

# **Savukaasupesurin lämpökuorman kulutus eri olosuhteissa**

Anniina Asikainen

Opinnäytetyö

Toukokuu 2017

Tekniikan ja liikenteen ala

Insinööri (AMK), energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Asikainen, Anniina	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Toukokuu 2017
	Sivumäärä 35	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi <b>Savukaasupesurin lämpökuorman kulutus eri olosuhteissa</b>		
Tutkinto-ohjelma Insinööri (AMK), energiatekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Hytönen, Kari Peuranen, Harri		
Toimeksiantaja(t) Mäntän Energia Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Voimalaitosten ikääntyessä laitekannan kunnossapito ja uusiminen on tärkeää, jotta energiantuotanto pysytään säilyttämään ennallaan. Mäntän Energian voimalaitoksen lähestyessä 100 ikävuotta, on uusia investointeja jouduttu tekemään jo runsaasti ja yksi uusimmista investoinneista on savukaasupesuri. Jotta savukaasupesurista saataisiin kaikki hyöty irti, on tärkeää, että pesurille luodaan tarvittavat lämmöntalteenotot, joista pesuri saa tarvittavan jäähdytyksen toimiakseen toivotulla tavalla.</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli kartoittaa Mäntän Energialle syksyllä käyttöön tulevan savukaasupesurin energiataseet kattilan eri kuormitustilanteissa. Laskelmissa oli tarkoitus kiinnittää huomio ylijäämlämpöön. Savukaasupesuriin suunniteltujen lämmönvaihtimien potentiaalinen tarkastelu oli tavoitteena energiataseissa. Pää tavoitteena työssä oli selvittää varsinkin savukaasupesurin kesäajan kuormitus, kun saatavilla ei ole niin paljon jäähdytystehoa lämpimän sään ja sen myötä lämpimien lämmönvaihdinten energiavirtojen vuoksi. Opinnäytetyön tavoitteena oli vielä lopuksi listata teoreettisesti potentiaalisia pesurin jäähdytysvaihtoehtoja.</p> <p>Opinnäytetyön tietoperusta koottiin suurimmaksi osaksi toimeksiantajan ja savukaasupesurin suunnittelijoiden materiaaleista. Tietoa saatiin myös haastatteleamalla Valmetin suunnittelijoita ja keskustelemalla Mäntän Energian työntekijöiden kanssa.</p> <p>Lopputuloksena saatiin laskettua eri kuormitustilanteisiin energiataseet, joista saatiin selville hukkaan menevän energian määrä. Tuloksien perusteella kartoitettiin eri vaihtoehtoja sille, miten pesurin hukkaenergiaa saataisiin hyödynnettyä ja pesuria jäähdytettyä tarpeeksi. Opinnäytetyön tuloksia voidaan hyödyntää siinä tilanteessa, kun pesurin käyttöönotto lähestyy ja tarvittavia tietoja eri kuormituksista muun muassa kesäaikaan tarvitaan.</p>		
Avainsanat ( <a href="#">asiasanat</a> ) Savukaasupesuri, lämmöntalteenotto, energiatase		
Muut tiedot		

Author(s) Asikainen, Anniina	Type of publication Bachelor's thesis	Date May 2017  Language of publication: Finnish
	Number of pages 35	Permission for web publication: x
Title of publication <b>Flue gas scrubber's thermal load consumption under different conditions</b>		
Degree programme Degree Programme in Energy Technology		
Supervisor(s) Hytönen, Kari Peuranen, Harri		
Assigned by Mäntän Energia Oy		
Abstract  <p>When a power plant becomes older, maintaining and renewing the equipment is important, so that the power production can be kept at the same level. As the power plant owned by Mäntän Energia is approaching its 100th year, there have been many new investments. One of them was a flue gas scrubber that was taken into use in fall 2017. To get all the benefits from the scrubber, the right amount of heat recovery is necessary because the scrubber needs a cooling system to function properly.</p> <p>The purpose of the thesis was to survey the energy balances of the flue gas scrubber in different load situations. The goal was to solve how much waste energy the scrubber would produce in use. Especially in summer times when the weather is warm, the heat exchangers will not produce enough cooling energy for the scrubber. The energy balance helps to understand how much energy can be produced by a flue gas scrubber and find alternative heat recovery systems if the current ones do not use all the heat energy. Additionally, different cooling systems were analyzed to determine which one could be used in the flue gas scrubber in Mänttä.</p> <p>The theoretical framework of the thesis consists of the material provided by the assignor and designers of the flue gas scrubber. Information was also collected by conducting interviews, and reviewing literature, internet and school material.</p> <p>As a result of the thesis different load situations were calculated and the amount of the waste energy was determined. Based on the results different options on how to use the waste energy and cool the scrubber enough were examined. The results of the thesis can be used when the scrubber is taken into use and information on the different load situations is needed.</p>		
Keywords/tags ( <a href="#">subjects</a> ) Flue gas scrubber, heat recovery, energy balance		
Miscellaneous		

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>3</b>
1.1	Opinnäytetyön tausta.....	3
1.2	Opinnäytetyön tavoitteet, rajaus ja toteutus .....	3
1.3	Mäntän Energia Oy.....	4
<b>2</b>	<b>Mäntän voimalaitos.....</b>	<b>5</b>
2.1	Voimalaitoksen toiminta .....	5
2.2	Käytettävät polttoaineet .....	6
<b>3</b>	<b>Savukaasupesuri.....</b>	<b>8</b>
3.1	Savukaasupesurin toimintaperiaate.....	8
3.2	Mäntän savukaasupesuri.....	9
3.2.1	Mäntän pesurin toimintaperiaate .....	9
3.2.2	Pesurille tulevan savukaasun ominaisuudet .....	12
<b>4</b>	<b>Lämmönvaihtimet .....</b>	<b>13</b>
4.1	Lämmönvaihdinten toimintaperiaate ja tyypit .....	13
4.2	Savukaasupesurin lämmönvaihtimet .....	14
4.2.1	Pesurin levylämmönvaihtimet.....	14
4.2.2	Kaukolämmönvaihdin .....	15
4.2.3	Prosessivesivaihdin .....	15
<b>5</b>	<b>Savukaasupesurin energiavirrat.....</b>	<b>16</b>
5.1	Virtausaineiden lämpötehojen määrittäminen.....	16
5.2	Savukaasujen lämpötehon määrittäminen .....	19
<b>6</b>	<b>Savukaasupesurin energiataseet.....</b>	<b>20</b>
6.1	Energiatase 32 %:n kuormassa.....	20
6.2	Energiatase 60 %:n kuormassa.....	22
6.3	Energiatase 60 %:n kuormassa ilman PV-lämmönvaihdinta.....	24
6.4	Energiatase 100 %:n kuormassa.....	25
6.5	Yhteenvedo taseista .....	27

<b>7</b>	<b>Pesuriveden jäähdytys.....</b>	<b>28</b>
7.1	Lämmöntalteenotosta jäähdytystehoa .....	28
7.2	Hyötysuhdetta kasvattavat jäähdytysvaihtoehdot .....	29
7.3	Jäähdytysvaihtoehdot ilman hyötysuhteen kasvamista .....	29
<b>8</b>	<b>Pohdinta.....</b>	<b>30</b>
8.1	Työn suoritus ja tulokset .....	30
8.2	Luotettavuus.....	31
8.3	Jatkotutkimustarpeet .....	31
	<b>Lähteet .....</b>	<b>32</b>
	<b>Liitteet .....</b>	<b>34</b>
	Liite 1. Veden entalpia-arvo taulukko .....	34

## Kuviot

Kuvio 1.	Mäntän Energian voimalaitos .....	5
Kuvio 2.	Savukaasupesurin toimintaperiaate.....	9
Kuvio 3.	Mäntän energian savukaasupesuripiirit.....	10
Kuvio 4.	Savukaasun entalpia, lämpötila-diagrammi .....	13
Kuvio 5.	Single pass -levylämmönvaihdin .....	14
Kuvio 6.	Savukaasupesurin energiatase .....	18

## Taulukot

Taulukko 1.	K4-kattilassa käytetyn polttoaineen ominaisarvoja .....	7
Taulukko 2.	Laskennalliset savukaasuominaisuudet pesurin käyttöönoton jälkeen ...	12
Taulukko 3.	Savukaasupesurin energiatase 32 %:n kuormassa .....	22
Taulukko 4.	Savukaasupesurin energiatase 60 %:n kuormassa .....	24
Taulukko 5.	Savukaasupesurin energiatase 60 %:n kuormassa ilman PV-vaihdinta ...	25
Taulukko 6.	Savukaasupesurin energiatase 100 %:n kuormassa .....	27
Taulukko 7.	Savukaasupesurin energiataseiden yhteenveto.....	27

# 1 Johdanto

## 1.1 Opinnäytetyön tausta

Voimalaitosten ikääntyessä on alettava investoimaan enemmän huoltoihin ja uuteen laitekantaan. Hyvällä kunnossapidoilla ja huolloilla laitteet voivat saavuttaa korkeita elinikä, mutta jossain vaiheessa uusien laitteiden investointi on väistämätöntä. Laitokseen voi olla hyvä tehdä erinäisiä parannuksia, jos todetaan että uudistuksilla voidaan saada laitoksen hyötysuhdetta tai käytettävyyttä parannettua.

Mäntän Energian voimalaitoksen on jo miltei 100 vuotta vanha, joten edellä mainittuja investointeja on tehty jo runsaasti, jotta energiantuotanto on pystytty säilyttämään entisellään. Yksi uusista hankinnoista Mäntän Energialle, tämän työn toimeksiantajalle, on syksyllä käyttöön tuleva savukaasupesuri. Sillä voimalaitos saa kasvatettua voimalaitoksen hyötysuhdettaan kahden lämmönvaihtimen avulla sekä puhdistettua voimalaitosprosessista syntyvää savukaasua tehokkaammin. Savukaasupesurin käytössä on kuitenkin muistettava järjestää pesurille riittävä jäähdytysteho, jotta edellä mainitut hyödyt saadaan käytäntöön.

## 1.2 Opinnäytetyön tavoitteet, rajaus ja toteutus

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää savukaasupesurin lämmöntalteenoton toimintaa ja laskea, miten lämmöntalteenoton kapasiteetti muuttuu sellaisina hetkinä, kun kaukolämpöön ja prosessiveteen ei tarvitse ohjata niin paljon lämpöenergiaa. Työn tavoitteena oli määrittää nämä kuormitusilanteet, joista kesäaika oli tärkein tarkastelutilanne. Tärkein kysymys, johon opinnäytetyön piti vastata, on se, kuinka lämpöä saadaan käytettyä savukaasupesurin kierrossa. Tärkeää on välttää tilanteet, joissa savukaasupesurin kiertovesi kuumenee liikaa ja aiheuttaa erinäisiä ongelmia, kuten hyötytehon laskua. Tavoitteena oli myös selvittää, millaisia savukaasupesurin jäähdytysjärjestelyjä voitaisiin Mäntän Energian pesuriin tehdä, jos pesurissa riittää lämpöenergiaa tai jäähdytystarvetta lisälämmöntalteenotolle.

Työssä laskettuihin energiataseisiin määritettiin systeemiksi savukaasupesuri. Tämän vuoksi työssä ei oteta kantaa laitoksen muihin uudistuksiin tai laitteistoihin. Opinnäytetyön lopputulos antaa Mäntän Energialle tietoa savukaasupesurin energiataseista ja lämmöntalteenoton toiminnasta eri kuormitusasteilla sekä mahdollisista pesuriveden jäähdytysjärjestelmistä.

Opinnäytetyö toteutettiin kehittämisprojektina, jossa pyrittiin luomaan uudelle savukaasupesurille edellytykset ympärivuotiseen käyttöön niin, että kaikki kuormitusmahdollisuudet on tutkittu. Näin pesurin käytölle luodaan turvallinen pohja, kun kaikki olosuhteet lämmöntalteenotossa on otettu huomioon. Laskennallisia arvoja pesurin eri olosuhteissa on tietenkin jo suunnittelussa huomioitu, mutta lähempää tutkimusta savukaasupesurista ja lämmöntalteenotosta ei Mäntän Energia ollut vielä tehnyt. Työ toteutettiin kehittämisprojektin mukaisessa etenemisjärjestyksessä: Ensin perehdyttiin aiheen teoriaan, minkä jälkeen kartoitettiin Mäntän Energian savukaasupesuriin liittyviä tietoja ja tehtiin selvitys näistä. Tämän jälkeen kerättyjen tietojen perusteella suoritettiin ne laskennat, jotka olivat työn tavoitteena. Laskelmien jälkeen työn lopussa pohdittiin mahdollisia parannusehdotuksia ja arvioitiin, kuinka hyvin tulokset vastasivat tavoitetta.

Tietoa opinnäytetyön tekemiseen saatiin suunnittelijoiden haastatteluista, havainnoimisesta voimalaitoksella, sekä tietokannoista. Opinnäytetyö toteutettiin Mäntän Energialle, ja sen tiedot voimalaitoksen toiminnasta ja laskennallisista arvoista toimikin ensisijaisena tiedonlähteenä työlle. Koska savukaasupesuri on Valmetin suunnittelema, tietoperustaa työhön saatiin myös paljon Valmetin suunnittelijoilta ja heidän lähtötiedoista. Muina tiedonlähteinä opinnäytetyössä käytettiin aiheeseen liittyviä internetsivuja, kirjallisuutta sekä saman tyyllisistä aiheista tehtyjä opinnäytetöitä. Mäntän Energia on toiminut usean opinnäytetyön toimeksiantajana, joten varsinkin näistä töistä tietoa löytyi myös hyvin.

### 1.3 Mäntän Energia Oy

Mäntän Energia perustettiin vuonna 1992, kun voimalaitos (ks. kuvio 1) eriytettiin Metsä-Serla Oy:n omistuksesta. Mäntän Energia sijaitsee Metsä Tissuen yhteydessä

Mäntässä, ja sen tehtävä on tuottaa kaukolämpöä Mänttään sekä prosessihöyryä ja sähköä Metsä Tissuelle (MEO esittelykalvot 2013). Metsä Tissue tuottaa laitoksellaan pehmopaperia, ja onkin ainoa suomalaisomisteinen pehmopaperin tuottaja koko maailmassa. (Metsä Tissue Suomessa n.d.)



Kuvio 1. Mäntän Energian voimalaitos

Mäntän Energiasta 70 % omistaa Mäntän Kaukolämpö Oy ja Metsä Tissue Oyj 30 %. Vuoden 2014 lopussa Mäntän Energian henkilöstö koostui 25 henkilöstä. Liikevaihtoa yrityksellä on yli 10 miljoonaa euroa vuoden aikana. (MEO esittelykalvot 2013.)

## 2 Mäntän voimalaitos

### 2.1 Voimalaitoksen toiminta

Mänttään valmistui voimalaitos vuonna 1935. Laitos on alun perin valmistettu pape-riteollisuutta varten Metsä Groupille. Voimalaitos on aluksi toiminut neljän kattilan voimalla, mutta nykyään käytössä on enää kaksi kattilaa. Vanhoja kattiloita on osittain purettu laitoksesta uusien laitteiden tieltä pois, mutta esimerkiksi K3-kattilaa,



joka lopetti energiantuotannon muutama vuosi sitten, ei ole purettu pois. Syynä tälle ovat kalliit purkukustannukset ja se, ettei kattilarakennusta tällä hetkellä tarvita muuhun käyttöön. (MEO esittelykalvot 2013)

Voimalaitoksen pääkattilana toimii K4-kattila, joka on teholtaan 105 MW suuruinen. Se tuottaa höyryä kuormituksesta riippuen 8–25 kg/s. Normaalilla kuormalla höyryn lämpötila on 510 astetta ja paine 85 baria. Kattila on alun perin toiminut jäteliemikattilana 1970-luvulla, kunnes se muutettiin vuonna 1993 jyrshinturpeen polttoon soveltuvaksi leijupetikattilaksi. Vuonna 2014 kattilaan uusittiin takavedon lämmönsiirripinnat ja puhaltimet. Uusin investointi kattilaan toteutetaan kesällä 2017. Tällöin vanhan leijuarinan vaihdetaan ilmapalkkiarinaksi, ilmajärjestelmän ja polttoaineensyöttöjärjestelmä uusitaan sekä asennetaan SNCR-järjestelmä vähentämään typenoksidipäästöjä. Kattilamuutokset toteutetaan samassa seisokissa savukaasupesurin asennuksen kanssa.

Voimalaitoksella toimii varakattilana K5-kattila. Kattila on otettu käyttöön vuonna 1975, ja vuonna 2011 siirretty Mäntän Energian käyttöön. Teholtaan varakattila on 44 MW suuruinen, ja kattila on täydessä käytössä vain muutamia viikkoja vuodessa. Polttoaineena siinä on käytössä raskas polttoöljy. Kattila tuottaa höyryä 15 kg/s höyryn lämpötilan ollessa 235 °C ja paineen 30 bar. (MEO esittelykalvot 2013)

Mäntän Energiaan kuuluu myös vesivoimalaitos, joka on valmistunut voimalaitoksen viereen Mäntänkoskeen vuonna 1933. Vesivoimalassa on vielä käytössä alkuperäinen Kaplan turbiini, joka on teholtaan 1,6 MW. Vesivoimalaitos saa energiansa kuuden metrin putouskorkeuden ansiosta, virtaama on 0–30 m<sup>3</sup>/s. Voimalaitos huolehtii vesivoimalan ylä- ja alapuolen vedenpinnan korkeuksista, jotka Suomen ympäristökeskus (SYKE) määrittelee. (Mts)

## 2.2 Käytettävät polttoaineet

Koska K4 pääkattila on leijukerroskattila, voi polttoaine ja sen kosteus vaihdella tiettyjen rajojen sisällä paljonkin. Taulukosta 1 näkee laskennalliset kosteusprosentit kullekin käytössä olevalle polttoaineelle sekä lämpöarvon vaihtelevuuden polttoaineessa. Taulukon 1 arvot toimivat laskenta-arvoina kattilauudistusten ja savukaasu-

pesurin suunnittelussa. Vuoden 2017 pääpolttoaineseos koostuu havupuun kuoresta, kuivista jakeista, siistauslietteestä, puhdistamolietteestä ja turpeesta. Turpeen käyttöä on tarkoituksena vähentää polttoaineseoksesta, ja tavoite on, että turpeen käyttö pidettäisiin suurimmillaan 15 %:ssa.

Taulukko 1. K4-kattilassa käytetyn polttoaineen ominaisarvoja (K4-kattilan leijuarinan ja ilmajärjestelmän uusinta sekä savukaasun puhdistuslaitteisto 2016)

<i>Polttoaineen ominaisuus</i>	<i>Yksikkö</i>	<i>Turve</i>	<i>Havupuun kuori</i>	<i>Kuiva jae</i>	<i>Puhdistamoliete</i>	<i>Siistausliete</i>
<b>Osuus polttoaineenergiasta</b>	%	0...100	0...100	0...50	1...7	3...9
<b>Kuiva-aineen max. lämpöarvo</b>	MJ/kg	21,8	20,7	20,4	16,8	8,5
<b>Kuiva-aineen min. lämpöarvo</b>	MJ/kg	20,5	19,4	19,1	16,0	7,9
<b>Kosteus</b>	p-%	50	60	22	65	50

Koska havupuun kuori ja liete ovat suhteellisen kosteuspitoisia, on polttoaineeseen sekoitettava kuivia jakeita, jotta kokonaiskosteus laskisi poltolle optimaalisempaan lukemaan, n. 50 p-%:n arvoon. Kuivina jakeina käytetään esimerkiksi sahanpurua, kantomurskaa ja vanerinsyrjää.

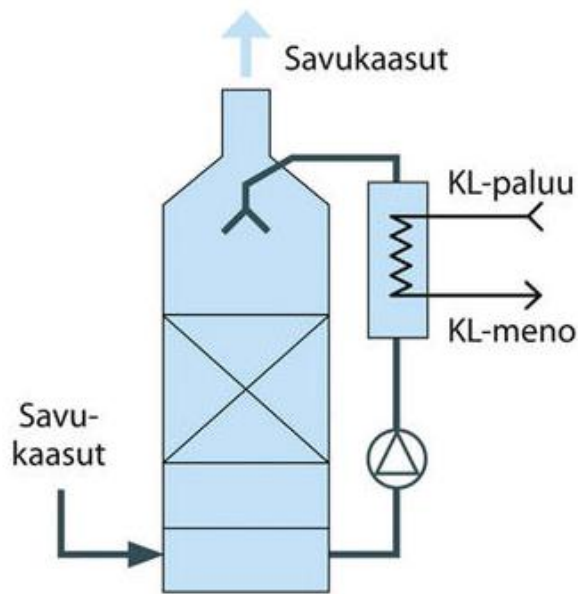
Kattilauudistuksen jälkeen kattilassa on mahdollisuus alkaa polttaa siistauslietettä. Siistausliete on kiinteä liete, jota syntyy paperin ja kartongin valmistuksessa tapahtuvassa puhdistuksessa. Se koostuu epäpuhtauksista, joita on poistettu kierrätyspaperista pesuvaiheessa (Kovanen 2015). Lietettä syntyy Metsä Tissuen tehtaalla, ja näin ollen polttoaineen saatavuus ja kuljetus hoituvat helposti. Vuodessa siistauslietteellä voitaisiin tuottaa Mäntässä noin 100 000 Gigajoulea energiaa (Metsä Tissue kehittää Mäntän tehdasta 2017). Myös puhdistamolietettä Mäntän Energia saa poltettavaksi Metsä Tissuen pehmopaperinvalmistusprosessista. (Päätös nro 75/2011/1, 3)

### 3 Savukaasupesuri

Voimalaitoksen energiantuotannossa yksi prosessin vaihe on savukaasujen puhdistaminen. Puhdistusmenetelmiä ja -laitteita on monia, kuten letku- ja sähkösuodattimia, erinäiset sykloneita sekä savukaasupesureita. Savukaasupesurit ovat erotusasteellaan yksi tehokkaimmista savukaasujen puhdistajista, mutta eivät niin yleisiä niiden lauhteen käsittelyn kalleuden vuoksi. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2014, s.255) Puhdistusmenetelmissä erotusasteella tarkoitetaan sitä, mikä on prosessiin syötetyn massan suhde prosessissa erotettuun massaan (Erotusaste 2014).

#### 3.1 Savukaasupesurin toimintaperiaate

Savukaasupesurin peruseriaatteena on savukaasun puhdistus ruiskutusnesteen, yleensä veden, avulla. Kuviossa 2 on esitetty yksinkertaistettu malli savukaasupesurin toiminnasta. Useimmissa pesureissa savukaasut ohjataan pesurin alaosaan sisään pesuvaiheeseen. Savukaasun lämpötila pesuriin tullessa on yleensä 150–200 °C. Pesuvaiheessa savukaasun lämpötila laskee n. 60 asteeseen, jota kutsutaan märkälämpötilaksi. Savukaasupesurissa kiertävään pesuveteen, eli kiertoveteen lisätään yleensä jotain emästä irrottamaan pienhiukkasia. Pesuvaiheessa suurin osa pienhiukkasia saadaan suodatettua kaasusta. Pesurin on tärkeää alittaa tässä vaiheessa kastepiste, jossa vesihöyryn kosteus on saavuttanut 100 %. Kastepisteen alituksessa vesihöyry kondensoituu eli tiivistyy vedeksi. Kyseessä on eksoterminen reaktio, joka tapahtuessaan vapauttaa ympäristöön runsaasti lämpöä. Tähän perustuu savukaasupesurin kyky tuottaa lämpöenergiaa lämmöntalteenottoja varten, joiden avulla pystytään nostamaan voimalaitoksen hyötysuhdetta. Kastepisteen alittaminen varmistuu, jos pesurin kiertovesi saadaan pidettyä tarpeeksi viileänä tai pesuriin syötetään lisävettä jäähdytyksenä. (Järvenreuna 2014.)



Kuvio 2. Savukaasupesurin toimintaperiaate (Järvenreuna 2014)

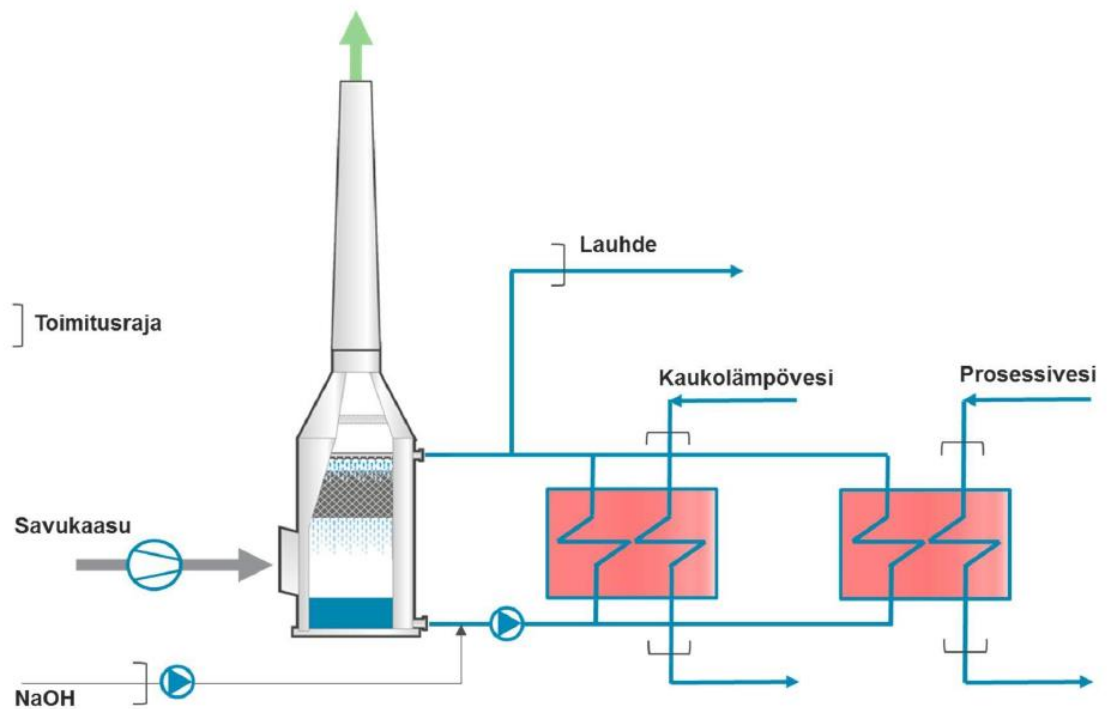
Seuraavassa vaiheessa savukaasut ohjataan lauhdutinvaiheeseen, jossa savukaasun vastakkaisesta suunnasta ohjataan ruiskutusvettä, joka sitoo itseensä pienhiukkasia ja näin puhdistaa savukaasua. Lauhdutusvaiheessa vettä ohjataan lämmönvaihtimille. Lämmönvaihtimella saadaan hyödynnettyä savukaasuista kiertonesteeseen sitoutunutta energiaa eteenpäin sekä laskettua kiertonesteen lämpötilaa sopivaksi. Näin muodostuvat ne kaksi pesuvaihetta, jotka useimmissa savukaasupesureissa ovat. Prosessivaiheiden jälkeen savukaasu ohjataan savupiippuun. (Mts.)

## 3.2 Mäntän savukaasupesuri

### 3.2.1 Mäntän pesurin toimintaperiaate

Mäntän Energian uudella savukaasupesurilla saadaan laitoksen hyötysuhdetta kasvatettua sekä vähennettyä tehokkaasti savukaasusta hiukkaspäästöjä. Pesuri puhdistaa savukaasuista muun muassa rikkioksidia  $\text{SO}_2$ , suolahappoa  $\text{HCl}$  ja ammoniakkia  $\text{NO}_3$ .

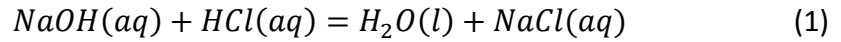
Mäntän Energialle tilattu pesuri on yksivaiheinen täytekappalepesuri. Yksivaiheinen pesuri eroaa luvussa 3.1 mainitusta kaksivaiheisesta pesurista niin, että pesukierto ja lauhdutuskierto on suunniteltu samaan kiertoon toimiviksi. Kiertoliuos sisältää lisätyt pesukemikaalit, ja sama liuos kulkee myös lämmönvaihtimien kautta. Yleensä yksivaiheisissa pesureissa ei ole pelkoa siitä, että kiertoputkisto ja lämmönvaihtimet likaantuisivat. Koska lämmönvaihtimien kiertovesi ei ole kuitenkaan niin puhdasta kuin kaksivaiheisessa pesurissa, on putkistoon hyvä tehdä väliaikatarkastuksia ja asentaa paikallinen lämpötila mittaus, jotta vaihtimen kunto saadaan helposti selville. Kuviossa 3 on esitetty Mäntän Energian pesurin yksinkertaistettu kaaviokuva, josta selvenee yksivaiheisen pesurin periaate.



Kuvio 3. Mäntän energian savukaasupesuripiirit (K4-kattilan leijuarinan ja ilmajärjestelmän uusinta sekä savukaasun puhdistuslaitteisto 2016)

Mäntän Energian pesurissa kemikaalina käytetään natriumhydroksidia eli lipeää, jonka kemiallinen merkki on NaOH. Lipeä on vahva emäs, jonka pH-arvo on noin 14 (Käyttöturvallisuustiedote natriumhydroksidi 2011). Lipeän annostelulla saadaan säädettyä kiertoliuoksen pH-arvoa 5:n ja 7:n väliin, jottei kiertoon pääse liian hapanta

liuosta. Lipeä reagoi suolahapon kanssa kaavan 1 mukaan muodostaen vettä sekä putkistolle haitattomampaa natriumkloridiliuosta:



Koska polttoaineen ominaisuuksissa on Mäntän Energialla hieman vaihtelua polttoaine yhdistelmien takia, olisi pesuriin mahdollisesti hyödyllistä jossain vaiheessa lisätä myös toinen kemikaalilinja, jolla syötettäisiin pesuriin happoa, jolla saataisiin vaihtoehtoisesti laskettua pH-arvoa, jos savukaasun puhdistus tätä vaatisi. (Smolander 2017.)

Koska pesuri on täyte kappale pesuri, on sen sisälle sijoitettu muovisia kappaleita noin kolmen metrin korkeudelta lisäämään pesupinta-alaa ja tarkentamaan näin pesun lopputulosta. Osittain tästä syystä on syytä pitää huoli siitä, että pesurin sisällä lämpötila ei kohoa liian suureksi, jottei muoveihin tule materiaalivahinkoja. Materiaalivahinkojen välttämiseksi on pesurissa palovesiyhde. Palovettä syötetään pesuriin hätätilanteissa, jos lämpötila-antureilta tulee tieto, että lämpötila on noussut muoviosien läheisyydessä liian korkealle. Tällöin palovesilinja aukeaa ja laskee pesupintojen lämpötilaa. Jotta pesuliuos pysyisi puhtaana ja sopivan lämpöisenä, syötetään pesurin yläosaan lisävettä, jonka tehtävä on pelkästään jäähdyttää pesuriliuosta normaaleissa ajotilanteissa. Jos kierrossa olevat vaihtimet, mitkä näkyvät kuviossa 3. punaisina laatikoina, ovat pienellä käytöllä, on lisäveden tarve suurempaa. (Mts.)

Jotta pesuliuos saataisiin pidettyä puhtaana ja lisävettä syötettyä pesuriin, on lauhteen ulosajo tärkeää. Lauhteen puhtaus on sen vuoksi tärkeää, etteivät kiintoaineet tai kloridit konsentroituisi pesukierto. Tämä voisi aiheuttaa kerrostumia pesupintoihin, kiertoputkistoihin tai toimilaitteisiin ja näin huonontaa pesurin tehoa ja toimintaa.

Mäntän voimalaitoksessa toimii tällä hetkellä tiilirakenteinen savupiippu, mutta savukaasupesurin myötä se poistuu käytöstä ja käyttöön tulee uusi piippu. Uusi savupiippu on suunniteltu savukaasupesurin päälle, jolloin kaikki savukaasut ohjautuvat pesurin kautta eikä ohituksen mahdollisuutta prosessissa ole.

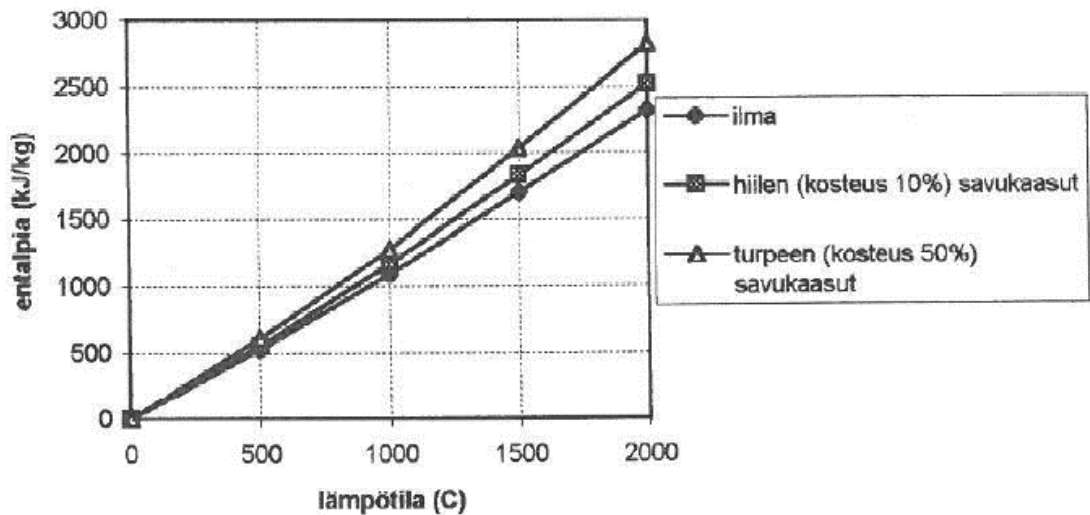
### 3.2.2 Pesurille tulevan savukaasun ominaisuudet

Koska pesuri on vasta hankinnassa, ei todellisia savukaasun ominaisuuksia pesurin jälkeen voida vielä tietää. Kuitenkin taulukkoon 2 on listattu pesurin suunnitteluvaiheen laskennallisia arvoja, joiden mukaan pesuri on mitoitettu. Savukaasun kosteutta pesurin jälkeen ei ollut tiedossa, mutta voidaan olettaa, että savukaasuista noin 6 prosenttia kondensoituisi vedeksi pesurissa. Savukaasujen kuivaosuus on noin 75 % ennen pesuria, josta suurimman osan voidaan päätellä olevan ilmaa.

Taulukko 2. Laskennalliset savukaasuominaisuudet pesurin käyttöönoton jälkeen (K4-kattilan leijuarinan ja ilmajärjestelmän uusinta sekä savukaasun puhdistuslaitteisto 2016)

<i>Savukaasun ominaisuudet</i>				
<b>Kattilan kuorma</b>	%	100	60	32
<b>Savukaasuvirtaus piippuun</b>	Nm <sup>3</sup> /s	42	26	16
<b>Savukaasun lämpötila pesurin jälkeen</b>	C	61	54	47
<b>Savukaasun kosteus</b>	vol-%	25,3	25,7	24,2
<b>Savukaasun lämpötila kattilan jälkeen</b>	C	165	150	130

Koska Mäntän Energialla polttoaineen vaihtelevuus on suurta, ei tässä työssä kannattanut määrittää tarkkaa savukaasun ominaislämpökapasiteettia tai tiheyttä, sillä polttoaineseos voi vaihdella tulevina vuosina paljonkin kattilauudistuksen jälkeen. Tästä syystä laskelmissa on käytetty keskimääräistä arvoa kuivan savukaasun entalpiarvosta. Savukaasujen entalpiaksi määritettiin  $1,1 \cdot f(\text{lämpötila})$  kJ/kg kuvion 4 mukaisesti, perustuen ilman ja turpeen savukaasujen entalpioiden keskiarvoon. (Huhtinen ym. 2004, 97) Sen avulla saatiin laskettua savukaasun lämpöteho. Savukaasujen ominaistiheydeksi määritettiin  $1,5 \text{ kg/m}^3$  massavirran laskentaa varten.



Kuvio 4. Savukaasun entalpia, lämpötila-diagrammi (Huhtinen 2004, 97)

## 4 Lämmönvaihtimet

### 4.1 Lämmönvaihdinten toimintaperiaate ja tyypit

Lämmönvaihdinten toiminta perustuu lämmönsiirtymiseen konvektion, johtumisen ja säteilyn avulla. Kuitenkin suurin lämmönsiirtyminen tapahtuu konvektiona eli ainevirtojen mukana siirtyvänä lämpönä. Lämmönvaihtimiin perinteisesti ohjataan eri lämpötiloissa kaksi ainevirtaa, jotka pyrkivät tasoittamaan lämpötilaeroaan. Tästä syystä vaihdinta voi käyttää sekä jäähdyttäjänä että lämmittäjänä. (Everything you need to know about heat exchangers 2017.)

Lämmönvaihtimissa käytetään eri virtaussuuntia. Myötävirtalämmönvaihtimessa nesteet virtaavat samaan suuntaan toisiinsa nähden vaihtimen läpi. Vastavirtalämmönvaihtimessa virtaukset liikkuvat vaihtimessa vastakkaisiin suuntiin, jolloin lämmönsiirtyminen on tehokkaampaa verrattuna myötävirtalämmönvaihtimeen. Ristivirtalämmönvaihtimessa virtaukset kulkevat kohtisuorassa toisiinsa nähden.

Yleisimmät vaihdintyyppit ovat putki- ja levylämmönvaihtimet. Putkilämmönvaihtimissa neste kulkee sylinterimäisen kuoren sisässä, jossa kulkee putkia myös toiselle väliaineelle. Toinen väliaine kulkee putkissa sijaitsevan väliaineen ulkopuolella, jolloin lämpötilat näiden välillä pyrkivät tasaantumaan. Levylämmönvaihtimien toiminta

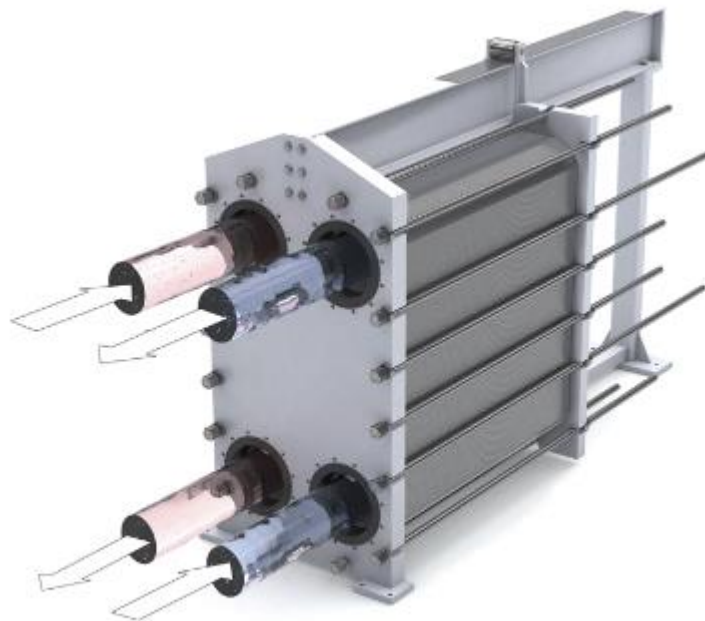


perustuu metallilevyjen lämmönjohtavuuteen. Vaihdin sisältää useita levyjä, jotka toimivat lämmönvälittäjinä vaihtimeen ohjatuille virroille. (How do heat exchangers work 2015.)

## 4.2 Savukaasupesurin lämmönvaihtimet

### 4.2.1 Pesurin levylämmönvaihtimet

Savukaasupesuriin suunnitellut lämmönvaihtimet ovat plate & frame -lämmönvaihtimia eli levylämmönvaihtimia. Vaihtimet ovat tilattu Funkelta, ja malliltaan ne ovat Single pass -vastavirtavaihtimia (ks. kuvio 5). Tämä tarkoittaa sitä, että vaihtimessa olevat putket ovat kiinni jokaisessa levyssä eikä vaihdin näin ollen sisällä liikkuvia levyjä. Funken Single pass -vaihtimen huono puoli onkin huono pääsy laitteiston sisälle huoltotilanteissa. (Gasketed plate heat exchangers 2016.)



Kuvio 5. Single pass -levylämmönvaihdin (Gasketed plate heat exchangers 2016)

#### 4.2.2 Kaukolämmönvaihdin

Pesurin toinen lämmönvaihdin on tarkoitettu kaukolämpöverkon lämmittämiseen. Vaihdin on mitoitettu keskimääräiselle kaukolämmönvirtaamalle 50 kg/s, ja siitä saatavaksi maksimaaliseksi tehoksi on laskettu 3,51 MW. Todellinen vaihtelevuus virtauksessa voi olla jopa 50 kg/s, kun kesällä virtaus voi olla 30 kg/s ja talvisin piikkien aikaan virtaama voi käydä arvossa 70 kg/s. Lämmönvaihtimella on tarkoitus saada kaukolämpökiertoon lisää energiakapasiteettia. Vaihdin yhdistetään kaukolämpöverkon tuloputkistoon laitoksen muiden lämmönvaihtimien edelle. Vaihtimen kautta ohjataan kaikki tulovesi kaukolämpöverkosta. Laitoksessa toimii tällä hetkellä kaksi prosessihöyryllä lämpiävää kaukolämmönvaihdinta, joista kumpikin on suuruudeltaan 11,3 MW. Päälämmönvaihtimia ennen kaukolämpövesi esilämmitetään lauhdeella 0,7 MW:n suuruisissa vaihtimissa.

Kaukolämmönvaihdin on suunniteltu niin, että se ottaa koko ajan pesuriliuokselta täyden kuorman, vaikkei tarvittavaa lisälämpöä tarvittaisikaan. Kuitenkin kaukolämpöputkistolle tehdään venttiilit, josta vaihdinlaitteen vikaantuessaan saadaan pois lämmityspiiristä. Koska pesuri on mitoitettu kahdelle lämmönvaihtimelle, tulee olla varmaa, että kiertoliuos pystyy kaikissa olosuhteissa antamaan tarpeeksi tehoa pois, jotta vältetään ylikuumenemisilta.

#### 4.2.3 Prosessivesivaihdin

Pesurissa on lisäksi prosessivedelle suunniteltu vaihdin. Vaihdin on suunnattu Metsä Tissuen käyttöön, ja tuleva prosessivesi otetaan Metsä Tissuen prosessivesisäiliöstä lämmitykseen. Koska prosessivesi on järvivettä ja säiliö sijaitsee osiltaan ulkona, prosessiveden lämpötila voi vaihdella vuoden aikojen mukaan rajusti. Vaihtelua voi olla 1–60 astetta, joten lämmönvaihdinta ei ole järkevää pitää samanlaisessa kiertopiirissä kuin kaukolämpövaihdinta. Prosessiveden piiriin sijoitetaan pesuveden säätöventtiilille dataa antava lämpötilamittari, jonka avulla pystytään säätämään prosessiveden lämmönvaihtimelle menevää vesimäärää. Mitä kylmempää prosessivesi on, sitä suuremmalla asetuksella säätöventtiili on, jolloin lämpöä saadaan siirrettyä tehokkaammin prosessiveteen. Lämmönvaihdin on suunniteltu niin, että se lämmittää pro-

sessivettä korkeintaan noin 60 asteeseen. Tästä syystä voi tulla tilanteita, ettei prosessivettä tarvitse lämmittää lainkaan, jolloin vaihtimen läpi ei tarvitse ajaa lämpöä. Prosessivesivaihdin on mitoitettu prosessivesivirtaamalle 50 kg/s, ja siitä saatavaksi maksimaaliseksi tehoksi on laskettu 6,2 MW.

Prosessivesivaihdin asennetaan samaan aikaan savukaasupesurin asennuksen yhteydessä, vaikka vaihdinta ei otetakaan heti käyttöön. Metsä Tissue aloittaa suunnittelun vaihtimille liittyvälle putkistolle vuoden 2018 puolella. Tästä syystä on hyvä huomioida se, että pesurivesi saa siihen saakka huonommin jäähdytystehoa, jolloin lauhdevettä syntyy enemmän kuin normaalitilanteessa.

## 5 Savukaasupesurin energiavirrat

### 5.1 Virtausaineiden lämpötehojen määrittäminen

Energiataseilla selvitetään valitun pisteen eli systeemin tulevien ja lähtevien energia-kuormien summa. Energiaperiaatteen eli termodynamiikan ensimmäisen säännön mukaan (ks. kaava 2), energiaa ei häviä mihinkään, se vain muuttaa muotoaan. Tämän lain mukaan energiataaseissa tulevien virtojen summan tulisi olla yhtä suuri kuin lähtevien virtojen summa. Todellisuudessa tällaiseen tilanteeseen ei kuitenkaan päästä erinäisten häviöiden vuoksi.

$$\Delta U = Q + W \quad (2)$$

jossa

$\Delta U$  = systeemin sisäenergian muutos

$Q$  = systeemiin tuotu lämpöenergia

$W$  = systeemiin tuotu työ

Taseiden laskennan perustana toimii kaava 3, jossa on otettu huomioon kaikki savukaasupesuriin tulevat ja lähtevät energiavirrat.

$$\sum(\dot{m} \cdot h)_{energy_{in}} + \dot{Q}_{sk_{in}} = \sum(\dot{m} \cdot h)_{energy_{out}} + \dot{Q}_{sk_{out}} + \dot{Q}_{häviöt} \quad (3)$$

jossa

$\sum(\dot{m} \cdot h)_{energy_{in}}$  = energiavirtojen lämpöteho entalpioiden avulla laskettua ennen savukaasupesuria

$\dot{Q}_{sk_{in}}$  = savukaasujen lämpöteho ennen savukaasupesuria

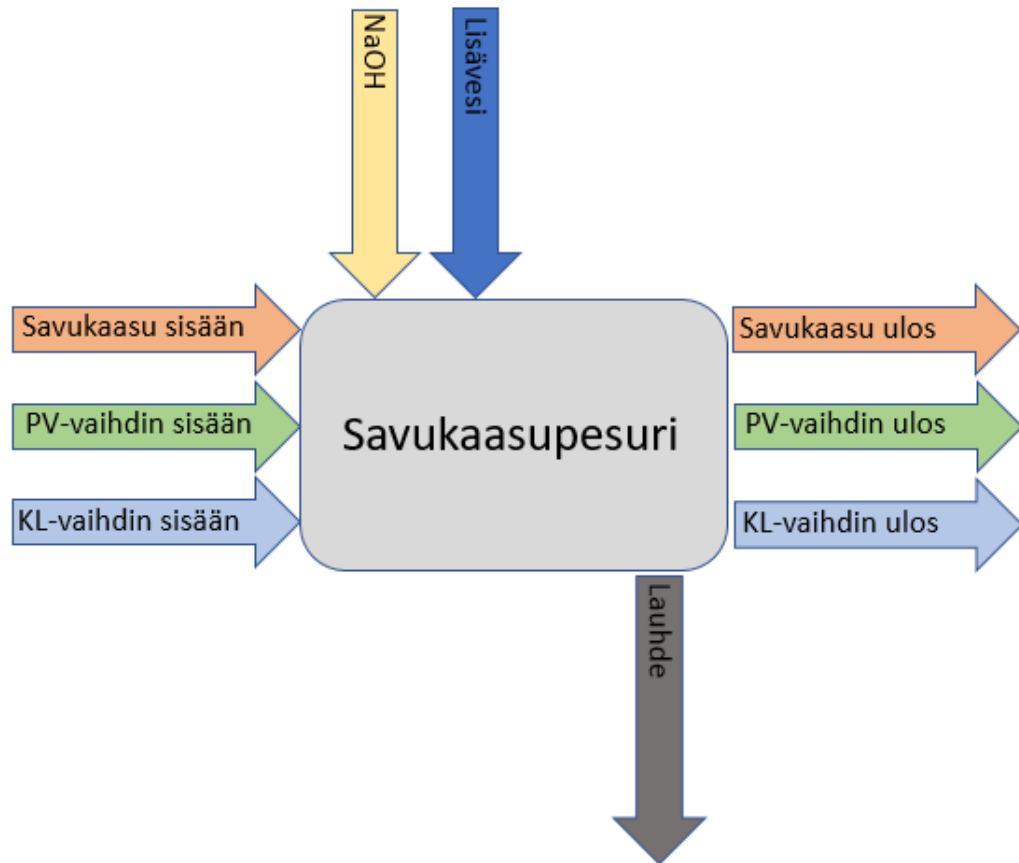
$\sum(\dot{m} \cdot h)_{energy_{out}}$  = energiavirtojen lämpöteho entalpioiden avulla laskettua savukaasupesurin jälkeen

$\dot{Q}_{sk_{out}}$  = savukaasujen lämpöteho savukaasupesurin jälkeen

$\dot{Q}_{häviöt}$  = tehohäviöt joita prosessissa syntyy

Jotta savukaasupesurin toiminnasta päästään kokonaisvaltaisesti selville, on hyvä tarkastella energiataseita useissa kattilakuormituskohtissa. Tähän opinnäytetyöhön on otettu kolme tarkastelupistettä, 32 %, 60 % ja 100 %. 32 %:n kuorma kattilan osapetiajon, jota voidaan käyttää silloin, kun energian tarve on erittäin pientä ja polttoaineseos tarpeeksi laadukasta. Osapetiajo mahdollistuu kattilan uudistuksien myötä syksyllä 2017. Kattilakuormitus on suurimman osan vuodesta 60 %:n luokkaa, ja tämä arvo toimiikin peruskuormana noin 80%:n ajan vuodesta. Kattilan korkean kapasiteetin vuoksi on huippukuorman ajaminen erittäin harvinaista, mutta silti tarpeellista ottaa laskennoissa huomioon.

Kuviossa 6 on kuvattu savukaasupesuriin tulevia ja lähteviä energia- ja materiaalivirtauksia, joita energiataseiden laskennassa otettiin huomioon. Ainoa virtaus, jota energiataseeseen ei ole laskettu, on palovesi. Kuten luvussa 3.2 mainittiin, ei savukaasupesuri normaalitilanteissa tarvitse palovettä lainkaan, joten sen kulutusta ei tarvitse huomioida.



Kuvio 6. Savukaasupesurin energiatase

Lasketuissa energiataseissa pitää muistaa ottaa huomioon se, että todellisia arvoja savukaasupesurin käytöstä ei pystytä saamaan laskelmiin. Suunnitteluarvot tuovat siis laskentaan teoreettisen näkökulman, jolla päästään hahmottamaan kokonaiskuva savukaasupesurin virroista. Kaikki laskennoissa käytetyt arvot on saatu Mäntän Energialta, jotka ovat toimineet savukaasupesurin suunnittelussa. Kuitenkin tässä työssä tehdyn laskentatiedoston avulla voidaan savukaasupesurin käyttöönoton jälkeen teoreettiset arvot vaihtaa todellisiin arvoihin ja näin kartoittaa realistinen energiatase helposti.

Koska energiataseita lasketaan useita, voidaan laskukaavat koota yhteisesti tähän lukuun näkyviin, ja taulukoida jokaiselle energiataseelle tulokset erikseen omiin lukuihin myöhemmin. Pesurin virroista NaOH-liuos, lisävesi, PV-vaihdin sisään/ulos, KL-vaihdin sisään/ulos sekä lauhde voidaan laskea massavirran ( $\dot{m}$ ), ja entalpian ( $h$ ) avulla kaavan 4 mukaisesti. Koska kyseessä ei ole korkeapaineisia tai -lämpöisiä putkilin-

joja, voidaan entalpia-arvot ottaa liitteessä 1 olevasta lämpötila-arvotaulukosta, sillä virtausaineiden paineet eivät ylitä painerajoja.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot h \quad (4)$$

## 5.2 Savukaasujen lämpötehon määrittäminen

Mäntän Energialta saaduista lähtötiedoista saatiin selvitettyä savukaasun tilavuusvirta eri kuormitustilanteissa. Tämän sekä luvussa 3.2.2 määritetyn savukaasun entalpi-an ja tiheyden mukaan saadaan määritettyä savukaasujen teho. Koska savukaasuihin määritetty entalpia koskee kuivia savukaasuja, eikä ota huomioon vesihöyryn kondensoitumisenergiaa, on vesihöyryn luovuttama energian laskeminen on esitetty alempana kaavassa 6. Kuivien savukaasujen laskentaan käytetään termodynamiikan tehon kaavaa 5, jossa

$V$  = savukaasun tilavuusvirta

$\rho$  = savukaasun tiheys = 1,5 kg/m<sup>3</sup>

$h$  = kuivan savukaasun entalpia

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot \rho \cdot h \quad (5)$$

Savukaasupesuriin tuleviin virtoihin lasketaan myös savukaasuista vapautuva lämpöenergia, joka syntyy savukaasujen vesihöyryn kondensoituessa osittain vedeksi. Vesihöyryn tiivistyminen on merkittävä osa savukaasupesurin lämmöntalteenoton kanalta, sillä se luovuttaa prosessiin suuren määrän lämpöenergiaa. Savukaasujen kosteuspitoisuus pesurissa laskee arviolta noin kuuden prosentin verran, jonka voidaan ajatella kondensoituvan. Näin pystytään määrittämään veden ominaishöyrystymisarvon avulla, kuinka paljon energiaa systeemiin saadaan kaavan 5 mukaisesti. Koska tarkempia tietoja vesihöyrystä ei ole tiedossa, tässä opinnäytetyössä vesihöyryn lämpöteho on määritetty vain sen luovuttamasta höyrystymislämpöenergiasta pesuriin.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot r \quad (6)$$

jossa

$m$  = vesihöyryn massavirta (savukaasun massavirta x vesihöyryn prosenttiosuus savukaasussa)

$r$  = veden höyrystymislämpö = 2257 kJ/kg

## 6 Savukaasupesurin energiataseet

### 6.1 Energiatase 32 %:n kuormassa

Koska 32 %:n kuormassa olosuhteet ovat sellaiset, ettei energiantuotanto ole suurta, käytetään laskelmissa kesäolosuhteiden mukaisia lämpötiloja. Kesäolosuhteet vaikuttavat lähinnä sisään menevien energiavirtojen lämpötiloihin, sillä kelien ollessa lämpimät, energiavirtojen lämpötilatkin kohoavat suuremmiksi. Luvuissa 5.1 ja 5.2 on avattu tarkemmin energiavirtojen laskukaavoja ja selvitetty niiden suuret, joten laskulausekkeet voidaan jokaiseen energiataseeseen kirjoittaa suoraan niin, että arvot ovat valmiiksi sijoitettuina. 32 %:n kattilakuormalla saatiin lämpötehoiksi seuraavat tulokset:

NaOH-virtaus lämpötilassa 50 °C:

$$\dot{Q}_{NaOH} = 0,0011 \text{ kg/s} \cdot 83,9 \text{ kJ/kg} = 0,09 \text{ kW}$$

Lisävesivirtaus lämpötilassa 15 °C:

$$\dot{Q}_{lisävesi} = 3 \text{ kg/s} \cdot 62,9 \text{ kJ/kg} = 189 \text{ kW}$$

Kaukolämpövirtaus sisään lämpötilassa 46 °C:

$$\dot{Q}_{KL\_sisään} = 49,2 \text{ kg/s} \cdot 192,6 \text{ kJ/kg} = 9477 \text{ kW}$$

Prosessivesivirtaus sisään lämpötilassa 60 °C:

$$\dot{Q}_{PV\_sisään} = 49,41 \text{ kg/s} \cdot 251,2 \text{ kJ/kg} = 12411 \text{ kW}$$

Savukaasuvirtaus sisään lämpötilassa 145 °C:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{SK\_sisään} &= 14,3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1,5 \text{ kg/m}^3 \cdot 159,5 \text{ kJ/kg} + 21,45 \text{ kg/s} \cdot 0,06 \\ &\quad \cdot 2257 \text{ kJ/kg} = 6326 \text{ kW} \end{aligned}$$

Lauhdevirtaus lämpötilassa 56 °C:

$$\dot{Q}_{lauhde} = 1,9 \text{ kg/s} \cdot 234,4 \text{ kJ/kg} = 446 \text{ kW}$$

Kaukolämpövirtaus ulos lämpötilassa 55 °C:

$$\dot{Q}_{KL\_ulos} = 49,2 \text{ kg/s} \cdot 230,3 \text{ kJ/kg} = 11329 \text{ kW}$$

Prosessivesivirtaus ulos lämpötilassa 60 °C:

$$\dot{Q}_{PV\_ulos} = 49,41 \text{ kg/s} \cdot 251,2 \text{ kJ/kg} = 12411 \text{ kW}$$

Savukaasuvirtaus ulos lämpötilassa 47 °C:

$$\dot{Q}_{SK\_ulos} = 14 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1,5 \text{ kg/m}^3 \cdot 51,7 \text{ kJ/kg} = 1086 \text{ kW}$$

Taulukossa 3 on esitetty energiavirrat sisään- ja ulosmenevien virtojen mukaisesti. Energiataseesta nähdään, että tase jää kolmen megawatin verran tasatilanteesta, jossa sisään- ja ulosmenevien virtojen summa on nolla. Laskelmien mukaan häviöte-



hoa syntyy siis 3,1 MW, joka poistuu savukaasupesurin systeemistä lauhteen tai savukaasujen mukana.

Taulukko 3. Savukaasupesurin energiatase 32 %:n kuormassa

<i>Virtaus</i>	<i>Sisään(MW)</i>	<i>Ulos(MW)</i>
<b>NaOH</b>	0,0001	
<b>Lisävesi</b>	0,2	
<b>KL-sisään</b>	9,5	
<b>PV-sisään</b>	12,4	
<b>SK-sisään</b>	6,3	
<b>Lauhde</b>		0,5
<b>KL-ulos</b>		11,3
<b>PV-ulos</b>		12,4
<b>SK-ulos</b>		1,1
<b>Yhteensä</b>	28,4	25,3

## 6.2 Energiatase 60 %:n kuormassa

Energiatase 60 %:n kattilakuormalla on vuoden normaalikuorman tase, joten laskenta kertoo kuinka hyvin savukaasupesuri käyttää tehonsa suurimman osan vuodesta. Tässä taseessa on kuitenkin huomioitu prosessivaihtimen energiavirratt, vaikka todellisuudessa vaihdin otetaan käyttöön vasta vuoden 2018 lopulla. Kattilakuormassa 60 % ja vuoden keskimääräisillä lämpötiloilla energiavirroista saatiin seuraavia tuloksia:

NaOH-virtaus lämpötilassa 50 °C:

$$\dot{Q}_{NaOH} = 0,0031 \text{ kg/s} \cdot 83,9 \text{ kJ/kg} = 0,26 \text{ kW}$$

Lisävesivirtaus lämpötilassa 10 °C:

$$\dot{Q}_{lisävesi} = 2,5 \text{ kg/s} \cdot 42 \text{ kJ/kg} = 105 \text{ kW}$$

Kaukolämpövirtaus sisään lämpötilassa 50 °C:

$$\dot{Q}_{KL\_sisään} = 49,2 \text{ kg/s} \cdot 210 \text{ kJ/kg} = 10332 \text{ kW}$$

Prosessivesivirtaus sisään lämpötilassa 30 °C:

$$\dot{Q}_{PV\_sisään} = 49,41 \text{ kg/s} \cdot 125,7 \text{ kJ/kg} = 6213 \text{ kW}$$

Savukaasuvirtaus sisään lämpötilassa 150 °C:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{SK\_sisään} &= 26,2 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1,5 \text{ kg/m}^3 \cdot 165 \text{ kJ/kg} + 39,3 \text{ kg/s} \cdot 0,06 \cdot 2257 \text{ kJ/kg} \\ &= 11807 \text{ kW} \end{aligned}$$

Lauhdevirtaus lämpötilassa 64,6 °C:

$$\dot{Q}_{lauhde} = 2,7 \text{ kg/s} \cdot 272,1 \text{ kJ/kg} = 735 \text{ kW}$$

Kaukolämpövirtaus ulos lämpötilassa 63 °C:

$$\dot{Q}_{KL\_ulos} = 49,2 \text{ kg/s} \cdot 259,6 \text{ kJ/kg} = 12770 \text{ kW}$$

Prosessivesivirtaus ulos lämpötilassa 60 °C:

$$\dot{Q}_{PV\_ulos} = 49,41 \text{ kg/s} \cdot 251,2 \text{ kJ/kg} = 12411 \text{ kW}$$

Savukaasuvirtaus ulos lämpötilassa 54 °C:

$$\dot{Q}_{SK\_ulos} = 26 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1,5 \text{ kg/m}^3 \cdot 59,4 \text{ kJ/kg} = 2317 \text{ kW}$$

Taulukosta 4 voidaan nähdä, että sisään- ja ulosmenevät virrat ovat melkein yhtä suuret. Laskennallisesti energiataaseessa häviöitä on vain 0,3 MW, joka voidaan kat-

soa olevan savukaasupesurin normaali lämpöhäviö. Tässä kuormitusasteessa pesurin lämpökapasiteetti olisi hyvin hyödynnetty.

Taulukko 4. Savukaasupesurin energiatase 60 %:n kuormassa

<i>Virtaus</i>	<i>Sisään(MW)</i>	<i>Ulos(MW)</i>
<b>NaOH</b>	0,0003	
<b>Lisävesi</b>	0,1	
<b>KL-sisään</b>	10,3	
<b>PV-sisään</b>	6,2	
<b>SK-sisään</b>	11,8	
<b>Lauhde</b>		0,7
<b>KL-ulos</b>		12,8
<b>PV-ulos</b>		12,4
<b>SK-ulos</b>		2,3
<b>Yhteensä</b>	28,5	28,2

### 6.3 Energiatase 60 %:n kuormassa ilman PV-lämmönvaihdinta

Koska prosessiveden lämmönvaihdin otetaan käyttöön aikaisintaan vuoden 2018 lopussa, on myös hyvä kartoittaa energiatase siltä ajalta, kun jäähdystystehoa vaihtimesta ei saada. Tässä taseessa ei siis oteta huomioon prosessiveden energiavirtoja, mutta se on muuten samanlainen kuin luvun 6.2 tase. Tästä syystä lähtöarvoja ja tarkempia laskutoimituksia ei tähän lukuun olla eritelty.

Taulukossa 5 on esitetty energiavirrat, sekä niiden summat. Sisään menevien virtojen summa on 6,4 MW suurempi kuin ulosmenevien virtojen summa, joten pesurista voitaisiin saada vielä tämän verran hyötykäyttöön energiaa. Todellisuudessa kuitenkin pesurissa tapahtuneiden häviöiden vuoksi ei koko lämpötehoa saataisi hyödynnettyä.

Taulukko 5. Savukaasupesurin energiatase 60 %:n kuormassa ilman PV-vaihdinta

<i>Virtaus</i>	<i>Sisään(MW)</i>	<i>Ulos(MW)</i>
<b>NaOH</b>	0,0003	
<b>Lisävesi</b>	0,1	
<b>KL-sisään</b>	10,3	
<b>SK-sisään</b>	11,8	
<b>Lauhde</b>		0,7
<b>KL-ulos</b>		12,8
<b>SK-ulos</b>		2,3
<b>Yhteensä</b>	22,2	15,8

#### 6.4 Energiatase 100 %:n kuormassa

100 %:n kattilakuorma on käytössä talviaikaan, kun energiantarve on suurimmillaan ja kelit kylmimmillään. Kattilan ollessa suhteellisen suuri Mäntän Energian normaali-käyttöön, tullaan 100 % kuormalla tuottamaan pesurista varmasti enemmän tehoa kuin mihin se on suunniteltu. 100 %:n energiataseen energiavirtojen suuruudeksi saatiin:

NaOH-virtaus lämpötilassa 50 °C:

$$\dot{Q}_{NaOH} = 0,0064 \text{ kg/s} \cdot 83,9 \text{ kJ/kg} = 0,54 \text{ kW}$$

Lisävesivirtaus lämpötilassa 5 °C:

$$\dot{Q}_{lisävesi} = 2 \text{ kg/s} \cdot 21 \text{ kJ/kg} = 42 \text{ kW}$$

Kaukolämpövirtaus sisään lämpötilassa 49,2 °C:

$$\dot{Q}_{KL\_sisään} = 49,2 \text{ kg/s} \cdot 240 \text{ kJ/kg} = 11808 \text{ kW}$$

Prosessivesivirtaus sisään lämpötilassa 1 °C:

$$\dot{Q}_{PV\_sisään} = 49,41 \text{ kg/s} \cdot 4,2 \text{ kJ/kg} = 208 \text{ kW}$$

Savukaasuvirtaus sisään lämpötilassa 165 °C:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{SK\_sisään} &= 43 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1,5 \text{ kg/m}^3 \cdot 181,5 \text{ kJ/kg} + 64,5 \text{ kg/s} \cdot 0,06 \cdot 2257 \text{ kJ/kg} \\ &= 20441 \text{ kW} \end{aligned}$$

Lauhdevirtaus lämpötilassa 69 °C:

$$\dot{Q}_{lauhde} = 1,9 \text{ kg/s} \cdot 288,9 \text{ kJ/kg} = 549 \text{ kW}$$

Kaukolämpövirtaus ulos lämpötilassa 64,6 °C:

$$\dot{Q}_{KL\_ulos} = 49,2 \text{ kg/s} \cdot 272 \text{ kJ/kg} = 13388 \text{ kW}$$

Prosessivesivirtaus ulos lämpötilassa 31 °C:

$$\dot{Q}_{PV\_ulos} = 49,41 \text{ kg/s} \cdot 129,9 \text{ kJ/kg} = 6419 \text{ kW}$$

Savukaasuvirtaus ulos lämpötilassa 61 °C:

$$\dot{Q}_{SK\_ulos} = 42,1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \frac{1,5 \text{ kg}}{\text{m}^3} \cdot 67,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 4237 \text{ kW}$$

Taulukosta 6 nähdään taseen sisään- ja ulosmenevät virrat. Näiden ero on suhteellisen suuri, sillä pesurin potentiaalista jää käyttämättä 7,9 MW. Tämä selittyy luultavasti sillä, että pesurin lämmöntalteenottoja ei olla suunniteltu vastaanottavan sadan prosentin kattilakuormaa, sillä kattila on harvoin täydessä kuormassa. Tulokseen vaikuttaa myös se, että kaukolämpöpiirin paluuvesi kaupungin verkosta palaa kylmillä ilmoilla kuumempänä takaisin. Kattilatehon ollessa suurempi, kaupungin lämmön-

vaihtimet eivät pysty hyödyntämään kaikkea saamaansa lämpötehoa, jolloin paluu-  
lämpötila on normaalia korkeampi.

Taulukko 6. Savukaasupesurin energiatase 100 %:n kuormassa

<i>Virtaus</i>	<i>Sisään(MW)</i>	<i>Ulos(MW)</i>
<b>NaOH</b>	0,001	
<b>Lisävesi</b>	0,042	
<b>KL-sisään</b>	11,8	
<b>PV-sisään</b>	0,2	
<b>SK-sisään</b>	20,4	
<b>Lauhde</b>		0,5
<b>KL-ulos</b>		13,4
<b>PV-ulos</b>		6,4
<b>SK-ulos</b>		4,2
<b>Yhteensä</b>	32,5	24,6

## 6.5 Yhteenvedo taseista

Taulukkoon 7 koottiin kaikki taseet ja niiden tulokset. Tuloksista huomataan, että savukaasupesuri on suunniteltu pääsääntöisesti 60 % kuormalle, sillä siinä häviöitä tulee 0,2 MW, joka todellisuudessa voisi olla lämpöhäviöitä, joita pesurista ei saada hyödynnettyä.

Taulukko 7. Savukaasupesurin energiataseiden yhteenvedo

<i>Taseet</i>	<i>Sisään (MW)</i>	<i>Ulos (MW)</i>	<i>Yhteensä (MW)</i>
<b>Tase 100 %</b>	32,5	24,6	7,9
<b>Tase 60 %</b>	28,5	28,2	0,2
<b>Tase 60 % ilman vaihdinta</b>	22,2	15,8	6,4
<b>Tase 32 %</b>	28,4	25,3	3,1

Hukkatehoa syntyy 60 %:n kattilakuormasta suhteellisen paljon, jossa ei ole prosessi-  
vesivaihdinta mukana. Eli juuri pesurin käyttöönoton jälkeen, pesuri tulee hukka-  
maan potentiaalista lämpöenergiaa melkein seitsemän megawatin verran. Koska kat-

tilan kuormitusaste on useimmiten 60 %, olisi kuluja vuoksi kannattavampaa, jos pesuriin investoitaisiin jokin jäähdytysjärjestelmä hyötysuhteen, sekä pesurin jäähdytystarpeen vuoksi.

Suurin hukateho syntyy, kun kattilakuorma on 100 %. Tämä kuitenkin ollut niin oleellinen tarkastelun kohde, sillä kattilan kuorma on todella harvoin sadassa prosentissa. Tästä taseesta nähtiin hyvin se, millainen potentiaali pesurilla olisi kattilan täydessä kuormassa, ja paljon siitä saataisiin energiaa hyötykäyttöön.

32 %:n kuormaa, hukatehon määrä on sellainen, että sitä voitaisiin hyödyntää johonkin käyttökohteeseen. Kuorman ajomäärät ovat kuitenkin suhteellisen vähäisiä, jolloin parempi ratkaisu tässä jäähdyttämiseen voisi olla jokin kohde, mikä ei ole riippuvainen pesurin lämmöstä.

## **7 Pesuriveden jäähdytys**

Kuten luvuissa 5 ja 6 huomattiin, pesurille olisi hyvä saada lisää jäähdytystehoa, sillä pesurissa on potentiaalia enemmän kuin siitä tultaisiin hyötykäyttämään nykyisellä suunnitelmalla. Laskelmista selvisi jo ennakkoon aavistettu asia, eli se, kiertoveden lämpötila ei välttämättä kesäaikaan jäähdy tarvittavaa määrää pienen jäähdytystehon vuoksi. Lisäämällä jäähdytystehoa voitaisiin saada koko voimalaitosprosessin hyötysuhdetta kasvatettua. Jäähdytystehon tarvetta lisää myös se, että uusi prosessilämmönvaihdin ei tule käyttöön kuin aikaisintaan 2018 vuonna.

### **7.1 Lämmöntalteenotosta jäähdytystehoa**

Jäähdytystehon lisääminen mahdollistuisi ottamalla käyttöön kolmas lämmöntalteenottojärjestelmä pesurikiertoon. Lämmönvaihdin voitaisiin sijoittaa semmoiseen kohteeseen, johon ei välttämättä tarvitsisi siirtää lämpöä, jos teho saadaan kulutettua kahteen ensimmäiseen vaihtimeen. Näin ollen lämmöntalteenotto voitaisiin sijoittaa pesukierron siihen vaiheeseen, missä pesuliuos on palannut yhteen KL- ja PV-vaihtimilta. Näitä ennen pesuliuosputkistoon voisi sijoittaa lämpötila-anturin, josta

menisi tieto kolmannen lämmönvaihtimen säätöventtiilille. Lämpötilan informaatio aukaisisi linjan, ja pesuliuos pääsisi näin jäähtymään ennen pesuriin menoa.

## 7.2 Hyötysuhdetta kasvattavat jäähdytysvaihtoehdot

Mäntän Energian mielestä hyödyllinen käyttökohde kolmannelle lämmönvaihtimelle voisi olla esimerkiksi voimalaitoksen pihatien lämmitys. Tämä vaatisi uudelta lämmönvaihtimelta putkiston pihatien alle sekä putkireitin voimalaitokselta maan alle. Koska jäähdystystehoa tarvittaisiin pesurilta enemmän kesäaikaan, ei tämä vaihtoehto olisi hyödyllinen. Lisäksi tarvittavaa jäähdystystehoa ei saataisi pienen lämpötilaeron vuoksi maan ja kiertonesteen välillä. Talviaikaan tämä vaihtoehto voisi olla hyödyllinen ja pesuriliuosta saataisiin jäähtymään hyvin suuremman lämpötilaeron ansiosta.

Vaikka pesurissa on jo huomioitu Metsä Tissuen lämmöntarve prosessivesivaihtimella, voisi tehtaan puolelta löytyä teoreettisesti muita potentiaalisia kohteita joihin lämmön voisi mahdollisesti hyötykäyttää. Sopivia kohteita, joihin noin 60 asteen loppulämpötila kävisi, olisi muun muassa tehtaalla paperin valmistuksessa olevan massan käsittelyssä. Siinä vettä voitaisiin hyötykäyttää massan käsittelyn pulpperoitiveden lämmittämässä tai massan pesussa. Pehmopaperitehtaalla lämmitetään myös kuitujen pesuun käytettävää suihkuvettä, joka soveltuisi myös lämmityskohteeksi. Yksi kohde voisi tehtaan puolella olla myös prosessikemikaalien valmistusvesissä, joiden pitää olla lämmitettyjä. Pesurilta tulevaa 60 asteen loppulämpötilaa voitaisiin hyödyntää myös prosessi-ilmassa, Mäntän voimalaitoksella palamisilmassa, tai Tissuen puolella kuivatusprosessin ilmaesilämmittämisessä.

## 7.3 Jäähdytysvaihtoehdot ilman hyötysuhteen kasvamista

Muita jäähdytysvaihtoehtoja, joita pesureissa yleisesti käytetään, jos lämpöä jää yli, ovat laitoksen katolle sijoitettavat lauhduttimet. Niissä kiertoneste kuljetetaan katolle, jossa ulkoilmaa ohjataan ilma-vesivaihtimen läpi tehostetulla ilman kululla. Näin pesurista ei saada kuitenkaan hyötykäyttöön lämpöenergiaa, vaan tämä vaihtoehto



on täysin jäähdytyksen tehostamiseen tarkoitettu. Toinen vaihtoehto, josta ei saada pesurin lämpötehoa hyödyksi, on järvivesivaihtimet. Näissä idea on se, että järvivettä kierrätetään vaihtimessa, jolloin pesuriliuos saa varmasti ympärivuotisesti jäähdytystä. Tässä ratkaisussa huonona puolena on se, että järvivesi likaannuttaa vaihdinta, jolloin investointeihin pitäisi lisätä myös mekaaniset suodattimet järvivedelle. Tälle vaihtoehdona on kuitenkin se, että vaihtimelle voitaisiin rakentaa suljettu kierto toisipuolelle. Tämä tarkoittaa sitä, että putkisto kiertäisi vaihtimelta järviveteen vuoroin jäähdytysnesteen jäähtyen ja vuoroin lämmiten.

## 8 Pohdinta

### 8.1 Työn suoritus ja tulokset

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää savukaasupesurin eri kuormitusilanteiden energiataseita sekä pohtia mahdollisia jäähdytysvaihtoehtoja systeemiin. Tuloksena saatiin neljä erilaista tasetilannetta, joista ilmeni kuinka paljon missäkin kuormitusilanteessa lämpöä jää hyödyntämättä. Laskelmat koottiin yhteen Excel-tiedostoon, jossa jokaiselle energiavirralle luotiin laskukaava. Laskukaavat auttavat savukaasupesurin käyttöönoton jälkeen muuttamaan helposti ja nopeasti laskennalliset arvot todellisiin mittausravoihin.

Laskelmissa pyrittiin keskittymään kesätilanteen energiataseeseen, mutta tulokset selvensivät, ettei kesätilanne ole ainoa kuormitusaste, jossa pesurin lämpötehoa jää käyttämättä. Tuloksien perusteella Mäntän Energian olisi mahdollista pohtia savukaasupesurin systeemiin kolmannen lämmöntalteenoton käyttöönottoa. Savukaasupesuri tulee tarvitsemaan lisäjäähdytystä, jos siitä halutaan saada kaikki mahdollinen hyöty. Opinnäytetyön teoriapohjaa pesurista ja sen lämmönvaihtimista voidaan käyttää tiiviinä tietolähteenä systeemistä Mäntän Energian käyttöön.

Opinnäytetyön alussa aihe rajattiin sen verran selkeästi ja tarkasti, että työn teoriaosuuden kokoaminen ja tarvittavien käsitteiden käsitteleminen olivat selkeää. Näin saatiin kasattua toimeksiantajan toivoma teoriaisuus työn alkuun, joka selvensi opinnäytetyön laskelmien perusteita.

## 8.2 Luotettavuus

Lähtötietojen kerääminen työn laskelmiin oli haastavaa, sillä saatavilla oli vain teoreettisia lukuja ja arvoja. Tämän vuoksi laskennat eivät ole realistisia, mikä tietenkin vaikuttaa siihen, kuinka todenmukaisesti niitä voidaan analysoida. Kriittisyys tuloksia kohtaan tässä työssä pitää silti muistaa oleellisesti laskelmia tarkastellessa. Optimalisempi aika työlle olisi ollut pesurin juuri tultua käyttöön, mutta opinnäytetyön ajankohdan sijoittuessa keväälle, ei työtä voitu siirtää syksyille 2017. Realistisilla savukaaupesurin arvoilla oltaisiin päästy määrittämään eri kuormitusasteille tarkemmat taseet, joista oltaisiin voitu työssä arvioida jäähdystehon tarvetta ja kohdetta vielä tarkemmin. Kuitenkin teoreettinen pohja energiataseille tuo hyvän informaation hukkaenergian määrästä, sillä realistiset arvot laskelmissa olisivat hyvin todennäköisesti suuremmat kuin teoreettiset arvot. Tämä johtuu siitä, että teoreettisissa laskelmissa ei voida määrittää todellisia häviöitä joita pesurissa syntyy.

## 8.3 Jatkotutkimustarpeet

Koska työn päätarkoitus ei ollut tarkastella jäähdystysvaihtoehtoja tarkemmin, voisi tästä löytyä jatkotutkimuskohdetta, jos Mäntän Energia haluaa hyödyntää hukkaenergian pesurista. Varsinkin vuosille 2017 ja 2018 kun prosessivaihdin ei ole käytössä, olisi lisääntyvän lauhdevesimääränkin kannalta hyvä tutkia mahdollista jäähdystysvaihtoehtoa pesuriin. Vaihtoehtona tälle olisi asentaa prosessivaihtimeen väliaikaisesti jäähdystystehoa tuova putkisto, jos pesurin käyttöönoton jälkeen näyttää siltä, että lauhdetta syntyy liian paljon eikä pesurin hyötysuhde saavuta haluttua määrää.

## Lähteet

Appendix 1 Property tables and charts (SI units). N.d. Veden entalpia-arvotaulukko. Viitattu 20.3.2017

Erotusaste. 2014. Tieteen termipankin internetsivusto. Viitattu 15.3.2017.

<http://tieteentermipankki.fi/wiki/Nimitys:erotusaste>

Everything you need to know about heat exchangers. 2017. Artikkelin Mahan's thermal productsin sivuilla. Viitattu 20.3.2017. <http://mahans.com/everything-you-need-to-know-about-heat-exchangers/>

Gasketed plate heat exchangers. 2016. Esite lämmönvaihdintuotteista Funken sivuilla. Viitattu 15.3.2017. <http://www.funke.de/index.php/en-gb/produkte-en-gb/plattenwaermetauscher-en-gb/pwt-geschraubt-en-gb.html>

How do heat exchangers work. 2015. Artikkelin Mahan's thermal productsin sivuilla. Viitattu 20.3.2017. <http://mahans.com/how-do-heat-exchangers-work/>

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2004. Höyrykattilateknikka. Helsinki: Edita Prima.

Järvenreuna, J. 2014. Savukaasupesuri parantaa lämpöyhtiön kannattavuutta. Promaint -lehden artikkeli 21.10.2014. Viitattu 2.3.2017.

<http://promaintlehti.fi/Tuotantotehokkuuden-kehittaminen/Savukaasupesuri-parantaa-lampoyhtion-kannattavuutta>

K4-kattilan leijuarinan ja ilmajärjestelmän uusinta sekä savukaasun puhdistuslaitteisto. 2016. Tekninen erittely. Valmet Technologies Oy. Viitattu 14.3.2017. Sisäinen materiaali.

Kovanen, A. 2015. Kuitusaven hyödyntäminen energiantuotannossa. Opinnäytetyö. Savonia-ammattikorkeakoulu Viitattu 24.2.2017. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201503102975>

MEO esittelykalvot. 2013. Power point –esitys. Mäntän Energia. Viitattu 14.2.2017. Sisäinen materiaali.

Metsä Tissue kehittää Mäntän tehdasta. 2017. Lehdistötiedote. Metsä Tissue. Viitattu 7.4.2017.

<https://newsclient.omxgroup.com/cdsPublic/viewDisclosure.action?disclosureId=764927&lang=en>

Metsä Tissue Suomessa. N.d. Metsä Tissuen internetsivut. Viitattu 5.4.2017.

<http://www.metsatissue.com/en/AboutUs/Operations-in-Finland/Suomi/Pages/default.aspx>

Natriumhydroksidi. 2011. Käyttöturvallisuustiedote Viitattu 14.3.2017.

<http://kayttoturvallisuustiedotteet.tamro.fi/webktt/frmPDF.aspx?id=80908>

Päätös nro 75/2011/1. Aluehallintoviraston päätös koskien siistauslietteen polttoa Mäntässä. Viitattu 27.2.2017.

[http://www.avi.fi/documents/10191/56868/Issavi paatos 75 2011 1 2011 29 6.pdf](http://www.avi.fi/documents/10191/56868/Issavi_paatos_75_2011_1_2011_29_6.pdf)

Shell and tube heat exchangers. 2016. Esite lämmönvaihdintuotteista Funken sivuilla. Viitattu 17.3.2017. <http://www.funke.de/en-gb/produkte-en-gb/rohrbuendelwaermetauscher-en-gb.html>

Smolander, S. 2017. Product engineer. Valmet Technologies Oy. Haastattelu 14.2.2017.

# Liitteet

Liite 1. Veden entalpia-arvo taulukko (Appendix 1 Property tables and charts (SI units) N.d.)

914  
PROPERTY TABLES AND CHARTS

TABLE A-4

Saturated water—Temperature table

Temp., $T$ , °C	Sat. press., $P_{sat}$ , kPa	Specific volume, $m^3/kg$		Internal energy, $kJ/kg$			Enthalpy, $kJ/kg$			Entropy, $kJ/kg\cdot K$		
		Sat. liquid, $v_f$	Sat. vapor, $v_g$	Sat. liquid, $u_f$	Evap., $u_{fg}$	Sat. vapor, $u_g$	Sat. liquid, $h_f$	Evap., $h_{fg}$	Sat. vapor, $h_g$	Sat. liquid, $s_f$	Evap., $s_{fg}$	Sat. vapor, $s_g$
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302