistolaitoksella kalkkiliete sumutetaan savukaasuihin sumuttimen avulla erillisessä reaktorissa, johon kattilasta sähkösuodattimien kautta tulevat esipuhdistetut savukaasut johdetaan 60 % reaktorin yläkanaviston ja 40 % alakanaviston kautta. Sumutin sijaitsee reaktorin yläosassa pyörien noin 13 200 kierrosta minuutissa. Tällöin lietesumun pisarakoko on keskimäärin noin 35 μm eli sumutettaessa yksi litra lietettä muodostaa noin 200m² absorptiopintaa rikkidioksidin kanssa. Lieite on sekoitus sammutettua kalkkia sekä veteen sekoitettua kiertopölyä. Lietteen tiheys on tavallisesti noin 1,31 kg/m³. (ABB Fläkt Oy. 1993.)

Kalkkimaito valmistetaan sammuttamalla poltettua kalkkia eli kalsiumoksidia CaO₂ vedellä. Reaktiossa vapautuu runsaasti lämpöä. Sammutuksessa 1000 kg kalkkia vaatii noin 4 m³ vettä, jolloin kalkkimaitoa Ca(OH)₂ eli kalsiumhydroksidia valmistuu 4,5 m³. Valmis tuote valuu täryseulan läpi ja varastoidaan varastosäiliöön. Sieltä kalkkimaito pumpataan yläsäiliöön ja sillä säädellään sumutettavan lietteen aktiivisuutta. Yläsäiliö pidetään aina täynnä kiertopölylietteen avulla. (ABB Fläkt Oy. 1993.)



Kuva 2. Yläsäiliö (ABB Fläkt Oy. 1993).

Reaktoriin johdettavien savukaasujen lämpötila on noin 130 °C. Reaktorissa savukaasuihin sumutettu liete reagoi savukaasun happamien komponenttien kanssa ja emäksinen liete kuivuu pölyksi. Pöly kulkeutuu savukaasujen mukana savukaasukanavissa sijaitseviin letkusuodattimiin, joiden pinnalle kerääntyvä kalkkipöly vielä reagoi suodatinsukkien läpi menevien savukaasujen kanssa. Osa kalkkipölystä tippuu reaktorin pohjalle, josta se kulkeutuu ensin murskaimeen, ja sieltä se kuljetetaan pneumaattisesti kieropölysiiloon tai lopputuotesiiloon. Letkusuodattimien pinnalle kertyvä kalkkipöly putoaa letkusuodatinkammioihin paineilmaimpulssin avulla, joista se pneumaattisesti siirretään pölylähettimillä kiertopölysiiloon tai vaihtoehtoisesti lopputuotesiiloon kiertopölysiilon ollessa täynnä. Kiertopölysiilosta pöly käytetään lietteen valmistukseen. (ABB Fläkt Oy. 1993.)



Kuva 3. Kieropölylaitteisto (ABB Fläkt Oy. 1993).

Reaktorin toiminnan kannalta on tärkeää että olosuhteet reaktorissa ovat kunnossa ja sumutin toimii moitteettomasti. Liian alhainen savukaasun lämpötila reaktorissa aiheuttaa korroosioriskin sekä lietteen kerrostumisen reaktorin kylkiin ja pohjalle, koska lietteessä oleva vesi ei ehdi haihtumaan. Liian kuumat savukaasut taas vahingoittavat akryylikuidusta valmistettuja letkusuodatinsukkia. (ABB Fläkt Oy. 1993.)

3.4 Kastepiste

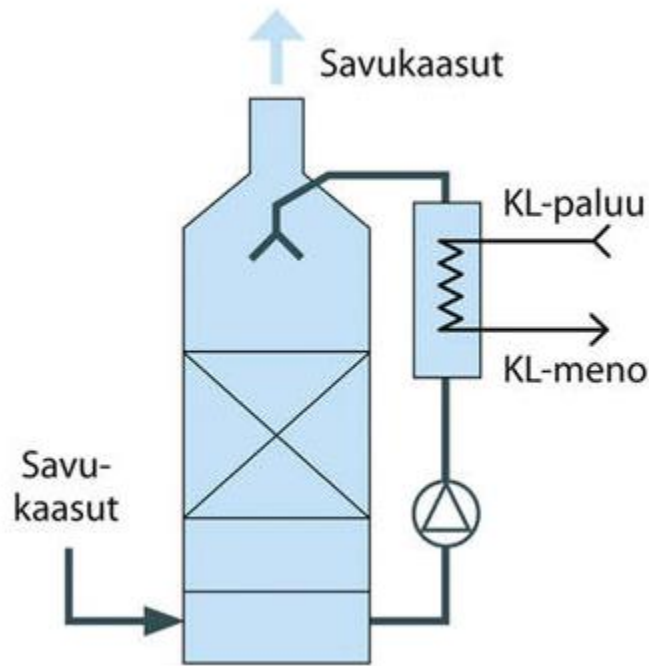
Kastepiste on lämpötila, jossa ilman sisältämä kosteus alkaa tiivistyä takaisin vedeksi. Kastepiste on suoraan verrannollinen savukaasujen vesisisältöön, joka helpoiten on ilmaistavissa savukaasujen vesihöyryn osapaineena. (Huhtinen ym. 2000, 99) Osapaine saadaan kertomalla savukaasun lämpötilassa olevan kylläisen vesihöyryn paine savukaasun suhteellisella kosteudella. (Raiko ym. 2004. 34.) Osapainetta vastaava kylläisen vesihöyryn paine on lämpötila, jossa savukaasun suhteellinen kosteus on 100 %, jolloin vesihöyry pyrkii lauhtumaan takaisin vedeksi. Mitä suurempi on savukaasujen vesihöyryn osapaine, sitä korkeammassa lämpötilassa vesihöyryn tiivistyminen alkaa. (Huhtinen ym. 2000, 99)

3.5 Rikkihappokastepiste

Happokastepisteellä tarkoitetaan rikkiatrioksidin SO_3 vaikutusta kastepisteeseen. Rikkiatrioksidia sisältävien savukaasujen kastepiste on normaalia vesikastepistettä korkeampi, jolloin rikkihapon muodostuminen on mahdollista. (Huhtinen ym. 2000, 99.)

4 SAVUKAASUPESURI

Savukaasupesuri on niin kutsuttu märkäpesuri, jolla sanansa mukaisesti pestään poltossa muodostuvia kuumia savukaasuja vedellä. Ennen pesureita käytettiin lähinnä savukaasujen epäpuhtauksien pesemiseen, mutta nykyään painopiste on siirtynyt savukaasujen sisältämän hukkaan menevän lämpöenergian talteenottoon. Pesurilla saadaan tehokkaasti hukkalämpöä talteen laitoksen savukaasujen puhdistuessa samalla. (Savukaasupesuri parantaa lämpöyhtiön kannattavuutta 2014.)



Kuva 4. Savukaasupesuri (Savukaasupesuri parantaa lämpöyhtiön kannattavuutta. 2014.)

Kuvassa 4. on esitetty perinteinen savukaasupesurin kytkentätapa. Savukaasupesurin ottama lämpöenergia siirretään kaukolämpöveden lämmitykseen. Kaukolämpövedellä jäähdytetään pesukierron vesi reilusti savukaasun kastepistelämpötilan alapuolelle. Savukaasupesureiden kytkentätapoja on monia erilaisia. Mikäli kaukolämmön paluueden lämpötila jää pesurille liian korkeaksi, on sitä mahdollista jäähdyttää esimerkiksi lämpöpumpulla. Mitä viileämmäksi pesuvesi saadaan sitä enemmän savukaasuista saadaan energiaa talteen. (Savukaasupesuri parantaa lämpöyhtiön kannattavuutta. 2014.)

4.1 Savukaasujen peseminen

Pesurissa ylhäältä suihkutettava pesuvesi ja alhaalta tuleva savukaasut törmäävät keskenään pesurissa, jolloin muodostuu vesi-pölypisaroita, jotka erotetaan pisaranerotimilla. Pesureiden käyttö pelkässä pölynerottamisessa on kuitenkin harvinaista prosessissa syntyvien jätevesien puhdistamisen ollessa kallista. Selluteollisuudessa pesuprosessissa muodostuvat vedet voidaan palauttaa takaisin prosessiin. (Huhtinen, ym. 2000. 255.)

Polttoaineille joiden palamisesta muodostuu runsaasti tuhkaa, tarvitaan hiukkasten esierotus ennen pesuria. Hiilikattilan savukaasujen hiukkasten puhdistaminen tapahtuu sähkösuodattimien sekä rikinpoistolaitoksen suodatinsukkien avulla. Hiukkaspitoisuus rikinpoistolaitoksen jälkeen on enää hyvin vähäinen. Lentotuhkaa ei haluta rikinpoistolaitoksen kiertopölyyn sen huonontaessa kalkinkäytön hyötysuhdetta. (ABB Fläkt Oy. 1993.)

4.2 Savukaasujen lämmön talteenotto pesurilla

Savukaasuihin suihkutetaan pesuvettä pesurin ala- ja yläosassa suuttimilla, jotka levittävät pesuveden ohueksi sumuksi. Perinteisessä savukaasupesurissa ensimmäisessä vaiheessa savukaasut johdetaan niin kutsutulle pesuvyöhykkeelle, jossa savukaasun sisältämät hiukkaset poistetaan vesisumutuksella. Toisessa vaiheessa savukaasut tulevat lämmön talteenotto vyöhykkeelle, jossa savukaasuihin suihkutetaan lisää vettä. Tällöin savukaasut kostuvat ja jäähtyvät alle kastepisteen, jolloin vesihöyry alkaa lauhtua takaisin vedeksi. Lämmön talteenottovyöhykkeessä alhaalta tuleva savukaasu ja ylhäältä tuleva pesuvesi ovat tehokkaasti kosketuksissa toistensa kanssa täytekappalepatjan pinnalla. (Savukaasupesuri parantaa lämpöyhtiön kannattavuutta 2014.)



Kuva 5. Täytekappaleet (Täytekappaleet 2014.)

Savukaasupesurin toiminnan kannalta oleellisinta on kastepisteen alittuminen. Suihkutettavan pesuveden määrä on riippuvainen savukaasun virtauksesta ja lämpötilasta. Liian pienellä pesuvesimäärällä savukaasu ei jäähdy riittävästi, jolloin pesuri toimii haihduttimena. (Savukaasupesuri parantaa lämpöyhtiön kannattavuutta. 2014.)

Lämmön talteenotto savukaasuista perustuu polttoon päätyvän veden höyrystämiseen kuluvaan energiaan. Vesihöyryyn sitoutunutta energiaa on mahdollista ottaa talteen savukaasupesurissa, jossa savukaasun lämpötila on mahdollista jäähdyttää riittävän alhaiseksi eli alle kastepisteen. Näin ainakin osa normaalisti hukkaan menevästä energiasta on mahdollista ottaa talteen lauhduttamalla muodostunut vesihöyry takaisin vedeksi, jolloin veden höyrystymisenergia vapautuu pesukierron veteen latenttilämpönä. Samalla myös savukaasun lämpötila laskee luovuttaen lämpötehoa pesuveteen. (Savukaasujen lauhdutus. 2014.)

Savukaasujen jäähtyessä riittävän alhaiseen lämpötilaan vettä voi lauhtua tapauskohtaisesti huomattaviakin määriä. Lauhdevedet on neutraloitava ja selkeytettävä, jonka jälkeen niitä on mahdollista hyödyntää esimerkiksi laitoksen omaan käyttöön. Martinlaakson voimalaitoksella pesurin lauhdevedet voitaisiin ohjata puhdistettuina rikinpoistolaitoksen pumppukaivoon, josta niitä voitaisiin hyödyntää lietteenvalmistuksessa. Rikinpoistolaitoksella lietteenvalmistuksen vedenkulutus on kattilan täydellä teholla noin 10 m³ tunnissa (ABB Fläkt Oy. 1993).

4.3 Pesurin rakenne

Savukaasupesuri jäähdyttää savukaasun alle sen märkälämpötilan, joten pesuri tarvitsee erillisen haponkestävästä materiaalista valmistetun piipun. Myös itse pesuri on valmistettava haponkestävästä materiaalista pesuvesien ollessa happamia. Savukaasut johdetaan pesuriin rikinpoistolaitokselta savukaasukanavaa pitkin ja ne tulee pystyä ohjaamaan savukaasupesurin ohitse mahdollisessa ongelmatilanteessa. Tällöin savukaasut ohjattaisiin normaalisti rikinpoistolaitoksen kautta, mutta suoraan savupiippuun.

Savukaasujen jäähtyessä lämmön talteenottovaiheessa tarvitsee vesihöyry pinnan, jota vasten se voi tiivistyä vedeksi ja lopulta valua pesurin pohjalle lauhteena. Tällaisia pintoja kutsutaan täytekappalepatjoiksi ja ne koostuvat pienistä täytekappaleista (kuva 5.). Täytekappalekerroksia voi olla yksi tai useampia. (Savukaasupesuri parantaa lämpöyhtiön kannattavuutta. 2014.)

5 SAVUKAASUJEN SISÄLTÄMÄ ENERGIA JA LÄMMÖNTALTEENOTTO

Savukaasulaskuissa hiilikattilan oletetaan käyvän täydellä teholla tunnin ajan.
Laskuissa palamisen oletetaan olevan täydellistä.

5.1 Hiilikattilan tunnin aikana tuottama energia ja siihen kulunut polttoaine

$$Q = \phi_{PA} t \quad (1)$$

jossa	Q	kattilalla tunnissa tuotettu energia	[MWh]
	t	aika	[h]
	ϕ_{PA}	kattilan polttoaineteho	[MW]

Energiamäärän tuottamiseen tarvittava polttoaineen massavirta saadaan selville jakamalla energiamäärä (MJ) polttoaineen alemmalla eli tehollisella lämpöarvolla (MJ/kg). (Huhtinen, 2000, s.337)

$$m_{PA} = \frac{Q}{H_u} \quad (2)$$

jossa	m_{PA}	kostean polttoaineen massa	[kg]
	H_u	polttoaineen tehollinen lämpöarvo	[MJ/kg]
	Q	energiamäärä	[MJ]

5.2 Kostean polttoaineen mukana tulevan veden massa

Polttoaineen mukana tuleva vesi saadaan laskettua kertomalla kostean polttoaineen massa polttoaineen kosteudella

$$m_{vesiPA} = m_{PA} \cdot kosteus - \% \quad (3)$$

jossa	m_{vesiPA}	polttoaineen mukana tuleva vesi	[kg]
	kosteus- %	polttoaineen kosteus	[%]
	m_{PA}	kostean polttoaineen massa	[kg]

5.3 Kuivan polttoaineen massa

Kuivan polttoaineen massa saadaan vähentämällä veden osuus kostean polttoaineen massasta

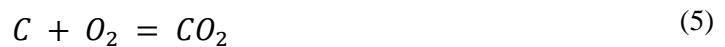
$$m_{kuivaPA} = m_{kosteapa} - m_{vesiPA} \quad (4)$$

$m_{kuivaPA}$	Kuivan polttoaineen massa	[kg]
$m_{kosteapa}$	Kostean polttoaineen massa	[kg]
m_{vesiPA}	Polttoaineen mukana tuleva vesi	[kg]

5.4 Palamisreaktioyhtälöt

Tässä on esitettyä savukaasulaskuissa tarvittavat tärkeimmät palamisen reaktioyhtälöt (Huhtinen, ym. 2000, 84).

Hiilen reagoiessa hapen kanssa muodostuu hiilidioksidia reaktioyhtälön mukaisesti.



Vedyn ja hapen reagoiessa keskenään muodostuu vettä reaktioyhtälön mukaisesti.



Rikin reagoiessa hapen kanssa muodostuu rikkidioksidia reaktioyhtälön mukaisesti



Taulukko 2. Kuivan polttoaineen alkuaineanalyysi ja moolimassat

AINE	Massa - %	Moolimassa kg/kmol
Hiili (C)	70,14	12,01
Vety (H ₂)	5	2,02
Rikki (S)	0,35	32,07
Typpi N ₂	1	28,00
Happi (O ₂)	11,0	32,00
Tuhka	12,51	-

Laskuissa käytetyt alkuaineiden moolimassat löytyvät taulukkokirjasta (Seppänen, R. 2010. 167).

Alkuaineen massa kuivassa polttoaineessa saadaan laskettua massaprosenttiosuuksista

$$m_{\text{alkuaine}} = m_{\text{kuiva polttoaine}} \cdot m - \% \quad (8)$$

jossa	m_{alkuaine}	alkuaineen massa	[kg]
	$m - \%$	alkuaineen massaprosentti	[%]
	$m_{\text{kuiva polttoaine}}$	kuivan polttoaineen massa	[kg]

Alkuaineen ainemäärä, massa ja moolimassa saadaan yhtälöllä
(Mäkelä, ym. 2010. 184)

$$n = \frac{m}{M} \quad (9)$$

jossa	n	alkuaineen ainemäärä	[kmol]
	m	alkuaineen massa	[kg]
	M	alkuaineen moolimassa	[kg/kmol]

5.5 Polttoaineen sisältämän vedyn palamisessa muodostuvan veden massa

$$m_{\text{vesi palaminen}} = \frac{m_{\text{kuiva polttoaine}} \cdot H_2 - \%}{M_{\text{vety}}} \cdot (0,5 \cdot M_{\text{happi}} + M_{\text{vety}}) \quad (10)$$

jossa	$m_{\text{vesi, palaminen}}$	vedyn palamisessa muodostuva vesi	[kg]
	$m_{\text{kuiva, polttoaine}}$	kuivan polttoaineen massa	[kg]
	$H_2 - \%$	vedyn osuus kuivassa polttoaineessa	[%]
	M_{happi}	hapen moolimassa	[kg/kmol]
	M_{vety}	vedyn moolimassa	[kg/kmol]

5.6 Stökiometrinen palamisilman tarve

Stökiometrinen palamisilmamäärä saadaan laskettua palamisessa muodostuvien yhdisteiden eli hiilidioksidin, rikkidioksidin muodostumiseen tarvittavan hapen määrästä. Reaktioyhtälöistä nähdään, että yksi mooli hiiltä tai rikkiä vaatii palamiseen

yhden moolin happea. Myös vedyn palamiseen tarvitaan happea, mutta ainoastaan puolet polttoaineessa olevan vedyn moolimäärästä. (Huhtinen, ym. 2000, 85.)

Yhdisteiden muodostumiseen tarvittavat hapen määrät on laskettu palamisen reaktioyhtälöiden 5 – 7 mukaisesti.

Hapen määrä hiilidioksidin muodostumiselle saadaan yhtälöllä (11)

$$n_{CO_2} = \frac{m_{kuiva,polttoaine} \cdot C-\%}{M_C} \quad (11)$$

jossa	n_{CO_2}	CO ₂ muodostumiseen tarvittava happi	[kmol]
	$m_{kuiva,polttoaine}$	kuivan polttoaineen massa	[kg]
	$C-\%$	hiilen osuus kuivassa polttoaineessa	[%]
	M_C	hiilen moolimassa	[kg/kmol]

Tarvittava määrä happea veden muodostumiselle saadaan yhtälöstä (12)

$$n_{H_2O} = 0,5 \cdot \frac{m_{kuiva,polttoaine} \cdot H_2-\%}{M_{H_2}} \quad (12)$$

jossa	n_{H_2O}	H ₂ O muodostumiseen tarvittava happi	[kmol]
	$m_{kuiva,polttoaine}$	kuivan polttoaineen massa	[kg]
	$H_2-\%$	vedyn osuus kuivassa polttoaineessa	[%]
	M_{H_2}	vedyn moolimassa	[kg/kmol]

Tarvittava määrä happea rikkidioksidin muodostumiselle saadaan yhtälöllä (13)

$$n_{SO_2} = \frac{m_{kuiva,polttoaine} \cdot S-\%}{M_S} \quad (13)$$

jossa	n_{SO_2}	SO ₂ muodostumiseen tarvittava happi	[kmol]
	$m_{kuiva,polttoaine}$	kuivan polttoaineen massa	[kg]
	$S-\%$	rikin osuus kuivassa polttoaineessa	[%]
	M_S	rikin moolimassa	[kg/kmol]

Polttoaine sisältää happea joka käytetään palamisreaktion happea. (Huhtinen ym. 2000. 84) Polttoaineen sisältämä hapen määrä saadaan yhtälöllä (14)

$$n_{O_2} = \frac{m_{kuiva,polttoaine} \cdot O_2 - \%}{M_{O_2}} \quad (14)$$

jossa	n_{O_2}	Kuivan polttoaineen sisältämä happi	[kmol]
	$m_{kuiva,polttoaine}$	kuivan polttoaineen massa	[kg]
	$O_2 - \%$	hapen osuus kuivassa polttoaineessa	[%]
	M_{O_2}	hapen moolimassa	[kg/kmol]

Palamiseen tarvittava stökiometrinen ilmamäärä saadaan selville laskemalla yhteen tarvittavat hapen ainemäärät muodostuville yhdisteille. Hapen määrä polttoaineessa voidaan vähentää tarvittavasta happimäärästä. (Huhtinen, ym. 2000. 85.)

$$n_{O_2(teor)} = n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{SO_2} - n_{O_2} \quad (15)$$

jossa	n_{CO_2}	CO ₂ muodostumiseen tarvittava happi	[kmol]
	n_{H_2O}	H ₂ O muodostumiseen tarvittava happi	[kmol]
	n_{SO_2}	SO ₂ muodostumiseen tarvittava happi	[kmol]
	n_{O_2}	O ₂ kuivassa polttoaineessa	[kmol]

5.7 Savukaasujen jäännöshappi ja palamisen ilmakerroin

Piipusta mitatun jäännöshapen avulla voidaan määrittää λ (lambda) eli palamisen ilmakerroin (Huhtinen, ym. 2000, 87)

$$\lambda = \frac{21}{21 - (O_2 - mitattu)} \quad (16)$$

jossa	λ	palamisen ilmakerroin	[-]
	$O_2 - mitattu$	Savukaasun jäännöshappipitoisuus	[%]

Ilmakertoimen avulla voidaan laskea savukaasuun päätyvän ylimääräisen hapen määrä (Huhtinen, ym. 2000. 86).

$$n_{O_2,sk} = n_{O_2(teor.)} \cdot (\lambda - 1) \quad (17)$$

jossa	λ	palamisen ilmakerroin	[-]
	$n_{O_2(teor.)}$	stökiometrinen hapen tarve	[kmol]
	$n_{O_2, sk}$	savukaasuihin päätyvä jäännöshappi	[kmol]

Palamisilma muodostuu pääosin hapesta 21 % ja typestä 79 %, jolloin hapen mukana tulee savukaasuihin 3,77 -kertainen määrä typpeä. Lasketaan savukaasuihin päätyvän typen määrä. (Huhtinen, ym. 2000, 86.)

$$n_{N_2,sk} = \lambda \cdot 3,77 \cdot n_{O_2(teor.)} \quad (18)$$

jossa	λ	palamisen ilmakerroin	[-]
	$n_{N_2,sk}$	savukaasuihin päätyvä typpi	[kmol]
	$n_{O_2,(teor.)}$	savukaasuihin päätyvä jäännöshappi	[kmol]

5.8 Palamisilman mukana savukaasuihin päätyvä kosteus

Vesihöyryn osapaine voidaan määrittää ilman suhteellisesta kosteudesta sekä palamisilman vesihöyryn osapaineesta (Raiko, ym. 2004. 34).

$$Ph = \varphi \cdot Ph' \quad (19)$$

jossa	Ph	vesihöyryn osapaine	[kPa]
	φ	ilman suhteellinen kosteusprosentti	[%]
	Ph'	kylläisen vesihöyryn paine	[kPa]

Vesihöyryn mooliosuus saadaan laskettua vesihöyryn osapaineen ja ilmanpaineen perusteella (Raiko, ym. 2004. 34).

$$Y_{H_2O} = \frac{P_h}{P_{tot}} \quad (20)$$

jossa	Y_{H_2O}	Ilmassa olevan vesihöyryn mooliosuus	[mol]
	P_h	vesihöyryn osapaine	[kPa]
	P_{tot}	ilmanpaine kyseisessä lämpötilassa	[kPa]

Palamisilman mukana tulevan vesihöyryn mooliosuus saadaan kertomalla todellinen palamisilmamäärä palamisilman vesihöyryn mooliosuudella (Raiko, ym. 2004. 35).

$$n_{vesi,p.ilma} = (n_{N_2,sk} + n_{O_2(teor.)} + n_{O_2,sk}) \cdot \left(\frac{y_{H_2O}}{1 - y_{H_2O}} \right) \quad (21)$$

jossa	$n_{vesi,p.ilma}$	Ilman mukana tulevan veden ainemäärä	[kmol]
	$n_{N_2,sk}$	typen ainemäärä savukaasussa	[kmol]
	$n_{O_2(teor.)}$	stökiometrinen hapen ainemäärä	[kmol]
	$n_{O_2,sk}$	savukaasun jäännöshappi	[kmol]
	Y_{H_2O}	Ilmassa olevan vesihöyryn mooliosuus	[mol]

Kun tiedetään veden ainemäärä palamisilmassa, saadaan veden massa kertomalla se veden moolimassalla

$$m_{vesi,palamisilma} = (M_{H_2} + 0.5 \cdot M_{O_2}) \cdot n_{vesi,p.ilma} \quad (22)$$

jossa	$m_{vesi,p.ilma}$	ilman mukana tulevan veden massa	[kg]
	$n_{vesi,p.ilma}$	ilman mukana tulevan veden ainemäärä	[kmol]
	M_{H_2}	vedyn moolimassa	[kg/kmol]
	M_{O_2}	hapen moolimassa	[kg/kmol]

5.9 Savukaasuihin päätyvän vesihöyryn kokonaismassa

Savukaasuun päätyvän veden kokonaismassa saadaan selville laskemalla yhteen polttoaineen ja palamisilman mukana tulevan veden määrä sekä polttoaineen sisältämän vedyn palamisesta muodostuvan sekä lietteen sumutuksesta savukaasuihin päätyvän veden määrä yhtälöllä (23)

$$m_{vesi,sk} = m_{vesi,PA} + m_{vesi,palaminen} + m_{vesi,p.ilma} + m_{vesi,RPL} \quad (23)$$

jossa	$m_{vesi, sk}$	savukaasuun päätyvän veden massa	[kg]
	$m_{vesi, PA}$	polttoaineen sisältämän veden massa	[kg]
	$m_{vesi, palaminen}$	palamisesta muodostuvan veden massa	[kg]
	$m_{vesi, p.ilma}$	ilman mukana tulevan veden massa	[kg]
	$m_{vesi, RPL}$	sumutuksesta tulevan veden massa	[kg]

5.10 Kuivan savukaasun massa

Hiilen reagoidessa hapen kanssa muodostuu hiilidioksidia reaktioyhtälön (5) mukaisesti. Kuivan hiilidioksidin massa savukaasuissa saadaan laskettua kertomalla muodostuvan hiilidioksidin ainemäärä hapen ja hiilen moolimassalla.

$$m_{CO_2,dry} = n_{CO_2} \cdot (M_{O_2} + M_C) \quad (24)$$

jossa	$m_{CO_2,dry}$	kuivan CO ₂ massa savukaasussa	[kg]
	n_{CO_2}	hiilidioksidin ainemäärä	[kmol]
	M_{O_2}	hapen moolimassa	[kg/kmol]
	M_C	hiilen moolimassa	[kg/kmol]

Rikin reagoidessa hapen kanssa muodostuu rikkidioksidia reaktioyhtälön (6) mukaisesti. Kuivan rikkidioksidin massa savukaasussa saadaan laskettua kertomalla rikkidioksidin ainemäärä hapen ja rikin moolimassoilla.

$$m_{SO_2,dry} = n_{SO_2} \cdot (M_{O_2} + M_S) \quad (25)$$

jossa	$m_{SO_2,dry}$	kuivan rikkidioksidin massa	[kg]
	n_{SO_2}	rikkidioksidin ainemäärä	[kmol]
	M_{O_2}	hapen moolimassa	[kg/kmol]
	M_S	rikin moolimassa	[kg/kmol]

Savukaasuun päätyvän kuivan hapen ainemäärä saadaan laskettua vähentämällä kostean jäännöshapen ainemäärästä veden osuus. Veden osuus kosteassa jäännöshapessa saadaan kertomalla se kostean ja kuivan palamisilman moolisuhteella. (Raiko ym. 2004. 37)

$$n_{O_2,dry} = n_{O_2,sk} - \left[n_{O_2,sk} \cdot \left(\frac{y_{H_2O}}{1 - y_{H_2O}} \right) \right] \quad (26)$$

jossa	$n_{O_2,dry}$	kuivan hapen määrä	[kmol]
	$n_{O_2,sk}$	hapen määrä savukaasuissa	[kmol]
	Y_{H_2O}	Ilmassa olevan vesihöyryn mooliosuus	[mol]

Kuivan hapen massa savukaasuissa saadaan laskettua kertomalla kuivan hapen aine määrä hapen moolimassalla yhtälön (27) mukaisesti

$$m_{O_2,dry} = n_{O_2,dry} \cdot M_{O_2} \quad (27)$$

jossa	$m_{O_2,dry}$	kuivan hapen massa	[kg]
	$n_{O_2,dry}$	kuivan hapen ainemäärä	[kmol]
	M_{O_2}	hapen moolimassa	[kg/kmol]

Savukaasuun päätyvän kuivan typen määrä saadaan laskettua vähentämällä palamisilman mukana tulevan kostean typen ainemäärästä veden osuus. Veden osuus kosteassa työssä saadaan kertomalla se kostean ja kuivan palamisilman moolisuhteella. (Raiko ym. 2004. 37)

$$n_{N_2,dry} = n_{N_2,sk} - \left[n_{N_2,sk} \cdot \left(\frac{y_{H_2O}}{1 - y_{H_2O}} \right) \right] \quad (28)$$

jossa	$n_{N_2,dry}$	kuivan typen ainemäärä	[kmol]
	$n_{N_2,sk}$	typen ainemäärä	[kmol]
	Y_{H_2O}	Ilmassa olevan vesihöyryn mooliosuus	[mol]

Palamisilman mukana tulevan kuivan typen massa savukaasuissa saadaan kertomalla kuivan typen ainemäärä typen moolimassalla yhtälön (29) mukaisesti.

$$m_{N_2,dry} = n_{N_2,dry} \cdot M_{N_2} \quad (29)$$

jossa	$m_{N_2,dry}$	kuivan typen massa	[kg]
	$n_{N_2,dry}$	kuivan typen ainemäärä	[kmol]
	M_{N_2}	typen moolimassa	[kg/kmol]

Polttoaine sisältää typpeä, mutta typen ollessa inertti kaasu, voidaan sen olettaa päätyvän savukaasuihin sellaisenaan (Raiko, ym. 2004. 38).

Kuivan polttoaineen mukana tulevan typen ainemäärä saadaan laskettua jakamalla typen osuus kuivassa polttoaineessa typen moolimassalla.

$$n_{N_2,dry,PA} = \frac{m(kuiva,polttoaine) \cdot N_2-\%}{M_{N_2}} \quad (30)$$

jossa	$n_{N_2,dry,PA}$	kuivan typen ainemäärä polttoaineessa	[kmol]
	$N_2-\%$	typen osuus kuivassa polttoaineessa	[%]
	M_{N_2}	typen moolimassa	[kg/kmol]

Polttoaineen mukana tulevan kuivan typen massa saadaan kertomalla kuivan typen ainemäärä typen moolimassalla.

$$m_{N_2,dry,PA} = n_{N_2,dry,PA} \cdot M_{N_2} \quad (31)$$

jossa	$m_{N_2,dry,PA}$	kuivan typen massa polttoaineessa	[kg]
	$n_{N_2,dry,PA}$	kuivan typen ainemäärä polttoaineessa	[kmol]
	M_{N_2}	typen moolimassa	[kg/kmol]

Kuivan savukaasun kokonaismassa saadaan laskemalla kaikkien muodostuneiden komponenttien massat yhteen yhtälön (32) mukaisesti.

$$m_{sk,dry} = m_{CO_2,dry} + m_{O_2,dry} + m_{N_2,dry} + m_{SO_2,dry} + m_{N_2,dry,PA} \quad (32)$$

jossa	$m_{CO_2,dry}$	kuivan hiilidioksidin massa	[kg]
	$m_{O_2,dry}$	kuivan hapen ainemäärä	[kg]
	$m_{N_2,dry}$	kuivan typen massa	[kg]
	$m_{SO_2,dry}$	hapen moolimassa	[kg]
	$m_{N_2,dry,PA}$	kuivan typen massa	[kg]

Rikinpoistolaitoksen lietteen sumutuksen mukana savukaasuun päätyvän veden massa saadaan laskettua sumutettavan kalkkilietteen massavirran sekä veden ja lietteen tiheyksien avulla.

$$m_{H_2O,RPL} = \frac{qm_{liete}}{\rho_{liete}} \cdot \rho_{H_2O} \quad (33)$$

jossa	$m_{H_2O,RPL}$	sumutuksesta savukaasuun tuleva vesi	[kg]
	qm_{liete}	sumutettavan kalkkilietteen massavirta	[kg/h]
	ρ_{liete}	lietteen tiheys	[kg/m ³]
	ρ_{H_2O}	Veden tiheys	[kg/m ³]

5.11 Savukaasujen vesihöyryn lauhtumisessa vapautuva lämpöteho

Savukaasun lauhtumisessa vapautuva energia saadaan lauhtumisessa vapautuvan höyrystymislämmön sekä savukaasuista lauhtuvan vesihöyryn määrän perusteella. Vesihöyry alkaa lauhtua suhteellisen kosteuden ollessa 100 %. (Savukaasupesuri parantaa lämpöyhtiön kannattavuutta 2014.)

Kastepisteen alittuessa lauhtuva vesimäärä on suoraan verrannollinen vesimäärään, jonka kuutio ilmaa pystyy sitomaan kyseisessä lämpötilassa verrattuna ilman vesisisältöön kastepisteessä. Ilman absoluuttisia vesisisältöjä yhdessä kuutiossa ilmaa tietyssä lämpötilassa löytyy esimerkiksi Sarlin Oy:n kastepistetaulukosta (Kastepistetaulukko. 2014).

Lauhtuva vesimäärä saadaan laskettua yhtälöllä 34. ilman absoluuttisesta vesisisällöstä kastepiste- ja loppulämpötilassa.

$$Vesi_{lauhtuva} = 1 - \frac{m,vesi(A)}{m,vesi(B)} \quad (34)$$

jossa	$Vesi_{lauhtuva}$	lauhtuvan vesihöyryn määrä	[%]
	$m, vesi(A)$	Absoluuttinen kosteus loppulämpötila	[g/m ³]
	$m, vesi(B)$	Absoluuttinen kosteus kastepiste	[g/m ³]

Vesihöyryn lauhtumisessa vapautuva höyrystymisenergian määrä saadaan höyrytaulukosta kastepisteen lämpötilan avulla kastepisteen ollessa lämpötila josta lauhtuminen alkaa.

Kun tiedetään lauhtuvan veden massavirta ja lauhtumisessa vapautuva höyrystymisenergia (kJ/kg), saadaan lauhtumisessa vapautuva lämpöteho laskettua yhtälöllä (35)

$$Q_{(\text{lauhtuminen})} = qm_{(\text{lauhtuva vesi})} \cdot H_{(\text{höyrystyminen})} \quad (35)$$

jossa	$Q_{\text{lauhtuminen}}$	lauhtumisessa vapautuva energia	[kW]
	$qm_{\text{lauhtuva vesi}}$	lauhtuvan veden massavirta	[kg/s]
	$H_{\text{höyrystyminen}}$	Höyrystymislämpö	[kJ/kg]

5.12 Savukaasun jäähtymisestä vapautuva lämpöteho

Pesurissa savukaasu luovuttaa myös lämpötehoa jäähtymällä. Savukaasun jäähtymisessä vapautuva lämpöteho siirtyy pesuveteen. Lasketaan seuraavaksi savukaasun jäähtymisestä vapautuva lämpöteho

$$Q_{(\text{jäähtyminen})} = qm_{(\text{savukaasu})} \cdot Cp_{\text{ilma}} \cdot \Delta T_{(\text{savukaasu})} \quad (36)$$

jossa	$Q_{\text{jäähtyminen}}$	Jäähtymisestä vapautuva lämpöteho	[kW]
	$qm_{\text{savukaasu}}$	Savukaasun massavirta	[kg/s]
	ΔT	Lämpötilaero	[°C]
	Cp	Ilman ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kg°C]

5.13 Pesukierron veteen siirtyvä lämpöteho

Pesuvesi vastaanottaa savukaasun sisältämän vesihöyryn lauhtumisesta ja savukaasun jäähtymisestä vapautuvan lämpötehon. Kun tiedetään lämpötila johon pesuvesi halutaan lämmittää, saadaan pesukierron veden massavirta yhtälöllä (37)

$$qm_{\text{pesuvesi}} = \frac{Q_{(\text{pesuri})}}{\Delta T_{\text{pesuvesi}} \cdot Cp_{(\text{vesi})}} \quad (37)$$

jossa	qm_{pesuvesi}	pesuveden massavirta	[kg/s]
	Q_{pesuri}	pesurissa veteen vapautuva lämpöteho	[kW]
	ΔT	Lämpötilaero	[°C]

6 SAVUKAASUPESURIN TUOTTAMA TEHO

Laskuissa oletetaan hiilikattilan käyvän täydellä 257 MW teholla tunnin ajan. Palamisen oletetaan olevan täydellistä. Lasketaan savukaasupesurin tuottama teho.

Hiilikattilan polttoainetehosta saadaan selville kattilalla tunnin aikana tuotettu energiamäärä.

$$Q = 257 \text{ MW} \cdot 1 \text{ h} = 257 \text{ MWh} \quad (1)$$

Kattilan tuottama energiamäärä on megajouleiksi muutettuna 925200 MJ.

Energiamäärän tuottamiseen kulunut polttoaineen massa saadaan jakamalla tuotettu energiamäärä (MJ) polttoaineen tehollisella lämpöarvolla (MJ/kg)

$$m_{\text{polttoaine}} = \frac{925200 \text{ MJ}}{25,10 \text{ MJ/kg}} = 36860,6 \text{ kg} \quad (2)$$

Polttoaineen mukana tuleva vesi lasketaan kertomalla kostean polttoaineen massa polttoaineen kosteudella

$$m_{\text{vesi polttoaine}} = 36860,6 \text{ kg} \cdot 0,1041 = 3837,2 \text{ kg} \quad (3)$$

Kuivan polttoaineen massa saadaan vähentämällä veden massa kostean polttoaineen massasta

$$m_{\text{kuiva polttoaine}} = 36860,6 \text{ kg} - 3837,2 \text{ kg} = 33023,4 \text{ kg} \quad (4)$$

Vedyn palamisessa muodostuvan veden määrä

$$m_{\text{vesi palaminen}} = \frac{33023,4 \text{ kg} \cdot 0,05}{2,02 \text{ kg/kmol}} \cdot \left[\left(0,5 \cdot 32,0 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) + 2,02 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right] = 14730 \text{ kg} \quad (10)$$

Polttoaineen mukana vettä savukaasuihin tulee 3837,2kg ja vedyn palamisessa vettä muodostuu yhteensä 14730kg.

Seuraavaksi lasketaan tarvittava hapen määrä muodostuville savukaasuyhdisteille eli hiilidioksidille, rikkidioksidille ja vedyn palamisesta muodostuvalle vedelle. Lisäksi lasketaan polttoaineen sisältämän hapen määrä.

Hiili reagoi hapen kanssa muodostaen hiilidioksidia reaktioyhtälön (5) mukaisesti. Lasketaan hiilen tarvitsema hapen määrä

$$n_{CO_2} = \frac{33023,4 \text{ kg} \cdot 0,7014}{12,01 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}}} = 1928,6 \text{ kmol} \quad (11)$$

Vety reagoi hapen kanssa muodostaen vettä reaktioyhtälön (6) mukaisesti. Lasketaan vedyn tarvitsema hapen määrä veden muodostumiselle

$$n_{H_2O} = 0,50 \cdot \frac{33023,4 \text{ kg} \cdot 0,05}{2,02 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}}} = 408,7 \text{ kmol} \quad (12)$$

Rikki ja happi reagoivat keskenään, jolloin muodostuu rikkidioksidia reaktioyhtälön (7) mukaisesti. Lasketaan tarvittava hapen määrä rikkidioksidin muodostumiselle

$$n_{SO_2} = \frac{33023,4 \text{ kg} \cdot 0,0035}{32,02 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}}} = 3,60 \text{ kmol} \quad (13)$$

Polttoaineen sisältämä happi vähennetään tarvittavasta palamisilman määrästä

$$n_{O_2} = \frac{33023,4 \text{ kg} \cdot 0,11}{32,00 \frac{\text{kmol}}{\text{kg}}} = 113,5 \text{ kmol} \quad (14)$$

Stökiometrinen palamisilmamäärä saadaan laskemalla eri yhdisteiden sekä veden muodostumiseen tarvittavat hapen moolimäärät yhteen

$$n_{O_2(\text{teor})} = (1928,6 + 408,7 + 11,79 + 3,60 - 113,5) = 2239,2 \text{ kmol} \quad (15)$$

Piipusta mitattu jäännöshappi on 4,7 tilavuus- %. Määritetään seuraavaksi palamisen ilmakerroin λ . Ilmakertoimen ollessa yksi, on savukaasujen jäännöshappi nolla.

$$\lambda = \frac{21}{21-4,7\%} = 1,288 \quad (16)$$

Kun tiedetään ilmakerroin palamiselle sekä stökiometrinen hapen tarve, voidaan yhtälöllä (17) laskea savukaasuihin päätyvän ylimääräisen hapen määrä

$$n_{O_2,sk} = (1,288 - 1) \cdot 2239,2 \text{ kmol} = 644,9 \text{ kmol} \quad (17)$$

Palamisilma muodostuu pääosin hapestä 21 % ja typestä 79 % jolloin hapen mukana savukaasuihin tulee 3,77 -kertainen määrä typpeä. Lasketaan savukaasuihin päätyvän typen määrä

$$n_{N_2,sk} = 1,288 \cdot 3,77 \cdot 2239,2 \text{ kmol} = 10873 \text{ kmol} \quad (18)$$

Palamisilman vesihöyryn osapaine

Ilman suhteellinen kosteus Vantaalla on keskimäärin noin 80 %. Palamisilman vesihöyryn osapaine saadaan kertomalla ilman suhteellisella kosteudella kylläisen vesihöyryn paine 25 °C asteen lämpötilassa. Se on polttoon tulevan ilman lämpötila ennen palamisilman esilämmitintä

$$P_h = 0,80 \cdot 3,166 \text{ kPa} = 2,53 \text{ kPa} \quad (19)$$

Vesihöyryn mooliosuus

$$Y_{H_2O} = \frac{2,53 \text{ kPa}}{101 \text{ kPa}} = 0,025 \text{ mol} \quad (20)$$

Palamisilman mukana tuleva veden ainemäärä

$$n_{vesi,p.ilma} = (10873 + 2239,2 + 644,9) \text{ kmol} \cdot \left(\frac{0,025 \text{ mol}}{1-0,025 \text{ mol}} \right) = 352,7 \text{ kmol} \quad (21)$$

Palamisilman mukana tulevan veden massa saadaan yhtälöllä (22)

$$m_{vesi,p.ilma} = (2,02 + 0,5 \cdot 32,0) \frac{kmol}{kg} \cdot 352,7 kmol = 6355,7 kg \quad (22)$$

Palamisilman mukana tulevan veden massa on 6355,7 kg.

Kun tiedetään palamisilman mukana tulevan veden massa, voidaan siirtyä kuivan savukaasun massan laskemiseen.

Hiilen reagoiessa hapen kanssa muodostuu hiilidioksidia. Kuivan hiilidioksidin osuus savukaasuissa saadaan laskettua yhtälöstä

$$m_{CO_2,dry} = 1928,6 kmol \cdot (32,00 + 12,01) \frac{kg}{kmol} = 84877,7 kg \quad (24)$$

Rikin reagoiessa hapen kanssa muodostuu rikkidioksidia. Kuivan rikkidioksidin osuus saadaan yhtälöstä

$$m_{SO_2,dry} = 3,60 kmol \cdot (32,00 + 32,02) kg/kmol = 230,5 kg \quad (25)$$

Kuivan hapen ainemäärä eli ilmakertoimen mukainen savukaasuihin päätyvä kuiva jäännöshappi

$$n_{O_2,dry} = 644,9 kmol - \left[644,9 kmol \cdot \left(\frac{0,025 mol}{1 - 0,025 mol} \right) \right] = 628,4 kmol \quad (26)$$

Kuivan hapen massa savukaasuissa saadaan yhtälöllä (27)

$$m_{O_2,dry} = 628,4 kmol \cdot 32,00 \frac{kg}{kmol} = 20108,8 kg \quad (27)$$

Palamisilman mukana tulevan kuivan typen ainemäärä savukaasussa saadaan vähentämällä vesihöyryn mooliosuus kostean palamisilman sisältämän typen ainemäärästä.

$$n_{N_2,dry} = 10873 \text{ kmol} - \left[10873 \text{ kmol} \cdot \left(\frac{0,025 \text{ mol}}{1-0,025 \text{ mol}} \right) \right] = 10594,2 \text{ kmol} \quad (28)$$

Palamisilman mukana tulevan kuivan typen massa savukaasuissa

$$m_{N_2,dry} = 10873 \text{ kmol} \cdot 28,00 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} = 304444 \text{ kg} \quad (29)$$

Polttoaineen sisältämän typpi vapautuu savukaasuihin sellaisenaan, lasketaan palamisessa kuivasta polttoaineesta vapautuvan typen ainemäärä

$$n_{N_2,dry,PA} = \frac{33023,4 \text{ kg} \cdot 0,01}{28,00 \text{ kg/kmol}} = 11,79 \text{ kmol} \quad (30)$$

Polttoaineesta palamisessa vapautuvan typen massa

$$m_{N_2,dry,PA} = 11,79 \text{ kmol} \cdot 28 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} = 330,1 \text{ kg} \quad (31)$$

Kuivan savukaasun kokonaismassa on silloin

$$m_{sk,dry} = (84877,7 + 20108,8 + 304444 + 230,5 + 330,1) = 409991,1 \text{ kg} \quad (32)$$

Hiilikattilan ollessa täydellä teholla lietteen sumutuksen määrä reaktorissa on $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ja lietteen tiheytenä käytetään arvoa $1,314 \text{ kg/m}^3$

$$m_{h_2O,RPL} = \frac{10 \text{ m}^3/\text{h}}{1,314 \text{ kg/m}^3} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 7610,4 \text{ kg} \quad (33)$$

Lietteen sumutuksesta tulee vielä $7610,4 \text{ kg}$ lisää vettä savukaasuihin.

Savukaasuihin päätyvän veden kokonaismäärä muodostuu polttoaineen mukana tulevasta vedestä, polttoaineen sisältämän vedyn palamisessa muodostuvasta vedestä, palamisilman mukana tulevasta vedestä sekä rikinpoistolaitoksen kalkkilietteen sumutuksesta tulevasta vedestä.

$$m_{vesi,sk} = 3837,2kg + 14730kg + 6355,7kg + 7610,4kg = 32533,3kg \quad (23)$$

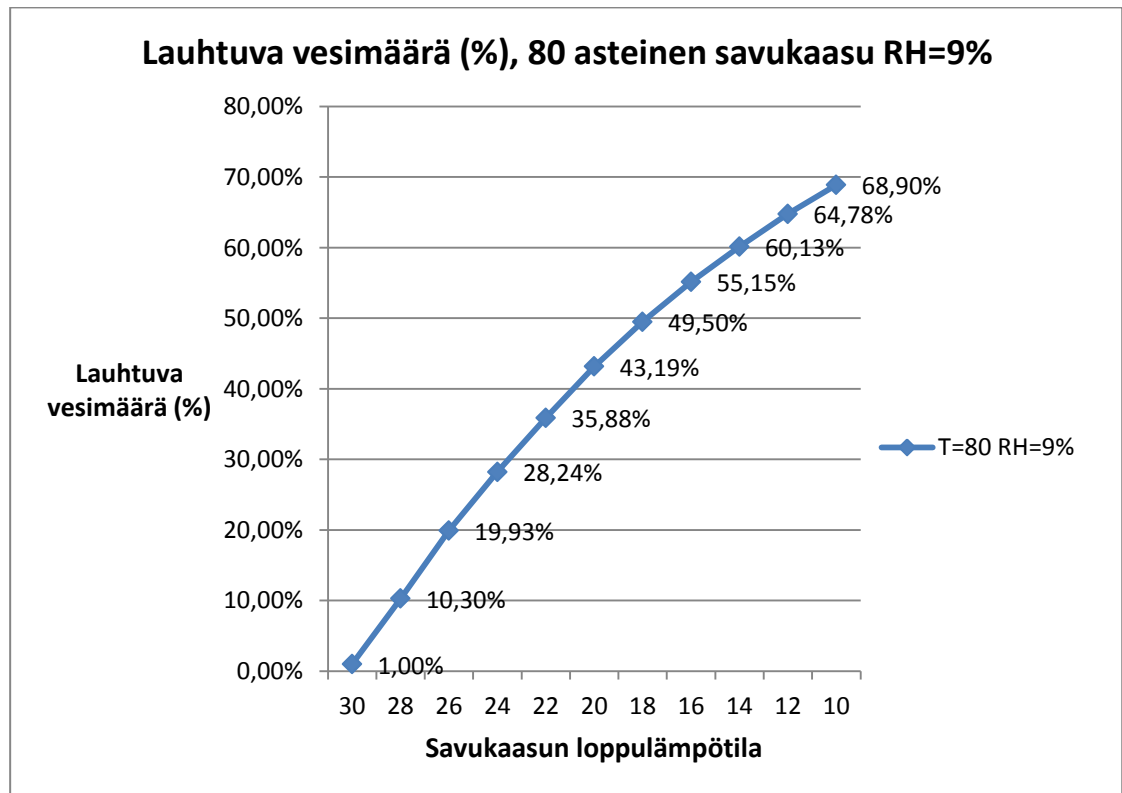
Savukaasuun päätyvän veden massa on yhteensä 32533,3kg.

Savukaasu jäädytetään 20 asteiseksi, jolloin lauhtuvan veden määrä saadaan ilman absoluuttisesta vesisisällöstä savukaasun kastepiste ja loppulämpötilan mukaisesti (Kastepistetaulukko. 2014).

$$H_2O_{lauhtuva} = 1 - \frac{17,1 \frac{g}{m^3}}{30,1 \frac{g}{m^3}} = 0,4319 \quad (34)$$

Savukaasujen sisältämästä kokonaisvesihöyrymäärästä lauhtuu 43,19 %, jolloin savukaasupesurissa lauhtuvan veden massavirta on 3,90 kg/s.

MAR2 hiilikattilan savukaasuista lauhtuvan veden prosenttiosuus savukaasun sisältämästä kokonaisvesisisällöstä savukaasun loppulämpötilan funktiona.



Kuva 6. Savukaasuista lauhtuvan veden määrä savukaasun loppulämpötilan mukaan

Vesihöyryn lauhtumisesta pesukierron veteen vapautuva lämpöteho

$$Q_{(\text{lauhtuminen})} = 9,05 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 0,4319 \cdot 2430 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 9498 \text{ kW} \quad (35)$$

Kuivaa savukaasua kaasua muodostuu yhteensä noin 410000 kg, jolloin kuivan savukaasun massavirta on 113,8 kg/s.

Lasketaan seuraavaksi savukaasupesurin pesukierron veteen siirtyvä savukaasun luovuttama jäähtymisteho

$$Q_{\text{jäähtyminen}} = 113,8 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \cdot (80 - 20)^\circ\text{C} = 6828 \text{ kW} \quad (36)$$

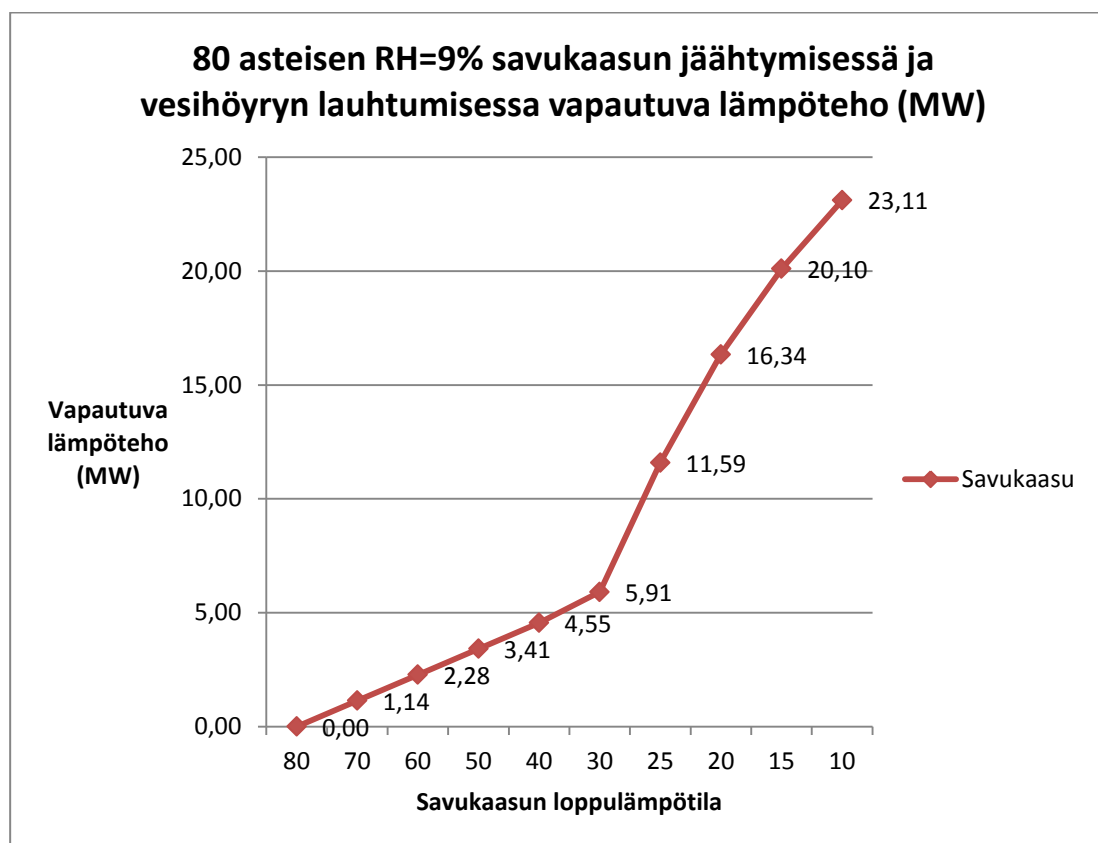
Vesihöyryn lauhtumisesta ja savukaasun jäähtymisestä pesukierron veteen siirtyy energiaa yhteensä 16326 kW eli noin 16,3 MW.

Jotta savukaasu saataisiin jäähtymään tavoiteltuun 20 °C asteeseen, voi pesuvesi olla enintään noin 18 °C asteista. Pesuveden halutaan lämpenevän 50 asteiseksi jolloin lämpötila ennen kompressoria on laitetoimittajan suosittelema 45 °C, Pesukierron veden massavirta saadaan pesurissa vapautuvan lämpötehon sekä pesuveden lämpötilaeron mukaisesti yhtälöllä (37)

$$qm_{\text{pesuvesi}} = \frac{16326 \text{ kW}}{(50 - 18)^\circ\text{C} \cdot 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}} = 122,1 \text{ kg/s} \quad (37)$$

Pesukierron veden massavirran ollessa noin 122,1 kg/s lämpenee se 50 °C asteiseksi.

Kuvaajassa on esitettyä savukaasun jäähtymisessä ja savukaasun sisältämän vesihöyryn lauhtumisessa pesukierron veteen vapautuva lämpöteho (MW) savukaasun loppulämpötilan funktiona. Kuvaajasta voidaan huomata kuinka lämpöteho kasvaa merkittävästi kun savukaasujen kastepiste 30 °C astetta alittuu.



Kuva 7. Pesuveteen vapautuva lämpöteho

Martinlaakson voimalaitokselle tulevan kaukolämmön paluuveden lämpötila on 45 °C joka on savukaasupesurille liian korkea, mikä estää sen käyttämisen pesukierron veden jäähdyttäjänä. Kaukolämmön paluuveden lämpötila on siis korkeampi kuin savukaasun kastepistelämpötilä. Tarvitaan erillinen lämpöpumppu jäähdyttämään pesuvettä.

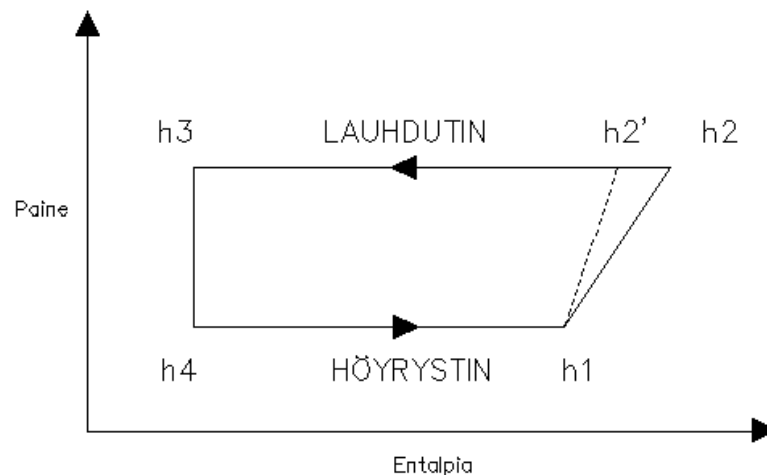
6.1 Lämpöpumppu

Lämpöpumppu koostuu neljästä eri pääkomponentista, jotka ovat kompressori, höyrystin, paisuntaventtiili ja lauhtutin. Lämpöpumpussa kiertävä kylmäaine sitoo itseensä energiaa höyrystymisessä sekä vapauttaa höyrystymisessä sidotun energian lauhtumisessa. (Nydal, R. 2002. 59)

Kompressorilla lauhtunut kylmäaine pumpataan korkeampaan paineeseen, jolloin se muuttuu kuumaksi kaasuksi eli tulistuu. Kuumakaasu siirtyy lauhtuttimeen, jossa lämpö siirtyy lämmitettävään kohteeseen. Prosessi vaatii toimiakseen riittävän suuren

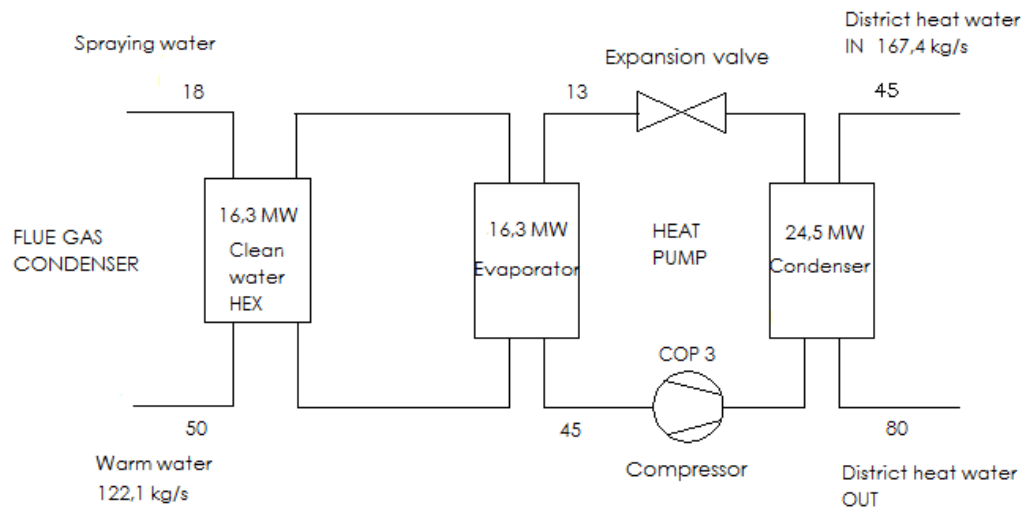
lämpöä vastaanottavan kohteen, johon lauhduttimen lämpö on mahdollista siirtää. Lauhduttimesta kylmäaine siirtyy paisuntaventtiilin läpi prosessin matalapainepuolelle, jossa jäähtynyt kylmäaine sitoo itseensä lämpöenergiaa jäähdyttävästä kohteesta, jossa samalla tapahtuu kylmäaineen höyrystyminen. Tämän jälkeen kiertoprosessi alkaa taas alusta kompressorin imiessä höyrystynyttä kylmäainetta ja tehden siitä taas kuumaa tulistettua kaasua. (Nydal, R. 2002. 59–61)

Kuva 8. Lämpöpumppu prosessi



Sijoittamalla lämpöpumppu savukaasupesurin ja kaukolämmön paluulinjan väliin, on mahdollista siirtää lämpimästä pesukierron vedestä energiaa kaukolämpövedeen lämpöpumpulla. Lämpöpumppu täytyisi kytkeä prosessiin niin, että sen höyrystin jäähdyttäisi pesukierron vettä ja tämän jäähdytyksessä siirtyvän lämpöenergian vastaanottaisi lauhduttimen toisella puolella oleva voimalaitokselle palaava kaukolämpövesi. Kytkentä on esitetty pesurin kytkentäkuvassa (kuva 9.).

Lämpöpumpun ja savukaasupesurin tuomalla lämpöteholla ei esilämmitetä laitokselle palaavaa kaukolämpövettä, vaan paluulinjasta otettaisiin tarvittavalla massavirralla kaukolämpövettä, joka olisi mahdollista lämmittää pesurilla ja lämpöpumpulla lämpötilaltaan 80 °C asteiseksi ja sen jälkeen syöttää vesi takaisin kaukolämmön menolinjaan. Laitokselle palaavan lopun kaukolämpöveden lämpötila pysyisi tällöin entisellään.



Kuva 9. Lämpöpumpun kytkentä savukaasupesuriin

Lämpöpumpun höyrystimellä on tarkoitus jäähdyttää pesuriin menevää vettä, jolloin sen tehoksi saadaan suoraan tarvittava pesuveden jäähdytystarve 16326 kW. Pesurin kytkentä kaukolämpöverkkoon on esitetty pesurin kytkentäkuvassa (kuva 9.). Höyrystimen teho on tiedossa, jolloin lauhduttimen teho saadaan lisäämällä kompressorin teho höyrystymisen tehoon. Tässä työssä ei kuitenkaan aloitettu mitoittamaan prosessiin sopivaa lämpöpumppua vaan sellainen tilataan ulkopuoliselta laitetoimittajalta valmiina pakettina valmiiksi mitoitetuna.

Erään laitetoimittajan tekemien laskelmien mukaan lämpöpumpun COP, eli lämpökerroin voidaan olettaa tässä tapauksessa olevan 3 joka tarkoittaa, että kompressorin kuluttaessa yhden yksikön verran tehoa todelliseen puristustyöhön, saadaan lämpöpumpusta ulos 3 yksikköä lämpöä. Kompressorin ottama teho on silloin puolet höyrystimen tehosta jolloin kompressorin tehoksi saadaan 8163 kW. Lauhduttimen tehon ollessa kompressorin ja höyrystimen tehojen summa, saadaan lauhduttimen tehoksi 24489 kW. Lauhdutinteho on savukaasupesurin ja lämpöpumpun tuottama kaukolämpöteho eli noin 24,5 MW.

Pesuria ei voida kytkeä suoraan lämpöpumppuun niin, että pesuvesi kulkisi suoraan höyrystimen läpi. Tämä on teoriassa mahdollista, mutta laitetoimittaja suosittelee ylimääräistä puhtaan veden lämmönvaihdinta pesurin ja höyrystimen väliin, jolloin pesuveden happamat komponentit eivät aiheuttaisi korroosiota höyrystimessä. Höyrystimen rikkoutuminen aiheuttaisi suurella todennäköisyydellä koko

lämpöpumpun rikkoutumisen.

Kaukolämpöveden lauhduttimella siirrettäväksi lämpötehoksi muodostuu 24,5 MW. Kaukolämpövesi lämmitetään keskimäärin noin 45 °C asteen paluulämpötilasta 80 °C asteiseksi, jolloin suurin mahdollinen kaukolämpöveden massavirta jonka lauhduttimen teholla pystytään lämmittämään saadaan laskettua yhtälöllä (38.)

$$qm_{KL} = \frac{Q_{lauhdutin}}{(Cp,vesi \cdot \Delta T)} \quad (38)$$

jossa	qm_{KL}	kaukolämpöveden massavirta	[kJ/kg]
	$Q_{lauhdutin}$	lauhduttimen teho	[kJ/kg]
	$Cp, vesi$	veden ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kg]
	ΔT	Lämpötilaero	[C°]

$$\frac{24489kW}{4,18kJ/kg^{\circ}C \cdot (80-45^{\circ}C)} = 167,4 \text{ kg/s} \quad (38)$$

Lauhduttimen läpi meneväksi kaukolämpöveden massavirraksi saadaan yhteensä 167,4 kg/s.

Lämpöpumpun kompressori vaatii 8163kW tehoa, joka voidaan tuottaa joko omakäyttösähköllä tai omakäyttöhöyryllä. Sähköntuotannon osuus tuotannossa on 0,32 ja kaukolämmöntuotannon on 0,68. Martinlaakson voimalaitoksella yhdellä kilolla höyryä tuotetaan noin 3 MW energiaa, josta 0,96 MW on sähköä, sekä 2,04 MW on lämpöä. Tarvittavan sähkön tuottamiseen kuluu siis paljon enemmän höyryä kuin siihen, että kompressori ottaisi tarvitsemansa tehon höyrystä. Olisi siis kannattavampaa tuottaa kompressorin ottama teho omakäyttöhöyryllä.

7 INVESTOINNIN KANNATTAVUUS

Investoinnin takaisinmaksuaika lasketaan jakamalla investoinnin kokonaishinta vuosittaisella investoinnin nettotuotolla. Savukaasupesurinarvioitu hankintahinta on x € ja lämpöpumppujen noin x €. Investoinnin kokonaishinnaksi muodostuisi silloin yhteensä x €.

Työ- ja elinkeinoministeriöltä on mahdollista hakea investointitukea hankkeisiin, jotka vähentävät ympäristöhaittoja, tehostavat energiantuotantoa tai säästävät energiaa. Tuen myöntäminen määräytyy valtionavustuslain (688/2001) pohjalta. Tuella halutaan vähentää uuteen tekniikkaan liittyvää taloudellista riskiä.

(Energiatuki. 2014. Työ- ja elinkeinoministeriö) Mahdollista 15 %:n investointitukea ei ole otettu huomioon kannattavuuslaskennassa.

Lämpöpumpun kompressorin ottama omakäyttöhöyryteho on 8,16 MW, jolla olisi voitu tuottaa 2,61 MW sähköä ja 5,55 MW kaukolämpöä. Lauhduttimen kaukolämpöteho on 24,5 MW, mutta sillä voidaan korvata todellisuudessa lämpökeskuksen maakaasulla tuottamaa kaukolämpötehoa ainoastaan 18,95 MW, koska kompressori kuluttaa 5,55 MW höyryturbiinin jälkeisten kaukolämmönvaihtimien tuottamasta kaukolämpötehosta, jolloin se on vähennettävä pesurin tuottamasta kaukolämpötehosta.

Savukaasupesurille on laskettu tulevan vuosittain noin 3000 käyttötuntia, jolloin lämpökeskuksen maakaasulla tuottamaa kaukolämpötehoa korvataan yhteensä 3000 h/a. Savukaasupesurin vuotuiseksi kaasua korvaavaksi lämmöntuotoksi muodostuu silloin 56 840 MWh. Pesurin tuottamalla teholla korvattavan maakaasun energiamaksu (ALV 0 %) on noin x €/MWh (sisältää x €/MWh verohelpotusta yhteistuotantomenetelmällä tuotetusta energiasta).

Kun kattilaa ajetaan osakuormalla, pesuri nostaa kattilan hyötysuhdetta noin 5 %. Hyötysuhteen noustessa kattilan hiilenkulutus pienenee jolloin pesuri tuottaa rahaa vähentyvän hiilenkulutuksen myötä. Osakuormilla kattilaa ajettiin vuonna 2013 huhti -, touko-, syys- ja lokakuussa. Hiilen energiamaksu on x €/MWh ja hiiltä poltettiin tuona aikana yhteensä 48665 tonnia. Kivihiilitonnin sisältämä energia on noin 6,5 MWh, jolloin poltettujen hiilien arvoksi saadaan x €. Hyötysuhteen nousu

vähentää poltettujen hiilien määrää 5 %, jolloin polttoainekulut putoavat x €/a
Hiilikattilan ollessa täydellä teholla, savukaasuista lauhtuu savukaasupesurissa noin
14 m³/h vettä. Lauhdevedet on selkeytettävä ja neutraloitava ennen niiden laskemista
viemäriin. Vedenkäsittelykustannukset on sisällytetty investointikustannuksiin.

Lauhtuvaa vettä ei ole kuitenkaan kannattavaa laskea viemäriin, vaan sitä voidaan
hyödyntää rikinpoistolaitoksen lietteenvalmistuksessa, johon kuluu vettä kattilan
ollessa täydellä teholla noin 10 m³/h. Rikinpoistolaitoksesta tulisi näin täysin
omavarainen vedenkulutuksen suhteen. Kaupunkiveden kulutus rikinpoistolaitoksella
vähentyisi 60000 m³/a, jolloin kaupunkiveden maksaessa noin x €/m³ säästöä syntyy
x €/a.

Loput 4 m³/h lauhtuvasta vedestä voidaan hyödyntää esimerkiksi kaukolämmön
lisävetenä. Jos vedet lasketaan viemäriin, on niistä maksettava normaali
jätevesimaksu, jonka suuruus on x €/m³. Osakuormilla ajettaessa lauhtuvan veden
osuus on pienempi, jolloin kaikki vesi on mahdollista hyödyntää
lietteenvalmistuksessa.

Huoltokustannuksiksi valittiin x €, joka kattaa kaksi kompressorille tehtävää huoltoa,
apulaitehuollot sekä laitteiston pesut.

x € lainan koroksi valittiin x % ja laina-ajaksi x vuotta jolloin korkokuluja muodostuu
annuiteettimenetelmällä yhteensä x €. (Lainalaskuri. 2014.)

Investoinnin takaisinmaksuajaksi muodostui x vuotta.

Investoinnin kannattavuuslaskelma löytyy kokonaisuudessaan työn lopusta (liite 2.).

8 YHTEENVETO

Perinteinen savukaasupesuri on toiminnaltaan melko yksinkertainen prosessi jossa savukaasuja jäädytetään kaukolämmön paluuedellä. Se kuitenkin vaatii toimiakseen kostean polttoaineen, jonka poltossa muodostuvien savukaasujen kastepiste on yli 50 °C astetta johtuen kaukolämmön paluueden korkeasta noin 45 °C asteen lämpötilasta.

Martinlaakson voimalaitoksen hiilikattilan polttoaineena käytettävä kivihiili on polttoaineena erittäin kuivaa verrattuna esimerkiksi biopolttoaineisiin. Sen kosteus on vain noin 10 % ja poltossa muodostuvien savukaasujen kastepistelämpötila on 30 °C, joka on hyvin alhainen. Ilman rikinpoistolaitoksen lietteen sumutuksesta tulevaa kosteutta kastepiste olisi ollut vieläkin alhaisempi. Osoittautui, että kastepistelämpötila on alhaisempi kuin kaukolämmön paluueden lämpötila, jota oli alun perin tarkoitus käyttää pesukierron veden jäädytyksessä. Tämä ongelma ratkaistiin lisäämällä prosessiin lämpöpumppu, jonka höyrystinosalla pesuvesi saadaan jäädytettyä riittävän viileäksi. Se kuitenkin tarkoittaa investoinnin kannalta hankintahinnan kaksinkertaistumista ja takaisinmaksuajan pidentymistä.

Vuonna 2016 voimaan astuva uusi IE-direktiivi tiukentaa tuotantolaitosten rikki- ja typpi- ja hiukkaspäästöjen raja-arvoja. Hiilikattilan uusien raja-arvojen alle päästään jo nyt, mutta ei pitkäaikaisesti ilman mahdollisia muutoksia.

Laskelmien perusteella savukaasupesuri osoittautui investointina kannattavaksi energiataloudellisesti kuin myös tuleva päästörajoiden tiukentuminen huomioon ottaen. Lisäksi huomionarvoista on mahdollinen Työ- ja elinkeinoministeriöltä saatava investointituki hankkeille, jotka parantavat energiatehokkuutta tai vähentävät ympäristöhaittoja. Savukaasupesuri täyttää molemmat tuen myöntämiseen vaadittavista ehdoista. Mahdollisesti myönnettävää tukea ei ole otettu investoinnin kannattavuuslaskelmissa huomioon lainkaan. Tuen suuruus on mahdollisesti noin 15 % kokonaisinvestoinnista.

Epävarmuutta laskelmiin aiheutuu osittain puutteellisista polttoaineen elementaarianalyyseistä. Polttoaineen sisältämistä alkuaineista esimerkiksi vedyn määrän pienikin vaihtelu aiheuttaa merkittäviä vesimäärän vaihteluita savukaasuissa. Myös kivihiilen kosteus vaihtelee hiilikentän ollessa altis vesi- ja lumisateille.

LÄHTEET

ABB Fläkt Oy. 1993. Vantaan sähkölaitos Oy. Rikinpoistolaitoksen käyttö- ja huolto-ohjeet.

ABB Power generation Ltd. 1994. Martinlaakso GT8C Training Documentation. Kaasuturbiini GT8C -koulutuskansio, suomennos.

Ahlström. Vantaan Sähkölaitos Oy. 1982. Höyrykattila 80kg/s, Rakenneselostus ja käyttöohje. Varkaus.

Antila, A., Karppinen, M., Leskelä, M., Mölsä, H., Pohjakallio, M. 2010. Tekniikan kemia. Helsinki, Edita

Biopolttoaineet. Mire. Saatavissa:

<http://www.mire.eu/fi/energiantuotanto/biopolttoaineet/>
[viitattu 4.8.2014]

CHP teknologia. Mire. Saatavissa:

<http://www.mire.eu/fi/energiantuotanto/chp/>
[viitattu 9.11.2014]

Energiatuki. 2014. Työ- ja elinkeinoministeriö. Saatavissa:

<https://www.tem.fi/energia/energiatuki>
[viitattu: 19.11.2014]

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P., Pakkanen, H. 2000. Höyrykattilatekniikka. Helsinki. Edita, Opetushallitus

Lainalaskuri. 2014. Opetushallitus. Saatavissa:

<http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/lainarahoitus/lainalaskuri.html>
[viitattu 22.11.2014]

Maakaasun ominaisuudet. 2014. Suomen kaasuyhdistys. Saatavissa:
<http://www.maakaasu.fi/kirjat/maakaasun-yleiset-turvaohjeet-ja-hatatilanteiden-toimintaohjeet/yleiset-turvaohjeet/maakaasun>
[viitattu 1.11.2014]

Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S., Öistämö, J. 2010 Tekniikan kaavasto.
Tampere. Amk-Kustannus Oy, Tammertekniikka

Nydal, R. 2002. Käytännön kylmätekniikka. Jyväskylä. Suomen Kylmäyhdistys ry.
Gummerus kirjapaino Oy. 3.painos. suomennos.

Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. Kurki-Suonio., I. 2002. Poltto ja palaminen.
Jyväskylä. International Flame Research Foundation – Suomen kansallinen osasto,
Teknillistieteelliset akatemit.

Savukaasujen lauhdutus. 2014 Ehox tuote Oy. Saatavissa:
<http://www.ehox.fi/savukaasupesuri-savukaasun-lauhutus.htm>
[viitattu 15.10.2014]

Savukaasupesuri parantaa lämpöyhtiön kannattavuutta. 2014. Promaint. Saatavissa:
<http://www.promaintlehti.fi/Tuotantotehokkuuden-kehittaminen/Savukaasupesuri-parantaa-lampoyhtion-kannattavuutta>
[viitattu: 16.11.2014]

Seppänen, R., Kervinen, M., Parkkila, I., Karkela, L., Meriläinen, P. 2010. Maol
taulukot. Helsinki. Otava. 2.-8. painos

Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Eija Alakangas. VTT.
Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>
[viitattu 12.10.2014]

Tehokas yhteistuotanto. 2014 Vantaan Energia. Saatavissa:

<http://www.vantaanenergia.fi/fi/Sahko/energiat%20hdejakauma/yhteistuotanto/Sivut/default.aspx>

[viitattu 5.8.2014]

Tietoa konsernista. Vantaan Energia Oy. Saatavissa:

<http://www.vantaanenergia.fi/fi/TietoaKonsernista/Sivut/default.aspx>

[viitattu 23.9.2014.]

Täytekappaleet. 2014. Muovitekniikka Oy. Saatavissa:

http://www.muovitekniikka.com/su_telpak.html

[viitattu: 16.11.2014]

Vantaan energia Oy. 2010. Vantaan Martinlaakson voimalaitoksen energia-analyysi maaliskuu 2010 loppuraportti.

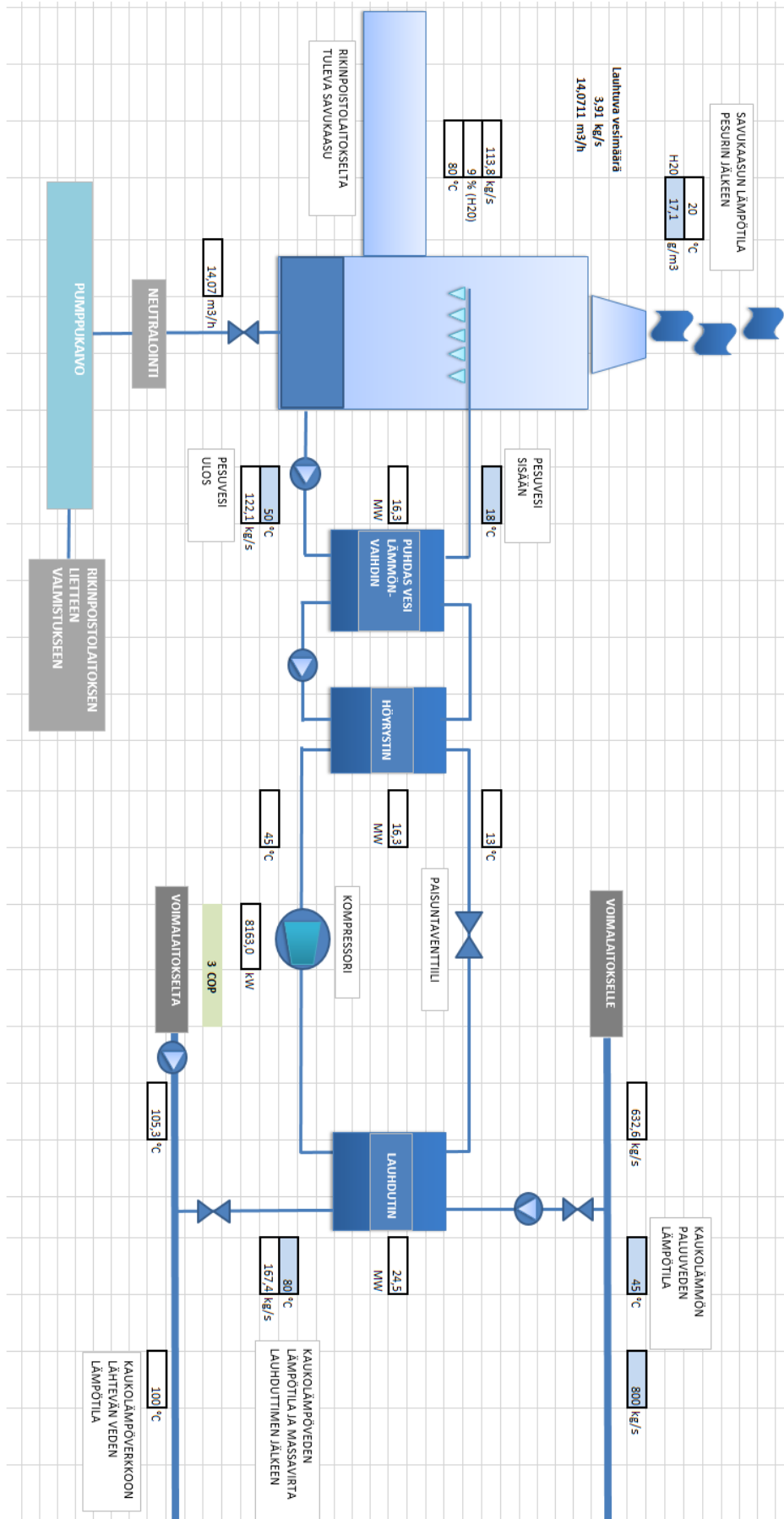
Vantaan Sähkölaitos Oy. 1975. Tampella-kattilan käyttö- ja hoito-ohjeet.

Vesikastepistetaulukko. 2014. Sarlin. Saatavissa:

<http://www.sarlin.com/fi/Paineilma/Tyokalupakki-/Kastepistetaulukko>

[viitattu: 15.9.2014]

Liite 1. Pesurin toimintamalli



Liite 2. Investoinnin kannattavuuslaskelma

INVESTOINTIKUSTANNUKSET

Lainan korko xxx % / xxx vuotta	xxxxx,xx	€
Lämpöpumppu	xxxxx,xx	€
Pesuri	xxxxx,xx	€
Huoltokustannukset	xxxxx,xx	€

HIILIKATTILA TÄYDELLÄ KUORMALLA (korvataan lämpökeskuksen maakaasua) 3000,00 h/a

KAUKOLÄMMÖNTUOTANTO PESURILLA

Pesurin kaukolämpöteho	24,50	MW
Tuotettu kaukolämpö (vähennetty turbiinin jälkeinen tuottamatta jäänyt KL-teho)	18,95	

VAIKUTUS SÄHKÖN JA LÄMMÖNTUOTANTOON

Sähköntuotannon osuus höyrystä	0,32	
Menetetty sähkö	2,61	MW
Menetetty kaukolämpö	5,55	MW
Kaukolämpöä (kaasumäärä joka korvataan)	56840,00	MWh/a
Maakaasun hinta	xxxxx,xx	€/MWh
Sähkön hinta	xxxxx,xx	€/MWh
Sähköntuotannosta aiheutuva tappio	xxxxx,xx	€/a

SÄÄSTETTY HIILI KATTILAN KÄYDESSÄ OSAKUORMALLA

Poltetut hiilet 2013 (huhti-, touko-, syys- ja lokakuu)	48665,00	tonnia
Hiilitonnin sisältämä energia	6,50	MWh/t
Kivihiilen energiamaksu	xxxxx,xx	e/MWh
Poltettujen hiilten hinta	xxxx,xx	€
Kattilan hyötysuhteen nousu	5,00 %	– yksikköä
Hiilen kulutuksen vähentymisestä säästöä	xxxxx,xx	€/a

LAUHDEVESIEN HYÖDYNTÄMINEN JA JÄTEVEDET

Kaupunkiveden hinta/m ³	xxxxx,xx	€/m ³
Jätevesimaksu /m ³	xxxxx,xx	€/m ³
Rikinpoistolaitoksella hyödynnetystä lauhdevedestä säästöä (10m ³ /h ja 6000h)	xxxxx,xx	€/a
Jätevesimaksu vedestä, joka lasketaan viemäriin (4m ³ /h, 3000h)	xxxxx,xx	€/a

PESURIN VUOSITUOTTO

xxxxx,xx €/a

10 VUODEN KOKONAISKUSTANNUKSET

xxxxx,xx €

Takaisinmaksuaika
(Ilman investointitukea)

x vuotta

Liite 3. Polttoaineen elementaarianalyysi



ANALYTICAL REPORT

COMPOSITE ANALYSIS

		As Received	Air Dried	Dry Basis	Dry Ash Free	
Proximate Analysis	Moisture	%	7.10	1.59	-----	-----
	Ash	%	10.16	10.77	10.94	-----
	Volatile	%	35.84	37.97	38.58	43.32
	Fixed Carbon	%	46.90	49.67	50.48	56.68
	Sulfur	%	0.58	0.61	0.62	0.70
	Gross Calorific Value	kcal/kg	6744	7144	7259	8152
ISO	Net CV, constant volume	kcal/kg	6470	-----	7007	-----
<i>Seyler's Formula used in Net CV calculation</i>						
Ultimate Analysis	C,H estimated using the Seyler's formula					
	Moisture	%	7.10	-----	-----	-----
	Carbon	%	67.95	-----	73.14	-----
	Hydrogen (in coal)	%	4.76	-----	5.12	-----
	Nitrogen not determined	%	0.00	-----	0.00	-----
	Sulfur	%	0.58	-----	0.62	-----
	Ash	%	10.16	-----	10.94	-----
	Nitrogen & Oxygen (by difference)	%	9.45	-----	10.18	-----