

**Tulitorvikattilan savukaasujen  
lämmöntalteenoton hyödyntäminen  
kaukolämpöverkkoon  
pellettipölypoltossa**

Alexi Varis

Opinnäytetyö  
Tammikuu 2017  
Tekniikan ja liikenteen ala  
Insinööri (AMK), energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Varis, Aleksi	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Huhtikuu 2017
	Sivumäärä 114	Julkaisun kieli Suomi
		Verkkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi <b>Tulitorvikattilan savukaasujen lämmöntalteenoton hyödyntäminen kaukolämpöverkoon pellettipölypoltossa</b>		
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Kari Hytönen, Hannu Kivistö		
Toimeksiantaja(t) Elomatic Oy, Varkauden Aluelämpö Oy		
Tiivistelmä <p>Varkauden Aluelämpö Oy:llä tuli ajankohtaiseksi savukaasujen lämmöntalteenoton esisuunnittelu savukaasusuodattimissa havaittujen ongelmien myötä. Modernisoidun pellettipölytulitorvikattilan savukaasujen lämpötilojen on todettu olevan liian korkeita, mikä aiheuttaa kangasletkusuodattimien palamista. Rikkoutuessaan kangasletkusuodattimet tuottavat monenlaisia ongelmia, kuten käyttökatkoksia, lähialueiden likaantumista ja ylimääräisiä huoltokustannuksia. Ratkaisuksi Elomatic Oy:ltä pyydettiin pellettipölykattilan lämmöntalteenottojärjestelmän selvitystä.</p> <p>Opinnäytetyön tehtävänä oli esisuunnitella lämmöntalteenottojärjestelmä, jolla pystytään laskemaan savukaasujen lämpötiloja. Suunnittelu lämpötilojen määritys perustuu happokastepisteeseen, jolloin vältetään matalalämpötilakorrosio. Esisuunnittelun tavoitteena oli lähtötietojen laatiminen, tehopotentialin mitoitus, alustavat laitesijoituspiirustukset ja PI-kaavio sekä kannattavuustarkastelu. Kannattavuustarkastelu toteutettiin käyttämällä eri toimittajien budjettitarjouksia sekä Elomatic Oy:n kannattavuuslaskentaperiaatteita. Investointikannattavuutta tutkittiin takaisinmaksuajan sekä laitoksen kokonaishyötysuhteen avulla. Tavoitteena oli myös laskea tehopotentiali NTU-laskentamenetelmällä, jolla pystytään arvioimaan myös järjestelmän pinta-ala oletettujen lämmönsiirtymiskertoimien avulla sekä ilmaisemaan järjestelmän tehokkuuskerroin.</p> <p>Opinnäytetyön lähtötietoja kerättiin Varkauden Aluelämpö Oy:n käyttöraporteista, Stora Enson polttoaineanalyseista, Pöyry Finland Oy:n päästömittausraporteista sekä Varkauden Aluelämpö Oy:n sekä Elomatic Oy:n toimihenkilöiltä ja dokumenteista.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena saatiin Varkauden Aluelämpö Oy:lle esisuunniteltua lämmöntalteenottojärjestelmän lähtötiedot, toimittajat, kustannusarviot sekä investoinnin kannattavuustarkastelut.</p>		
Avainsanat ( <a href="#">asiasanat</a> ) Lämmöntalteenotto, pellettipöly, tulitorvikattila, kaukolämpö		
Muut tiedot Opinnäytetyö on osittain salattu, koska työssä käytettyjen materiaalien ja saatujen tuloksien julkittelu voivat aiheuttaa yrityksille tappioita ja aiheuttaa kilpailijoille taloudellisia etuja. Salassa pidettävyys perustuu lakiin (621/1999) 24 §, kohdat 17 ja 20.		

Author(s) Varis, Aleksi	Type of publication Bachelor's thesis	Date April 2017
		Language of publication: Finnish
	Number of pages 114	Permission for web publication: x
Title of publication <b>Utilizing flue gas heat recovery of a fire tube boiler to district heat network in pellet dust combustion</b>		
Degree programme Degree Programme in Energy Technology		
Supervisor(s) Hytönen Kari, Kivistö Hannu		
Assigned by Elomatic Oy, Varkauden Aluelämpö Oy		
Abstract  <p>It became current for Varkauden Aluelämpö Oy to account the pre-design heat recovery system because of the issues with the flue gas filters. Modernizing the pulverized pellet fire tube boiler has led to the increased temperatures, and this is known to burn the hose filters, which has in some cases resulted in problems such as unplanned downtimes, contaminating of surrounding areas and additional maintenance costs. To resolve this, Elomatic Oy was asked to provide a report statement on the heat recovery of the pellet dust boiler.</p> <p>The objective of this thesis was proposal of the pre-design heat recovery system, which will decrease the flue gas temperatures. The temperatures are determined using the acid dew point of the flue gas to avoid low temperature corrosion. The goal of the pre-design was to resolve the initial input data, calculate of the system potential, design the preliminary layout- and process drawings and investigate investment viability in terms of the suppliers' budget offers and viability calculation principles of Elomatic Oy. Investment viability was studied using the payback time and the total efficacy ratio of the boiler. An additional objective was to calculate the system capacity by using a NTU based calculation method, which can be used to estimate the heat transfer surface area through the heat transfer coefficient values and indicate the total efficiency of the system.</p> <p>The initial data for the thesis was collected from operational reports of Varkauden aluelämpö Oy, the pellet analysis by Stora Enso, the emission measurement analysis by Pöyry Finland Oy and from documents received from Varkauden Aluelämpö Oy and Elomatic Oy and their employees. As a result, a pre-designed heat recovery system for Varkauden aluelämpö Oy including systems input data, conceivable suppliers, estimation of the investment and investment viability investigation was achieved.</p>		
Keywords/tags ( <a href="#">subjects</a> ) Heat recovery, pellet dust, fire tube boiler, district heating		
Miscellaneous Parts of this thesis are redacted, because publishing the used materials or results may cause losses to the parties that supported its production. The materials and results can also provide un-wanted business advantages to business competitors if published publicly. The Redacting is based on the law (621/1999) 24 §, parts 17 and 20.		

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>8</b>
1.1	Tausta .....	8
1.2	Tavoitteet .....	10
1.3	Tutkimusasetelma ja rakenne .....	11
1.4	Rajaukset .....	12
1.5	Toteutus.....	13
<b>2</b>	<b>Toimeksiantajat.....</b>	<b>13</b>
2.1	Elomatic Oy.....	13
2.2	Varkauden Aluelämpö Oy.....	14
2.2.1	Yritystiedot .....	14
2.2.2	Varkauden kaukolämpöverkko.....	15
2.2.3	Riikinvoiman ekovoimalaitos.....	16
2.2.4	Stora Enso .....	17
2.2.5	Lämpökeskukset .....	18
<b>3</b>	<b>Laitosympäristön kuvaus .....</b>	<b>18</b>
3.1	Kaukolämpöverkosto.....	18
3.2	Hasintien lämpökeskus.....	20
3.3	Lämpökeskuksen pellettipölypolttomodernisointi .....	21
3.3.1	Tulitorvi-tuliputkikattila.....	22
3.3.2	Pellettiöljy-yhdistelmäpoltin .....	23
3.3.3	Kangassuodattimet.....	24
3.3.4	Pellettisiilot.....	26
3.3.5	Vasaramyllymurskain.....	27
3.3.6	Siirtimet ja puhaltimet.....	28
3.4	Puupelletti .....	29
3.4.1	Pölypoltto .....	31

3.4.2	Pelletin pölypoltto .....	32
<b>4</b>	<b>Projektinhoito .....</b>	<b>33</b>
4.1	Esisuunnittelun periaatteet.....	34
4.2	Ideointi ja toteutuskelpoisuus.....	34
4.3	Vaatimustenmäärittely.....	35
4.4	Projektisuunnittelu.....	36
4.5	Esisuunnittelun päättäminen .....	36
<b>5</b>	<b>Lämmönsiirtymisen perusteet .....</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>Putkivirtauksen perusteet.....</b>	<b>38</b>
6.1	Laminaarinen virtaus.....	39
6.2	Turbulenttinen virtaus.....	39
<b>7</b>	<b>Savukaasut .....</b>	<b>40</b>
7.1	Palamisen periaatteet .....	40
7.2	Savukaasujen määrittely.....	40
7.3	Savukaasujen koostuminen ja polttoaineanalyysi .....	42
7.4	Savukaasujen happo- ja vesikastepiste .....	43
7.5	Ilmakerroin .....	46
7.6	Ominaislämpökapasiteetti .....	46
7.7	Viskositeetti.....	47
7.8	Savukaasujen lämmönjohtavuus.....	48
7.9	Savukaasupäästöjen mittaaminen .....	48
<b>8</b>	<b>Lämmöntalteenoton periaatteet.....</b>	<b>49</b>
8.1	Ekonomaisier lämmönvaihdin.....	50
8.2	Savukaasupesuri.....	51
<b>9</b>	<b>Lämmöntalteenottojärjestelmän mitoitus.....</b>	<b>54</b>
9.1	Arviointimenetelmä NTU.....	54
9.1.1	Lämmönsiirtopotentiaali ja tehokkuus.....	54
9.1.2	Lämmönsiirtopinta-ala .....	56

9.2	Lämmönsiirtymiskerroin .....	57
<b>10</b>	<b>Lämmöntalteenottojärjestelmän esisuunnittelu .....</b>	<b>58</b>
10.1	Lähtötiedot ja toteutus .....	58
10.2	Polttoaineanalyysi .....	60
10.3	Savukaasulaskenta .....	60
10.3.1	Happokastepisteen määrittäminen.....	62
10.3.2	Savukaasun ominaislämpökapasiteetti .....	64
10.4	Lämpökapasiteetti.....	65
10.5	Lämmöntalteenottojärjestelmän lämmönsiirtopotentiaali ja tehokkuusluku .....	65
10.6	NTU-arvon määrittäminen .....	67
10.7	Lämmönsiirtymiskerroin .....	67
10.8	Arvioitu lämmönsiirtopinta-ala .....	67
10.9	Putkikoon valinta.....	68
10.10	Laitesijoituspiirustuksien ja PI-kaavioiden esisuunnittelu .....	69
<b>11</b>	<b>Kannattavuustarkastelu.....</b>	<b>70</b>
11.1	Takaisinmaksuajan periaatteet .....	70
11.2	Kustannustehokkuuden määritelmät ja toteutus .....	71
11.3	Investoinnin säästö- ja tuottopotentiaali.....	72
11.3.1	Polttoainesäästö .....	72
11.3.2	Savukaasusuodattimen tehostamissäästö .....	73
11.3.3	Kaukolämpöenergian tuotto .....	74
11.4	Lämmöntalteenottojärjestelmän kustannukset .....	75
11.5	Lämmöntalteenottojärjestelmän takaisinmaksuaika.....	76
11.6	Pellettipöly-tulitorvikattilan hyötysuhde .....	76
<b>12</b>	<b>Tulokset .....</b>	<b>79</b>
<b>13</b>	<b>Pohdinta.....</b>	<b>80</b>
13.1	Tuloksien arviointi ja kriittisyys .....	80

13.2 Tuloksien vertailu .....	82
13.3 Jatkotutkimustarkastelu .....	82
13.4 Loppusanat .....	83
<b>Lähteet .....</b>	<b>85</b>
<b>Liitteet .....</b>	<b>90</b>

## Kuviot

Kuvio 1. Varkauden Aluelämpö Oy:n kaukolämpöverkosto .....	16
Kuvio 2. Riikinvoiman Oy:n omistajayhteisöt ja omistusosuudet.....	17
Kuvio 3. Hasintien lämpökeskuksen toimintaperiaate .....	20
Kuvio 4. Tulitorvikattila- ja pellettipölyöljy-yhdistelmäpoltin.....	22
Kuvio 5. Kangasletkusuodatin .....	25
Kuvio 6. Suodatinelementti.....	26
Kuvio 7. Pellettisiilot.....	27
Kuvio 8. Seulalevy ja jauhattua pellettipölyä .....	28
Kuvio 9. Projektin eteneminen.....	34
Kuvio 10. Laminaarinen virtaus.....	39
Kuvio 11. Turbulenttinen virtaus.....	40
Kuvio 12. Happokastepistetaulukko savukaasun SO <sub>3</sub> -pitoisuuden ja kosteuden mukaan.....	45
Kuvio 13. Vastavirtalämmönvaihdin .....	49
Kuvio 14. Myötävirtalämmönvaihdin.....	50
Kuvio 15. Ristivirtalämmönvaihdin .....	50
Kuvio 16. Savukaasupesurin toimintaperiaate.....	53
Kuvio 17. Savukaasujen happokastepiste pellettipölypoltossa .....	63

## Taulukot

Taulukko 1. Ruuvien ja puhaltimien sähkömoottoritehot.....	29
Taulukko 2. Polttoaineiden happokastepistelämpötilat.....	44
Taulukko 3. Pöyry Finland Oy:n päästömittauksiin perustuvat lähtötiedot.....	59
Taulukko 4. Varkauden Aluelämpö Oy:n käyttöraporttiin perustuvat lähtötiedot .....	59
Taulukko 5. Pellettipöly polttoaineanalyysi .....	60
Taulukko 6. Savukaasukomponenttiosuudet pellettipölypoltossa.....	61
Taulukko 7. Savukaasukomponenttiosuudet pellettipölypoltossa ilmakertoimella....	62
Taulukko 8. Savukaasujen rikkidioksidi- ja rikkiatriksidipitoisuudet.....	63



Taulukko 9. Savukaasujen mitoitettu happokastepistelämpötila.....	64
Taulukko 10. Savukaasujen massaosuudet ja ominaislämpökapasiteetit .....	64
Taulukko 11. Savukaasujen mitoittava lämpökapasiteetti .....	65
Taulukko 12. Lämmöntalteenottojärjestelmän lämmönsiirtopotentiaali ja tehokkuusluku .....	66
Taulukko 13. Lämmöntalteenottojärjestelmän lämmönsiirtopinta-alat .....	67
Taulukko 14. Lämmöntalteenottojärjestelmän putkikoon vertailu.....	68
Taulukko 15. Takaisinmaksuajan tunnusluvut .....	70
Taulukko 16. Investoinnin polttoainesäästö .....	73
Taulukko 17. Investoinnin savukaasusuodattimen huoltovälin tehostamissäästö .....	74
Taulukko 18. Investoinnin kaukolämpöenergian tuotto.....	74
Taulukko 19. Yhteenveto kannattavuuslaskennoista .....	75
Taulukko 20. Investoinnin takaisinmaksuajat .....	76
Taulukko 21. Pellettipölylämpökeskuksen käyttöraporttitiedot .....	77

## **Liitteet**

Liite 1. Lähtötietoluettelo

Liite 2. Erilaatuisten pellettien ominaisuuksia

Liite 3. Projektkategoriat

Liite 4. Lämmöntalteenottojärjestelmän NTU-laskentakaaviot

Liite 5. Aineiden lämmönsiirtymiskertoimet

Liite 6. Likaantumisen aiheuttamat lämmönsiirtymiskertoimet

Liite 7. Kenno- ja putkilämmönvaihtimen kokonaislämmönsiirtymiskertoimet

Liite 8. Savukaasuanalyysi laskentatyökalu

Liite 9. Pöyry Finland Oy:n päästömittausraportti (osa 1)

Liite 10. Pöyry Finland Oy:n päästömittausraportti (osa 2)

Liite 11. Varkauden Aluelämpö Oy:n käyttöraportti

Liite 12. Stora Enson polttoaineanalyysi

Liite 13. Lämmöntalteenottojärjestelmän laskentatyökalu

Liite 14. Hasintien lämpökeskuksen 3D-piirustus

Liite 15. Hasintien lämpökeskuksen pohjapiirustus

Liite 16. Hasintien 3D-piirustus pohjainen laitesijoituspiirustus

Liite 17. Lämmöntalteenottojärjestelmän prosessi- ja instrumentointipiirustus

Liite 18. Lämmöntalteenottojärjestelmän kustannustehokkuuden yhteenveto (Osa 1/2)

Liite 19. Lämmöntalteenottojärjestelmän kustannustehokkuuden yhteenveto (Osa 2/2)

Liite 20. Toimittajan 1 budjettitarjous (Osa 1/2)

Liite 21. Toimittajan 1 budjettitarjous (Osa 2/2.)

Liite 22. Toimittajan 4 budjettitarjous (Osa 1/2)

Liite 23. Toimittajan 4 budjettitarjous (Osa 2/2)

Liite 24. Toimittajan 4 lämmönvaihdin (Osa 1/2)

Liite 25. Toimittajan 4 lämmönvaihdin (Osa 2/2)

# 1 Johdanto

Ilmastopäästöjen vähentämiseksi Suomi on sitoutunut noudattamaan EU:n yhteisiä tavoitteita vähentää kasvihuonepäästöjä 20 %, kasvattamaan uusiutuvan energian osuutta EU:n kokonaisenergiasta 20 %:iin ja saavuttamaan 20 %:n energiatehokkuustavoitteen vuoteen 2020 mennessä. Vuoteen 2030 mennessä tavoitteet nousevat 40 %:iin verrattuna vuoden 1990 päästöihin. Tällä hetkellä monet EU-maat, Suomi mukaan lukien, ovat jo saavuttaneet vuoden 2020 tavoitteet, mutta vuoden 2030 tavoitteet ovat merkittävästi tiukempia ja vaativat lisätoimia päästöjen alentamiseksi. (Suomi saavuttamassa vuoden 2020 päästötavoitteet - vuoden 2030 tavoite edellyttää paljon lisätoimia 2016.)

Tällä hetkellä kolme neljäsosaa kasvihuonepäästöistä syntyy energiantuotannosta ja käytöstä. Energiatehokkuus on tärkeässä osassa fossiilisten polttoaineiden käytön ja niistä johtuvien kasvihuonepäästöjen alentamisessa sekä niiden korvaamisessa uusiutuvilla energianlähteillä. Tavoitteiden saavuttamiseksi tehtyjen investointien, sekä niiden tarvitsemien rahoitusten ja markkinoinnin tulisi olla pitkällä aikavälillä liiketaloudellisesti kannattavia, jotta teoreettiset laskelmat olisivat käytännössä hyödyllisiä. (Huttunen 2017, 13 – 14.)

Suomen valtioneuvoston selonteossa kansallisesta energia- ja ilmastostrategiassa vuoteen 2030 on mm. mainittu kivihiilen käytöstä luopumisen vaikutuksesta hake- ja pellettikattiloiden lämmöntuotantoon ja sen vaikutusta työllisyysvaikutuksiin. (Huttunen 2017, 57.) Raskaan polttoöljyn käytöstä luopuminen ja modernisointi toisivat samankaltaisia etuja. Lisäksi voimassa olevien pellettikattiloiden optimoinnilla voidaan saavuttaa huomattavia säästöjä ja käytön parannuksia.

## 1.1 Tausta

Varkauden Aluelämpö Oy modernisoi Varkaudessa Hasintiellä sijaitsevan, raskaalla polttoöljyllä toimivan lämpökeskuksen vuonna 2015. Lämpökeskus toimii Varkaudessa kaukolämmön huippu- ja varatuotantolaitoksena tuottaen keskimäärin vuodessa 10 000 MWh lämpöä kaukolämpöverkoston. Lämpökeskuksessa toimivista kolmesta tulitorvikattilasta kaksi öljyteholtaan 6 ja 10 MW muutettiin pellettipölykäyttöiseksi

ja yksi (6 MW) kevytöljykäyttöiseksi. Modernisoinnin jälkeen tulitorvikattiloilla saavutettiin pellettipölypoltolla 4,2 MW:n ja 7 MW:n suunnittelutehot. (Onkalo 2015, 1.)

Modernisoinnin tuloksena kotimaisen uusiutuvan polttoaineen käytöllä saavutettiin huomattavat säästöt päästöissä sekä polttoaineen hankintakustannuksista. Lisäksi polttoaineen muutos pellettiin luo itäsuomalaiseen aluetalouteen kasvua. (Onkalo 2015, 1.)

Modernisoinnin jälkeisessä käytössä on kumminkin havaittu pienemmässä pellettipölytulitorvikattilassa savukaasujen korkeiden lämpötilojen vaikutus savukaasusuodatimeen. Liian korkeat lämpötilat tulitorvikattilan jälkeen vaurioittavat kangasletkusuodattimia, mikä aiheuttaa ennen aikaisia käyttökatkoksia, huoltokustannuksia sekä tuhkan leviämistä lähiympäristöön.

Syitä savukaasujen korkeisiin lämpötiloihin on monia. Ne ilmenivät, kun pellettiöljy-yhdistelmäpoltin vaihdettiin raskaan öljypolttimen tilalle pienemmässä tulitorvikattilassa. Verrattuna suurempaan tulitorvikattilaan pellettipöly palaa syvemmillä tulipesän perällä, mikä estää lämmön riittävän siirtymisen lämpöpintoihin ja jättää polttilan liian korkeaksi. Myöhäiseen palamiseen vaikuttavat pellettipölyn primäärinkantoilman tilavuusvirta, tulitorvikattilan kapeus ja yhdistelmäpoltinrunгон pituuden lyhyys. Kantoilman tilavuusvirta sekä tulitorvikattilan kapeus vaikuttavat pellettipölypoltossa syntyvien kuumien savukaasujen virtausnopeuteen ja yhdistelmäpoltinrunгон lyhyys syttymisen aiheuttaman liekin sijoittumiseen tulitorvikattilassa. Kantoilman virtaa ei pystytä vähentämään, koska se toimii samalla palamisilmana, jolloin se vaikuttaisi myös palamisen laatuun. Kantoilmavirtauksen alentuessa myöskään pellettipölyjärjestelmästä ei saada kaikkea potentiaalia hyödyksi. Lisäksi polttimen runkoa ei pystytä muuttamaan, koska lämpökeskuksen tilat ovat liian ahtaat. Myös kesällä 2015 tehtyjen päästömittauksien perusteella partikkelipitoisuus oli merkittävän korkea, mikä kertoo tulitorvikattilan toiminnan olevan epätasapainossa.

Lämpötilojen alentamiseksi on kaavailtu lämmöntalteenottoratkaisua kaukolämpöverkkoon. Näin voitaisiin huoltokustannuksien lisäksi parantaa lämpökeskuksen hyötysuhdetta ja kustannustehokkuutta sekä lisätä lähialueen siisteyttä ja Varkauden Aluelämpö Oy:n imagoa kaukolämmön tuottajana.

## 1.2 Tavoitteet

Opinnäytetyön ensisijaisena tavoitteena oli saada esisuunniteltua Varkauden Aluelämpö Oy:n tarpeeseen soveltuva lämmöntalteenottojärjestelmä, jolla pystyttäisiin laskemaan savukaasujen lämpötilaa tulitorvikattilan jälkeen. Savukaasujen lämpötila nousee joissain tapauksissa jopa yli 200 °C. Liika kuumuus polttaa reikiä savukaasujen kangasletkusuodattimiin. Jos savukaasusuodattimen rasiutus vähentyisi, saavutettaisiin huomattavia hyötyjä kuten:

- lämpökeskuksen keskeytymätön käyttö
- lähialueelle leviävän tuhkan väheneminen tuhkasuodattimen rikkoutuessa
- imagostatuksen kasvaminen
- huolto- ja polttokustannussäästöt.

Hyödyillä on pitkäaikaiset vaikutukset yritykselle niin kustannuksellisesti kuin imagolisesti. Huoltokustannukset ovat merkittäviä, koska suodattimen on havaittu vaurioituvan noin kolme kertaa useammin kuin isommassa, 7 MW kattilassa. Lisäksi huoltoseisokkien vähentyessä lämpökeskusta voidaan ajaa yhtäjaksoisesti, jolloin seisokin aikaista lämmöntuotantoa ei menetetä. Näiden lisäksi Varkauden Aluelämpö Oy:n imago lämmöntuottajana kasvaa entisestään, koska lähialueet eivät likaannu suodattimien rikkoutuessa. Kun imago paranee, sillä on pitkäaikaisia positiivisia seuraamuksia Varkauden Aluelämpö Oy:lle.

Työssä tavoitteena olevalla esisuunnittelulla on merkittävä rooli tulevaisuudessa ajankohtaiseksi tulevan lämmöntalteenottojärjestelmän investoinneissa. Esisuunnittelun tavoitteena oli määritellä lämmöntalteenoton lähtötiedot ja tehopotentiaali, laatia budjettitarjoukset, laitesijoituspiirustus sekä prosessi- ja instrumenttipiirustus sekä tutkia investoinnin kannattavuutta.

Tavoitteen saavuttamiseksi kohteessa tehtiin lämpötila-, virtaus- sekä polttoainetarcastelut, joiden perusteella laskettiin tarvittavat savukaasuanalyysit sekä lämmöntalteenottojärjestelmän mitoitus tiedot. Savukaasulaskelmiin kuului mm. savukaasujen happokastepisteen sekä ominaislämpökapasiteetin ja tiheyden määrittäminen. Lämpötila- ja virtausarvot saatiin Varkauden Aluelämpö Oy:ltä mittausdatana käyttöraportista ja

Pöyry Finland Oy:n teettämistä päästömittausraporteista. Polttoainetarkasteluissa käytettiin Stora Enson polttoaineanalyysseja.

Tavoitteena oli myös tarkastella esisuunnittelusta saatujen taustatietojen, laskelmien ja tulosten perusteella lämmöntalteenottojärjestelmän investoinnin kannattavuustehokkuutta. Kannattavuustehokkuutta tarkasteltiin takaisinmaksuajan avulla vertaamalla tulosta yritysten keskimääräisiin korollisiin vieraan pääoman takaisinmaksuajan tunnuslukuihin. Kannattavuustehokkuuden tavoitteena oli myös tarkastella lämpökeskuksen kokonaishyötysuhteen paranemista lämmöntalteenottojärjestelmän jälkeen.

Tämän tutkimustyön tavoitteena oli myös luoda käytännöllistä tietoa vastaavanlaisten pellettipölypoltto tulitorvikattiloiden savukaasujen hyödyntämiseen ja loppulämpötilojen hallintaan.

### 1.3 Tutkimusasetelma ja rakenne

Kanasen (2012, 42) mukaan: ”Kehittämistutkimus ei tuota pelkästään tekstejä vaan käytännössä toimivia ratkaisuja”. Tutkimustuloksena saadaan toimiva muuttunut ratkaisu, jota voidaan käyttää vastaavassa kontekstissa, mutta ei sellaisenaan vaan vaatii soveltamista.

Opinnäytetyössä tavoitteeksi määriteltiin savukaasujen korkeiden lämpötilojen hallinta tulitorvikattilan jälkeen kangasletkusuodattimien vaurioitumisen estämiseksi pellettipölypoltossa. Opinnäytetyö on kehittämistutkimus, jossa tutkittiin lämmöntalteenottojärjestelmän lähtökohtia esisuunnittelun näkökulmasta. Tutkimustuloksena saatiin esisuunniteltu lämmöntalteenottojärjestelmä.

Tutkimuksen aineistona käytettiin Varkauden Aluelämpö Oy:n käyttöraportteja, Pöyry Finland Oy:n päästömittausraportteja ja Stora Enson polttoaineanalyysseja. Lisäksi tehtiin savukaasu- ja lämpötekniisiä laskelmia.

Tässä kehittämistutkimuksessa keskityttiin tarkemmin pellettipölyllä toimivaan tulitorvikattilaan ja siihen esisuunniteltavaan lämmöntalteenottojärjestelmään. Lähde-  
materiaalina käytettiin Varkauden Aluelämpö Oy:n lämpökeskuksesta saatuja mate-

riaaleja sekä ulkomaalaisia ja kotimaisia julkaisuja, tutkimuksia, kirjallisuutta ja teorioita. Lisäksi käytettiin Elomatic Oy:n sisäisiä materiaaleja.

Työn rakenne perustuu kohteen tulitorvikattilatekniikan kuvaamiseen pellettipölypoltolla, esisuunnittelun havainnollistamiseen, lämpöoppi- ja savukaasuteoriaan ja lämmöntalteenottojärjestelmän lämpötekniiseen mitoitukseen sekä kannattavuusarviointiin. Lämpötekniisen mitoituksen tukena on lämmönsiirtymiseen liittyvien tärkeimpien tekijöiden kuvaaminen sekä polttoaine- sekä savukaasuanalysit lämmöntalteenottojärjestelmän mitoituksessa. Työssä myös kerrotaan matalalämpötilakorroosion merkitys lämmöntalteenottojärjestelmän esisuunnittelussa.

Tässä opinnäytetyössä käytettiin NTU-arviointimenetelmää, koska sillä pystyttiin lämmönsiirtopotentiaalin lisäksi määrittämään arvioitu lämmönsiirtopinta-ala. Lämmönsiirtopinta-alan arvioinnilla saadaan tietoa lämmöntalteenottojärjestelmän koosta. Pinta-alan lisäksi menetelmällä pystyttiin ilmaisemaan järjestelmän tehokkuutta vertaamalla maksimaalista ja todellista lämmönsiirtopotentiaalia.

#### 1.4 Rajaukset

Työ rajattiin Varkauden Aluelämpö Oy:n Hasintien lämpökeskuksen tulitorvikattilan mitoitukseen lämpötekniisin perustein, joista tehtiin laitesijoitus- sekä prosessi- ja instrumentointipiirustukset, budjettitarjoukset sekä kustannus- ja kannattavuusarviot. Lämpötekniisiin perusteisiin valittiin putkilämmönvaihtimiin liittyvät lämmönsiirtomenetelmät. Työssä ei tutkittu muita lämmöntalteenottojärjestelmiä, koska ensisijaisena tavoitteena oli lämpötilojen alentaminen riittävälle tasolle kangasletkusuodattimien kunnon turvaamiseksi mahdollisimman kustannustehokkaasti. Työssä on kuitenkin kerrottu savukaasupesurin toimintaperiaate järjestelmän selventämiseksi, koska nykyään savukaasupesurit ovat yhä yleisempiä. Putkilämmönvaihtimet ovat savukaasupesureita yksinkertaisempia järjestelmiä, jotka ovat helppoja ja kustannustehokkaita toteuttaa. Tämän vuoksi esim. savukaasupesurin suunnittelu ei ollut järkevää tämän koko luokan laitoksissa. Savukaasupesuria suunnitellessa täytyy myös ottaa huomioon jäteveden käsittely, joka tuo lisää käyttökustannuksia. Lisäksi pellettipölyn polttamisessa syntyvät savukaasut ovat kuivia, mikä aiheuttaa savukaasupesurin hyödyn alenemisen.

Työn ulkopuolelle jätettiin mahdolliset rakennus-, automaatio- ja LVI-esisuunnittelu sekä tarkemmat painelaitekohtaiset laskelmat. Työstä rajattiin myös savukaasupuhaltimen kustannuslaskenta, koska puhaltimelle todettiin tehtäväksi tehoarviointi käyttöönotossa.

## 1.5 Toteutus

Työ toteutettiin yhteistyössä toimeksiantajan, Elomatic Oy:n, sekä asiakkaan, Varkauden Aluelämpö Oy:n kanssa. Elomatic Oy toimi työssä konsulttitoimistona, jossa mitoitus-, laitesijoitus-, prosessi- ja projektinhoitosuunnittelusta toteutui.

Varkauden Aluelämpö Oy:n kanssa yhteistyössä selvitettiin lähtötiedot tarvittavia lämpötekniisiä laskentoja varten. Työn aikana käytiin kohteessa Varkaudessa tekevässä lähtötietojen keräämistä, mitä varten luotiin lähtötietoluettelo, jolla keräysprosessia pystyttiin nopeuttamaan ja selkeyttämään. Lähtötietoluetteloon kuului savukaasun sekä kaukolämpöverkon lämpötila- ja virtausmittaukset. Lähtötietoluetteloa voidaan tarkastella liitteestä 1. Lähtötietojen lisäksi Stora Ensolta saatiin polttoaineanalyysit, jonka perusteella tehtiin savukaasulaskelmat.

Mittaustiedot laitesijoitussuunnitteluun saatiin Varkauden Aluelämpö Oy:n modernisointiprojektin pohjalta tehdyistä pohjapiirustuksista sekä erikseen Hasintien lämpökeskuksella suoritetuista mittauksista. Varkauden Aluelämpö Oy:n tiloissa myös perehdyttiin prosessiin liittyviin asioihin, kuten pellettipölylaitteistoon sekä poltin- ja suodatintekniikkaan pellettipölypoltossa. Varkaudessa tehtyjen lähtötietojen keräämisen aikana saatiin myös merkittävää tietoa liittyen lämmöntalteenottojärjestelmän mitoitukseen esim. happokastepisteestä.

## 2 Toimeksiantajat

### 2.1 Elomatic Oy

Ari Elo perusti Elomatic Oy:n vuonna 1970. Tämän jälkeen yhtiö on monialaistunut ja kasvanut tasaisesti nykypäivään asti. Elomaticin erikoisosaamiseen kuuluvat elintarviketeollisuus, kemiallinen teollisuus, paperiteollisuus, laivateollisuus, mekaaninen teollisuus sekä bio- ja lääketeollisuus. (Elomatic Lyhyesti N.d.)



Elomatic Oy tarjoaa asiakkailleen monipuolista osaamista, kuten suunnittelu-, tekninen konsultointi-, ja projektinhallintapalveluja sekä tuotekehityspalveluja kuten ohjelmistonkehitystä. Yrityksellä on kokemusta tuotteiden ja kokonaisratkaisujen tuottamisesta julkisen sektorin organisaatioille ja teollisuusyrityksille. (Brink 2016, 8.)

Yhtiön pääkonttori sijaitsee Turussa, mutta toimipisteitä on laajasti Suomessa sekä Puolassa, Hollannissa, Intiassa, Kiinassa, Serbiassa, Venäjällä, Italiassa ja Yhdistyneissä Arabiemiirikunnissa, joissa toimii yhteensä noin 800 toimihenkilöä. (Elomatic Lyhyesti N.d.) Konsernin liikevaihto vuonna 2016 oli yrityksen historian suurin 55 milj. euroa (Elomaticin liikevaihto 55 miljoonaan euroon 2017).

Elomaticin energiaorganisaatio suunnittelee ja konsultoi energiantuotantoon ja jakeluun, polttoaineen jalostukseen sekä energiatehokkuuteen liittyvissä tehtävissä. Jyväskylän toimipisteen energiaosastolla työskentelee yhteensä 35 suunnittelijaa. (Brink 2016, 26–27.) Erytisoaaminen jakaantuu seuraaviin alueisiin:

- energiakonsultointi
- tuotantolaitosten suunnittelu (voimalaitokset ja lämpökeskukset)
- lämmöntalteenottojärjestelmät
- energiatehokkuus
- energiantuotanto
- energianjakelu
- biopolttoaineet.

## 2.2 Varkauden Aluelämpö Oy

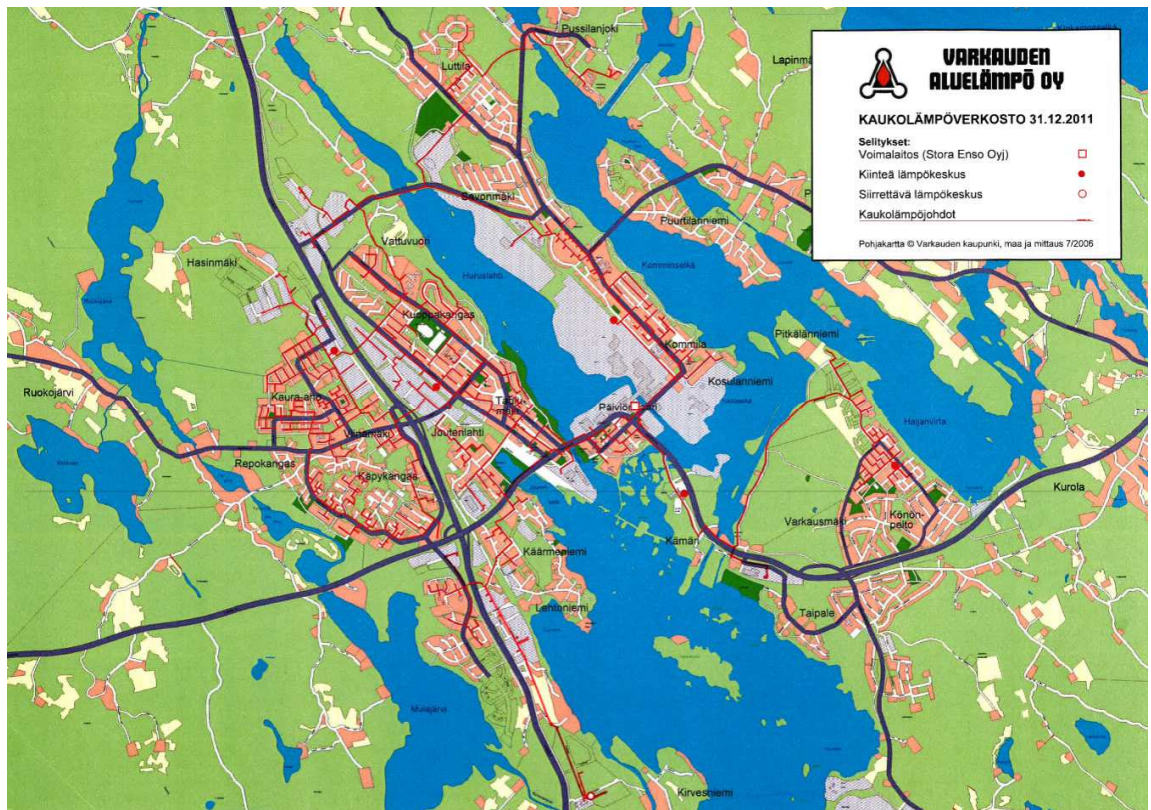
### 2.2.1 Yritystiedot

Varkauden Aluelämpö Oy on vuonna 1976 perustettu kaukolämpöä tuottava ja jakava osakeyhtiö, jonka omistajia ovat Varkauden kaupunki 80,1 %:lla ja Savon Voima Oyj 19,9 %:lla. Yhtiöllä on osaamista energiatehokkuuden, lämpimän veden ja kiinteistöjen lämmityksen projekteissa sekä teollisuuden ja palveluiden kohteista asumiseen liittyviin kiinteistöihin. (Varkauden Aluelämmön hallinto N.d.) Vuonna 2015 yrityksen liikevaihto oli n. 10 milj. euroa, mikä on pysynyt hyvin samana viimeiset vuodet (Hallituksen toimintakertomus 2016).

Varkauden Aluelämpö Oy tuottaa vuosittain n. 180 GWh kaukolämpöä monipuolisesti ensisijaisesti vuonna 2016 valmistuneella Riikinvoiman ekovoimalaitoksella sekä omilla lämpölaitoksilla ja tarvittaessa Stora Enson laitoksien hukkalämmöllä. Riikinvoiman ekovoimalaitoksella yhtiö pystyy tuottamaan jopa merkittävän 80 % osuuden kokonaislämmöntuotannosta. Jäljelle jäävä 20 % lämmöstä tuotetaan Varkauden Aluelämpö Oy:n omilla lämpökeskuksilla, joista 10 %: lämmöstä on tuotettu pellettipölyllä. Kokonaisuudessaan energia tuotetaan ympäristöystävällisesti, sillä vuonna 2016 Varkauden Aluelämpö Oy:n kokonaistuotannosta 91,5 % oli tuotettu uusiutuvalla energialla sekä hiilivapaasti 94,3 %. Yhtiön hiilijalanjälki oli CO<sup>2</sup>-päästöinä 54 g/kWh. Häätätilanteiden varalle Varkauden Aluelämpö Oy:llä on myös kapasiteettia tuottaa varateholla kokonaistehon verran lämpöä. (Väänänen 2017.)

### 2.2.2 Varkauden kaukolämpöverkko

Varkauden Aluelämpö Oy omistaa maanalaisia kaukolämpökanavia yhteensä noin 120km. Rengasverkostoksi suunniteltu kaukolämpöverkko turvaa lämmön jakelun siirron häiriötilanteissa. (Maanalaiset kaukolämpökanavat ja niiden muutokset v. 2015 N.d.) Kaukolämpöverkkoon liittyneitä vuonna 2015 oli yhteensä 1413 kotitaloutta ja liitettyjen rakennuksien lämmitetty tilavuus yhteensä 4 763 000 m<sup>3</sup>. (Hallituksen toimintakertomus 2016.) Kuviosta 1 voidaan nähdä kaukolämpöverkosto Varkauden alueella, Stora Enson voimalaitos sekä lämpövoimalaitoksien sijainnit.



Kuvio 1. Varkauden Aluelämpö Oy:n kaukolämpöverkosto (Kaukolämpöverkkoon liittyminen 2016)

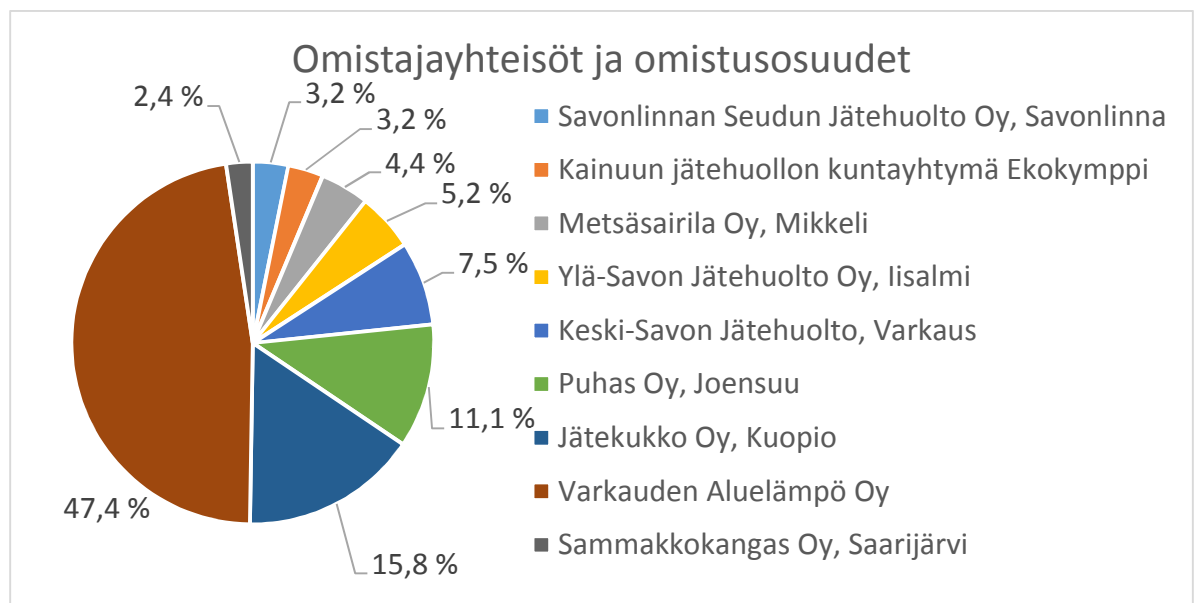
### 2.2.3 Riikinvoiman ekovoimalaitos

Vuonna 2016 valmistuneen ekolaitoksen ensisijaisena tarkoituksena on polttaa kainuulaisten sekä keski- ja itäsuomalaisien kierrätyskelvottomat yhdyskuntajätteet tuottaen kaukolämpöä Varkauden kaukolämpöverkkoon sekä sähköä valtakunnan sähköverkkoon. (KH 23.01.2017, § 24.)

Kiertopetiteknikkaan perustuva kattila polttaa laitokselle toimitetun ja lajitellun jätteen, josta on eroteltu esim. metallit ja ohjattu kierrätykseen. Ennen polttamista, jäte murskataan oikeaan palakokoon, mikä parantaa palamista. Muodostuvia päästöjä tarkkaillaan tarkasti, joista esim. syntyvä pohjatuuhka hyöty käytetään ja savukaasut puhdistetaan siten, että saavutetaan päästörajat ja vaatimukset jätteenpolttoasetukseen täytyvät. Savukaasujen puhdistuksen lopputuote myös käsitellään ja loppusijoitetaan ympäristöstävällisesti. (Riikinvoima Ekovoimalaitos esite 2016, 3.)

Ennen luovutusta vuonna 2017 kokonaiskustannuksiltaan arviolta 123,3 milj. euroa maksanut ekolaitos tuottaa 54 MW:n polttoainetehon hävittäen 145 000 tonnia jä-tettä vuosittain (Väänänen 2017). Laitos tuottaa yhteensä 180 GWh kaukolämpöä ja 90 GWh sähköä vuodessa, mikä on merkittävä osa Varkauden Aluelämpö Oy:n kauko-lämmöstä sekä sähköstä. (Riikinvoiman ekovoimalaitos N.d, 2.)

Riikinvoima Oy on mankala-periaatteella toimiva vuonna 2012 perustettu yhtiö ja sen omistajina toimivat kahdeksan kunnallista jätehuoltoyhtiötä eri maakunnista sekä Varkauden Aluelämpö Oy. Alla olevasta kuvaajasta 2 voidaan havaita Riikinvoima Oy:n omistusosuudet. (KH 23.01.2017, § 24.)



Kuvio 2. Riikinvoiman Oy:n omistajayhteisöt ja omistusosuudet (KH 23.01.2017).

#### 2.2.4 Stora Enso

Stora Enso on maailmanlaajuinen pakkausmateriaalien, biomateriaalien, puutuotteiden ja paperin tarjoaja. Yhtiöllä toimii noin 26 000 työntekijää yli 35 maassa ja liikevaihto vuonna 2015 oli 10 miljardia euroa. (Stora Enso lyhyesti N.d.)

Varkauden hyödyntämä lämpöenergia tuotetaan pääsääntöisesti tehtailla paikalla olevissa voimalaitoskattiloissa. Voimalaitoskattilat käyttävät polttoaineena

puun kuorta tai muita puusta saatavia biopolttoaineita, jotka jäävät prosesseissa ylimääräiseksi. (Stora Enso Varkaus N.d.)

Riikinvoima Oy:n ekovoimalaitoksen valmistuessa Varkauden hankkima Stora Enson kaukolämmön tuotanto siirtyy pääsääntöisesti Riikinvoiman jätteenpolttolaitokselle. Valmistumisen jälkeen kulutushuippujen kattaminen perustuu Varkauden Aluelämpö Oy:n ja Stora Enson välillä olevaan energiaostosopimukseen, joka ei kuitenkaan velvoita lämpöenergian ostamiseen (Laitinen. 2014. & Väänänen 2017).

### 2.2.5 Lämpökeskukset

Yhteensä Varkauden Aluelämpö Oy omistaa seitsemän lämpökeskusta; Hasintien-, Haijanvirran-, Hevosharjun-, Kuoppakankaan-, Metallikadun-, Kämärin-, ja Haijanvirranlämpökeskukset. (Lämpökeskukset N.d.) Yksittäisten lämpökeskuskattiloiden tehot vaihtelevat Metallikadun 1,2 MW:sta Hasintien 11,2 MW:iin, joista yksittäisten lämpökeskusten kattiloiden öljykäytöllä voidaan päästä jopa 22 MW:n yhteistehoon. (Väänänen 2017).

Lämpökeskukset ovat huippu- ja varalämpökeskuksia kovilla pakkasilla ja varatehona esim. huoltoseisokeissa tai hätätilanteissa. Lämpökeskukset ovat suunniteltu siten, että pellettipölykäyttöisiä kattiloita käytetään tarvittaessa täydellä teholla ja verkoon tuotettua lämpöenergiaa säädellään rinnalla olevilla Riikinvoiman, Stora Enson tai omalla tuotannolla. (Väänänen 2017.)

## 3 Laitosympäristön kuvaus

### 3.1 Kaukolämpöverkosto

Kaukolämpö koostuu lämmöntuottajista, kaukolämpöverkosta ja lämmön kuluttajista eli asiakkaista. Kaukolämpöä tuotetaan yhteistuotantovoimalaitoksissa (CHP) tai pelkästään lämpönä lämpökeskuksissa, joista se siirretään asiakkaille kaksiputkisessa (meno- ja paluuputki) kaukolämpöverkossa. (Nuutinen 2016.)

Asiakkailla olevassa lämmönsiirtimessä menoputkessa kulkeva vesi luovuttaa lämpö-energiansa, minkä jälkeen se palautuu takaisin laitokselle. Näin ollen kaukolämpövesi kulkee täysin erillään asiakkaan lämmitysverkosta. Kaukolämpöverkossa kulkevan menoveden lämpötila vaihtelee ulkolämpötilasta riippuen n. 65 °C – 115 °C välillä. Palaavan jäähtyneen kaukolämpöveden lämpötila vaihtelee 40 °C – 60 °C. (Kaukolämpöverkko N.d.)

Virtaaman aikaansaamiseksi täytyy verkostoon luoda riittävä paine-ero, joka tuotetaan lämpölaitoksien pumpuilla meno- ja paluuv veden välillä. Paine-ero normaaleissa käyttöolosuhteissa on vähintään 60 kPa (0,6 bar), mikä takaa asiakkaiden toimintavarmuuden kaukolämpölaitteille. Kaukolämpöverkon paine voi vaihdella jatkuvasti esim. vuodenajan mukaan. Paine voi korkeimmillaan ylittää noin 1,5 MPa. (15 bar). (Kaukolämpöverkko N.d.) Varkauden Aluelämpö Oy:n kaukolämpöverkosto on mitoitettu 1,6 MPa (16 bar), mutta teholtaan rajoitettu 1 MPa:iin (10 bar) kattiloiden turvaamiseksi (Väänänen 2017).

Lämmöntuotanto tapahtuu paikkakuntakohtaisesti erilaisilla polttoaineilla. Polttoaineita voivat olla mm. puu, puutähteet, pelletti, turve, maakaasu, hiili, tai öljyn eri muodot. Puun osuus kaukolämmön tuotannosta on Suomessa yhteensä noin 29%, johon on myös laskettuna pelletti.

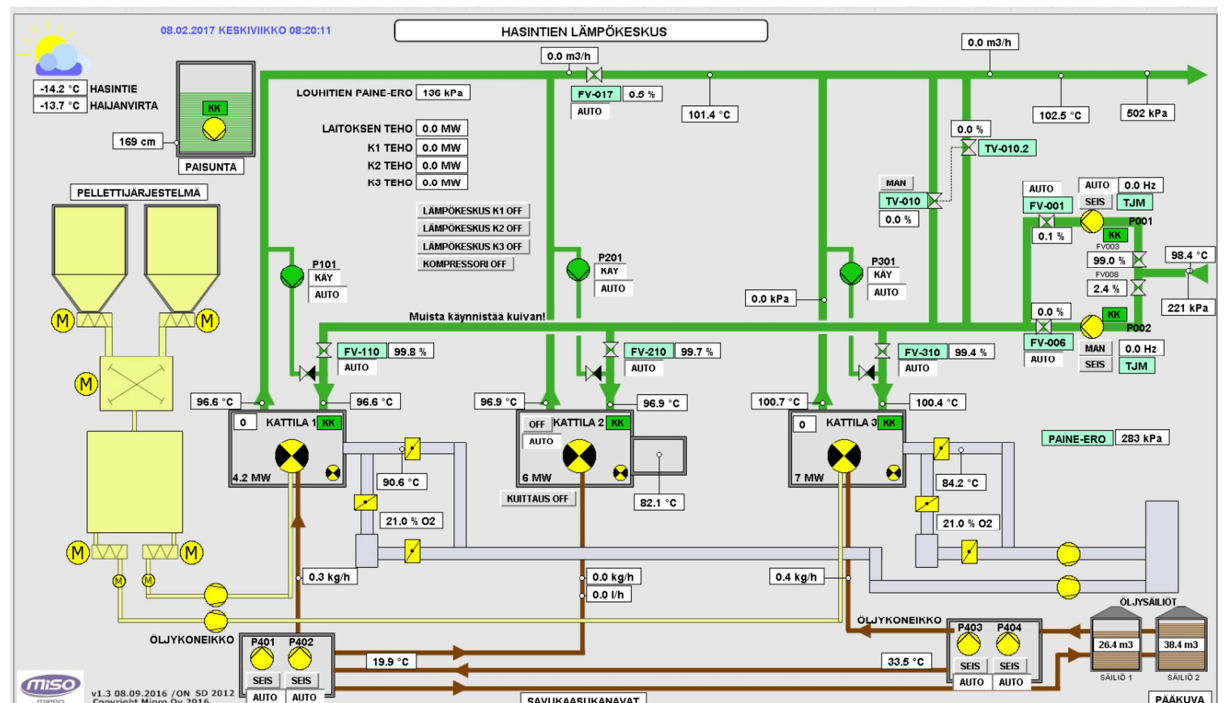
Polttoainetta valittaessa otetaan huomioon ympäristöystävällisyys ja taloudellisuus, joihin vaikuttaa oleellisesti laitoksen käyttötunnit. Käyttötuntien lisääntyessä pystytään mm. investoimaan polttoaineen käsittelyyn, joissa voidaan hyödyntää erilaisia seuloja, erottimia ja kuljettimia. Polttoaineina näissä tapauksissa käytetään yleisesti maakaasua, turvetta, hiiltä tai puuta. (Kaukolämmön tuotanto ja polttoaineet N.d.)

Vara- ja huippulämpökeskuksissa käytetään taas polttoaineena yleensä öljyä helpon varastoimisominaisuuksiensa vuoksi. Laitoksien on oltava investointina halpoja, mutta kumminkin toimintavarmoja. Kaukolämpöverkoston käytetään myös hyödyksi teollisuuden ylijäämälämpöä. Vuonna 2015 Kaukolämmöntuotanto vuonna 2015 oli yhteensä 33 TWh, joka koostuu yhteistuotantolaitoksien 24,42 TWh:sta (74%) ja lämpökeskuksien 10,28 TWh:sta (26%). (Kaukolämmön tuotanto ja polttoaineet N.d.)

Suomessa on yhteensä n. 15000 km kaukolämpöverkkoa, jonka pituus kasvaa vuosittain n. 250-500 km. Suurin osa koostuu olemassa olevaan verkkoon tehdyillä liittymisillä sekä täydennysrakentamisilla, mutta myös vanhan verkon peruskorjauksia tehdään yhteensä n. 50-70 km vuodessa. Verkon lämpöjohdot ovat pääosin tehdasvalmistettuja kiinnivaahdotettuja teräksisiä uretaani eristettyjä, joissa on muovinen suojuori. Meno- ja paluuputki voidaan rakentaa joko erillisiin tai omiin suojuori ja eristyspaketteihin. Käyttöikä näille johdolle on n. 100 vuotta. (Kaukolämpöverkkoja lähes 15 000 km N.d.)

### 3.2 Hasintien lämpökeskus

Varkauden Aluelämpö Oy:n Hasintien lämpökeskus koostuu kahdesta yhdistelmäpellettipölyöljy tulitorvikattilasta sekä kevyestä polttoöljy tulitorvikattilasta. Yhdistelmäpellettipölyöljy tulitorvikattilat ovat jaettu suunnittelutehoiltaan 4,2 MW sekä 7 MW kattiloihin (mitattuna 4,8 MW ja 7,8 MW), joiden öljytehot yltyvät 6 MW:iin ja 10 MW:iin. Kevyen polttoöljy kattilan teho on 6MW. Kuviosta 3 pystytään havaitsemaan tarkempi kattiloiden toimintaperiaate.



Kuvio 3. Hasintien lämpökeskuksen toimintaperiaate

Kuviossa vihreällä värillä on kuvattu kaukolämpöverkon kytkentä kattiloihin, joita säädetään virtausventtiileillä sekä taajuusmuuttaja ohjatuilla kaukolämpöpumpuilla. Kattilaan menevän veden lämpötilaa sekä kaukolämmön menoveden lämpötilaa ohjataan myös omilla piireillään. Tällä tavoin pystytään kiertävän veden lämpötila pitämään optimaalisena.

Savukaasukanavia pystytään käyttämään kahdella eri tavalla ohjaamalla savukaasut kangasletkusuodattimien kautta tai ohittamalla ne. Ohjaukseen vaikuttaa savukaasujen lämpötila, koska lämpötilan ollessa liian korkea tai matala kangasletkusuodatinta ei pystytä käyttämään. Savukaasukanavia säädetään savukaasupelleillä sekä virtauksen määrää savukaasupuhaltimilla. Savukaasukanavat on esitetty kaaviossa harmaalla värillä.

Lämpökeskuksen polttoaineen syöttö on toteutettu kahdella eri tavalla, pellettipölyllä sekä kevyellä polttoöljyllä. Pellettipölyjärjestelmässä ensimmäisenä on pellettisiilot, joista pelletti siirtyy siirtoruuveilla murskaimelle. Murskaimen jälkeen pellettipöly siirtyy pölysiilon kautta siirtoruuvien ja puhaltimien avulla polttimille. Polttoaineen syöttö on esitetty keltaiselle (pellettipöly) ja ruskealla (kevyt öljy).

### 3.3 Lämpökeskuksen pellettipölypolttomodernisointi

Hasintien lämpökeskus modernisoitiin kolmesta raskaasta öljykäyttöisestä kattilasta kahteen yhdistelmä pellettipöly-öljykäyttöiseen, sekä yhteen kevyt öljy käyttöiseen kattilaan. Kaikki kolme ovat tulitorvikattiloita, jotka toimivat kaukolämmön huippu- ja varatuotantolaitoksina. Keskimääräinen lämmöntuotanto on ollut noin 14 GWh vuodessa raskaalla polttoöljyllä. Tulevaisuudessa kattiloiden käytön on oletettu olevan noin 10 GWh. (Onkalo 2015.)

Investointiin päädyttiin uusiutuvan ja kotimaisen polttoaineen poltolla saavutettavien kustannussäästöjen vuoksi. Huomattavia eroja saatiin myös ympäristöpäästöissä sekä modernisointi siirsi polttoaineen hankinta kustannukset Itä-Suomen aluetalouteen Kiteelle. (Onkalo 2015.)



### 3.3.1 Tulitorvi-tuliputkikattila

Tulitorvi-tuliputkikattilat ovat suurvesikattiloita, joissa kattilan vesitila on nimensä mukaan suuri verrattuna vesiputkikattiloihin. Tuliputkien ja tulitorvien ulkopintaa peittää kokonaisuudessa vesi, jota tulitorvessa ja tuliputkissa virtaava savukaasu lämmittää. Kattilan tarpeesta ja rakenteesta riippuen vesi joko lämmitetään tai höyrytetään. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2004, 112.)

Tulitorvikattiloissa polttoaine palaa tulitorvessa, minkä jälkeen kuumat savukaasut virtaavat kääntökammion kautta tuliputkiin. Kolmivetoisen kattilan rakenteessa on toinenkin kääntökammio kattilan etupäässä, polttimen yläpuolella. Lopuksi savukaasut virtaavat kattilan perästä mahdollisen syöttöveden esilämmittimen lävitse savukaasusuodattimelle ja savupiippuun. Tulitorvi on vesitilassa alimmaisena ja tuliputket ovat niiden yläpuolella. Tulitorvikattiloita on myös vesiputkirakenteisia, niissä virtaava vesi kulkee putkissa vesitilan sijaan. Tämän kaltainen rakenne on järkevää paineen kasvaessa 20 bar suuremmaksi, jolloin tarvittaisiin tulitorvissa ja painekuorissa paksut seinämät. Tuliputkikattiloiden tehoalue jää myös alle 12 MW:n. (Huhtinen ym. 2004, 112.) Kuviossa 4 on Hasintien Witermo Rauma Repola Oy:n toimittama tulitorvikattila, johon on asennettu pellettipölyöljy-yhdistelmäpoltin.



Kuvio 4. Tulitorvikattila- ja pellettipölyöljy-yhdistelmäpoltin

Tulitorvikattiloiden valmistukseen on myös laadittu standardi (SFS-EN 12953-2 2002.), jossa esitetään tarvittavat vaatimukset tulitorvikattiloiden ja niiden varusteiden sisä- tai ulkopuolisen paineen kuormittamisessa osissa ja paineenalaisiin osiin liittyvissä osissa käytettäville materiaaleille. Standardissa käydään lävitse putket ja putkista muovatut osat, takeet ja valut, hitsausaineet, kiinnittimet ja levytuotteet sekä levytuotteista muovatut osat esim. tuliputket, muovatut päädyt ja ulkovaipat. (SFS-EN 12953-2, 2012.)

### 3.3.2 Pellettiöljy-yhdistelmäpoltin

Hasintien pellettipölylämpökeskuksessa on kahden eri tehoalueen pellettipölyöljy-yhdistelmäpoltinta. Suurempi EBDL-1100FT sekä pienempi EBDL-500FT ovat molemmat tulitorvikattiloihin soveltuvia polttimia. Polttimien lisäksi kokoonpanoon liittyy olennaisesti palamisilmanpuhallin, taajuusmuuttaja, automaatiojärjestelmä, venttiiliryhvät sekä erilaiset mittaukset ja toimilaitteet palamisilmalle ja polttoaineille. Polttimen runkomateriaali on normaaliterästä. Tämän työn esisuunnittelussa perehdyttiin tarkemmin pienemmän EBDL-500FT:n toimintaan. (Yhdistelmäpoltin EBDL-500 FT 2015.)

Yhdistelmäpolttimen palamisilma jaetaan kahteen virtaukseen, primääri- sekä sekundääri-ilmaan. Primääri-ilman pääasiallisena tarkoituksena on toimia palamisilmana ja liekin sydänilmana. Kevyt öljy hajotetaan paineilman avulla öljylanssissa, josta se johdetaan suuttimella. Suuttimessa kevyt öljy sytytetään riittävän suurella jännitteellä suurtaajuuskipinän avulla. (Yhdistelmäpoltin EBDL-500 FT 2015.)

Sekundääri-ilman tarkoituksena on sekoittua pellettipölyn kanssa tasaiseksi polttoaine-ilmaseokseksi vakaan ja hyvän palamisen saavuttamiseksi. Pellettipölyn sytyttämiseksi on polttimessa pölylanssi, jossa on massattu teräskartio. Teräskartiolla saavutetaan liekin stabiloituminen ja riittävän korkea lämpötila pölyn syttymiseksi. (Yhdistelmäpoltin EBDL-500 FT 2015.)

Primääri- ja sekundääri-ilmojen säätö toteutetaan palamisilmapeltiä säätämällä öljy sekä pellettitehon mukaan. Palamisilmapellinsäätö on varustettu erilaisilla pneu-

maattisilla toimilaitteilla. Palamisilma tuodaan polttimelle taajuusmuuttajaohjatulla palamisilmapuhaltimella. (Yhdistelmäpoltin EBDL-500 FT 2015.)

### 3.3.3 Kangassuodattimet

Kangassuodattimien toimintaperiaate perustuu pölyhiukkasten poistoon savukaasusta viemällä ne kankaan lävitse. Materiaaliltaan kankaat ovat synteettisiä-, mineraalisia- tai luonnonkuitua.

Yleisin käytettävissä oleva kangassuodatin on letkusuodatin. Letkusuodattimen läpi kulkeva savukaasu puhdistuu jättämällä savukaasujen pölyhiukkaset kankaaseen, mikä parantaa savukaasun suodattavuusastetta. Pölykerroksen kasvaessa pöly poistetaan ultraäänellä, mekaanisesti ravistamalla tai paineilmasysäyksillä. Lisäksi on olemassa huuhteluun perustuvia järjestelmiä, joissa ilma virtaa päinvastaiseen suuntaan kuin savukaasut. Kangasletkusuodattimien etuna on hyvä suodattamisaste ja alhainen painehäviö. Kangassuodattimet ovat myös soveltuvia puolikuivien rikinpoistomenetelmien yhteyteen kalkin suodattimena. (Huhtinen ym. 2004, 253.)

Rakenteeltaan kangasletkusuodattimet voivat olla suorakulmaisia tai pyöreitä riippuen prosessista ja tilasta johon suodatin sijoitetaan. Molemmilla ratkaisuilla on omat hyötynsä. Suorakulmainen suodatin on helppo sijoittaa ja mitoittaa. Suodatinletkujen kiinnitykset ja mitat pystytään myös suunnittelemaan paremmin prosessin tarpeiden mukaisesti. Pyöreiden suodattimien etu on sen muodossa, koska muodolla kylmäsiiltojen pinta-ala saadaan minimoitua korroosion estämiseksi. Pyöreä muoto ei myöskään kerää pölyä. (Suodatinjärjestelmät pölynerotukseen ja tuotteen talteenottoon 2016, 2.)

Hasintien kaukolämpökeskuksessa oleva ongelmallinen savukaasusuodatin on runkorakenteeltaan suorakulmainen. Rakenne koostuu jaetusta kaasun likaisesta ja puhtaasta kaasutilasta, sekä niiden välissä olevasta letkusuodattimista. Suodatinrakenteeseen kiinnitetyt letkusuodattimet pidetään muodossaan suodatinkoreilla. Lisäksi suodattimien puhdistus toteutetaan jokaiselle suodatinriville erikseen olevilla puhdistusputkilla, jotka magneettiventtiili ohjatusti puhaltavat paineilmaa jaksottaisesti paine-eron ja ajastimen mukaisesti. Paine-erolla tarkoitetaan suodattimien likaisu-

desta johtuvaa paine-eroa. (Pulstex & Varitex suodattimien käyttö-, huolto- ja turvallisuusohjeet 2012, 6.)

Hasintien pellettipöly lämpökeskuksella savukaasu johdetaan kangasletkusuodattimelle suodattimen tuloyhteeseen ylhäällä ja johdetaan savupiippuun toiselta puolelta poistoyhteestä. Kuviossa 5 nähdään Hasintien kangasletkusuodatin.



Kuvio 5. Kangasletkusuodatin

Savukaasusuodattimen sisällä suodatinelementit on kiinnitetty yläpäästään ns. snap-band pikakiinnityksellä, jossa suodatinelementin sisään on tehty joustava teräsrenkas, joka palauttaa muotonsa ja tiivistää suodattimen reikälevyä vasten. (Pulstex &

Varitex suodattimien käyttö-, huolto- ja turvallisuusohjeet 2012, 9.) Kuviossa 6 on esitetty suodatinelementti.



Kuvio 6. Suodatinelementti (Pulstex & Varitex suodattimien käyttö-, huolto- ja turvallisuusohjeet 2012, 9.)

### 3.3.4 Pellettisiilot

Pelletin varastoinnissa on käytetty kahta ulkosiiloa, jotka ovat varustettu lähtösuihkeilla, keinuosilla ja purkuruuveilla. Ulkosiilot pystyvät varastoimaan yhteensä noin 120 tonnia pellettiä. Rakenteelliset hitsatut teräskokoonpanot ja tuotejärjestelmät ovat saaneet tuotannon sisäisen laadunvalvonnan vaatimustenmukaisuustodistuksen. (Suodattimien käyttö- ja huolto-ohje 2015.) Kuviossa 7 on Vaasan kuljetuskanaavat Oy:n toimittamat pellettisiilot.



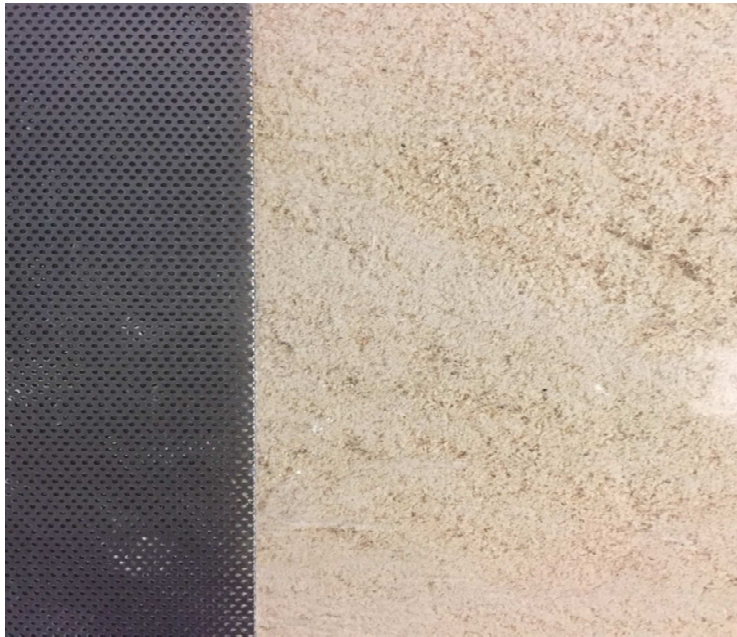
Kuvio 7. Pellettisiilot

### 3.3.5 Vasaramyllymurskain

Pelletinpölyn murskataan vasaramyllyllä, joka seuloo pelletin erittäin hienojakoiseksi rakeeksi, halkaisijaltaan n. 1-2 mm kokoiseksi pölyksi seulalevyistä riippuen. Vasaramyllyn toimintaperiaate perustuu ilmaan, joka takaa korkean kapasiteetin ja hienon murskautuvuuden. Prosessissa pelletti imetään sisään murskaimeen, jossa se keskipakovoiman ja ilman vaikutuksesta painetaan seulalevyjä vasten. Keskipakovoiman tuottaa teholtaan 200 kW sähkömoottori, joka pystyy tuottamaan 8000-10000 m<sup>3</sup>/h ilmavirran. Pyörivät varret murskaavat pelletin seulalevyjen lävitse. (Käyttö- ja huolto-ohjeet, Franssons-vasaramylly HK 45 2015.)

Tuotettu hienojakoinen pöly on tasalaatuista, minkä vuoksi murskain soveltuu pelletin murskaamiseen. Vasaramyllyllä saavutettu murskaavuus toleranssi alle 2 mm:lle on 95 %. Loppujakeen raekokoa voidaan tarvittaessa muuttaa vaihdettavilla seulalevyillä, joissa on erilainen reikäkoko. Lisäksi loppujakeen raekokoa voidaan säätää se-

kä roottorin pyörintänopeudella. Raekoon pienentyessä kapasiteettitaso laskee. Hie-  
non pölyn vuoksi suositellaan myös kipinäilmaisulaitteiston käyttöä vaaratilanteiden  
välttämiseksi. (Käyttö- ja huolto-ohjeet, Franssons-vasaramylly HK 45 2015.) Kuviosta  
8 voidaan havaita Hasintien lämpökeskuksen pellettipölyä ja 2 mm:n seulalevy (va-  
semmalla) jauhettua pellettipölyä.



Kuvio 8. Seulalevy ja jauhettua pellettipölyä

### 3.3.6 Siirtimet ja puhaltimet

Hasintien pellettipölyjärjestelmässä on kahdenlaisia eri siirrintyypppejä. Siirtoperiaat-  
teet ovat toteutettu ruuveilla ja puhaltimilla, joita pellettilaitoksessa on monissa eri  
prosesseissa. Pellettisiiloista vasaramyllylle pelletti siirtyy siirtoruuvien sekä vasara-  
myllyn aiheuttaman alipaineen avulla. Molemmissa pellettisiiloissa on oma siirto-  
ruuvi. Vasaramyllystä pöly siirtyy murskaimen puhallusilman avulla pölysiilon, mistä  
pöly pystytään siirtämään ruuhkaruuveille siilon pohjassa olevan pohjaruuvien avulla.  
Siilossa pöly jakaantuu kahteen erillisiin ruuhkaruuviiin. Ruuhkaruuvit syöttävät omia  
pellettipölytulitorvikattiloita. Alhaisen painon ja raekoon vuoksi puhaltimia pystytään  
hyödyntämään pellettipölyn siirtämisessä tulitorvikattilalle ruuhkaruuveilta, vaikka  
matka polttimelle on kymmeniä metrejä. Ruuveja sekä puhaltimia ohjataan auto-

maation avulla. Taulukossa 1 on listattuna ruuvien ja puhaltimien sähkömoottorien sähkötehot.

Taulukko 1. Ruuvien ja puhaltimien sähkömoottoritehot.

Siirrintyyppi	Teho
Pellettin siirtoruuvit (2kpl)	1,1kW
Ruuhkaruuvit (2kpl)	1,5kW
Sulkusyötin (2kpl)	0,75kW
Vasaramylly	200kW
Pohjaruuvi	7,5kW
Pellettipöly puhallin (2kpl)	15kW
Tuhkaruuvi (2kpl)	0,75kW

### 3.4 Puupelletti

Puupelletti on kokoonpuristettua pientä n. 10-30 mm palamaista biopolttoainetta. Pelletin raaka-aineena käytetään pääosin puunsivutuotteita puunjalostusteollisuudesta, joita ovat mm. kuusi- ja mäntypuiden sahanpuru, hiontapöly ja kuiva kutteri. Pellettiä on myös valmistettu ruokohelpistä, puun kuoresta, oljesta sekä näiden sekoituksista. Raaka-aine vaikuttaa pelletin lämpöarvoon sekä sen palamisominaisuuksiin. Tulevaisuudessa on myös kehitteillä valmistaa sopivasta rankapuusta pellettiä. (Raaka-aineet N.d.)

Pelletin valmistuksessa on myös mahdollista käyttää erilaisia sideaineita, jotka saadaan joko puusta itsestään tai muista luonnonlähteistä kuten maissi- tai perunatärkelyksestä. Poltto-ominaisuuksiin sideaineet eivät vaikuta, koska niiden osuus pelletin painosta on normaalisti vain noin 1 %. Toisaalta, näiden aineiden käytöllä voidaan saavuttaa parempi sitovuus, kosteuden suojaavuus tai voitelevuus, mitkä vaikuttavat tuotannon laitteiden kestävyys ja energiatehokkuuteen. (Knuuttila, Alakangas & Moisio 2003, 84.)

Puupolttoainejalosteena pelletillä on mm. seuraavia etuja:



- korkea energiatiheys ja energia-arvo
- tasalaatuista ja kuivaa polttoainetta
- uusiutuvaa, useasti kotimaista ja ympäristöystävällistä bioenergiaa
- jakelu, käsittely ja varastointi vaivatonta ja riskitöntä.

Suomessa pellettiä on valmistettu 1990-luvun lopusta alkaen ja sen käyttö on ollut kasvavaa. Vuonna 2014 pellettiä käytettiin yhteensä 240 000 tonnia, joista 181 000 tonnia poltettiin lämpö-, ja voimalaitoksissa tai muissa suurissa kohteissa. Vuosittaisesta pellettituotannosta Suomessa on noin 300 000 tonnia. (Kortelainen 2015.)

Valmista pelletin laatua tarkkaillaan monella tapaa erilaisilla mittauksilla kuten kosteuspitoisuus-, käsittelykestävyys-, irtoaineksen määrä-, tuhkapitoisuus-, lämpöarvo- ja tiheysmittauksilla. (Pelletin laatu N.d.)

Pelletin laatua varten on laadittu myös kansainvälinen standardi (SFS-EN ISO 17225-2:2014), joka sisältää standardin pienen kokoluokan sekä teollisuuskäyttöön tarkoitettuille pellettilaatuluokille. Standardista löytyy kattavat tiedot pelletin materiaali alkuperästä, koosta ja polttoaineominaisuuksista kuten kosteudesta, tuhkasta, kestäväydestä, lämpöarvosta sekä pelletin alkuainepitoisuuksista. Laatuvaatimukset ovat jaoteltu kolmeen laatuysikköön A1, A2, ja B, jotka ovat tarkoitettu pienen kokoluokan sovelluksiin sekä kolmeen luokkaan I1, I2, I3 teollisuuskäytössä. (SFS-EN ISO 17225-2:2014. 8-20.) Liitteessä 2 voidaan tutkia tarkemmin pelletin eri laatuisten pitoisuuksia ympäristöministeriön laatiman taulukon mukaan.

Hasintien pellettipölytulitorvikattilan pelletin toimittajana toimii Stora Enso, joka valmistaa pellettinsä sahojen sivutuotteista syntyvästä sahanpurusta, kuivasta hakkeesta ja kutterinlastusta. Puun toimitus on varmistettu jäljitettävyyjärjestelmällä, joka on sertifioitu PEFC<sup>TM</sup>:n (Promoting Sustainable Forest Management) sekä FSC<sup>®</sup>:n (Forest Steward Council) mukaisesti. Pelletin energiasisältö on korkea ja ne synnyttävät hyvin pienen määrän tuhkaa, koska laatu on korkea. Kahden kilon pellettimäärä sisältää lämpöenergiaa yhtä paljon kuin n. litran verran öljyä. Hasintiellä syntynyt tuhka pystytään hyödyntämään mm. metsien lannoittamisessa, mikä tutkittu labtium testeillä. (Pellets by Stora Enso, Ilmastoystävällinen lämmitysratkaisu N.d.)

Hasintien pellettipölylämpökeskukseen pelletit toimitetaan Kiteen tuotantolaitokselta, johon mm. Kiteen sahaloista toimitetaan kuusitukkien jalostuksesta syntyviä

sivutuotteita kuten sahapurua. Suomen tuotannon lisäksi tuotantoa on seitsemässä laitoksessa mm. Ruotsissa, Venäjällä, Virossa ja Tšekissä. (Kaukolämpöä tuottavat pelletit valmistetaan ja käytetään lähellä N.d.)

### 3.4.1 Pölypoltto

Kiinteän polttoaineen pölypoltaminen on yleisintä kivihiilellä. Kivihiilellä tuotettu energia on lähes kokonaan tuotettu pölypolttamalla. Pölypolttamisessa partikkelikoon ollessa pieni, saadaan palamisreaktiosta nopeampi, koska reaktiopinta on suurempi. Pölypoltosta kuitenkin aiheutuu vaikeasti hallittavia päästöjä, joita säädellään ylimääräisillä SO<sub>x</sub> ja NO<sub>x</sub> järjestelmillä. (Vakkilainen 2017, 145.)

Pölypoltto on kannattavaa biopolttoaineilla, jos puusta saatavat sivutuotteet kuten sahapuru on alle 1 mm kokoista. Monissa tapauksissa biopolttoainetta joudutaan kuitenkin jauhamaan pienempään partikkelikokoon, mikä kuluttaa liikaa energiaa, jopa 300 kWh tonnia kohden. (Vakkilainen 2017, 145.) Kuitenkin on tapauksia joissa biomassan jauhaminen on kannattavaa, mm. Ruotsissa ja Isonsa-Britanniassa on tehty muutoksia hiililaitoksista täysin pellettipölypolttolaitoksiksi. Näiden lisäksi Kanadassa on modifioitu onnistuneesti hiilimurskain- ja poltinjärjestelmä pellettipölykäyttöiseksi. Poltinjärjestelmässä on havaittu vain pieniä muutoksia kuten liekin pituuden kasvu, joka johtuu pelletin hitaammasta palamisesta. Liekki on kuitenkin tasapainoinen. (Livingston 2013.)

Pölypolttamista suunniteltaessa on otetta huomioon tuhkan käsittely, erikoispolttimet tai vanhojen muutokset, polttoaineen murskaus, polttoaineen käsittely, puhaltimet, tuulettimet ja pumput. Biopölypolttamisessa myös päästöjen hallitsemiseksi voidaan harkita sähkösuodatinta. (Vakkilainen 2017, 146.)

Pölypoltossa tuhkasta koostuvat ainesosat muodostavat kahta eri kokoluokkaa, 10-100 µm sekä alle 1 µm. Riippuen tuhkan kokoluokasta ja polttoaineen koostumuksesta ne sisältävät erilaisia alkuaineita. Tuhkan muodostumisen kannalta pölypoltossa merkittävä tekijä on korkea lämpötila, joka toteuttaa tuhkassa olevien mineraalien väliset reaktiot ja polttoaineen höyrystymisen. Korkean lämpötilan myötä myös tuhka-ahiukkasten sulamisen vaikutus korostuu. Lisäksi pölypoltossa lentotuhkan määrä

lisääntyä savukaasukanavissa, mikä vähentää tulipesän pohjalle jäävän tuhkan määrää. Lentotuhkan poistaminen tapahtuu suodattimien avulla. (Raiko 2002, 285.)

### 3.4.2 Pelletin pölypoltto

Pelletin pölypoltolla saadaan aikaan monenlaisia hyötyjä verrattuna tavalliseen pellettipolttoon. Laitoksien käynnistys sekä käyttäminen ovat nopeampaa ja tarkempaa, koska polttoaineen laatu on tasalaatuista ja pienikokoista. (Tampereen Energiantuotanto Oy, Sarankulma Heating Plant N.d.) Monien hyötyjen lisäksi pelletin pölypoltossa pitää myös ottaa huomioon useita tekijöitä. Näistä tekijöistä Iso-Britannian ympäristöministeriö on tehnyt ohjeistuksen liittyen pelletin laatuun, varastointiin, käsittelyyn ja murskaukseen, tuhkan käsittelyyn sekä hätäsuunnitteluun. Ohjeistus ei ota kantaa Suomessa käytettäviin tai suunnitteilla oleviin pellettipölylaitoksiin.

#### **Iso-Britannian ohjeistus**

Pelletin laatuun vaikuttavia tekijöitä ovat toimittaja, toimitusmatka, pelletin tuotantokäsittely ja väliaikavarastointi. Riskianalyseissa on otettava huomioon mm. pelletin sisäiset laadun muutokset ja niiden vaikutukset palamiseen. Pelletin laadusta riippuen epäpuhtauksien ja metallien erottelu on merkittävä tekijä vahingollisten syttymisien ehkäisemiseksi, koska pellettipöly on erittäin syttymisherkkää materiaalia. (Best Available Techniques for Pulverised Combustion of Wood Pellets in Power Plant 2013, 6.)

Pellettiä varastoitaessa on mitoitettava siilot pelletin käytön ja turvallisuusriskien mukaan. Pelletin varastoinnin aikaa, laatua, lämpötilaa ja kaasujen muodostumista seurataan riskien minimoimiseksi, mikä varmistaa pellettipölyn vahingollisen syttymisen. Seuraamisen lisäksi varastosiiilot pitäisi suojata ulkoisilta haitoilta kuten vedeltä, syttymisriskeiltä ja ylimääräiseltä ilmasta kosteuden välttämiseksi. Myöskin henkilöstön liikkumista varastointialueen lähistöllä on vältettävä. Hätätilanteiden varalta on järkevää suunnitella palonsammutusjärjestelmä, joka voidaan rakentaa syrjäyttävillä kaasuilla, vaahdoilla tai vedellä sekä tiedottaa palonsammutusyksiköitä palosuunnitelmalla ja muilla tarvittavilla tiedoilla. Tarvittavia tietoja voivat olla mm. kaasujen määrät ja sijainti. Lisäksi pellettipölyn käsittelytilat suunnitellaan ATEX-tasoisiksi, joissa käytetään syttymistä vähentävää materiaalia ja varmistetaan ohjauksien pö-

lynkestävyys. (Best Available Techniques for Pulverised Combustion of Wood Pellets in Power Plant 2013, 6-7.)

Pelletin siirtokuljettimet suunnitellaan siten että ne ovat suljettuna sään vaikutuksilta, pölyn käsittelyltä ja poistolta sekä niin että kuljettimet pystytään tarkastamaan ja putsamaan. Siirtokuljettimien poistoluukuista poistetut pölyt täytyy käsitellä ja tarkastella uudestaan laadun varmistamiseksi. Siirtokuljettimien kohdissa, joissa ilmenee kuumentumista, on varmistettava syttymisen estäminen sekä kohtia täytyy monitoroida kaasu- ja lämpötilamittauksilla sekä suojata syttymisenestolaitteistoilla. Myös valvontalaitteistoja voidaan käyttää toiminnan varmistamiseksi. Puhtaanapidosssa käytetään puhaltimia, jotka toimivat aktiivisesti. (Best Available Techniques for Pulverised Combustion of Wood Pellets in Power Plant 2013, 7-8.)

Pelletin murskauksessa on huomioitava puhallettavan primääri-ilman lämpötila, joka ei saa olla liian korkea lämpötila. Korkea lämpötila voi johtaa haihtuvien materiaalien syttymiseen ja räjähtämiseen. Oikean lämpötilan lisäksi, primääri-ilman virtauksen pitää olla riittävän suuri murskaimesta tulevan pölyn siirtämiseen putkistoista kattilalle. (Best Available Techniques for Pulverised Combustion of Wood Pellets in Power Plant 2013, 8.)

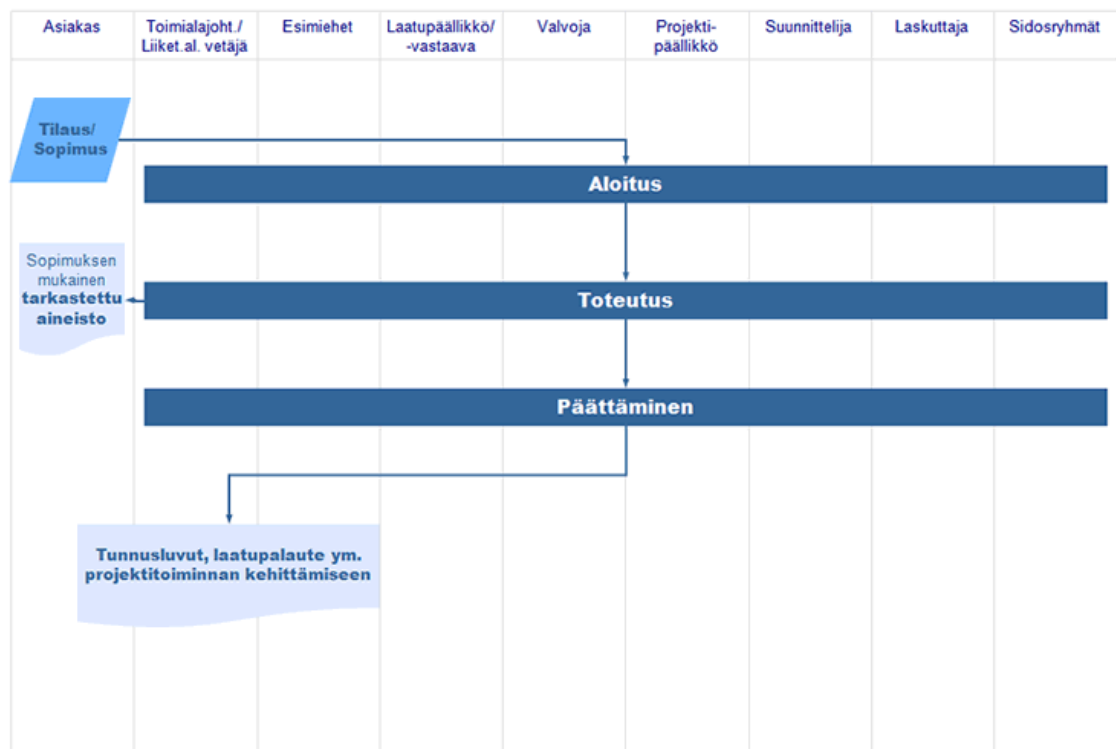
Pellettipölypoltossa syntyvästä pohjatuhkasta on varmistettava palavan tuhkan käsittely ja lämmöntalteenoton maksimointi. Lämmöntalteenotolla saadaan palavan tuhkan lämpötilaa laskettua merkittävästi. (Best Available Techniques for Pulverised Combustion of Wood Pellets in Power Plant 2013, 8.)

## **4 Projektinhoito**

Projektinhoitotoiminnot aloitetaan viimeistään, kun saadaan tieto toteuttamispäätöksestä tai sopimuksen voimaantulosta. Toimintojen tarkoituksena on varmistaa projektin lopputuloksen laatu ja toteutus, yhdenmukainen menettely jokaisessa eri toimipisteessä ja liiketoiminta alueilla sekä aikataulullinen ja taloudellinen järkevyyden. Projektinhoidolla pystytään myös luomaan edellytykset toiminnan jatkuvalle kehitykselle. (Projektinhoitotoiminnot N.d.)

## 4.1 Esisuunnittelun periaatteet

Esisuunnitteluvaiheella on tärkeä rooli projekteissa. Tuotteen tai prosessin vaatimusten avaaminen määrittelevät koko projektin rajoitukset ja tavoitteet, mitä ilman projektin loppuun saattaminen on hyvin hankalaa. Esisuunnittelu vaiheessa tehdään mm. esiselvitys-, strategiatyö- ja projektisuunnittelu. (Syrilä 2015, 5.)



Kuvio 9. Projektin eteneminen (Projektinohjotoiminnot N.d).

Kuviosta 9 voidaan myös havaita projektin periaatteellinen eteneminen ja siihen osallistuvien tahojen merkitys. Jokaisella projektin vaiheella on olennainen merkitys projektin onnistumisen osalta. Esisuunnitteluprosessi toimii kuviossa aloitus ja toteutus prosessien välisessä tilanteessa.

## 4.2 Ideointi ja toteutuskelpoisuus

Tuotteen tai kohteen kehittäminen pohjautuu ideaan, joka todetaan järkeväksi ja toteutuskelpoiseksi. Idean järkevyyttä ja toteutuskelpoisuutta arvioidaan sen teknisillä ja liiketoiminnallisilla raameilla. On huomioitavaa jättää tekniset toteutusmahdollis-

suudet riittävän avoimiksi, jotta tuotetta ei rajata liikaa jo esisuunnittelussa. Toteutuskelpoisuutta tarkastellaan kohteesta tehdyn alustavan tarkastelun avulla. Tarkastelun tekeminen vaatii laajaa selvitystä tuotteen käyttäjistä, markkinoista, valmistuskustannuksista ja muista taloudellisista vaikutustekijöistä. Koska kohteen tai tuotteen kustannusrakennetta ei vielä tiedetä, esisuunnittelu perustuu aina tuotto- ja kustannus-oletuksiin. Kehittämiprojekteissa alustava tarkastelu ja sen ylläpito on tärkeää. Tämän avulla saadaan vertailupohja kustannusehdotuksille. Monissa tapauksissa voidaan huomata esisuunnitteluvaiheessa toteutuskelpoisuuden olevan niin huono, että koko projekti voidaan päättää epäkannattavuuden vuoksi. Tästä syystä suuremmissa projekteissa käytetään välitavoitteita ja palavereita ajantasaisuuden varmistamiseksi. (Syrilä 2015, 6.)

### 4.3 Vaatimustenmäärittely

Vaiheen tärkein tulos on muuntaa asiakkaan tarpeet kohteen toiminnallisiksi ja teknisiksi erittelyksi ja vaatimuksiksi. Monessa tapauksessa kokemukset, odotukset ja tyytyväisyys saattavat muuttua asiakkaan toimesta, joten projektin edetessä vaatimustenmäärittelyä täydennetään ja korjataan tarpeen mukaan. Merkittävin osa vaatimuksista on vaikeasti havaittavia, joita asiakkaan on hankala ilmaista. Nämä vaatimukset saadaan selville käyttäjä- ja asiakasanalyysin avulla sekä tarkastelemalla kohteen toimintaa ja prosesseja. Olennaista on, että työtä ohjaavat asiakkaan tavoitteet, siksi suunnittelun ja kohteen asiakkaan välinen yhteistyö on tärkeää. Asiakas ymmärtää mitä tuotteelta halutaan ja miten vaatimukset vaikuttavat suhteessa oletettuihin valmistuskustannuksiin. Vaatimukset pystytään myös erittelemään toteutuskelpoisuuden perusteella. (Syrilä 2015, 6.)

Määrittelyn teossa on järkevä valita tarpeeksi yksityiskohtainen taso. Oikean tason puuttuessa sopimattomat sekä määrittelemättömät kohdat voivat olla myöhemmin hankala ratkaista, toisaalta ne eivät myöskään saa rajata liikaa kehitettäviä ratkaisuja. Tuoteidea ja vaatimustenmäärittely rakentavat tuotekuvauksen, joita projektin edetessä jatketaan tarkemmilla yksityiskohdilla ja suunnittelulla. (Syrilä 2015, 6.)

## 4.4 Projektisuunnittelu

Esisuunnittelu vaiheen toisena tärkeänä tehtävä on rakentaa projektisuunnitelma, jolla pystytään luomaan vaatimustenmukainen tuote. Projektisuunnitelmassa tarkennetaan tavoitteet ja rajoitteet, mitä ovat päämäärä, aikataululliset rajoitteet sekä taloudelliset, laadulliset ja yrityskuvalliset tavoitteet. Aikataulussa pitäisi saada vähintään kuvattua projektin päätehtävät, päätös ja niiden riippuvuussuhteet. Projektille myös määrätään vastuuhenkilöt ja työskentelyorganisaatio.

Monessa tapauksessa projektintyyppistä riippumatta projektin hoitotoiminnot suoritetaan arvioidun koon mukaan. Liitteessä 3 on esitetty esimerkki projektijaosta suurissa ja pienissä projekteissa tuntityömäärää kohden. liitteestä voidaan havaita tarpeellisuus vastuuhenkilöille sekä prosesseille eri toteutusvaiheissa. (Syrilä 2015, 6-7.)

## 4.5 Esisuunnittelun päättäminen

Saaduista tuloksista voidaan esisuunnittelu saattaa loppuun kokoprojektin osalta tai pelkästään esisuunnittelun osalta ja jatkaa seuraavaan vaiheeseen. Tätä vaihetta voidaan myös kuvata ”Go or No Go” –termillä. Päättäminen muistuttaa pääsääntöisesti esim. projektin päättämistä esisuunnittelupäättämisen ollessa vain suppeampi. Suuremmissa projekteissa esisuunnittelun merkitys kuitenkin korostuu huomattavasti, joten päättäminenkin on laajempaa ja tärkeämpää. Päättäminen pitää sisällään seuraavanlaisia kohtia laajuudesta riippuen:

- arkistointi
- loppuraportin laatiminen
- aikataulun pitävyyseraportti
- tunnuslukujen laskeminen
- projektipalautteen kerääminen
- päätöskokous.

Näiden asioiden avulla pystytään varmistamaan päättämisen sisällöllinen, laadullinen, aikataulullinen sekä kustannuksellinen vastaavuus verrattuna tilaussopimukseen. Vertailussa pystytään löytämään myös mahdollisia kehittämiskohteita tulevia

projekteja ja toteutussuunnittelua ajatellen. Lisäksi arkistoimalla tarkoin käytetyt lähtötiedot, pystytään niitä myös myöhemmin tarvittaessa tarkastelemaan. (Projektin päättäminen N.d.)

Projektin järkevällä päättämisellä käyttämällä systemaattista raportointia on myös olennainen osa yrityksen myynti ja tarjoustoiminnassa. Raportoinnista saatavien tietojen avulla pystytään kehittämään, tarkentamaan ja varmistamaan tarjouksien sisältöä ja oikeellisuutta. Hyvällä raportoinnilla ja dokumentoinnilla pystytään myös parantamaan markkinointia esim. asiakkuuksien hallinnassa ja luokittelussa. (Projektin päättäminen N.d.)

## **5 Lämmönsiirtymisen perusteet**

### **Johtuminen**

Peruseriaatteena lämmönsiirtymisessä lämpötilat pyrkivät tasaantumaan kahden eri lämpötilan välillä. Johtumisessa lämpö siirtyy kiinteään väliaineen lävitse, jossa lämpötilat ovat väliaineen ulkopinnoilla. Lämpö virtaa suuremmasta lämpötilasta pienempään. Johtumisen lämpövirtaan vaikuttaa olennaisesti lämmönsiirtymispinta-ala, lämpötilaero, materiaalien lämmönjohtavuus ja aineen paksuus. Lämmönjohtavuuksissa on huomattavia eroja eri aineiden välillä, mm. kaasut johtavat huonosti lämpöä. (Huhtinen ym. 2004, 204.)

### **Konvektio**

Konvektiossa liikkuvasta nesteestä tai kaasusta lämpövirta kulkeutuu materiaalipintaan. Konvektio tapahtuu myös materiaalipinnasta virtaavaan nesteeseen tai kaasuun. Konvektiota on kahden tyyppistä, vapaata sekä pakotettua. Vapaassa konvektiossa lämmönsiirto nesteestä tai kaasusta tapahtuu luonnollisen liikkeen avulla kiinteään aineeseen johtuen lämpötilaeron muodostamasta tiheyserosta. Pakotetussa konvektiossa hyödynnetään ulkoista voimaa liikkeen parantamiseksi. Ulkoinen voima voidaan tuottaa esim. pumpulla tai puhaltimella. Lämmönsiirtymiskerroin konvektiossa riippuu mm. pinnankarheudesta, virtaavan aineen laadusta, virtausnopeudesta sekä paineesta. (Huhtinen ym. 2004, 205.)



Konvektiossa merkittävässä roolissa on rajakerros, jossa lämpötila muuttuu samaksi kuin materiaalipinnan lämpötila sekä virtaavan aineen nopeus laskee merkittävästi. Merkittävin osa lämmönsiirrosta konvektiossa muodostuu tässä rajakerroksesta. Rajakerroksen paksuus riippuu ensisijaisesti rajakerroksen ulkopuolisesta virtausnopeudesta. Rajakerroksessa lämpö siirtyy miltei täysin johtumalla, joten myös johtuminen on osa konvektiota. Rajakerroksen sijainti konvektiossa on esitetty kuviossa 11. (Huhtinen ym. 2004, 205.)

### **Lämpösäteily**

Aineen lämpötilan ollessa yli absoluuttisen nollapisteen ( $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) tapahtuu aineessa myös lämpösäteilyä. Säteilyssä energia siirtyy sähkömagneettisesti, jossa spektrialue riippuu aineen faasimuodosta. Kaasuilla spektri muodostuu aallonpituudeltaan kapeaksi ja nestemäisillä sekä kiinteillä aineilla laajaksi. Lämpötilan noustessa materiaalissa säteilynlämmönsiirtymisen määrä ja merkitys kasvaa merkittävästi. (Huhtinen ym. 2004, 206.)

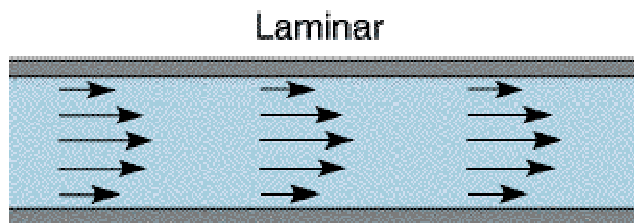
## **6 Putkivirtauksen perusteet**

Tutkittaessa lämmönsiirtoa putkivirtauksissa täytyy ottaa huomioon virtauksien muoto lämmönsiirtopintaa kohden. Virtauksen pyörteily vaikuttaa lämmönsiirtymiskertoimeen. Lämmönsiirtymiskertoimen kasvaessa myös lämmönsiirtopinta-alan tarve laskee.

Lämpölaitoksissa virtauksia esiintyy kanavissa ja putkistoissa. Virtaukset voivat esiintyä joko turbulenttisina tai laminaarisina. Turbulenttiset virtaukset ovat kaikista yleisimpiä, ja laminaarisia virtauksia ilmenee harvoin. Laminaariset virtaukset ovat hitaita, mikä johtaa laajempiin poikkipintamittoihin ja siten korkeisiin materiaalikulutuksiin. Kustannuksia eivät korjaa pienistä virtauksista saadut energiasäästöt. Putkistojen ja kanavien suunnittelu perustuu käytännössä optimointiin, jolla saadaan alhaimmat materiaali-, valmistus-, asennus- ja käyttökustannukset. (Perttula 2000, 64.)

## 6.1 Laminaarinen virtaus

Käytännöllinen kuvaustapa laminaarisesta virtauksesta on eräänlainen malli päällekkäin asetetuista ohutseinämäisistä putkista. Kun kaikkiin putkiin kohdistetaan sama paine poikkipinta-alaan nähden, alkaa tapahtua liikkumista putkien suhteen. Lähempänä keskustaa olevat putket liikkuvat uloimpana olevia nopeammin. Uloimman putken oletetaan olevan paikallaan, joten materiaalin pinnanlaadulla ei ole merkitystä virtaukseen. Todellisuudessa virtaukset ovat putkien sijaan nesteitä tai kaasuja. (Perttula 2000, 65) Kuviossa 10 voidaan havainnoida laminaarisen virtauksen leikkauskuvanto.

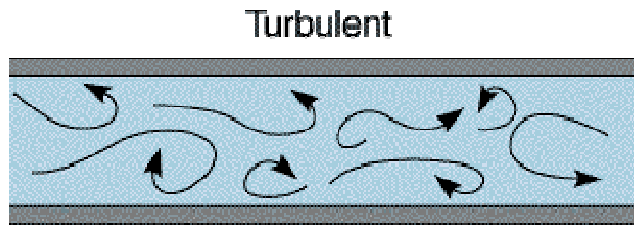


Kuvio 10. Laminaarinen virtaus (Turbulent Flow and Viscosity 2012).

## 6.2 Turbulenttinen virtaus

Virtausnopeuden kasvaessa riittävän suureksi, putken ja kanavan seinämissä olevat kaasu- tai nestehiukkaset kulkeutuvat virtauksen mukaan ja alkavat pyörteillä. Virtaus alkaa sekoittua kerroksittain virtausnopeuden kasvaessa ja lopulta virtaus on täysin sekoittunutta ja turbulenttista. Pyörteiden syntyminen ja aineen sisäisen kitkan voittaminen rajakerroksessa kuluttaa energiaa. Pyörteiden syntyminen voidaan nähdä kuvioista 11. Materiaalipinnan lähellä virtaus on hitaampaa, joten siellä voi ilmetä myös laminaarista virtausta, joka kuitenkin rikkoutuu jatkuvasti. Erityisesti lämmönvaihtimissa on tärkeää turbulenttinen virtaus lämmönsiirtymisen parantamiseksi. Lämmönsiirtopinnassa jatkuvasti tapahtuva virtausaineen sekoittuminen mahdollistaa suuremman lämpötilapoiikkeaman pinnan ja virtausaineen välillä. Koska turbulenttisessa virtauksessa pinnan läheisyydessä ei ole liikkumatonta kohtaa, vaikuttaa

pinnan materiaali painehäviöön. Epätasaisemmassa materiaalissa painehäviöt kasvavat. (Perttula 2000, 66–67.)



Kuvio 11. Turbulenttinen virtaus (Turbulent Flow and Viscosity 2012 ).

## 7 Savukaasut

### 7.1 Palamisen periaatteet

Tutkittaessa palamista teoreettisesti on oleellista selvittää ensin reaktioon liittyvien materiaalien määrät, koostumukset sekä siirtyvät energiamäärät. Monessa tapauksessa palaminen tapahtuu korkeassa lämpötilassa ja pienessä paineessa, joten kiineellinen kaasuteoria ei toteudu harvojen kaasufaasin ainevirtojen vuoksi. Palamisreaktiossa lähtöaineiden molekyylien sidokset irtoavat ja muodostavat uusia vahvempia sidosenergian sidoksia. Tässä reaktiossa ylimääräinen sidosenergia vapautuu systeemiin, mikä nostaa usein merkittävästi lämpötilaa. Reaktiossa suhde atomien lukumäärän kesken täytyy olla yhtä suuri lähtöaineiden ja reaktiotuotteiden kesken reaktion toteutumiseksi. (Raiko 2002, 31–32.)

### 7.2 Savukaasujen määrittäminen

Tarkasteltaessa polttoaineiden palamista, oletetaan niiden sisältävän vain viittä alkuainetta, joiden reaktioilla ja määrillä on merkitystä. Nämä viisi alkuainetta ovat hiili *C*, vety *H*, typpi *N*, rikki *S* ja happi *O*. Täydellisen palamisen tarvittava happi- tai ilmamäärä sekä syntyvän savukaasun koostumus ja määrä pystytään laskemaan tutkimala kyseisiä alkuainepitoisuuksia. (Raiko 2002, 34.) On myös huomattavaa, että pala-

misen yhteydessä vapautuu huomattava määrä energiaa. Seuraavaksi on esitettyinä kaikkien näiden viiden alkuaineen reaktioyhtälöt, missä energian vapautumista ei ole otettu huomioon.

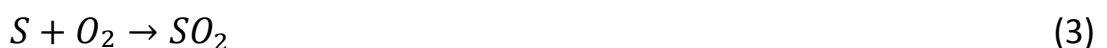
Hiilen reagoiessa hapen kanssa syntyy hiilidioksidia. Hiilidioksidia syntyy kaavan 1 mukaisesti. (Honkanen 2015.)



Kahden vetyatomien reagoiessa hapen kanssa syntyy vettä kaavan 2 mukaisesti. (Honkanen 2015.)



Rikin palaessa syntyy rikkidioksidia kaavan 3 mukaisesti. Rikkiä kuitenkin esiintyy polttoaineesta riippuen suhteellisen vähän. (Honkanen 2015.)



Osa poltossa muodostuneesta rikkidioksidista reagoi edelleen rikkitrioksidiksi. Rikkitrioksidin määrä savukaasuissa on varsin pieni, enintään muutama prosentti kokonaisrikkidioksidin määrästä. Vaikka rikkitrioksidin määrä on vähäinen, on sillä todella suuri merkitys lämmönsiirtojärjestelmien savukaasujen loppulämpötilan suunnittelussa. Matalissa lämpötiloissa rikkidioksidista muodostuu korroosiota aiheuttavaa happoa. Ympäristövaikutuksien osalta molempien molekyylien vaikutukset ovat kumminkin samat. (Raiko 2002, 346–347.)

Palamisessa rikkitrioksidia muodostuu pääsääntöisesti kahdella tavalla korkeissa lämpötiloissa ( $> 1100\text{ }^\circ\text{C}$ ) tai katalyyttisesti matalissa lämpötiloissa ( $500\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$ ). Matalissa lämpötiloissa reaktio nopeus on hidas, joten merkittävin määrä syntyy korkeissa lämpötiloissa. Korkeissa lämpötiloissa rikkidioksidi voi reagoida kaavan 4 tavalla:



Tässä tapauksessa M viittaa mihinkä vain molekyyliin tai kaasuatomiin. (Raiko 2002, 346–347.) Polttoaineissa oleva happi ja typpi eivät reagoi ei reagoi palamisreaktiossa. Ne siirtyvät suoraan savukaasuihin, mikä vähentää palamisilman tarvetta. Kaavoista 5 ja 6 voidaan nähdä reaktioyhtälöt. (Honkanen 2015.)



Kuitenkin osa typpiatomeista muodostaa ympäristölle haitallisia typpimonoksideja ja typpidioksidia kaavojen 7 ja 8 tavalla.



### 7.3 Savukaasujen koostuminen ja polttoaineanalyysi

Tarkasteltaessa savukaasujen koostumusta on tarpeellista valita tarkasteltava polttoainemäärä, joka jaetaan reagoiviin ja reagoimattomiin komponentteihin. Ainemäärä

on nestemäisillä ja kiinteillä polttoaineilla on yleensä laskennan yksinkertaistamiseksi 1 kg ja kaasumaisilla moolimäärä kohti 1 mol tai 1 kmol. Savukaasujen koostumus taas ilmaistaan massaosuuksina hiili-, vety-, rikki-, happi-, typpi-, tuhka-, ja vesipitoisuuksina nestemäisille ja kiinteille polttoaineille sekä mooliosuuksina kaasuille. (Raiko 2002, 36-37.)

Kun polttoaineen koostumus on tiedossa, pystytään jokaisen reaktioyhtälön avulla laskemaan muodostuvat savukaasukomponentit sekä happi-, tai ilmamäärät. Ilmamäärän laskemiseen on myös huomioitava ilmakerroin. Koostumuksen palavat alkuainekomponentit ovat hiili (C) vety ( $H_2$ ) ja rikki (S). Muut polttoaineessa olevat inerttikaasut typpi (N), hiilidioksidi ja vesihöyry siirtyvät reagoimattomina suoraan savukaasuihin. Myöskään tuhka ei reagoi palamisessa. Polttoaineessa oleva happi ( $O_2$ ) vähennetään palamiseen tarvittavasta happimäärästä. (Raiko 2002, 37.) Näiden lisäksi ilman mukana tuleva ns. raakatyyppi lasketaan tyypillisesti kertomalla ilman määrä typpikertoimella. Kerroin perustuu typen määrään ilmassa, joka on 3,76. (Honkanen, H. 2015.)

#### 7.4 Savukaasujen happo- ja vesikastepiste

Kastepisteellä tarkoitetaan lämpötilaa, jossa jokin kuuma kaasufaasiyhdiste alkaa lauhtua ja sillä on keskeinen merkitys lauhtumisesta johtuvaan korroosiovaaran ehkäisyyn. Lauhtuminen voi alkaa tapahtumaan kaasun sisältämien hiukkasten tai kaasun kanssa kosketuksissa olevien materiaalien pinnoille. Lauhtumisen tapahtuessa hiukkasten pinnoilla on kaasutilassa kastepiste alitettu paikallisesti. Kylmemmille lämpöpinnoille lauhtuminen voi kuitenkin tapahtua savukaasun lämpötilan ollessa korkeampi kuin kastepiste. (Stoor & Riikonen 1991, 5.)

Tästä syystä on huomioitava lämpöpintojen lämpötila, johon vaikuttaa virtaavien aineiden lämpötilat. Lämmönsiirtimen, toimilaitteiden ja savukaasukanavien kestävyden takaamiseksi savukaasujen lämpötilat pyritäänkin pitämään korkeammalla kuin happokastepiste esim.  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  korkeammalla kuin happokastepiste.

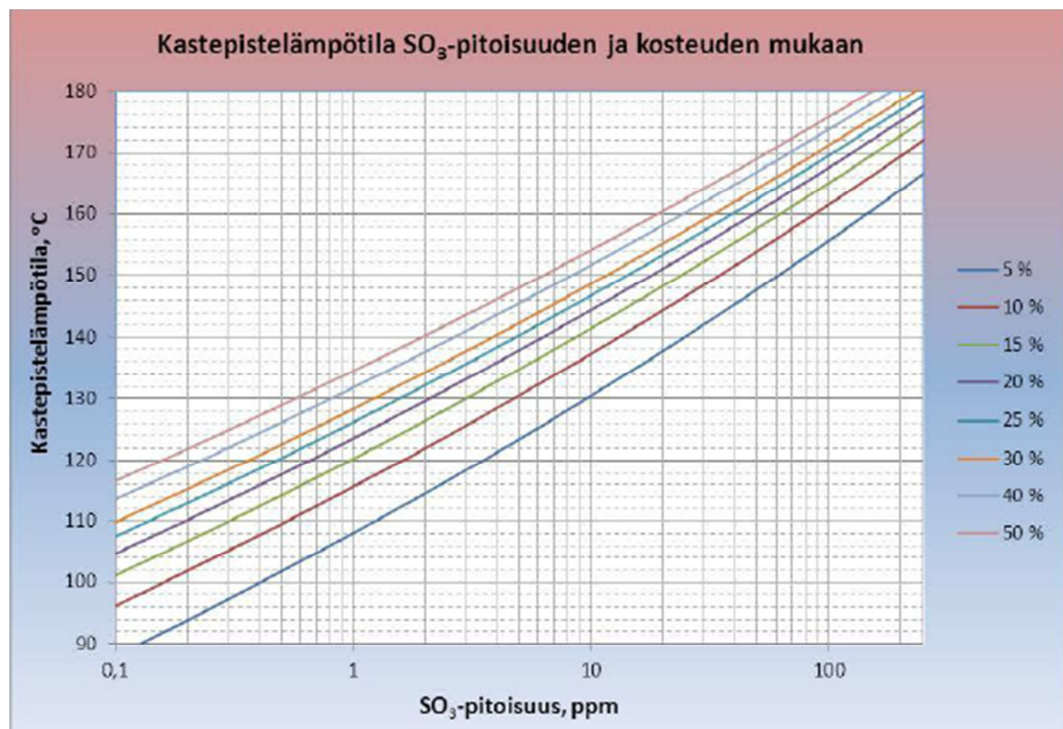
Savukaasujen kastepisteet ovat merkittäviä tietoja suunniteltaessa kattilaa ja sen käyttölaitteita. Etenkin kattilajärjestelmän loppupäässä, jossa lämpötilat laskevat alle  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  happokastepisteen merkitys korostuu vesikastepistettä enemmän. Lämmön-

talteenottojärjestelmän jälkeisen savukaasun lämpötila määräytyy savukaasun monessa tapauksessa happokastepisteen mukaan. Happokastepisteen alittuessa savukaasuista muodostuu lämpöpinnoille voimakkaasti korroosiota aiheuttavia rikkihaittoisia yhdisteitä. (Huhtinen ym. 2004, 212.)

polttoaineen rikki muodostuu palamisessa suurimmaksi osin rikkioksidiksi ( $\text{SO}_2$ ), mutta osasta muodostuu myös rikkitrioksidia ( $\text{SO}_3$ ). Kastepisteen alittuessa pääsee savukaasuissa oleva kosteus yhdistymään rikkitrioksidin kanssa luoden hapettavia kalvoja ja rikkihappoa. Rikkitrioksidin määrään vaikuttaa polttoaineen rikkihaittoisuus, ylimäärä-rä happi, katalyyttien määrä, savukaasujen viipymäaika tulipesässä sekä tulipesän ja seinämien lämpötila. (Huhtinen ym. 2004, 212.) On arvioitu, että savukaasuista rikkioksidista n. 1-5 %:ia hapettuu kattilassa rikkitrioksidiksi (Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta 2012, 18). Rikkihappokorroosiota ilmenee happopisaroiden muodostuessa lämpöpinnoille savukaasujen lämpötilan pudotessa n. alle  $150\text{ }^\circ\text{C}$ . Taulukosta 2 voidaan havaita eri polttoaineiden happokastepisteitä sekä Kuvioista 12 voidaan havaita savukaasujen  $\text{SO}_3$ - ja  $\text{H}_2\text{O}$ -pitoisuuksien vaikutukset happokastepisteeseen.

Taulukko 2. Polttoaineiden happokastepistelämpötilat (Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta 2012, 18).

Polttoaine	Happokastepistelämpötila
Pelletti	< $115\text{ }^\circ\text{C}$
Hiili	$120\text{--}150\text{ }^\circ\text{C}$
yhdyskuntajäte	$130\text{--}150\text{ }^\circ\text{C}$
Öljy	$140\text{--}160\text{ }^\circ\text{C}$
Maakaasu	$100\text{--}120\text{ }^\circ\text{C}$



Kuvio 12. Happokastepistetaulukko savukaasun SO<sub>3</sub>-pitoisuuden ja kosteuden mukaan (Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta 2012, 19).

Korroosio vahvistuu entisestään lämpötilan laskiessa alle vesikastepisteen, joka on n. 50 °C. Savukaasujen rikkidioksidipitoisuuden takia syntyy rikkihapoketta, joka korrodoi lämpöpintoja huomattavasti enemmän kuin samanvahvuinen rikkihappo. (Huhtinen ym. 2004, 212.) Savukaasujen vesikastepisteen muodostuminen riippuu savukaasuissa olevan veden määrästä ja sen osapaineesta savukaasuissa. Vesihöyryn osapaineen savukaasuissa ollessa alle kylläisen veden höyryn paineen, savukaasujen vesihöyry alkaa tiivistyä vedeksi. Savukaasujen ilmaylimäärä sekä polttoaineen kosteus vaikuttaa huomattavasti vesikastepisteeseen. Tekijät vaikuttavat vesihöyryn osapaineeseen savukaasuissa ja vesikastepistelämpötilaan. (Huhtinen ym. 2004, 99.)

Matalalämpötilakorroosiota voidaan vähentää monella tapaa. Happamia rikkiyhdisteitä voidaan neutraloida syöttämällä savukaasukanavaan ammoniakkia tai magnesiumyhdisteitä. Polttamalla riittävällä ilmamäärällä voidaan vähentää rikkiatrioksidien syntymistä tai riittävän korkealla savukaasujen lämpötilalla pystytään varmistamaan happokastepisteen ylitys. Toisaalta liian korkea lämpötila voi myös aiheuttaa hyötysuhteen alenemista. (Huhtinen ym. 2004, 213.)



## 7.5 Ilmakerroin

Palaminen tapahtuu hapen määrästä riippuen stoikiometrisesti, epätäydellisesti ja täydellisesti. Stoikiometrisessä palamisessa kaikki reaktioon liittyvät alkuaineet reagoivat käyttämällä happea teoreettisen määrän. Tällä tavoin pystytään määrittämään tarvittava hapen määrä palamisessa. Epätäydellisessä palamisessa kaikki alkuaineet eivät saa tarvittavaa happimäärää täydelliseen reaktioon. Tuloksena syntyy epäpuhtauksia ja päästöjä kuten hiilimonoksidia (CO), vetyä (H<sub>2</sub>), metaania (CH<sub>4</sub>) sekä muita yhdisteitä kuten tervaa, nokea, haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC) ja savua. Täydellisessä palamisessa pyritään saavuttamaan kaikkien alkuaineiden täydellinen palaminen, mikä käytännössä kuitenkin ei ole mahdollista. Palamisessa vapautuu aina palamatonta hiiltä, tuhkaa ja hiilimonoksidia. Kiinteällä biomassalla lähes täydellinen palaminen saavutetaan käyttämällä pientä ilmaylimäärää. Käytetty ilmamäärä saadaan ilmakertoimen avulla, mikä on 1.15-1.3 välillä. (Vakkilainen 2017, 37.) Ilmakertoimen määrittäminen on tärkeää määriteltäessä savukaasujen koostumusta sekä puhtaan palamisen varmistamiseksi.

Ilmakertoimen suuruuteen vaikuttavat monet tekijät kuten polttoaine, säätölaitteiden tarkkuus ja kattilatyyppi. Lähimmäksi teoreettista ilmakerrointa päästään suurissa kattiloissa, joissa on hyvät säätöjärjestelmät. (Perttula 2000, 25.) Ilmakerroin voidaan määrittää savukaasuista saaduilla happipitoisuuksilla seuraavasti yhtälöllä 9.

$$\lambda = 0,21 / (0,21 - O_{2 \text{ Mitattu}}) \quad (9)$$

missä  $\lambda$  = ilmakerroin

$O_{2 \text{ Mitattu}}$  = Savukaasujen happipitoisuus

## 7.6 Ominaislämpökapasiteetti

Aineiden ominaislämpötilakapasiteetit voidaan esittää kahdella arvolla vakiopaineessa ( $C_p$ ) ja vakiotilavuudessa ( $C_v$ ), koska materiaalien tilavuus vaihtelee lämpötilavaihtelun myötä. Käytännössä kuitenkin nesteiden oletetaan olevan kokoonpuristamat-

tomia, joten niistä esitetään harvoin ominaislämpökapasiteettia vakiotilavuudessa. Lämpötilakapasiteetti kertoo kuinka paljon lämpöenergiaa tarvitaan nostamaan lämpötilaa yhden asteen verran yhdessä kilossa materiaalia. Yksikkönä käytetään yleensä KJ/kg °C. (Perttula 2000, 27.)

Kaasuilla ominaislämpökapasiteetti muuttuu huomattavasti voimakkaammin paineen ja lämpötilan funktiona kuin nesteillä. Laskennoissa joissa kaasun lämpötila muuttuu paljon, on syytä ottaa ominaislämpökapasiteetin muutos huomioon alku- ja loppulämpötilassa. (Perttula 2000, 28.)

Tietyn kaasun tarkka ominaislämpötilakapasiteetti saadaan määriteltyä kertomalla eri osakaasukomponenttien massaosuudet ominaislämpötilakapasiteeteilla sekä laskeamalla ne yhteen. Savukaasujen ominaislämpökapasiteetti voidaan laskea yhtälöllä 10.

$$c_{psk} = \sum x_k \times c_{pk} \quad (10)$$

missä  $c_{psk}$  = kaasun ominaislämpökapasiteetti

$x_k$  = kaasukomponentin massaosuus

$c_{pk}$  = kaasukomponentin ominaislämpökapasiteetti

Savukaasun ominaislämpökapasiteetin laskemiseksi täytyy ensin määrittellä osakomponenttien massaosuudet sekä komponentin ominaislämpö. Massaosuudet saadaan määriteltyä joko päästömittauksista tai savukaasulaskelmista. Ominaislämpökapasiteetin määrittelemineen on varsin työlästä, joten työn helpottamiseksi on laadittu myös valmiita taulukoita entalpioiden ja lämpötilojen mukaan. (Huhtinen ym. 2004, 97.)

## 7.7 Viskositeetti

Savukaasujen viskositeetit (dynaaminen viskositeetti) ovat normaalissa huoneen lämpötilassa  $10\text{--}20 \times 10^{-5}$  kg/sm. Olennaista savukaasujen viskositeetissa on sen merkittävä kasvaminen lämpötilan noustessa. Lämpötilassa  $1000\text{ °C}$  savukaasukom-

ponenttien viskositeetti saa arvon väliltä  $45\text{--}55 \times 10^{-5}$  kg/sm. Tarkemmat viskositeettien arvot saadaan laskemalla. (Huhtinen ym. 2004, 98.)

## 7.8 Savukaasujen lämmönjohtavuus

Kaasut toimivat hyvänä eristeenä ja lämpötilan noustessa niiden lämmönjohtavuuskyky kasvaa. Normaalisissa huoneenlämmöissä kaasujen lämmönjohtavuus on n.  $0,15\text{--}0,25$  W/m °C, mutta jo 500 °C:ssa arvo on n.  $0,55$  W/m °C. Tästä voidaan päätellä johtavuuden nousevan lämpötilan funktiona. Tarkasteltaessa tarkemmin savukaasuseoksen lämmönjohtavuutta käytetään savukaasukomponenttien lämmönjohtavuutta ja kertomalla se kaasukomponentin massaosuudella. Lämmönjohtavuuden määrittäminen on olennaista määriteltäessä lämmönsiirtymiskerrointa suunnitteluvaiheessa. (Huhtinen 2004, 97.)

## 7.9 Savukaasupäästöjen mittaaminen

Palamisesta syntyvien savukaasupäästöjen mittaamiseen käytetään monentyyppisiä menetelmiä ja analysointireittejä savukaasujen koostumuksesta, mittausolosuhteista sekä mitattavista yhdisteistä riippuen. (Vauhkala 2010, 7) Analysointireitit perustuvat fysikaalisiin, kemiallisiin, sähköisiin ja optisiin menetelmiin sekä niiden yhdistelmiin (Huhtinen 2004, 288.). Käytännössä analysointireitit ilmaisevat mittaustiedon jännite- tai virtaviestinä. Viesti kerätään talteen ja voidaan muuttaa suoraan pitoisuuksiksi dataloggerin avulla tai vaihtoehtoisesti myöhemmin laskennallisesti. Laitosmittareiden kalibroinnissa on merkittävää, että referenssimittaus ja tarkasteltava mittaus perustuvat samaan analyysitekniikkaan yhtenäisten vertailutuloksien saamiseksi. (Vauhkala 2010, 7.)

Tärkeimmät palamisen kannalta mitattavat suureet ovat happi ( $O_2$ ), hiilimonoksidi (CO) ja  $CO_2$ -pitoisuus. Päästöjen osalta oleellimmat ovat  $NO_x$ -,  $SO_2$ - ja hiukkaspitoisuudet. Palamattomia hiilivetyypäästöjä voidaan mitata päästöjen sekä palamisen tarkkailemiseksi. (Huhtinen 2004, 288.)

Kaasumaisten ilmapäästöjen määrittelemiseksi SFS (Suomen standardisoimisliitto) on asettanut useita standardeja pohjautuen kansainvälisiin standardeihin. Standardit sisältävät mm. kaasumaisten päästöjen mittauksien yleiset periaatteet. Kaasumaisten

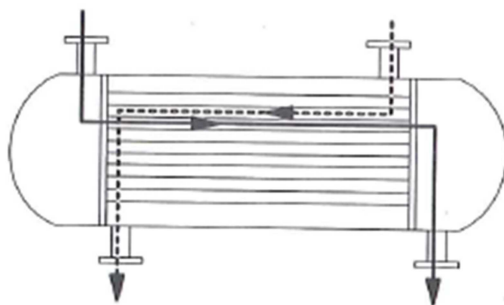
ilmapäästöjen standardit koostuvat mm. seuraavista kohdista: (Annala, Hemminki, Junttila, Laukkarinen, Rantala ja Saastamoinen 2000, 5.)

- SFS 3869 ja 5634 (kaasumaiset päästöt)
- SFS 5625 (savukaasut)
- SFS 3864 ja SFS 5109 (rikkidioksidi)
- SFS 5293 (rikkivety)
- SFS 5425 (typpioksidi).

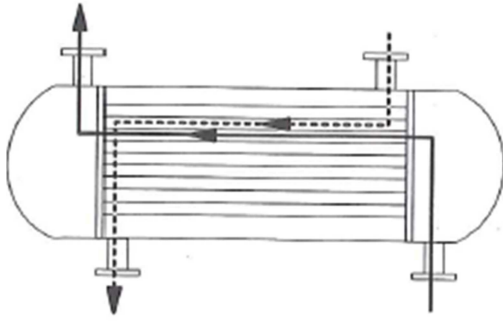
## 8 Lämmöntalteenoton periaatteet

Lämmöntalteenottojärjestelmillä pyritään saamaan hyödynnettyä lämpöä savukaasuista tai muusta lämmönlähteestä johonkin toiseen virtaukseen. Lämmön talteen ottaminen tapahtuu käytännössä lämmönvaihtimilla, joissa lämpöä talteen ottava virtaama on vesi, vesi - höyry, höyry tai ilma. (Huhtinen ym. 2004, 202.)

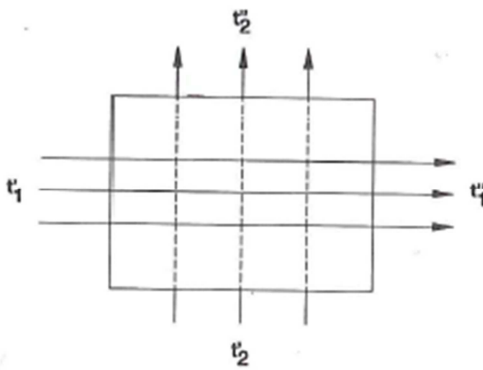
Lämmönvaihtimia on toimintaperiaatteeltaan kolmenlaisia, myötä-, vasta- ja ristivirtalämmönvaihtimia. Toisin kuin myötävirtalämmönvaihtimessa, vastavirtalämmönvaihtimessa aineet virtaavat vastakkaisiin suuntiin. Tällä tavoin saadaan lämpöä siirrettyä pienemmällä lämmönsiirtopinta-alalla. Käytännössä merkittävin osa kattiloiden lämmönsiirtimistä on kuitenkin tehty ristivirtalämmönsiirtimillä, jossa virrat kulkevat kohtisuorasti ristiin. Ristivirtaustekniikka tuo kuumia ja kylmiä pisteitä siirtimen rakenteeseen, mikä asettaa materiaalit merkittävällä rasitukselle. Kuvioissa 13, 14 ja 15 on esitetty lämmönvaihtimien periaatekuvia. (Huhtinen ym. 2004, 202.)



Kuvio 13. Vastavirtalämmönvaihdin (Huhtinen ym. 2004, 203).



Kuvio 14. Myötävirtalämmönvaihdin (Huhtinen ym. 2004, 203).



Kuvio 15. Ristivirtalämmönvaihdin (Huhtinen ym. 2004, 203).

## 8.1 Ekonomaisier lämmönvaihdin

Monissa tapauksissa ennen päälämmitysjärjestelmää, lämmitettävä aine voidaan esilämmittää savukaasujen hukkalämmöllä kattilan jälkeen olevalla lämmöntalteenottojärjestelmällä nimeltä ekonomaisier. Ekonomaisier parantaa kokonaisenergiahyötysuhdetta ja alentaa savukaasujen loppulämpötilaa. (Vakkilainen 2017, 64)

Ekonomaisierit ovat pääsääntöisesti konvektiivisia lämmönvaihtimia, ja ne ovat rakennettu rivoituksella. Kuitenkin jollain biopolttoaineilla käytetään suoria putkia, koska rivoitetut putket ovat alttiimpia likaantumiselle ja kulumiselle. Biopolttoaineiden palamisessa syntyvästä tuhkasta ja epäpuhtauksista johtuva likaantuminen vähentää lämmönsiirtokykyä. Likaantuminen voi myös vahingoittaa lämmönsiirtopintoja epätasaisen lämmönsiirron ja lämpövirran sekä raskaiden puhdistusmenetelmien vuoksi. (Vakkilainen 2017, 130-131.)

Ekonomaisella on varsin alhainen lämmönsiirtopintalämpötila, jonka vuoksi se voidaan rakentaa hiiliteräksestä. Normaalisti ekonomaisella lämpötila ei laske niin alas, että matalalämpötilakorroosiota ilmenee. Tästä syystä poikittais- ja pituussuuntainen putkien asettelu voi olla tiukka. Savukaasujen lämpötilan kuitenkin alittuessa 150 °C:en, matalalämpötilakorroosio pitää ottaa huomioon suunnittelussa tai pahimmassa tapauksessa se voi estää ekonomaiserin rakentamisen. Lämpötilan laskiessa tälle tasolle savukaasut alkavat lähentyä happokastepistettä, joka on kriittistä materiaaleille. (Vakkilainen 2017, 171.) Happokastepisteen määrittäminen on tärkeää materiaalien syöpymisen estämiseksi.

Esilämmittimet voidaan jakaa raaka-aineen mukaan valurauta- ja teräspuutkiesilämmittimiin. Valurauta kestää terästä paremmin matalalämpötilakorroosiota ja on hyvä materiaali, jos virtaava neste on kylmää. Lisäksi valurautaputket kestävät paremmin savukaasuista johtuvaa eroosiota ja mahdollisten nuohomien aiheuttamaa kulutusta. Valurautarakenteen huonona puolena on huono paineen kesto, mikä on noin 60 bar. Paineen kestoa pystytään kumminkin parantamaan komppoundrakenteella, jossa on yhdistetty teräsputki ja ulkoinen valurautarakenne. (Huhtinen ym. 2004, 194-195.)

Valurautaesilämmittimiä yleisempi käytettävä materiaali on hiiliteräspuutket, joiden ulkohalkaisija on 30-50 mm. Pituus- ja poikittaissuuntaiset mitat putkien välillä vaihtelevat 50-150 mm. Myös teräspuutkirakenteessa on mahdollista käyttää teräs- tai alumiinirivoituksia, joilla mahdollistetaan parempi syöpymiskestävyys. Putkien rivoituksella saavutetaan myös suurempi lämmönsiirtopinta-ala, jolla pystytään nostamaan lämmönsiirtymiskerrointia. Tyypillisesti ekonomaisereilla lämmönsiirtymiskerros on hyvin alhainen, mikä johtuu alhaisista lämpötiloista. (Vakkilainen 2017, 172.)

Standardissa SFS-EN 12953-6 on määritelty, että savukaasuilla lämmitettävän syöttöveden esilämmittimen on oltava varusteltu veden ulostulossa olevalla lämpötilan ilmaisevalla laitteella. (SFS-EN 12953-6. 2002.)

## 8.2 Savukaasupesuri

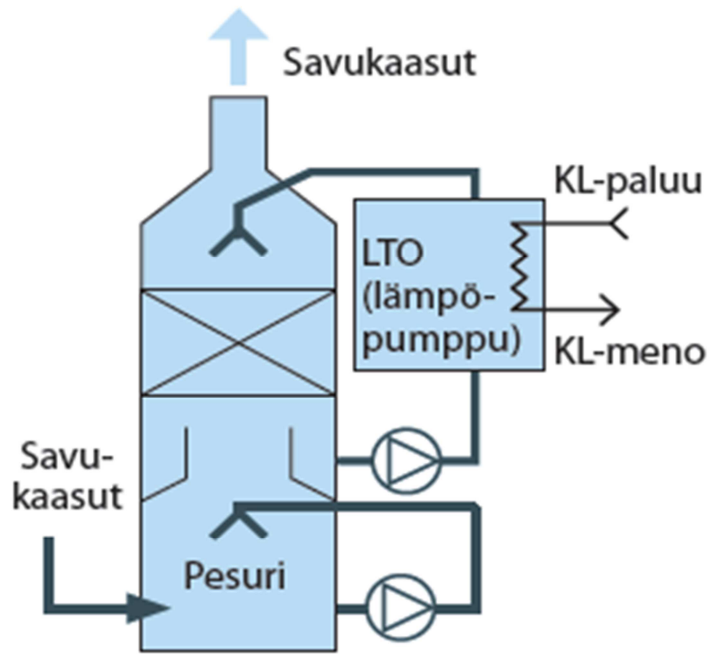
Savukaasupesurissa savukaasut ja kiertävä vesi joutuvat kosketuksiin keskenään muodostaen nopeiden virtauksien vaikutuksesta pieniä pisaroita, joihin agglomeroi-

tuu pölyhiukkasia savukaasuista. Syntynyt vesipisaraseos puhdistetaan erikseen pisanerottimessa. (Huhtinen ym. 2004, 255.)

Aikaisemmin pesureilla oli pääsääntöisesti tarkoituksena savukaasujen hiukkaspäästöjen alentaminen mutta nykyään se toimii myös suurimmassa määrin lämmöntalteenoton tehostamisessa. (Järvenreuna & Nummila N.d, 2.) Savukaasupesureiden käyttö pelkästään pölynerottamiseen on kumminkin vähäistä, mikä johtuu suurista investointikustannuksista vedenpuhdistimiin. Pölynerotusta kumminkin käytetään tilanteissa, joissa korkeiden lämpötilojen vuoksi muiden järjestelmien käyttö on mahdotonta lämpötilaa jäähdyttämättä. (Huhtinen ym. 2004, 255.) Tämän takia savukaasupesureita käytetään yhdessä lämmöntalteenottojärjestelmien kanssa.

Käytännössä yhdistetty lämmöntalteenottojärjestelmä ja hiukkaspäästöjensuodatus perustuvat kahteen vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa savukaasuista pestään suuriosa hiukkasista. Toisessa vaiheessa savukaasut kulkevat lauhduttimeen, jossa ne luovuttavat lämpöenergiansa. Lämpöenergia siirtyy yhdessä tai useammassa täytekappalekerroksessa savukaasuista täytekappaleisiin ja edelleen kiertoveteen. Savukaasuista lauhtunutta kiertovettä pumpataan lämmönvaihtimelle, jossa se siirtää lämpöenergiansa mm. kaukolämpöveden. (Järvenreuna & Nummila N.d, 2.)

Lämpöenergian siirtymisen tehostamiseksi sekä savukaasujen kastelämpötilan varmistamiseksi on myös olemassa lämpöpumppukytkennällä varustettuja savukaasupesureita. Lämpöpumppu mahdollistaa termoaineen avulla kaukolämmön paluuveden lämpötilasta riippumattoman savukaasupesurin kastelämpötilan saavuttamisen. Lämpöpumppukytkennällä pystytään myös nostamaan lämpötehoa noin viisinkertaiseksi. (Järvenreuna & Nummila N.d, 3.) Kastepisteen saavuttamista voidaan parantaa tarvittaessa palamisilman kostuttimella (Huhtinen ym. 2004, 255). Kuviosta 16 voidaan havaita savukaasupesurin toimintaperiaate.



Kuvio 16. Savukaasupesurin toimintaperiaate (Järvenreuna & Nummila N.d, 3)



## 9 Lämmöntalteenottojärjestelmän mitoitus

### 9.1 Arviointimenetelmä NTU

Yksi monista lämmönvaihtimen mitoituksessa käytettävistä menetelmistä on  $\epsilon$ -NTU (Number of Transfer Units) -menetelmä. Tässä menetelmässä tarvittavat lähtötiedot perustuvat lämmönsiirtimeen tuleviin lämpötiloihin sekä mitoittavaan lämpökapasiteettiin.

Monissa tapauksissa näitä arvoja tarkastellaan lämpöä talteen ottavasta virtaavasta nesteestä ja lämpöä luovuttavasta savukaasusta. Menetelmässä yksinkertaistetaan huomattavasti lämmönvaihtimen mitoitusta, perustuen maksimaaliseen ja todelliseen lämmönsiirtopotentiaaliin sekä niiden väliseen tehokkuuteen.

#### 9.1.1 Lämmönsiirtopotentiaali ja tehokkuus

NTU-menetelmässä tarkoituksena on määritellä lämmönvaihtimelle lämmönsiirtopotentiaali ja tehokkuus. Selvittäessä lämmönvaihtimen tehokkuutta  $\epsilon$  täytyy ensin laskea suurin mahdollinen lämmönsiirtopotentiaali  $Q_{max}$ , jossa otetaan huomioon mahdollisimman suuri lämpötilaero. Tämä saadaan laskettua seuraavalla kaavalla 11 (Incropera, Dewitt, Bergman & Lavine 2006, 687):

$$Q_{max} = C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (11)$$

missä  $Q_{max}$  = lämmönsiirtopotentiaali

$C_{min}$  = alhaisin lämpökapasiteetti

$T_{h,i}$  = kuuman aineen sisääntulolämpötila

$T_{c,i}$  = kylmän aineen sisääntulolämpötila

Alhaisin lämpökapasiteetti  $C_{min}$  saadaan laskemalla molemmille virtaaville aineille oma lämpökapasiteetti ja vertailemalla tuloksia toisiinsa. Tuloksista alhaisinta käytetään laskennassa. (Incropera ym. 2006, 686-687.) Kaavoista 12 ja 13 voidaan havaita laskentakaavat lämpökapasiteeteille.

$$C_h = m_h \times c_h \quad (12)$$

$$C_c = m_c \times c_c \quad (13)$$

missä  $c_h$  = kuuman aineen ominaislämpökapasiteetti

$c_c$  = kylmän aineen ominaislämpökapasiteetti

$m_h$  = kuuman aineen massavirta

$m_c$  = kylmän aineen massavirta

$C_h$  = kuuman aineen lämpökapasiteetti

$C_c$  = kylmän aineen lämpökapasiteetti

Laskettaessa suurinta mahdollista lämmönsiirtopotentiaalia on huomioitava, että tämä arvo ei kerro todellisuutta. Määriteltäessä todellista lämmönsiirtopotentiaalia täytyy ottaa huomioon lämmönsiirtimessä tapahtuva häviö sekä mitoittavia tekijöitä, kuten mahdollinen happokastepistelämpötila. Häviö huomioidaan lämmönvaihtimen tehokkuus kertoimen  $\varepsilon$  avulla. Todellinen lämmönsiirtopotentiaali saadaan laskettua kaavalla 14. (Incropera ym. 2006, 687):

$$Q = \varepsilon \times C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (14)$$

missä  $\varepsilon$  = tehokkuusluku

$Q$  = todellinen lämmönsiirtopotentiaali

josta tehokkuus  $\varepsilon$  saadaan suoraan laitetoimittajalta tai voidaan määrittää tarvittavien lämpötilojen ollessa tiedossa. Tehokkuusluku voidaan laskea kaavoilla 15 ja 16. (Incropera ym. 2006, 687):

$$\varepsilon = \frac{C_h(T_{h,i} - T_{h,o})}{C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (15)$$

tai vaihtoehtoisesti

$$\varepsilon = \frac{C_c(T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (16)$$

missä  $T_{h,o}$  = kuuman aineen ulostulolämpötila

$T_{h,o}$  = kylmän aineen ulostulolämpötila

$Q_{todellinen}$  = todellinen lämmönsiirtopotentiaali

### 9.1.2 Lämmönsiirtopinta-ala

NTU-menetelmässä on myös mahdollista selvittää lämmöntalteenottojärjestelmän lämmönsiirtopinta-ala. NTU-arvo on dimensioton luku, jota käytetään laajasti erilaisissa lämmöntalteenottojärjestelmä analyseissa. Pinta-ala saadaan laskettua seuraavalla kaavalla 17. (Incropera ym. 2006, 687):

$$A = \frac{NTU \times C_{min}}{U} \quad (17)$$

missä  $A$  = lämmönvaihtimen pinta-ala

$U$  = lämmönsiirtymiskerroin

Jokaiselle lämmönvaihtimelle on määritelty omat NTU-arvot, jotka saadaan laskettua erilisistä taulukoista (Liite 4) siinä tapauksessa, kun pinta-ala ei ole tiedossa. (Incrope-

ra ym. 2006, 690.) Työssä käytetylle ristivirtalämmönvaihtimelle käytetään kaavaa 18.

$$NTU = \frac{1}{C_r - 1} \ln \left( \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C_r - 1} \right) \quad (C_r < 1) \quad (18)$$

$$NTU = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad (C_r = 1)$$

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

missä  $C_r$  = lämpökapasiteettisuhde

$C_{max}$  = korkein lämpökapasiteetti

## 9.2 Lämmönsiirtymiskerroin

Kokonaislämmönsiirtymiskerroin määritellään kahden eri aineen välillä, jotka ovat eristetty toisistaan seinällä. Aineiden yksittäisiin lämmönsiirtymiskertoimiin vaikuttaa hydrodynaamiset ominaisuudet, kuten virtauksen turbulenttisuus ja laminaarisuus. Lämmönsiirtymiskertoimiin liittyy myös fyysiset ominaisuudet kuten tiheys, viskositeetti ja termodynaamisuus. Yksikkönä lämmönsiirtymiskertoimessa käytetään  $W/m^2K$ , joka ilmaisee lämpöenergian siirtymisen pinta-alaa kohden lämpötilan muuttuessa yhdellä yksiköllä. (Dimian ja Bildea 2008, 475.)

Laskettaessa tarkempaa lämmönsiirtymiskerrointa, jokaisen kohteeseen liittyvän eri aineen siirtymiskerroin on määriteltävä erikseen. Tämä vaihe tapahtuu varsinaisessa suunnittelussa, jolloin lämmöntalteenottojärjestelmän lämmönsiirtymispinta-ala määritellään tarkasti. Lämmönsiirtymiskertoimen määrittelyä varten on laskettu liikiarvoja, jotka ovat taulukoituna eri aineille ja lämmönsiirtojärjestelmille. Liitteessä 5 on esitetty eri aineiden lämmönsiirtymiskertoimia.

Lopputulokseen vaikuttaa myös lämpötilaeroista ja aineiden pitoisuuksista johtuvan likaantumisen synnyttämä lämmönsiirtymisen huonontuminen. Liitteessä 6 on esitetty likaantumisen aiheuttamia kertoimia.

Näiden kahden kertoimen avulla saadaan muodostettua kokonaislämmönläpäisykerroin tietylle lämmönvaihdinjärjestelmälle. Liitteessä 7 on esitetty kenno-, ja putkilämmönsiirtimien kokonaislämmönsiirtymiskertoimia.

## 10 Lämmöntalteenottojärjestelmän esisuunnittelu

### 10.1 Lähtötiedot ja toteutus

Lämmöntalteenottojärjestelmän esisuunnittelussa käytiin Varkaudessa selvittämässä kaukolämmön sekä savukaasujen virtaus- ja lämpötila-arvot. Selvityksiin kuului tarkastelu vuoden 2016 tehtyihin päivittäisiin käyttöraportteihin ja perehtyminen Pöyryn laatimaan savukaasujen päästömittaukseen sekä laitosdokumentteihin. Laitosdokumentit olivat luettavissa vain paikan päällä tiedon leviämisen estämiseksi. Perehtymiseen kuului tulitorvikattilan ja pölypolttajärjestelmän rakenteen selvitys ja prosessi- ja instrumentointikaavion tekeminen olemassa olevasta järjestelmästä. Prosessi- ja instrumentointikaavioon pystyttiin esittämään tuleva lämmöntalteenottojärjestelmä toimilaitteineen. Työn loppuvaiheissa Varkaudessa käytiin myös työmaapalaverissa toimittajan kanssa liittyen lämmöntalteenottojärjestelmän toteutukseen sekä projektin loppupalaverissa Varkauden Aluelämpö Oy:n toimihenkilöiden kanssa.

Selvityksissä saatiin selville savukaasujen tilavuusvirta sekä lämpötila 4 MW teholla Pöyryn tekemästä päästömittausraportista kesäkuussa vuonna 2016. Massavirta pystyttiin ratkaisemaan tilavuusvirrasta  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  tiheyden ollessa  $1,37 \text{ kg}/\text{Nm}^3$  kyseisellä kostealla savukaasulla. Tiheys laskettiin savukaasukomponenttiosuuksien avulla, mikä voidaan havaita liitteestä 8.

Savukaasujen lämpötila saatiin ratkaistua päästömittausten tuntikohtaisien lämpötilojen perusteella. Päästömittausten perusteella tulitorvikattilaa ajettiin täydellä teholla kello 15:39-17:32 välisenä aikana. Mittaustietojen ollessa tasatunnein otettiin lämpötilakeskiarvot 15:00-18:00 väliseltä ajoilta, jolloin lämpötilaksi saatiin  $200,3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Päästömittausraportin tarvittavat osat on esitetty liitteissä 9 ja 10. Savukaasujen lähtötiedot voidaan havainnoida taulukosta 3.

Taulukko 3. Pöyry Finland Oy:n päästömittauksiin perustuvat lähtötiedot

Mittaus	Tulos	Yksikkö
Savukaasun massavirta (kostea tiheys 1,37 kg/Nm <sup>3</sup> )	2,74	[kg/s]
Savukaasun lämpötila tulitorvikattilan jälkeen	200,3	[°C]

Kaukolämpöveden tilavuusvirta sekä lämpötila täydellä teholla (4MW) saatiin Varkauden Aluelämpö Oy:n käyttöraporteista, joista on valittu 20. päivä helmikuuta vuodelta 2016 jolloin tulitorvikattila oli täydellisessä pellettipölykäytössä. Tätä päivää käytettiin, koska toisina päivinä laitosta oli käytetty öljyllä pellettipölyn sijasta, lisäksi poltinta oli käytetty 24 tuntia vuorokaudesta. Laskennoissa oletettiin veden tiheyden olevan 1000 kg/m<sup>3</sup>, jolloin tilavuusvirrasta saatiin ratkaistua massavirta. Lämpötila 70 °C määriteltiin Varkauden Aluelämpö Oy:n kanssa lämmöntalteenottojärjestelmän mitoitusarvoksi. Varkauden Aluelämpö Oy:n käyttöraportti helmikuulta on esitetty liitteessä 11 ja kaukolämmön lähtötiedot taulukosta 4.

Taulukko 4. Varkauden Aluelämpö Oy:n käyttöraporttiin perustuvat lähtötiedot

Mittaus	Tulos	Yksikkö
Kattilaveden massavirta (tiheys 1000kg/m <sup>3</sup> )	24,6	[kg/s]
Kaukolämpöverkon paluulämpötila	59	[°C]
lämmöntalteenottojärjestelmälle asetettu lähtölämpötila	70	[°C]

Kohteessa myös tehtiin mitoitus, jolla pystyttiin tekemään alustavat laitesijoituspiirustukset. Mittauksien tukena oli Varkauden Aluelämpö Oy:ltä saadut DWG-formaatissa olevat tiedostot, jotka oli päivitetty pellettipöly modernisoinnissa vuonna 2015. Mittauksien lisäksi tehtiin kartoitus käyttökomponenteista kuten pellettipölypolttoon liittyvistä laitteista. Varkauden Aluelämpö Oy antoi myös luvan valokuvata kohdetta.

Varkaudesta saatiin myös tarkat polttoaineanalyysit liittyen toimitettuun pellettiin. Polttoaineen toimitus on toteutettu Stora Enson toimesta ja viralliset polttoaineana-

lyysit saatiin heidän kauttaan. Tarkemmat tiedot toimitetusta pelletistä voidaan havaita Stora Enson pellettianalyysistä liitteestä 12.

Varkauden Aluelämpö Oy:llä tehtyjen vierailuiden jälkeen varsinainen selvitys- ja laskentatyö tehtiin Elomatic Oy:n toimistolla. Arvoihin pääsemiseksi luotiin laskentatyökalu, jota voidaan tutkia liitteestä 13. Näiden lisäksi projektin aikana oltiin kontaktissa toimittajien kanssa mahdollisten muutoksien ja kysymysten takia.

## 10.2 Polttoaineanalyysi

Savukaasuanalyysin määrittelemiseksi oli tärkeää saada Stora Ensolta tarvittavat polttoaineanalyysit, joista selvisi alkuainepitoisuudet sekä kosteusprosentti Kiteeltä toimitetusta pelletistä. Polttoaineanalyysit oli tehty maaliskuun lopussa vuonna 2016 ILAC MRA:n toimesta Tšekissä. Polttoaineanalyysit saatiin tekemällä kysely Stora Ensolle sähköpostitse, josta saatiin taulukossa 5 olevat arvot:

Taulukko 5. Pellettipöly polttoaineanalyysi

Parametri	Yksikkö	Arvo
Kosteusprosentti	% / massa	7 %
Hiili [C]	massa % (kuiva)	46,9 %
Happi [O <sub>2</sub> ]	massa % (kuiva)	47,4 %
Vety [H]	massa % (kuiva)	5,5 %
Typpi [N <sub>2</sub> ]	massa % (kuiva)	0,1 %
Rikki [S]	massa % (kuiva)	<0,1 %
Tuhkapitoisuus	massa % (kuiva)	0,1 %

## 10.3 Savukaasulaskenta

Polttoaineista saatujen hiili-, vety-, rikki-, happi-, typpi-, tuhka- ja kosteuspitoisuuksien avulla pystyttiin määrittelemään tarkka savukaasukoostumus. Koostumuksen avulla määriteltiin savukaasujen ominaislämpökapasiteetti, jonka avulla pystyttiin laskemaan lämmönsiirtokapasiteetti lämmöntalteenottojärjestelmälle tietyllä savu-

kaasun massavirralla ja lämpötiloilla. Savukaasulaskentojen tuloksena määriteltiin myös savukaasun happokastepiste savukaasujen rikkitrioksidipitoisuuden ja kosteusprosentin perusteella. Lämpötiloina savukaasukomponenttien lämpökapasiteeteissa käytettiin lähtötiedoissa saatuja arvoja. Savukaasulaskennat toteutettiin yhtä polttoainekiloa kohden.

Savukaasuanalyyseissä käytettiin ilmakertoimena 1,54, joka vaikutti savukaasuissa olevaan hapen ja typen määrään. Ilmankerroin pystyttiin laskemaan Pöyryn päästömittauksista saadun savukaasun happipitoisuuden avulla, joka oli 7,4 % laitoksen toimiessa täydellä teholla. Lisääntyneet moolimäärät ilmakertoimen vuoksi olivat hapella 20,61 mol:ia ja typellä 77,7 mol:ia. Savukaasuanalyysit laskettiin kappaleessa 7.1 esitetyillä alkuainereaktioilla.

Savukaasuanalyysiä varten luotiin myös Microsoft Excel -ohjelmistolla laskentatyökalu, jolla pystyttiin laskemaan savukaasukoostumukset kuivissa ja kosteissa savukaasuissa mooleina sekä prosentteina, sekä määrittelemään savukaasukomponenttien paino ja tilavuus poltettua polttoainekiloa kohden (Liite 8). Lisäksi työkalulla pystyttiin ratkaisemaan savukaasun happokastepiste ja tiheys. Taulukoista 6 ja 7 voidaan havaita savukaasulaskentojen tulokset, joissa on huomioitu erikseen täydellinen palaminen ja ilmakerroin. Tuloksista voidaan myös huomata ilmassa olevan typen määrän vaikutus savukaasuissa.

Taulukko 6. Savukaasukomponenttiosuudet pellettipölypoltossa

	Kosteat savukaasut		Kuivat savukaasut	
	<i>mol/kgpa</i>	<i>mooliosuus %</i>	<i>mol/kgpa</i>	<i>Mooliosuus %</i>
CO <sub>2</sub>	39,05	18,3 %	39,05	21,5 %
H <sub>2</sub> O	31,17	14,6 %		
SO <sub>2</sub>	< 0,01	< 0,1 %	< 0,01	< 0,1 %
N <sub>2</sub>	142,84	67 %	142,84	78,5 %
Yhteensä	213,05	100 %	181,89	100 %



Taulukko 7. Savukaasukomponenttiosuudet pellettipölypoltossa ilmakertoimella

	Kosteat savukaasut		Kuivat savukaasut	
	<i>mol/kgpa</i>	<i>mooliosuus %</i>	<i>mol/kgpa</i>	<i>Mooliosuus %</i>
CO <sub>2</sub>	39,05	12,5 %	39,05	13,9%
H <sub>2</sub> O	31,17	10,1 %		
SO <sub>2</sub>	< 0,01	< 0,1 %	< 0,01	< 0,1 %
N <sub>2</sub>	220,54	70,8 %	220,54	78,7 %
O <sub>2</sub>	20,61	6,6 %	20,61	7,4 %
Yhteensä	311,365	100 %	280,2	100 %

### 10.3.1 Happokastepisteen määrittäminen

Tässä työssä happokastepisteen määrittäminen oli tärkeää matalalämpötilakorroosion estämiseksi savukaasujen alhaisen lämpötilan vuoksi lämmöntalteenottojärjestelmän jälkeen. Tästä syystä happokastelämpötila myös toimi rajoittavana tekijänä lämmöntalteenottojärjestelmän mitoituksessa. Lisäksi savukaasusuodattimen käyttöohjeessa (Pulstex & Varitex suodattimien käyttö-, huolto- ja turvallisuusohjeet. 2012) on määritelty seuraavasti:

*”Normaali prosessin ajotilanteessa prosessia tulee ajaa aina suodattimen läpi vain, jos savukaasun lämpötila ylittää riittävästi vesi- ja happokastepisteen.”*

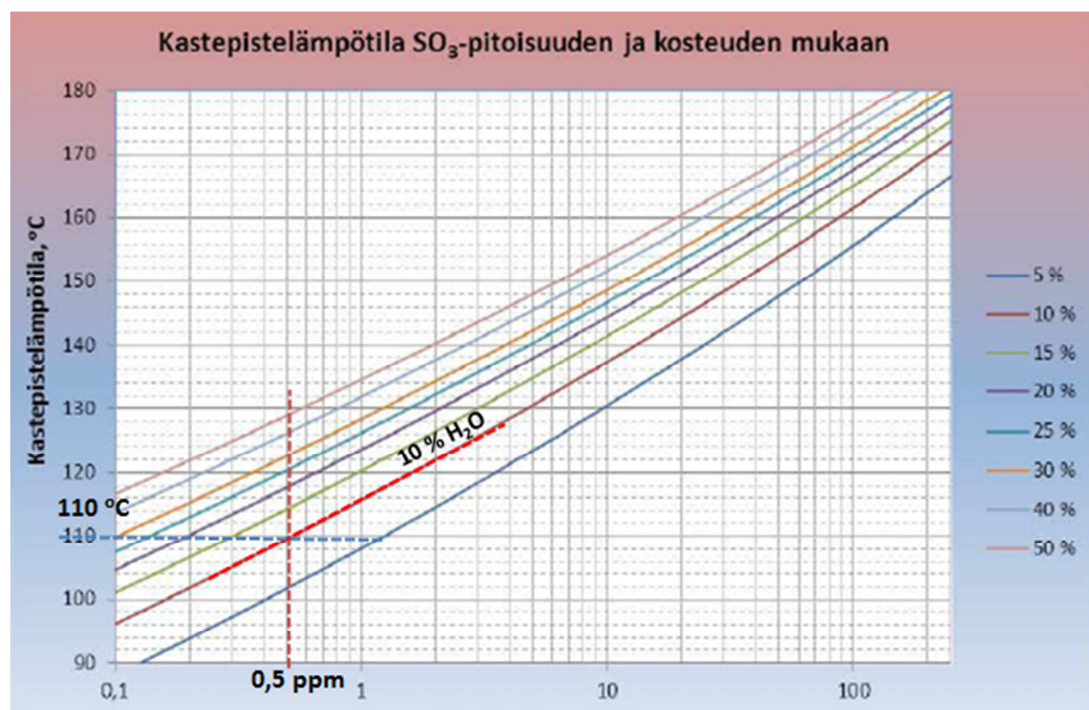
Savukaasujen happokastepisteen määrittelemiseksi käytettiin Suomen ympäristöministeriön oletusta, että savukaasujen rikkidioksidipitoisuudesta 1-5 % muodostuu rikkiatrioksidiksi. Laskelmissa käytettiin korkeinta 5 % rikkiatrioksidin muodostumisarvoa, millä varmistettiin turvallinen savukaasujen loppulämpötila. Rikkiatrioksidinosuus savukaasuista laskettiin kosteista savukaasuista, koska savukaasujen kosteudella on myös merkittävä merkitys happokastepistelämpötilaan. Kosteus oli tässä tapauksessa 10 %, perustuen Pöyryn päästömittauksiin. Laskettuun happokastelämpötilaan lisättiin myös savukaasusuodattimen käyttöohjeessa esitetty 20 °C korotus, koska laskettussa happokastelämpötilassa savukaasuissa voidaan jo havaita faasimuutosta.

Taulukossa 8 on esitettyä rikki- ja rikkitrioksidipitoisuus savukaasuissa. Rikki- ja rikkitrioksidipitoisuus on esitetty happokastepistetaulukossa ppm-muodossa sekä moolipitoisuuksien ollessa hyvin pieniä esitettiin ne parts per million – muodossa (ppm). Esitystapa osoittaa, kuinka monta miljoonasosaa jokin on jostakin.

Taulukko 8. Savukaasujen rikkidioksidi- ja rikkitrioksidipitoisuudet

	Kosteat savukaasut			Kuivat savukaasut		
	<i>mol/kgpa</i>	<i>mooliosuus %</i>	<i>ppm</i>	<i>mol/kgpa</i>	<i>Mooliosuus %</i>	<i>ppm</i>
Kosteus	31,17	10,01 %				
SO <sub>2</sub>	< 0,01	< 0,01 %	10,01	< 0,01	< 0,01 %	11,13
SO <sub>3</sub>	< 0,01	< 0,01 %	<b>0,5</b>	< 0,01	< 0,01 %	0,56

Saatu rikkitrioksidipitoisuus **0,5 ppm** sijoitettiin kosteuden mukaan jaettuun kastepistetaulukon. Kosteuden ollessa n. 10 % savukaasuissa saatiin arvoksi **110 °C**. Sijoittaminen voidaan havaita kuviosta 17 sekä saadut tulokset taulukosta 9.



Kuvio 17. Savukaasujen happokastepiste pellettipölypoltossa (Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta 2012, 9).

Taulukko 9. Savukaasujen mitoitettu happokastepistelämpötila

SO <sub>3</sub> -pitoisuus	0,5 ppm
Happokastepiste	110 °C
Happokastepiste turvakorotuksella	<b>130 °C</b>

### 10.3.2 Savukaasun ominaislämpökapasiteetti

Savukaasun lämpökapasiteetin tarkkaan määrittämiseen tehtiin myös savukaasukomponenttien ominaislämpökapasiteettien tarkastelu lämpötilassa 200 °C, koska lämpötilaksi saatiin mittauksista 200,3 °C. Savukaasun ominaislämpökapasiteetti laskettiin savukaasukomponenttien massaosuuksien avulla.

Ominaislämpökapasiteetti saatiin selvitettyä savukaasuanalyysi työkalulla. Ominaislämpökapasiteetti määriteltiin kappaleessa 7.5 esitetyllä kaavalla ja tulokseksi saatiin **1,023 kJ/kg °C**. Taulukosta 10 voidaan tutkia tarkempia kaasukomponenttien ominaislämpökapasiteetteja.

Taulukko 10. Savukaasujen massaosuudet ja ominaislämpökapasiteetit

Savukaasujen massaosuudet			
	Savukaasukomponentin massaosuus	Ominaislämpökapasiteetti 200 °C [kJ/kg °C]	Savukaasukomponentin ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg °C]
CO <sub>2</sub>	18,8 %	0,74	0,14
H <sub>2</sub> O	6,2 %	1,85	0,11
SO <sub>2</sub>	< 0,1 %	0,57	< 0,01
SO <sub>3</sub>	< 0,1 %	0,57	< 0,01
N <sub>2</sub>	67,8 %	1,04	0,7
O <sub>2</sub>	7,2 %	0,91	0,07
Yhteensä	100 %		<b>1,02</b>

## 10.4 Lämpökapasiteetti

Lämmönsiirtopotentiaalin määrittämiseksi laskettiin määrävä lämpökapasiteetti lämmöntalteenottojärjestelmälle. Määrävä lämpökapasiteetti lasketaan tässä tapauksessa erikseen savukaasuille ja kaukolämpövedelle. Lämpökapasiteetti laskemiseksi tarvittiin savukaasujen ja kaukolämmön massavirrat sekä ominaislämpökapasiteetit. Lämpötilat saatiin päästömittaus- ja käyttöraporteista sekä ominaislämpötilakapasiteetit savukaasuille laskentatyökälulla ja kaukolämpövedelle olettamalla arvo  $4,2 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ . Lämpökapasiteetit laskettiin kappaleessa 9.2.1. esitetyillä kaavoilla 12 ja 13. Lämpökapasiteetti saatiin kaukolämmölle  $17,2 \text{ kW/ } ^\circ\text{C}$  ja savukaasuille  $2,8 \text{ kW/ } ^\circ\text{C}$ , joista valittiin pienempi  **$2,8 \text{ kW/ } ^\circ\text{C}$** .

Kaukolämmön massavirraksi mitoitettiin osavirta  $4 \text{ kg/s}$  kaukolämmön paluupuolella olevasta  $27,4 \text{ kg/s}$ :sta. Tällä osavirralla saavutetaan haluttu vedenloppulämpötila  $70 ^\circ\text{C}$  valitulla putkikoolla DN80, jonka valinta perusteista kerrotaan kappaleessa 10.8. Savukaasujen massavirta oli  $2,74 \text{ kg/s}$  päästömittauksista saadun tilavuusvirran  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  sekä laskentojen tiheyden  $1,37 \text{ kg/m}^3$  avulla. Taulukosta 11 voidaan havaita yhteenveto lämpökapasiteettilaskennoista.

Taulukko 11. Savukaasujen mitoitettava lämpökapasiteetti

Savukaasut $C_h$	2,8	$\text{kW/ } ^\circ\text{C}$
Kaukolämpövesi $C_c$	18,1	$\text{kW/ } ^\circ\text{C}$
Valittu lämpökapasiteetti $C_{\min}$	2,8	$\text{kW/ } ^\circ\text{C}$

## 10.5 Lämmöntalteenottojärjestelmän lämmönsiirtopotentiaali ja tehokkuusluku

Lämpökapasiteetin valinnan jälkeen pystytään ratkaisemaan lämmönsiirtopotentiaali tietyillä lämpötilaeroilla. Maksimaalisen lämmönsiirtopotentiaalin määrittelyssä käytettiin kaukolämmön paluueden lämpötilaa  $59 ^\circ\text{C}$  sekä savukaasujen lämpötilaa  $200,3 ^\circ\text{C}$  tulitorvikattilan jälkeen. Lämpökapasiteettina käytettiin  $C_{\min}$  – arvoa. Maksimaaliseksi lämmönsiirtopotentiaaliksi tulokseksi saatiin  **$398,5 \text{ kW}$** .

Todellisuudessa kumminkaan kyseinen lämmönsiirtyminen ei ole mahdollista. Savukaasujen lämpötila laskisi liian alas saavuttaen happokastepisteen, joka aiheuttaa matalalämpötilakorroosiota järjestelmässä. Todellisen lämmönsiirtopotentiaali laske-  
miseksi käytettiin kaavaa 19.

$$Q_{\text{todellinen}} = C_h(T_{h,i} - T_{h,\text{happokastepiste}}) \quad (19)$$

missä  $Q_{\text{Todellinen}}$  = lämmöntalteenottojärjestelmän lämmönsiirtopotentiaali

$C_h$  = savukaasujen lämpökapasiteetti

$T_{h,i}$  = savukaasujen sisääntulo lämpötila

$T_{h,\text{happokastepiste}}$  = savukaasujen happokastepiste + 20 °C

Todellisessa lämmönsiirtopotentiaalissa otettiin huomioon savukaasujen happokastepiste 110 °C. Happokastepisteen alittumisen estämiseksi lämpötila mitoitettiin 20 °C korkeammaksi, jolloin mitoitettava tekijä kaukolämmön paluveden lämpötilan sijaan oli 130 °C. Turva-arvo 20 °C saatiin savukaasusuodattimen toimintaselostuksesta. Todelliseksi lämmönsiirtopotentiaaliksi saatiin lopulta **198,2 kW**.

Maksimaalisen ja todellisen lämmönsiirtokapasiteetin avulla pystyttiin määrittelemään tehokkuusluku  $\epsilon$  kaavalla 15, tulokseksi saatiin 49,8 %. Tehokkuusluku kertoo todellisen lämmönsiirtopotentiaalın olevan 49,8 % maksimaalisesta potentiaalista. Tehokkuusluku määrittyy tässä tapauksessa savukaasujen lämpötilojen sekä happokastepisteen mukaan, jolloin tehokkuusluku lämmöntalteenottojärjestelmälle jää alhaiseksi. Taulukosta 12 voidaan havainnoida saadut tulokset.

Taulukko 12. Lämmöntalteenottojärjestelmän lämmönsiirtopotentiaali ja tehokkuusluku

Maksimaalinen lämmönsiirtopotentiaali	398,5	kW
Todellinen lämmönsiirtopotentiaali	198,2	kW
Tehokkuusluku	49,8	%

## 10.6 NTU-arvon määrittäminen

NTU-arvon laskemiseksi käytettiin kaavaa 18, jossa käytettiin putkilämmönvaihtimen tehokkuuskerrointa 49,8 % sekä virtaavien aineiden lämpökapasiteettien suhdetta. NTU-arvo saatiin laskettaessa lämmönsiirtimen ollessa ristivirtaputkilämmönvaihtimen ja lämpökapasiteettien suhteen ollessa  $n$ , 0,16 tulokseksi saatiin **0,72**.

## 10.7 Lämmönsiirtymiskerroin

Lämmönsiirtymiskertoimen määrittelemiseksi käytettiin luvussa 9.1 esitettyä käsitteilytapaa. Lämmönsiirtymiskerroin valittiin liitteessä 7 olevasta taulukosta B.4 kaasuneste putkilämmönvaihtimelle. Lämmönsiirtymiskertoimeksi valittiin **20-300 W/m<sup>2</sup> °C**, lukuun on otettu huomioon nesteiden ja kaasujen lämmönsiirtymiskertoimet ja niissä ilmenevät likaantumiskertoimet. Luku on tässä tapauksessa suuntaa-antava ja antaa lähtökohdat myöhempää suunnittelua varten.

## 10.8 Arvioitu lämmönsiirtopinta-ala

Lämmöntalteenottojärjestelmän pinta-alan arvioivat laskut suoritettiin NTU-menetelmällä. Menetelmässä käytettiin lämmönsiirtimen laskettaessa NTU-arvoa ja alhaisinta lämpökapasiteettia  $C_{\min}$  sekä arvioitua lämmönsiirtymiskerrointa 20-300 W/m<sup>2</sup> °C kaasuneste putkilämmönvaihtimille. Näiden lähtötietojen perusteella pystyttiin määrittelemään lämmönsiirtopinta-ala, joka laskettiin kaavalla 20. Taulukosta 13 voidaan tarkastella lämmönsiirtopinta-aloja pienimmällä ja suurimmalla arvioidulla lämmönsiirtymiskertoimella.

$$A = \frac{0,72 \times 2,8 \text{ W } ^\circ\text{C}}{20-300 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} \quad (20)$$

Taulukko 13. Lämmöntalteenottojärjestelmän lämmönsiirtopinta-alat

Lämmönsiirtopinta-ala $A_{\max}$ (20 W/m <sup>2</sup> °C)	101,5	m <sup>2</sup>
Lämmönsiirtopinta-ala $A_{\min}$ (300 W/m <sup>2</sup> °C)	2,9	m <sup>2</sup>

Taulukosta 13 voidaan havaita pinta-alan jakauma, jolla voidaan arvioida lämmöntalteenottojärjestelmän lämmönsiirtopinta-ala. Pinta-alan avulla pystytään arvioimaan putkikoosta riippuen järjestelmän tarvittava tilavuus. Tässä arvioinnissa on käytetty putkikokoa DN80.

## 10.9 Putkikoon valinta

Putkikoon arvioimiseksi käytettiin standardin PSK2401 määrittämää taulukkoa suosituksille veden virtausnopeuksille ja tilavuusvirroille painehäviön ollessa määräävänä tekijänä. Painehäviö on tässä tapauksessa määräävä, koska paine-ero lämmöntalteenottojärjestelmässä tuotetaan pumpulla, jonka mitoitukseen paine-ero vaikuttaa. Standardista löytyy myös arviot mm. vesihöyrylle, ilmalle, palaville, palamattomille ja nesteytetyille kaasuille, palaville nesteille, hapoille, emäksille ja sulpulle. Standardissa virtausnopeuden valintaan vaikuttaa putken koko, rakenneaine ja sisäpinnan karheus, virtaavan aineen lämpötila, viskositeetti sekä energian ja putken hinta. (PSK 2401 2009, 5.)

Putkikoon määrittämisessä haluttiin selvittää asiakkaalle suositusvirtaaman vaikutus putkikoon valintaan, kun painehäviö on määräävä. Veden tiheyden ollessa  $1 \text{ kg/dm}^3$ , pystyttiin loppulämpötila määrittelemään kaavalla 21. Suositelluilla virtauksilla saatiin taulukossa 14 olevia loppulämpötiloja jäähdytysvedelle.

$$T_{c.o} = \frac{198,2 \text{ kW}}{\dot{m}_{DN} * 4,2 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}} + 59,8 \text{ }^\circ\text{C} \quad (21)$$

missä  $\dot{m}_{DN}$  = DN-putkikoon massavirta

Taulukko 14. Lämmöntalteenottojärjestelmän putkikoon vertailu

Putkikoko	Tilavuusvirta	Lämpötila
DN50	3,6 l/s	72,9 °C
DN65	6,3 l/s	67,3 °C
DN80	9,1 l/s	65,0 °C

Jäähdytysveden loppulämpötilaksi määritelty 70 °C saavutetaan parhaiten DN50 putkikoolla, jolloin virtaama on n. 4,3 l/s. Varkauden Aluelämpö Oy:n toiveesta putkikooksi kumminkin valittiin DN80 mahdollisien lisäkytkentöjen vuoksi lämmöntalteenottojärjestelmässä.

## 10.10 Laitesijoituspiirustuksien ja PI-kaavioiden esisuunnittelu

Kohteesta luotiin esisuunnittelua varten laitesijoituspiirustus, jossa esitettiin tulitorvikattiloiden, savukaasukanavien sekä kaukolämpöputkien rakenne, mitat ja sijainti kohteessa. Laitesijoituspiirustuksien suunnittelu toteutettiin Autodesk inventor-ohjelmistolla, jolla tehtiin 3D-piirustus tulitorvikattiloista, savukaasukanavista, pellettiöljy-yhdistelmäpolttimesta, laitosrakennuksesta ja lämmöntalteenottojärjestelmän sijainnista. Liitteessä 14 on esitettynä 3D-piirustus lämpökeskuksesta.

Hasintien lämpökeskuksesta oli pellettipölypoltto muutosprojektissa luotu uusitut pohjapiirustukset (liite 15), joiden pohjalta pystyttiin esisuunnittelemaan lämmöntalteenottojärjestelmän sijainti savukaasukanavistossa. Ahtaiden sisätilojen vuoksi lämmöntalteenottojärjestelmällä ei ollut muuta sijoituskohdetta kuin lämpökeskuksen ulkopuolella. Sijainnin ollessa tiedossa, laitesijoituspiirustuksilla pystytään arvioimaan tarvittavien jäähdytysputkien pituudet. Liitteessä 16 on esitetty pohjapiirustus 3D-malliin pohjautuen. Laitesijoituspiirustuksien lisäksi luotiin alustava prosessi- ja instrumentointikaavio, josta voitiin havaita tulitorvikattilan vesipiirien kytkennät, lämmöntalteenottojärjestelmän kytkentä kaukolämpöverkkoon ja savukaasukanaviin sekä tarvittavat käyttölaitteet ja niiden ohjaukset. Prosessi- ja instrumentointikaavio toteutettiin Autodesk AutoCAD Plant 3D –ohjelmistolla. Kaaviota voidaan tarkastella tarkemmin liitteestä 17.

Jäähdytysvesiputkien pituudet arvioitiin haarana tulitorvikattilalle kulkevasta kaukolämmönpaluuputkesta, josta saatiin pituudeksi yhteensä 25 metriä. Piirustuksista pystyttiin myös arvioimaan kustannuslaskentaa varten pituudet savukaasukanavia varten, joista saatiin 10 metriä. Pituuksien ollessa tiedossa pystyttiin mitoitetun teräksen tilavuuden avulla määrittelemään teräsmateriaalin hinta teräksen kilohinnan avulla.



## 11 Kannattavuustarkastelu

### 11.1 Takaisinmaksuajan periaatteet

Investoinnin takaisinmaksuaika on kannattavuuden laskentamenetelmä, joka ilmoittaa vuosina ajan jolloin investointi maksaa itsensä takaisin. Takaisinmaksuaika on yritysten yleisimmin käyttämä tarkastelumenetelmä. Investoinnin takaisinmaksuaika pystytään laskemaan kaavalla 22.

$$\text{Investoinnin takaisinmaksuaika} = \frac{\text{Alkuinvestointi}}{\text{Vuotuiset nettotulot}} \quad (22)$$

Tämä tarkastelumenetelmä korostaa investoinnin rahoituksen merkitystä. Tarkastelussa lasketaan kuinka monta vuotta kestää kattaa hankintameno nettokassavirralla. Investoinnin kannattavuutta verrataan tavoitteeksi asetettuun takaisinmaksuajaan. (Niskanen & Niskanen 2013, 319.)

Jokaisella yrityksellä useasti on omat takaisinmaksuajan tunnuslukunsa, mutta yleisen vertailupohjan takaisinmaksuajan kannattavuudelle saa tutkittaessa yritysten keskimääräisten korollisten vieraan pääoman takaisinmaksuajan tunnuslukuja taulukosta 15.

Taulukko 15. Takaisinmaksuajan tunnusluvut (Vieraan pääoman takaisinmaksuaika. N.d.)

Kannattavuustaso	Vuosien määrä
Erinomainen	Alle 1 vuosi
Hyvä	1-3 vuotta
Tyydyttävä	3-5 vuotta
Välttävä	5-10 vuotta
Heikko	Yli 10 vuotta

Takaisinmaksuajan huonona puolena on, että se ei ota huomioon rahan aika-arvoa. Kun laskentakorko investoinnille otetaan huomioon, takaisinmaksuajat ilmenevät

pidemmiksi. Laskentakorkoa määriteltäessä yritykset ottavat huomioon rahan aika-arvon lisäksi investoinnin riskin, joka nostaa laskentakorkoa.

Laskentakaavalla 23 voidaan laskea yksinkertainen korollinen takaisinmaksuaika (Tarkka takaisinmaksuaika, N.d.):

$$\text{korollinen takaisinmaksuaika} = \frac{-\ln\left(\frac{1-H}{iS}\right) - \ln(i)}{\ln(1+i)} \quad (23)$$

missä  $H$  = investoinnin suuruus

$S$  = nettotuotto

$i$  = laskentakorko

## 11.2 Kustannustehokkuuden määritelmät ja toteutus

Varkauden Aluelämpö Oy:n kannattavuustarkastelussa tutkittiin investointia takaisinmaksuajan näkökulmasta, jossa otettiin huomioon kohdat.

- järjestelmän hankintakustannukset
- arvioidut savukaasusuodattimen huoltokustannussäästöt vuodessa
- säästetyn polttoaineen kustannukset
- kaukolämpöenergialla saavutettu tuotto,

joista järjestelmän hankintakustannuksissa otettiin huomioon tekijät:

- lämmöntalteenottojärjestelmän suunnittelu, kokoonpano ja käyttöönotto
- kaukolämpövesiputkiston suunnittelu ja muutokset
- savukaasukanavien suunnittelu ja muutokset
- sähkö- ja automaatio suunnittelu ja asennukset
- projektointi
- valvonta
- varaukset.

Käytännössä järjestelmän hankintakustannukset saatiin eri toimittajien budjettitarjouksista sekä Elomaticin sisäisillä käytännöillä ja kustannuslaskentatyökaluilla, jotka

perustuvat aiempiin projekteihin. Elomaticin sisäisiä käytäntöjä tutkittiin keskustelu- ja palavereilla ja kustannuslaskentatyökaluja jaettiin Elomaticin sisäisesti. Kustannuksia tarkasteltiin toimittajan kokonaistoimituksena tai vaihtoehtoisesti osatoimituksina toimittajan sekä Elomaticin kustannusarvioinnin avulla.

Osatoimituksiin kuului tässä työssä lämmöntalteenottojärjestelmän jäähdytysvesiputkisto, jäähdytysvesipumppu, sähkömoottori, taajuusmuuttaja, savukaasukanavamutokset sekä sähkö- ja automaatio suunnittelu, kytkennät ja asennukset. Tässä työssä hinnat olivat laskettu varauksien ollessa 5 %.

### 11.3 Investoinnin säästö- ja tuottopotentiali

#### 11.3.1 Polttoainesäästö

Säästetyn polttoaineen kustannukset laskettiin pelletin määrällä vuoden käyttötunteja kohden. Käyttötunnit on määritelty vuoden 2016 käyttöraporteista, jotka olivat 792 tuntia vuodessa.

Käyttötuntien sekä lämmöntalteenottojärjestelmän tehon avulla pystyttiin ratkaisemaan säästetty lämpöenergia. Lämpöenergia määrää peilattiin Suomesta keskiarvolla laskettuun pelletin tonnihintaan, jonka arvo saatiin Elomaticin tilastoista. Säästöksi saatiin **7 233 €/a**. Taulukosta 16 voidaan havainnoida lähtötiedot ja tulokset polttoainesäästöille.

Taulukko 16. Investoinnin polttoainesäästö

Polttoainesäästö	
Tulitorvikattilan hyötysuhde	81,5 %
Tulitorvikattilan käyttötunnit vuodessa	792 h
Pelletin lämpöarvo saapumistilassa	4,8 MWh/t
Lämmöntalteenottojärjestelmän teho	198,2 kW
Pelletin hinta	180 €/t
Säästetty pelletin määrä (ennakkoarvio)	15,3 t/a
Säästetty pelletin määrä (vuonna 2016)	40,2 t/a
<b>Säästö vuoden 2016 toteumalla</b>	<b>7 233 €/a</b>

### 11.3.2 Savukaasusuodattimen tehostamissäästö

Tarkasteltaessa lämmöntalteenottojärjestelmän investointia, savukaasusuodattimen tehostamissäästö oli merkittävä osatekijä. Nykyisen savukaasusuodattimen huoltovälin oli huomattu olevan kolmenkertaisesti lyhyempi kuin suuremmissa kattilassa. Suuremman kattilan savukaasusuodattimen huoltovälin ollessa 5000 tuntia, pystyttiin sitä käyttämään saavutettavana huoltovälinä investoinnin jälkeen. Huoltovälien avulla laskettiin vuosikustannukset suhteessa vuoden käyttötunteihin vuonna 2016, jotka olivat 792 tuntia. Yhden savukaasusuodattimen huollon huoltokustannus oli yhteensä 30 000 €, joka saatiin käyttökokemusten perusteella. Huoltovälin parantamisella saavutetuksi säästökseen saatiin **9 504€/a**. Taulukosta 17 voidaan tarkastella saatuja tuloksia.

Taulukko 17. Investoinnin savukaasusuodattimen huoltovälin tehostamissäästö

Savukaasusuodattimen tehostamissäästö	
Savukaasusuodattimen huoltoväli (Nykyinen)	1667 h
Savukaasusuodattimen huoltoväli (lämmöntalteenottojärjestelmän jälkeen)	5000 h
Savukaasusuodattimen huoltokustannus	30 000 €
Vuosikustannukset (Nykyinen)	14 256 €/a
Vuosikustannukset (lämmöntalteenottojärjestelmän jälkeen)	4 752 €/a
<b>Säästö</b>	<b>9 504 €/a</b>

### 11.3.3 Kaukolämpöenergian tuotto

Kannattavuustarkastelussa otettiin myös huomioon lämmöntalteenottojärjestelmällä tuotetun lämpöenergian myyminen kaukolämpöenergiana Varkauden Aluelämpö Oy:n asiakkaille vuoden 2016 toteutuneiden tuntien mukaan. Kaukolämmön hinta saatiin Varkauden Aluelämpö Oy:n yleisistä hintasopimuksista, josta laskettiin arviolta 15 %:n katetuotto. Tuotettu kaukolämpö oli laskettu lämmöntalteenottojärjestelmän tuotolla vuodessa. Tuotetusta kaukolämpöenergiasta vähennettiin kaukolämpöverkosta johtuvat lämpöhäviöt, jotka oletettiin olevan keskimäärin 15 %. (s.203. Energiategollisuus. Kaukolämmön käsikirja). Tuotoksi saatiin yhteensä **1 369 €/a**. Taulukossa 18 esitetään kaukolämpöenergian tuotto ja sen lähtötiedot.

Taulukko 18. Investoinnin kaukolämpöenergian tuotto

Kaukolämpöenergian tuotto	
Tuotettu kaukolämpö	169,9 MWh/a
Kaukolämmön hinta	68,4 €/MWh
Arvioitu kaukolämpö kate 15 % kaukolämmön hinnasta	10,3 €/MWh
Kaukolämpöhäviöt	15 %
<b>Tuotto</b>	<b>1 369 €/a</b>

## 11.4 Lämmöntalteenottojärjestelmän kustannukset

Lämmöntalteenottojärjestelmän investointikustannuksia selvitettiin budjettitarjouksilla sekä Elomaticin sisäisillä kustannuslaskentatyökaluilla. Budjettitarjouspyyntöjä lähetettiin usealle eri toimittajalle, joihin lisättiin liitteeksi seuraavat lähtötiedot.

- laskennoista saadut lämpötekniset arvot
- jäähdytysputkien sekä savukaasukanavien koko- ja pituusarviot
- mitoitettu laitesijoituspiirustus
- alustava prosessi- ja instrumentointikaavio

Budjettitarjouspyynnöt lähetettiin kymmenelle eri toimittajalle, joista neljä olivat kiinnostuneita. Saatujen budjettitarjouksien perusteella pystyttiin luomaan asiakkaalle investointikustannukset sekä tarkastelemaan investoinnin kannattavuutta. Lasketujen tuloksien yhteenveto voidaan nähdä taulukosta 19. Tarjouksien sekä osatoimituksien kustannukset pystytään tarkastelemaan tarkemmin yhteenvedosta liitteistä 18 ja 19. Budjettitarjouksissa olevien toimittajien tarkempia tarjouksia voidaan tutkia liitteistä 20–25. Toimittajien nimet ovat työssä jätetty pois, koska toimittajien julkisuus voi aiheuttaa toimittajille tappioita ja kilpailijoille kilpailullista hyötyä.

Taulukko 19. Yhteenveto kannattavuuslaskennoista

Säästö- ja tuottopotentiali	Hinta
Huoltokustannus säästö	9 504 €
Kaukolämpöenergian tuotto	1 369 €
Polttoainesäästö	7 233 €
<b>Yhteensä</b>	<b>18 106 €</b>
<b>Investointikustannus yhteensä</b>	
• Toimittaja 1	186 730 €
• Toimittaja 2	281 280 €
• Toimittaja 3	117 160 €
• Toimittaja 4	127 560 €

## 11.5 Lämmöntalteenottojärjestelmän takaisinmaksuaika

Kaikkien kannattavuustarkasteluun liittyvien kustannuksien ollessa selvillä pystyttiin laskemaan investoinnin takaisinmaksuajat. Takaisinmaksuaikoihin otettiin huomioon toimittajien budjettitarjouksiin lisätyt osatoimituksien kustannusarviot kokonaisuudesta riippuen. Koroton sekä korollinen takaisinmaksuaika laskettiin kaavoilla 22 ja 23, missä korollisessa takaisinmaksuajassa käytettiin 5 % laskentakorkoa. Takaisinmaksuajat voidaan nähdä taulukosta 20.

Taulukko 20. Investoinnin takaisinmaksuajat

Toimittaja	Takaisinmaksuaika	Korollinen takaisinmaksuaika
Toimittaja 1	10,3 vuotta	14,9 vuotta
Toimittaja 2	15,5 vuotta	30,7 vuotta
Toimittaja 3	7,0 vuotta	8,9 vuotta
Toimittaja 4	6,5 vuotta	8,0 vuotta

## 11.6 Pellettipöly-tulitorvikattilan hyötysuhde

Kattilan hyötysuhdetta mitataan lämmönsiirto- ja prosessilaitteiden toimivuudella siirtää polttoaineenlämpöteho määriteltyyn väliaineeseen, kuten veteen. Seuraavaksi voidaan havaita kaava 23 hyötysuhteen laskentaan. (Vakkilainen 2017, 75.)

$$\eta = \frac{Q_{\text{Hyödynnetty}}}{Q_{\text{Polttoaine}}} \quad (23)$$

missä  $\eta$  = kattilan hyötysuhde

$Q_{\text{hyödynnetty}}$  = hyödynnetty kokonaislämpöenergia

$Q_{\text{Polttoaine}}$  = polttoaineen lämpöenergia

Polttoaineiden kosteus vaikuttaa merkittävästi polttoaineesta hyödynnettävään lämpöenergiaan. Kosteus nostaa savukaasujen häviöitä, mikä alentaa laitoksen hyötysuhdetta. Erityisesti polttaessa biopolttoaineita kosteus voi olla huomattavan suuri verrattuna muihin polttoaineisiin, mutta pelletti on kuitenkin muita biopolttoaineita kuivempaa ja energiatiheämpää, joten niiden häviöt ovat pienempiä.

Hyötysuhteen paraneminen pystyttiin ratkaisemaan vertailemalla ennen esilämmitintä olevaa hyötysuhdetta, esilämmittimen jälkeiseen hyötysuhteeseen. Hyötysuhteen laskemiseen käytettiin vuoden 2016 käyttöraportteja, joista valittiin ajankohta missä öljyn käyttö oli vähäisintä, jolloin lämpö on tuotettu pellettipölyllä. Päivältä 20.2.2016 saadut lähtöarvot voidaan havaita taulukosta 21.

Taulukko 21. Pellettipölylämpökeskuksen käyttöraporttitiedot

Käyttöraportti 20.2.2016	
Kattilankäyttö	24 h
Öljynkäyttö	3 l
KL-virtaus	88,7 m <sup>3</sup> /h
KL-massavirta	24,6 kg/s
KL-menoveden lämpötila	100,6 °C
KL-paluuveden lämpötila	59,6 °C
Veden ominaislämpökapasiteetti	4,2 kJ/kg °C
Pelletin lämpöarvo	16,5 MJ/kg
Pellettipölyn syöttö 4 MW teholla	0,32 kg/s

Saatujen lähtötietojen avulla pystyttiin ratkaisemaan pelletin lämpöenergia sekä kaukolämpöveden hyödynnetty huippulämpöenergia. Pelletin lämpöarvon ollessa 16,5 MJ/kg ja syötön 0,32 kg/s polttimen huipputeholla saatiin kaavalla 24 laskettu polttoaineteho. Pelletinpölyn syöttö saatiin polttimen toimintaselosteesta.

$$Q_{\text{Polttoaine}} = 16,5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \times 0,32 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 5,28 \text{ MW} \quad (24)$$



Kaukolämpövedeen siirtynyt lämpöenergia saatiin laskettua kaukolämpöveden massavirran, ominaislämpökapasiteetin ja lämpötilojen erotuksen avulla. Laskenta voidaan havaita kaavasta 25.

$$Q_{Hyödynnetty} = 4,2 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} \times 24,6 \frac{kg}{s} \times (100,6^{\circ}C - 59,6^{\circ}C) = 4,24 \text{ MW} \quad (25)$$

Lämmöntalteenottojärjestelmä -investoinnin jälkeinen lämpöteho saatiin lisäämällä hyödynnettyyn lämpötehoon lämmöntalteenottojärjestelmällä tuotettu lämpöteho, joka on laskettu kaavalla 26.

$$Q_{Hyödynnetty \text{ EKO}} = 4,24 \text{ MW} + 0,198 \text{ MW} = 4,438 \text{ MW} \quad (26)$$

Saatujen lämpötehojen avulla pystyttiin määrittelemään hyötysuhteet ennen ja jälkeen lämmöntalteenottojärjestelmä investoinnin. Hyötysuhde parani **3,8 %**, tulos on laskettu kaavoilla 27, 28 ja 29.

$$\eta = \frac{4,24 \text{ MW}}{5,28 \text{ MW}} \times 100 \% = 80,3 \% \quad (27)$$

$$\eta_{eko} = \frac{4,438 \text{ MW}}{5,28 \text{ MW}} \times 100 \% = 84,1 \% \quad (28)$$

$$\eta_{tehostaminen} = 84,1 \% - 80,3 \% = 3,8 \% \quad (29)$$

## 12 Tulokset

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää ja laskea pellettipölykäyttöisen tulitorvikattilan lämmöntalteenottojärjestelmän mitoitukseen tarvittavat lähtötiedot, joiden perusteella pystyttiin rakentamaan asiakkaalle budjettitarjousten perusteella kustannusarviot lämmöntalteenottojärjestelmän toteutusta varten. Lämmöntalteenottojärjestelmän ensisijaisena tarkoituksena oli laskea liian korkeiden savukaasujen lämpötilaa ennen savukaasusuodatinta.

Opinnäytetyön tavoitteiden saavuttamiseksi toteutettiin lämmöntalteenottojärjestelmän lähtötietojen määrittely, lämpötekniinen mitoitus, alustavat laitesijoitus- ja Pi-piirustukset sekä kustannusarviot ja kannattavuustarkastelu. Lämpötekniisiin mitoituksiin kuului savukaasulaskenta, happokastepisteen määrittely, lämmöntalteenottojärjestelmän lämpötehollinen määrittely ja pinta-alan arviointi. Kannattavuustarkastelua tutkittiin takaisinmaksuajan ja hyötysuhteen avulla.

Opinnäytetyö tuloksina saatiin esisuunniteltua Varkauden Aluelämpö Oy:n toimeksiantoon soveltuva lämmöntalteenottojärjestelmä, jolla pystytään laskemaan savukaasujen lämpötiloja n. 200 °C:sta 130 °C:seen. Lämpötehollisesti lämmöntalteenottojärjestelmä pystyy siirtämään yhteensä n. 190 kW lämpöenergiaa kaukolämpöverkkoon esilämmittäen vettä 59 °C:sta 70 °C:seen. Järjestelmän lämpöpinta-ala arvioitiin  $2,9 \text{ m}^2 - 101,5 \text{ m}^2$ .

Työn esisuunnittelun perusteella saatiin tuloksena lämmöntalteenottojärjestelmän varsinaiset kokonaiskustannusarviot ja budjettitarjoukset neljältä eri toimittajalta. Toimittajista riippuen saatiin laajuudeltaan erilaisia toimituksia, mutta Elomaticin omia kustannusarvioita tehtiin jokaisen kohdalla, koska esim. sähkö- ja instrumenttikustannukset puuttuivat lähes kaikilta.

Saaduista kustannusarvioista tehtiin kannattavuustarkastelut, joista saatiin tuloksena investoinnin takaisinmaksuajat, olettaen että säästö- ja tuottopotentialin olevan kaikille sama. Säästö- ja tuottopotentialiin otettiin huomioon polttoaine- ja savukaasusuodattimen huoltokustannussäästö sekä järjestelmällä tuotettu kaukolämmön tuotto.

Takaisinmaksuajat olivat investoinnista riippuen hyvin erilaiset, joka johtuu tarjouksien indikaatiivisuudesta. Indikaatiivisuuden takia kannattavinta investointia oli hankala arvioida, koska tarjouksien tarkkuudet olivat heikot halvimmilla tarjouksilla. Korkeisiin tarjouksiin myös vaikuttaa järjestelmän toteutustapa kuten ohjausjärjestelmän toimintaperiaate. Kannattavuustarkastelussa on myös hyvä huomioida skenaario, jossa laitoksen käyttötunnit muuttuisivat säästä tai Riikinvoiman ekolaitoksen käytöstä riippuen. Skenaariosta riippuen kattilan käyttötunnit voivat jopa kolminkertaistua. Käyttötuntien noustessa kolminkertaisiksi takaisinmaksuajat laskevat samassa suhteessa kolmasosaan.

Kannattavuustarkastelun tuloksena saatiin lisäksi lämpökeskuksen hyötysuhdetarkastelu lämmöntalteenottojärjestelmän jälkeen, josta saatiin positiiviset tulokset. Hyötysuhde parani 80,3 %:sta 83,9 %:iin.

Lisäksi työssä perehdyttiin esisuunnittelun merkitykseen suunnittelussa Elomatic Oy:n toimintatavan avulla. Perehtymisen perusteella pystytään havainnollistamaan esisuunnittelun merkitys projektinkokonaisuudessa. Myös Esisuunnittelun aikana valmistuneet laskentatyökalut ovat myös hyödyllisiä jatkossa mm. savukaasuanalyyysien ja happokastepisteen määrittämisessä. Yhteenvetona kehittämistutkimuksen lopputuloksena saatiin:

- lämpöteknillinen mitoitus
- alustavat laitesijoitus- ja PI-piirustukset
- budjettitarjoukset
- kannattavuustarkastelu
- laskentatyökalut savukaasuille, lämmöntalteenottojärjestelmän mitoitukseen ja kustannuksille

## **13 Pohdinta**

### **13.1 Tuloksien arviointi ja kriittisyys**

Työn polttoaineanalyysien tuloksia pohdittaessa on huomioitavaa, että todellisuudessa polttoaineen laatu ei aina pysy vakiona. Polttoaineen laadun vaihtelu voidaan havaita esim. polttoaineen kosteuden vaihteluna, mikä vaikuttaa happokastepistee-

seen ja lämpöarvoon. Lämpöarvon laskiessa pelletin määrä kasvaa, jos haluttu lämpöteho pysyy samana. Lopulta pelletin määrän kasvu vaikuttaa kaukolämmönhintaan.

Jos työssä käytettyjä käyttö- ja päästömittausraportteja tutkittaisiin eri päivämäärillä, lähtötiedot järjestelmälle voisivat poiketa. Poikkeukset johtuisivat ulkolämpötilojen muutoksesta, lämmöntuotannon jakautumisesta eri laitosten välillä sekä yhdistelmäpolttimen öljypellettipöly polttosuhteesta. Toisaalta päästömittaus on luotettava, koska siinä on käytetty täyttä pellettipölytehoa savukaasujen lämpötilojen mittaamiseen. Savukaasujen lämpötilat eivät nouse ajankohdasta riippuen.

Laskentoja varten selvitettiin myös käyttötunnit, jonka arvioiminen oli haastavaa valmistuneen Riikinvoiman ekovoimalaitoksen myötä. Riikinvoiman lämpöteho tulee vaikuttamaan merkittävästä tulevaisuudessa lämpökeskuksien käyttötunteihin. Voimalaitoksen todellista lämmöntuotantoa ei vielä tiedetä ja sitä myötä lämpökeskuksien tarkkoja käyttötuntitietoja ei ole. Käyttötunteihin vaikuttaa myös ulkolämpötilat ja niiden heilahtelut, joita on hankala arvioida etukäteen. Suuntaa-antavuuden takia takaisinmaksuaikaan liittyvät polttoainekustannukset ja kaukolämmöntuotto voivat siis poiketa tuloksista.

Asiakkaalle tuloksena toimitettujen budjettitarjousten ja tarkastelujen avulla asiakkaan on huomattavasti helpompi valita järkevin ja kustannustehokkain vaihtoehto, mutta silti huomioitavaa on tarjouksien indikatiivisuus. Tarjouksien ollessa indikatiivisia, voivat ne poiketa lopullisesta investointikustannuksesta. Lisäksi kustannusarviointitarkkuuteen vaikuttaa kaukolämpöveden ja pelletin hinnan heilahtelu. Jokainen tekijä muuttaa investoinnin takaisinmaksuaikaa.

Lähdekriittisyydessä on huomioitavaa, että pellettipölypoltosta löytyy Suomesta hyvin vähän tietoa. Suomessa on kuitenkin muutamia yrityksiä, jotka tekevät pellettipölytekniikkaan liittyviä projekteja, mutta tiedon jakaminen on hankalaa ja salaista. Tästä syystä työssä valittiin teoriaosuudessa vertailukohdaksi Iso-Britannian ohjeistus pellettipölytekniikkaan ja siihen liittyviin määräyksiin. Ohjeistus luo uutta näkökulmaa alalle, kuinka järjestelmät tulisivat suunnitella.

## 13.2 Tuloksien vertailu

Kanasen (2012, 43) mukaan *muutosprosessin toteuttaminen voidaan siirtää vastaavaan kontekstiin, mutta ei tulosta sellaisenaan, koska tulos edellyttää muutosprosessia. Tulosta voidaan hyödyntää muuallakin ottamalla huomioon muutoksen vaatimat toimenpiteet ja konteksti.* Tämän opinnäytetyön kehittämistutkimuksen tulosta voidaan myös hyödyntää muissa vastaavissa konteksteissa ottaen huomioon muutoksen vaatimat toimenpiteet. Täten voidaan sanoa, että tulokset eivät ole suoraan yleistettävissä.

Opinnäytetyössä saatiin tuloksissa arvioitua myös lämmöntalteenottojärjestelmän pinta-alaa NTU-menetelmän avulla, missä käytettiin taulukoituja lämmönsiirtymiskertoimia. Budjettitarjouksien toimittajilla on useasti heidän omille lämmöntalteenottojärjestelmilleen valmiiksi lasketut lämmönsiirtymiskertoimet, millä pystytään laskemaan suoraan lämmöntalteenottojärjestelmän lämmönsiirtopinta-ala. Lämmönsiirtymiskertoimen tarkemman arvoon määrittämiseen vaikuttaa merkittävästi lämmöntalteenottojärjestelmän tyyppi ja putkien materiaali sekä virtaavat aineet. Työssä laskennalliset tulokset pinta-aloille olivat hyvin laajoja, koska lämmönsiirtymiskertoimen haarukka oli varsin suuri. Laskennallisilla pinta-aloilla pystytään kuitenkin tekemään alustavaa esisuunnittelua, missä voidaan arvioida lämmönvaihtimen kokoa. Tällä laskennalla saadaan nopeasti arvioitua esisuunnittelussa myös investointikustannuksia. Pinta-alat eivät kuitenkaan ole vertailtavissa yleisesti, koska vastaavissa konteksteissa lähtötiedot voivat poiketa merkittävästi.

## 13.3 Jatkotutkimustarkastelu

Opinnäytetyötä tehdessä havaittiin useita kohtia, joista pystyttäisiin tekemään jatkotutkimuksia. Työssä ilmenevää pellettipölytekniikkaa on tutkittu vähän ja Suomessa siitä ei löydy tarkkoja määritelmiä. Esimerkiksi työssä ilmenevän Iso-Britannian ympäristöministeriön tekemä ohjeistus olisi hyvä luoda myös Suomen käytäntöön pelletin- sekä pellettipölypolton lisääntyessä. Ohjeistuksen ei tulisi kumminkaan ohjata liikaa kasvavaa ja uutta tekniikkaa, mikä aiheuttaisi kilpailukyvyn heikkenemistä. Myös työssä tutkitun tulitorvikattilan pellettipölytekniikan soveltuvuutta olisi hyvä selvittää muihin Suomessa käytettäviin raskaan öljyn tulitorvikattiloihin. Modernisoimalla

muitakin lämpökeskuksia pystyttäisiin vastaamaan EU:n yhteisiin ilmastopäästötavoitteisiin.

Tässä opinnäytetyössä tutkittuja kustannuslaskelmia voitaisiin jatkotutkia projektin edetessä suunnitteluun ja toteutukseen, koska esisuunnittelu vaiheessa budjettitarjoukset ja kustannusarviot eivät ole tarkkoja. Lisäksi kohteeseen tulevien toimittajien sekä toimilaitteiden tarkentuessa pystytään kustannukset arvioimaan huomattavasti tarkemmin. Lisäksi opinnäytetyössä mainittu imagotatuksen kohoaminen vaatisi lisätutkimuksia, koska arviointi esisuunnitteluvaiheessa on hyvin hankalaa.

Työssä suoritettujen tutkimusten ohessa katselmoitiin myös tarvetta savukaasupuhaltimeen liittyvistä muutoksista, jotka saattavat olla ajankohtaisia lämmöntalteenottojärjestelmää suunniteltaessa ja käyttöönottaessa. Katselmoinnissa huomattiin puhaltimen ajoparametrien sekä teknisen erittelyn perusteella mahdollinen tarve puhaltimen päivittämiselle. Tarkemmin puhaltimen toimittajan kanssa käydyissä keskusteluissa ilmeni, että lämmöntalteenottojärjestelmän tuottama paine-ero voi johtaa puhaltimen siipipyörätehon kasvattamiseen. Tämän hetkisen mitoituksen perusteella puhaltimen siipipyöräteho riittäisi, mutta lopullinen ratkaisu saadaan järjestelmää koeajaessa. Lisäksi huomattiin saaduista savukaasupäästömittauksista, että savukaasupartikkeleiden korkea määrä voi aiheuttaa tärinää puhaltimessa. Tärinän kuitenkin pitäisi loppua lämmöntalteenottojärjestelmän käyttöönoton jälkeen, koska myös savukaasusuodatin toimisi optimaalisesti. Savukaasusuodattimen toimiessa, savukaasujen partikkeli määrä laskee. Kyseisistä syistä on järkevää tehdä katselmointi savukaasupuhaltimelle täydellisen toiminnan toteutumiseksi lämmöntalteenottojärjestelmän toteutuksen jälkeen.

## 13.4 Loppusanat

Varkauden Aluelämpö Oy:n pyytämä selvitys lämmöntalteenottojärjestelmästä osoittautui kiinnostavaksi opinnäytetyön aiheeksi pellettipölytekniikan vähäisien ennakkotietojen vuoksi sekä selkeän kehittämistarpeen muodostuessa Varkauden Aluelämpö Oy:lle ajankohtaiseksi tulevaisuudessa. Uusi pellettipölytekniikka ja todellinen kehittämistarve motivoi entisestään työn tekemisessä.

Opinnäytetyö oli ajoittain haastava ja ongelma tilanteisiin päädyttäessä ammattitaitoisia mielipiteitä oli saatavilla niin Elomatic Oy:n kuin Varkauden Aluelämpö Oy:n toimihenkilöiltä. Siksi haluankin kiittää kaikkia työssä mukana olleita henkilöitä, sekä perhettäni ja ystäviäni tuesta tämän opinnäytetyön aikana. Ilman teitä työ olisi ollut lopulta hyvin erilainen.

## Lähteet

- Alakangas, E. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus Oy. Viitattu 7.4.2017. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-38-8419-2>
- Annala, T., Hemminki, S., Juntila, M., Laukkarinen, A., Rantala, M. & Saastamoinen, J. 2000. Ympäristömittausten luotettavuus, Ympäristömittauksia koskevien säädösten tarkastelu. Tukes-julkaisu. Viitattu 10.2.2017. [http://www.tukes.fi/Tiedostot/julkaisut/9\\_2000.pdf](http://www.tukes.fi/Tiedostot/julkaisut/9_2000.pdf)
- Best Available Techniques for Pulverised Combustion of Wood Pellets in Power Plant. 2013. Bristol: Environment Agency. Viitattu 23.3.2017. [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/296543/LIT\\_8880\\_148985.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/296543/LIT_8880_148985.pdf)
- Brink, M. 2016. The Elomatic Catalogue 2016. Turku: Elomatic Oy.
- Dimian, A. C. & Bildea, C. S. 2008. Appendix B: Heat-Exchanger Design, in Chemical Process Design: Computer-Aided Case Studies, Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA. <http://dx.doi.org/10.1002/9783527621583>
- Elomatic lyhyesti. N.d. Internet-artikkeli. Elomatic Oy. Viitattu 6.1.2017. <http://www.elomatic.com/fi/yritys/elomatic-lyhyesti.html>.
- Elomaticin liikevaihto 55 miljoonaan euroon. 2017. Internet -artikkeli. Elomatic Oy. Viitattu 22.3.2017. <http://www.elomatic.com/fi/elomatic/uutiset/2017/01/17/elomaticin-liikevaihto-55-miljoonaan-euroon/>
- Hallituksen toimintakertomus. N.d. Internet -artikkeli. Varkauden aluelämpö Oy. Viitattu 22.3.2017. [http://vuosikertomus.varkaudenaluelampo.fi/issues/fi\\_fi-vuosikertomus-2015/topics/fi\\_fi-varkauden-aluelammon-vuosi-2015/articles/hallituksen-toimintakertomus-2015](http://vuosikertomus.varkaudenaluelampo.fi/issues/fi_fi-vuosikertomus-2015/topics/fi_fi-varkauden-aluelammon-vuosi-2015/articles/hallituksen-toimintakertomus-2015)
- Honkanen, H. 2015. Polttoaineiden koostumus ja palaminen. Bioenergia ja palaminen kurssimateriaalit. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.
- Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2004. Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Edita Prima Oy.
- Huttunen, R. 2017. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Työ- ja elinkeinoministeriön –julkaisu. Työ- ja elinkeinoministeriö. Viitattu 10.3.2017. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-190-6>
- Incropera, F., Dewitt, D., Bergman, T. & Lavine, A. 2006. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Hoboken, United States of America. 6<sup>th</sup> ed. John Wiley & Sons.
- Järvenreuna, J. & Nummila. N.d. Nykyaikainen savukaasupesuri – Merkittävä biolämpölaitosten kannattavuuden parantaja. Caligo Clean Efficiency. Viitattu 31.1.2017. [http://www.caligoindustria.com/lehdisto/Caligo\\_Savukaasupesuri.pdf](http://www.caligoindustria.com/lehdisto/Caligo_Savukaasupesuri.pdf)
- Kananen, J. 2012. Kehittämistutkimus opinnäytetyönä, kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylä: Jyväskylän Ammattikorkeakoulu.



Kaukolämmön tuotanto ja polttoaineet. N.d. Internet -artikkeli. Energiateollisuus. Viitattu 20.3.2017. <http://188.117.57.25/energia-ja-ymparisto/kaukolampo-ja-kaukojaahdytys/tuotanto-ja-polttoaineet>

Kaukolämpöverkkoja lähes 15 000 km. N.d. Internet -artikkeli. Energiateollisuus. Viitattu 20.3.2017. <http://energia.fi/perustietoa/energia-alasta/energiaverkot/kaukolampoverkot>

Kaukolämpöverkko. N.d. Internet -artikkeli. Energiateollisuus. Viitattu 22.3.2017. <http://188.117.57.25/energia-ja-ymparisto/kaukolampo-ja-kaukojaahdytys/kaukolampoverkko>

Kaukolämpöverkkoon liittyminen. 2016. Internet -artikkeli. Varkauden aluelämpö Oy. Viitattu 20.3.2017 <http://www.varkaudenaluelampo.fi/fi/kaukolampo/liittyma/>

Kaukolämpöä tuottavat pelletit valmistetaan ja käytetään lähellä. N.d. Stora Enson pelletin tuotanto- ja myyntipäällikkö Mauno Väyrysen haastattelu. Varkauden Aluelämpö Oy:n internet-sivut. Viitattu 1.2.2017. [http://www.varkaudenaluelampo.fi/fi/yritys/ajankohtaista/kaukolampoa-tuottavat-pelletit-valmistetaan-ja-kaytetaan-lahella/?ccm\\_paging\\_p\\_b775=4](http://www.varkaudenaluelampo.fi/fi/yritys/ajankohtaista/kaukolampoa-tuottavat-pelletit-valmistetaan-ja-kaytetaan-lahella/?ccm_paging_p_b775=4)

KH 23.01.2017. Joensuun kaupunginhallituksen kokouspöytäkirja, § 24 Riikinvoima Oy:n toiminnan esittely. Viitattu 1.2.2017 <http://webdynasty.ins.fi/djulkaisu/kokous/20171172-12.PDF>

Knuuttila, K., Alakangas E & Moisio, T. 2003. Puuenergia. Jyväskylä: Jyväskylän teknologiakeskus.

Kortelainen, J. 2015. Pelletin voimalaitoskäyttö kasvussa. Internet -artikkeli. Energiateollisuus Ry. Viitattu 23.3.2017. <http://www.energiuutiset.fi/uutiset/pelletin-voimalaitoskaytto-kasvussa.html>

Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta. 2012. Ympäristöministeriö: Energiateollisuus. Viitattu 17.1.2017. <http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BC1EA01A4-C78E-4152-A601-3AE51323EDEB%7D/119826>

Käyttö- ja huolto-ohjeet, Franssons-vasaramylly HK 45. 2015. Franssons Recycling Machinee. Sundvall, Sweden.

Laitinen, J. 2014. Varkauden Aluelämpö ja Stora Enso sopuun kaukolämmöstä. Savon Sanomien -julkaisu 14.08.2014. Viitattu 1.2.2017 <http://www.savonsanomien.fi/talous/Varkauden-Aluel%C3%A4mp%C3%B6-ja-Stora-Enso-sopuun-kaukol%C3%A4mm%C3%B6st%C3%A4/505075>

Livingston, W R. 2013. The firing and co-firing of biomass in large pulverised coal boilers. IEA Exco Workshop Jeju. Doosan Power Systems. Viitattu 20.1.2017. <http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/11/P07-The-firing-and-co-firing-of-biomass-in-large-pulverised-coal-boilers-Livingston.pdf>

Lämpökeskukset. N.d. Internet -artikkeli. Varkauden aluelämpö Oy. Viitattu 22.3.2017. <http://www.varkaudenaluelampo.fi/fi/energiatuotanto/lampokeskukset/>

Maanalaiset kaukolämpökanavat ja niiden muutokset v.2015. N.d. Vuosikertomus. Varkauden aluelämpö Oy. Viitattu 20.3.2017.

[http://vuosikertomus.varkaudenaluelampo.fi/issues/fi\\_fi-vuosikertomus-2015/topics/fi\\_fi-liiketoiminta-hallinto-ja-henkilosto-2015/articles/kaukolampoverkko\\_2015](http://vuosikertomus.varkaudenaluelampo.fi/issues/fi_fi-vuosikertomus-2015/topics/fi_fi-liiketoiminta-hallinto-ja-henkilosto-2015/articles/kaukolampoverkko_2015)

Niskanen, J & Niskanen, M. 2013. Yritysrahoitus. 7. painos. Helsinki: Edita.

Nuutinen, M. 2016. Kaukolämpö ja hybridiratkaisut. Hajautettu energiantuotanto. Kurssiluentomateriaali. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Onkalo, M. 2015. Varkauden aluelämpö modernisoi Hasintien lämpökeskuksen kaksi öljykattilaa pellettikäyttöiseksi. Lehdistötiedote. Varkauden Aluelämpö Oy. Viitattu 6.1.2017.

[http://www.varkaudenaluelampo.fi/files/1214/2260/1369/Lehdisttiedote\\_29\\_1\\_2015.pdf](http://www.varkaudenaluelampo.fi/files/1214/2260/1369/Lehdisttiedote_29_1_2015.pdf)

Pellets by Stora Enso, Ilmastoystävällinen lämmitysratkaisu. N.d. Internet -esite. Stora Enso Oy. Viitattu 1.2.2017.

[https://pellets.storaenso.com/Archive/ePelletsShop/Downloads/Pellets\\_A4\\_brochure\\_FI\\_17112016\\_light.pdf](https://pellets.storaenso.com/Archive/ePelletsShop/Downloads/Pellets_A4_brochure_FI_17112016_light.pdf)

Pelletin laatu. N.d. Internet -artikkeli. Bioenergia, Pellettienergia. Viitattu 23.3.2017.

<http://www.pellettienergia.fi/Pelletin%20laatu>

Perttula, J. 2000. Energiatekniikka. Porvoo. 1. painos. WSOY.

Projektinhoitotoiminnot. N.d. Elomatic Intranet. Elomatic Oy. Viitattu 21.2.2017.

<https://ims.elomatic.local/fi/ydinprosessit/projektinhoitotoiminnot/yleistÄ.html>

Projektin päättäminen. N.d. Elomatic Intranet. Elomatic Oy Viitattu 21.2.2017.

<https://ims.elomatic.local/fi/ydinprosessit/projektinhoitotoiminnot/projektin-pÄttÄminen>

PSK 2401. 2009. Putkiston virtausnopeudet. PSK Standardisointiyhdistys Ry. Viitattu 9.4.2017. <http://www.psk-standardisointi.fi.ezproxy.jamk.fi:2048/Standard/Ryhma24/psk2401.pdf>

Pulstex & Varitex suodattimien käyttö-, huolto- ja turvallisuusohjeet. 2012. Industri Textil.

Raaka-aineet. N.d. Internet -artikkeli. Bioenergia, Pellettienergia. Viitattu 20.3.2017.

<http://www.pellettienergia.fi/Raaka-aineet>

Raiko, R., Kurki-Suonio, I., Saastamoinen, J. & Hupa. M. 2002. Poltto ja palaminen. Jyväskylä: International Flame Research Foundation (IFRF) Suomen kansallinen osasto.

Riikinvoiman ekovoimalaitos. N.d. Internet -esite. Riikinvoima Oy. Viitattu. 23.3.2017.

[http://riikinvoima.fi/files/Riikinvoima\\_Ekovoimalaitos\\_A4\\_web1.pdf](http://riikinvoima.fi/files/Riikinvoima_Ekovoimalaitos_A4_web1.pdf) Viitattu 9.1.2016

SFS-EN ISO 17225-2. 2014. Kiinteät polttoaineet. Polttoaineen laatuvaatimukset ja – luokat. Osa 2: Luokitellut puupelletit. Suomen Standardisointiliitto SFS ry.

Vahvistettu 16.06.2014. Viitattu 23.3.2017. <https://janet.finna.fi>, SFS Online.

SFS-EN 12953-6. 2002. Tulitorvikattilat. Osa 6: Vaatimukset kattilan varusteille. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Vahvistettu 28.03.2011. Viitattu 23.3.2017. <https://janet.finna.fi>, SFS Online.

SFS-EN 12953-2. 2012. Tulitorvikattilat. Osa 2: Kattiloiden ja niiden varusteiden paineenalaiseen osiin tarkoitetut materiaalit. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Vahvistettu 07.05.2012. Viitattu 23.3.2017. <https://janet.finna.fi>, SFS Online.

Stoor, H. & Riikonen, A. 1991. Ekonomaiserin mitoitus- ja suunnitteluopas. Neste oil Oy.

Suodatinjärjestelmät pölynerotukseen ja tuotteen talteenottoon. 2016. Esite. Industri Textil. Viitattu. 23.2.2017.

<http://pubsys.kooper.se/industriertextil2011/files/Broschyrrer/Esite%20Fin%201.0.pdf>

Suodattimien käyttö- ja huolto-ohje. 2015. VKK Vaasan Kuljetuskanavat Oy.

Suomi saavuttamassa vuoden 2020 päästötavoitteet – vuoden 2030 tavoite edellyttää paljon lisätoimia. 2016. Internet -julkaisu. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Viitattu 11.2.2017. <http://www.vtt.fi/medialle/uutiset/suomi-saavuttamassa-vuoden-2020-p%C3%A4st%C3%A4st%C3%B6tavoitteet>

Stora Enso Varkaus. N.d. Internet -artikkeli. Stora Enso Oy. Viitattu 22.3.2017. <http://www.varkaudenalueelampo.fi/fi/energiatuotanto/stora-enso/>

Stora Enso lyhyesti. N.d. Internet -artikkeli. Stora Enso Oy. Viitattu 22.3.2017. <http://www.storaenso.com/lang/finland/about/Pages/stora-enso-brief.aspx>

Syrilä, A-L. 2015. Menettelyohje, tuotekehitysprojekti. Elomatic Oy. Viitattu 21.2.2017. [https://ims.elomatic.local/fi/assets/ims-editors/kaavakuvat/Tuotekehitys/Menettelyohje\\_Tuotekehitysprojekti\\_1.0.pdf](https://ims.elomatic.local/fi/assets/ims-editors/kaavakuvat/Tuotekehitys/Menettelyohje_Tuotekehitysprojekti_1.0.pdf)

Tampereen Energiantuotanto Oy, Sarankulma Heating Plant. N.d. Internet -esite. Valmet Corporation Oyj. Viitattu 23.2.2017.

[http://www.valmet.com/Valmet/products/Vault2MP.nsf/BYWID/WID-140522-2256E-8E980/\\$File/HPGB\\_R\\_2300\\_085-02\\_1405\\_Tampere\\_energia\\_flyer\\_final.pdf?OpenElement](http://www.valmet.com/Valmet/products/Vault2MP.nsf/BYWID/WID-140522-2256E-8E980/$File/HPGB_R_2300_085-02_1405_Tampere_energia_flyer_final.pdf?OpenElement)

Tarkka takaisinmaksuaika. N.d. Metropolia Ammattikorkeakoulun kurssiluentomateriaali. Helsinki: Metropolia Ammattikorkeakoulu. Viitattu 23.3.2017. <http://docplayer.fi/3558263-Investoinnin-takaisinmaksuaika.html>

Turbulent Flow and Viscosity. 2012. Internet –artikkeli. Viitattu 7.4.2017. <https://esfsciencenew.wordpress.com/2012/10/26/turbulent-flow-and-viscosity/>

Vakkilainen, E. 2017. Steam Generation From Biomass, Construction and Design of Large Boilers. Elsevier: Butterworth-Heinemann.

Varkauden Aluelämmön hallinto. N.d. Internet -artikkeli. Varkauden Aluelämpö Oy. Viitattu 6.1.2017. <http://www.varkaudenalueelampo.fi/fi/yritys/hallinto/>

Vauhkala, M. 2010. Viranomaisten vaatimien päästömittausten tuomat haasteet talviolosuhteissa, Suuret polttolaitokset ja jätteenpolto. Opinnäytetyö, AMK. Lahti: Lahden ammattikorkeakoulu. Viitattu 10.2.2017.

<https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/7708/Vauhkala.Mika.pdf?sequence=1>

Vieraan pääoman takaisinmaksuaika. N.d. internet -artikkeli. Balance consulting. Viitattu 15.2.2017.

[http://www.balanceconsulting.fi/tunnusluvut/vieraan\\_paaoman\\_takaisinmaksuaika](http://www.balanceconsulting.fi/tunnusluvut/vieraan_paaoman_takaisinmaksuaika)

Väänänen, J. 2017. Varkauden Aluelämpö Oy:n kaukolämpöinsinööri. Varkauden Kaupunki. Työmaakeskustelu 1.2.2017.

Yhdistelmäpoltin EBDL-500 FT. 2015. Käyttö- ja huolto-ohje. Enviroburners Oy.

# Liitteet

Lite 1. Lähtötietoluettelo

## LÄHTÖTIEDOT

ASIAKAS: Varkauden aluelämpö  
 PROJEKTI: Pellettipölykattilan LTO-tarkastelu

LÄHTÖTIEETO	ARVO	HUOM!
<b>Mittaukset:</b>		
Savukaasujen lämpötilat		
Savukaasun virtaama		
Savukaasuanalyysit		Takuukoe/Päästömittausraportti jos löytyy
Ominaislämpötilakapasiteetti		Takuukoe/Päästömittausraportti jos löytyy
Partikkelit		Takuukoe/Päästömittausraportti jos löytyy
Jäännöshappi		Takuukoe/Päästömittausraportti jos löytyy
Päästöt		Takuukoe/Päästömittausraportti jos löytyy
Savukaasujen kosteus		Takuukoerapotissa tai laskennan kautta (polttoaineen kosteus)
Savukaasupuhaltimen tehokäyrä		Tehokapasiteetti, täytyykö pumppu uusia paineen muutoksen takia
Kaukolämmön menoveden lämpötila		
Kaukolämmön tuloveden lämpötila		
Kaukolämmön menoveden virtaama		
Kaukolämmön tuloveden virtaama		
Kaukolämpöpumppu tehokäyrä		Tehokapasiteetti, täytyykö pumppu uusia paineen muutoksen takia
Polttoaineanalyysit		mm. tuhka, kosteus, kloridit, rikki, typpi, hiili, happi, vety.
Lämpökeskuksen toiminta/käyttö tunnit/ajat		
Lämpökeskuksen yleistiedot		Vanhat piirrustukset, kaaviot ja lähdemateriaalit
<b>Piirrustukset ja kaaviot:</b>		
Prosessikaaviot		
Layout-kuvat		
Pohjapiirustukset		
<b>Lisätiedot:</b>		

Liite 2. Erilaatuisten pellettien ominaisuuksia (Alakangas, Hurskainen, Laatikainen-Luntama & Korhonen 2016, 97).

Ominaisuus	Tuote 1	Tuote 2	Tuote 3	Tuote 4	Tuote 5
Kosteus, p-%	5,2	6,6	9,1	8,5	9,7
<b>KUIVA-AINEESSA, p-%</b>					
Tuhka	0,28	0,30	0,25	0,24	0,37
Hilli, C	49,80	49,70	49,72	49,39	49,12
Vety, H	6,12	6,11	6,13	6,10	6,03
Typpi, N	0,16	0,16	0,05	0,07	0,08
Rikki, S	0,005	0,006	0,004	0,005	0,007
<b>KUIVA-AINEESSA, mg/kg</b>					
Kadmium, Cd	0,06	0,08	0,07	0,11	0,06
Kromi, Cr	0,48	1,59	0,36	0,48	0,31
Sinkki, Zn	7,83	0,04	7,55	7,56	8,00
Kupari, Cu	1,14	2,76	1,02	1,22	1,10
Nikkeli, Ni	0,26	0,26	0,24	0,21	0,30
Rauta, Fe	9,28	8,19	8,79	7,59	29,79
Kloori, Cl	6,88	5,82	6,85	5,73	7,38
Natrium, Na	61,52	30,32	15,23	7,78	53,35
Mangaani, Mn	64,42	65,74	62,02	85,43	67,21
<b>KUIVA-AINEESSA, mg/g</b>					
Kalsium, Ca	0,57	0,59	0,54	0,62	0,64
Kalium, K	0,31	0,35	0,35	0,26	0,46
Magnesium, Mg	0,11	0,12	0,13	0,09	0,12
Fosfori, P	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03
Halkaisija, mm	8	8	8	8	8
Pituus keskimäärin, mm	16	14	19	7	14
Minimi	10	7	8	4	6
Maksimi	22	25	37	10	25
Pellettien määrä, kpl/100 g	110	120	110	300	140
Puristuslujuus (Amandus-Kahl), kp/kg	21	20	21	17	19
Minimi	20	18	20	9	17
Maksimi	21	21	21	21	21
Rummutuslujuus, hienoaines (ASTM E 1288-89, < 2,36 mm), %	1,8	1,1	1,3	1,9	2,6
Irtotiheys, kg/irto-m <sup>3</sup>					
Saapumistilassa	690	680	630	600	560
Kuivana	655	635	575	550	505
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg					
Kuiva-aineessa	19,0	18,9	19,0	18,8	18,7
Saapumistilassa	17,9	17,5	17,0	17,0	16,7
Tehollinen lämpöarvo, MWh/t					
Kuiva-aineessa	5,28	5,26	5,28	5,23	5,20
Saapumistilassa	4,98	4,87	4,74	4,73	4,63
Energiatiheys, MWh/irto-m <sup>3</sup>	3,43	3,31	2,98	2,84	2,59

Liite 3. Projektikategoriat (Projektikategoriat. 2014. Elomatic Oy. Viitattu 14.3.2017. <https://ims.elomatic.local/fi/assets/ims-editors/kaavakuvat/Projektinhoito/Projektikategoriat,%20rev%202.pdf>)

Liite 4. Lämmöntalteenottojärjestelmien NTU-laskentakaaviot (Incropera ym. 2006, 686-687).

**TABLE 11.4** Heat Exchanger NTU Relations

Flow Arrangement	Relation	
<b>Concentric tube</b>		
Parallel flow	$NTU = -\frac{\ln[1 - \varepsilon(1 + C_r)]}{1 + C_r}$	(11.28b)
Counterflow	$NTU = \frac{1}{C_r - 1} \ln\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C_r - 1}\right) \quad (C_r < 1)$	(11.29b)
	$NTU = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad (C_r = 1)$	
<b>Shell-and-tube</b>		
One shell pass (2, 4, . . . tube passes)	$(NTU)_1 = -(1 + C_r^2)^{-1/2} \ln\left(\frac{E - 1}{E + 1}\right)$	(11.30b)
	$E = \frac{2/\varepsilon_1 - (1 + C_r)}{(1 + C_r^2)^{1/2}}$	(11.30c)
$n$ Shell passes ( $2n, 4n, . . .$ tube passes)	Use Equations 11.30b and 11.30c with $\varepsilon_1 = \frac{F - 1}{F - C_r} \quad F = \left(\frac{\varepsilon C_r - 1}{\varepsilon - 1}\right)^{1/n} \quad NTU = n(NTU)_1$	(11.31b, c, d)
<b>Cross-flow (single pass)</b>		
$C_{\max}$ (mixed), $C_{\min}$ (unmixed)	$NTU = -\ln\left[1 + \left(\frac{1}{C_r}\right) \ln(1 - \varepsilon C_r)\right]$	(11.33b)
$C_{\min}$ (mixed), $C_{\max}$ (unmixed)	$NTU = -\left(\frac{1}{C_r}\right) \ln[C_r \ln(1 - \varepsilon) + 1]$	(11.34b)
All exchangers ( $C_r = 0$ )	$NTU = -\ln(1 - \varepsilon)$	(11.35b)



## Liite 5. Aineiden lämmönsiirtymiskertoimet (Dimian ja Bildea 2008, 476).

Table B.2 Partial heat-transfer coefficients.

Fluid	$h$ (W/m <sup>2</sup> K)	Fluid	$h$ (W/m <sup>2</sup> K)
<i>Gases</i>		<i>Boiling liquids</i>	
Gases, low pressure	20–80	Boiling water	1500–2000
Gases, high pressure	100–300	Boiling organics	800–1300
Hydrogen-rich gases	80–150	<i>Condensing vapor</i>	
<i>Liquids</i>		Condensing steam	4000–5000
Water, turbulent regime	1500–3000	Thermal fluids	2000–3000
Dilute aqueous	1000–2000	<i>Solutions</i>	
<i>Solutions</i>		Light organic liquids	1000–1500
Light organic liquids	1000–1500	Viscous organic liquids	500–800
Viscous organic liquids	500–800	Heavy-ends	200–500
Heavy-ends	200–500	Brines	800–1000
Brines	800–1000	Molten salts	500–700
Molten salts	500–700	Organics	800–2000
		Organics with NC	500–1500
		Refrigerants	1500

NC: noncondensables.

Liite 6. Likaantumisen aiheuttamat lämmönsiirtymiskertoimet (Dimian ja Bildea 2008, 476).

**Table B.3** Fouling as the equivalent heat-transfer coefficient.

<b>Fluid</b>	<b>Fouling (<math>W/m^2K</math>)</b>
Cooling water (towers)	3000–6000
Organic liquids & light hydrocarbon	5000
Refrigerated brine	3000–5000
Steam condensate	3000–5000
Steam vapor	4000–10000
Condensing organic vapors	5000
Condensing thermal fluids	5000
Aqueous salt solutions	1000–3000
Flue gases	2000–5000

Liite 7. Kenno- ja putkilämmönvaihtimen kokonaislämmönsiirtymiskertoimet (Dimian ja Bildea 2008, 477).

Table B.4 Overall heat-transfer coefficients for shell-and-tubes heat exchangers.

Hot fluid	Cold fluid	$U$ ( $W/m^2 K$ )
<i>Heat exchangers</i>		
Water	Water	800–1500
Organic solvents	Organic solvents	200–500
Light oils	Light oils	100–400
Heavy oils	Heavy oils	50–300
Gases	Gases	10–50
<i>Coolers</i>		
Organic solvents	Water	250–750
Light oils	Water	350–900
Heavy oils	Water	60–300
Gases	Water	20–300
Water	Brine	600–1200
Organic solvents	Brine	150–500
Gases	Brine	15–250
Water	Natural gas mixture with hydrogen	500–800
Water or brine	Gases, moderate pressures	100–200
<i>Heaters</i>		
Steam	Organic solvents	500–1000
Steam	Light oils	300–900
Steam	Heavy oils	60–450
Steam	Gases	30–300
Dowtherm	Heavy oils	50–300
Dowtherm	Gases	20–200
Flue gases	Steam or hydrocarbon vapors	30–100
<i>Condensers</i>		
Steam	Water	1000–1500
Organic vapors	Water	700–1000
Organics vapors, high NC, A	Water	100–500
Organics vapors, low NC, V	Water	250–600
Thermal fluid vapors	Tall oil	300–400
Tall oil, vegetable oil vapors	Water	100–250
<i>Vaporizers</i>		
Steam	Aqueous diluted solutions	1000–2000
Steam	Light organics	1000–1500
Steam	Heavy organics	600–900
<i>Evaporators</i>		
Steam	Sea water (long tube falling film)	1500–3000
Steam	Sea water (long tube rising film)	700–2500
Steam	Sugar solution (agitated film)	1000–2000

Liite 8. Savukaasuanalyysi laskentatyökalu

Liite 9. Pöyry Finland Oy:n päästömittausraportti, osa 1

Liite 10. Pöyry Finland Oy:n päästömittausraportti, osa 2

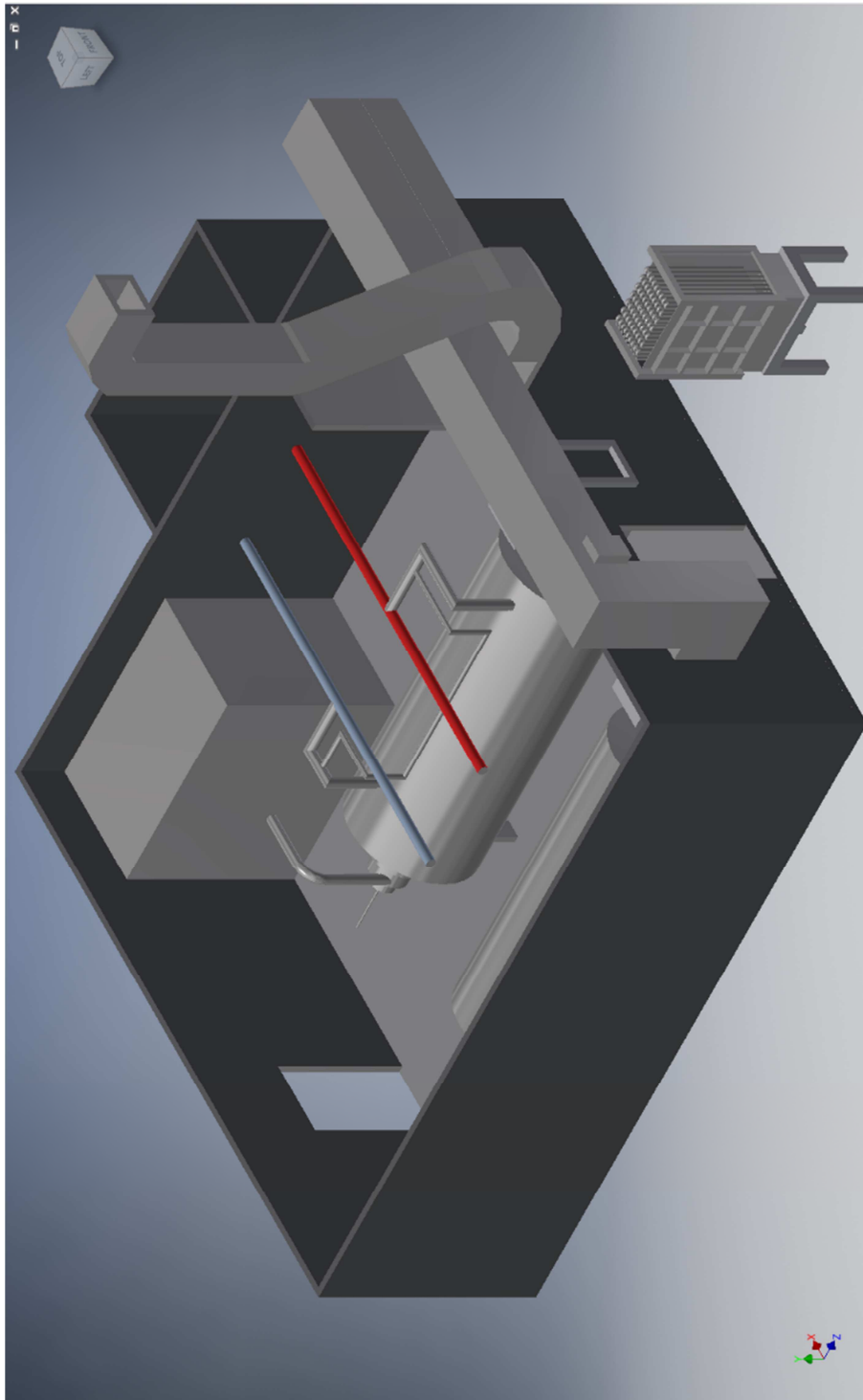
Liite 11. Varkauden Aluelämpö Oy:n käyttöraportti

## Liite 12. Stora Enson polttoaineanalyysi



Liite 13. Lämmöntalteenottojärjestelmän laskentatyökalu

Liite 14. Hasintien lämpökeskuksen 3D-piirustus



Liite 15. Hasintien lämpökeskuksen pohjapiirustus

Liite 16. Hasintien 3D-piirustus pohjainen laitesijoituspiirustus

Liite 17. Lämmöntalteenottojärjestelmän prosessi- ja instrumentointipiirustus.

Liite 18. Lämmöntalteenottojärjestelmän kustannustehokkuuden yhteenveto  
(Osa 1/2)

Polttoainesäästö		Yksikkö	
Kattilan hyötysuhde	%		81,5 %
Tuitorvikattilan käyttötunnit [Vuoden 2016 toteumalla]	h/a		792,0
Pelletinlämpöarvo saapumistilassa	MWh/t		4,8
Ekonomaiserin teho	kW		198,2
Säästetty polttoaineenergia [Vuoden 2016 toteumalla]	MWh		192,6
Säästetty pelletti [Vuoden 2016 toteumalla]	t/a		40,2
Pelletin hinta	€/MWh		37,6 €
Pelletin tonnihinta	€/t		180 €
Säästö [Vuoden 2016 toteumalla]	€/a		<b>7 233 €</b>
Savukaasusuodattimen tehostamissäästö			
Savukaasusuodattimen huoltoväli (h) [Nykyinen]	h		1667
Savukaasusuodattimen huoltoväli (h) [Ekonomaisier]	h		5000
Vuoden käyttötunnit	h		792
Savukaasusuodattimien huoltokustannus	€/krt		30 000 €
Suodatin huollot vuodessa [Nykyinen]	krt/a		0,5
Suodatin huollot vuodessa [Ekonomaisier]	Krt/a		0,2
Vuosikustannukset [Nykyinen]	€/a		14 256 €
Vuosikustannukset investoinnin jälkeen [Ekonomaisier]	€/a		4 752 €
Säästö	€/a		<b>9 504 €</b>
Tuotettu kaukolämpö			
Tuotettu kaukolämpö	MWh		157,0
Kaukolämmön hinta (Kate 15 % 68,4 €/MWh)	€/MWh		10,3 €
Kaukolämpöverkon lämpöhäviöt keskimäärin	%		15 %
Tuotto	€/a		<b>1 369 €</b>
Yhteen laskettu säästö			
Säästö			<b>18 106 €</b>

Toimittajien Budjettitarjoukset (ALV 0 %)			Toimittaja 1	Toimittaja 2	Toimittaja 3	Toimittaja 4
Toimittajan budjettitarjous	Yksikkö	Yksikkö				
LTO-järjestelmä	-	€	68 000 €	40 000 €	32 000 €	250 000 €
Huom.			200kW, sis. asennuksen	ei sis.asennusta, vain Eko + erisyls	193 kW sis. asennuksen valmistuksen	201kW, sis asennuksen
Savukaasukanava muutokset	-	€	25 000 €	ei sis. Toim.	17 000 €	sis. Toim.
Huom.			sis. huoltokäytännön mittayhteet	-	10m DN500 + Expi 500x500 sovite +	tulo DN 550 / lähtö DN 500
Jäähdytysvesiputkistot	-	€	20 000 €	ei sis. Toim.	17 000 €	sis. Toim.
huom.			pumput	-	käyrät ja kannakkeet	Saato 3-tie vent. DN80
Tuhkasuppilo + sulkusyötin ja tuhkaruuvi	-	€	22 000 €	ei sis. Toim.	ei sis. Toim.	sis. Toim.
huom.			ei sis. asennusta, tuhkakonttiin	-	-	1,5m pumppu ja vakionopeudella, ei
Sähkö- ja automaatio	-	€	10 000 €	ei sis. Toim.	ei sis. Toim.	sis. Toim.
huom.			ohjelmointi, toimintakuvaukset	-	-	toimintakuvaukset, pumppu ja
<b>Yhteensä</b>		€	<b>145 000 €</b>	<b>40 000 €</b>	<b>66 000 €</b>	<b>250 000 €</b>

Liite 19. Lämmöntalteenottojärjestelmän kustannustehokkuus yhteenveto (Osa 1/2)

Lisäkustannusarviot						
Huom. Lisättävät Omat kustannusarvioinnit (ALV 0 %)			Toimittaja 1	Toimittaja 2	Toimittaja 3	Toimittaja 4
<b>Jäähdytysvesiputkisto DN80</b>						
	Määrä	Yksikkö				
Putkisto + käyrät + supistukset (PN16 P235GH)	25 m	€	sis. Toim.	670 €	sis. Toim.	sis. Toim.
Asennukset	-	€	sis. Toim.	3 270 €	sis. Toim.	sis. Toim.
Putkituennat (kevyt Primääri + Sekundääri kannakointi)	12 kpl	€	sis. Toim.	780 €	sis. Toim.	sis. Toim.
Venttiilit	6 kpl	€	sis. Toim.	1 270 €	1 270 €	sis. Toim.
Eristykset	40 mm	€	1 947 €	1 947 €	1 947 €	sis. Toim.
<b>Yhteensä</b>		€		<b>1 950 €</b>	<b>7 940 €</b>	<b>3 220 €</b>
<b>Jäähdytysvesiputkisto DN50 (Vaihtoehtoinen)</b>						
Putkisto + käyrät + supistukset (PN16 P235GH)	25 m	€	sis. Toim.	450 €	sis. Toim.	sis. Toim.
Asennukset	-	€	sis. Toim.	2 640 €	sis. Toim.	sis. Toim.
Putkituennat (kevyt Primääri + Sekundääri kannakointi)	12 kpl	€	sis. Toim.	780 €	sis. Toim.	sis. Toim.
Venttiilit	6 kpl	€	sis. Toim.	1 270 €	1 270 €	sis. Toim.
Eristykset	40 mm	€	1 683 €	1 683 €	1 683 €	sis. Toim.
<b>Yhteensä</b>		€		<b>1 690 €</b>	<b>6 830 €</b>	<b>2 960 €</b>
<b>Jäähdytysvesipumppu</b>						
Sulzer [pumppu + ABB-moottori] [vaihtoehto 1]	3 kW motor	€	sis. Toim.	7 410 €	7 410 €	sis. Toim.
Kolmeks [pumppu + Kolmeks-moottori] [vaihtoehto 2]	2,2 kW motor	€	sis. Toim.	5 300 €	5 300 €	sis. Toim.
<b>Kannattavin vaihtoehto</b>		€		<b>0 €</b>	<b>5 300 €</b>	<b>5 300 €</b>
<b>Savukaasukanava muutokset</b>						
Materiaalikustannukset [teräs]	10m	€	sis. Toim.	7 930 €	sis. Toim.	sis. Toim.
Kannattimet (arvio)	100kg	€	sis. Toim.	1 000 €	sis. Toim.	sis. Toim.
Eristykset	100 mm/10m	€	3 320 €	2 760 €	3 320 €	sis. Toim.
Perustukset (valu)	Arvio	€	1 000 €	1 000 €	1 000 €	sis. Toim.
Asennukset [30% savukaasumuutos kustannuksista]		€	sis. Toim.	3 810 €	1 296 €	sis. Toim.
<b>Yhteensä</b>		€		<b>4 320 €</b>	<b>16 500 €</b>	<b>5 620 €</b>
<b>Sähkö- ja automaatiojärjestelmä</b>						
Suunnittelu (hinta riippuvainen Mipro:n osuudesta)	Sov, piir, ajok	€	sis. Toim.	6 000 €	6 000 €	sis. Toim.
Laitteinvestoinnit	tamu, piir	€	sis. Toim.	5 960 €	5 960 €	sis. Toim.
Asennukset		€	4 180 €	4 180 €	4 180 €	sis. Toim.
<b>Yhteensä</b>		€		<b>4 180 €</b>	<b>16 140 €</b>	<b>16 140 €</b>
<b>Ohjelmistopäivitykset MiPro</b>						
Logiikka- ja valvomo-ohjelmointi	83,4€/h, 40h	€	3 336 €	3 336 €	3 336 €	3 336 €
Dokumentaation päivitys	83,4€/h, 40h	€	3 336 €	3 336 €	3 336 €	3 336 €
<b>Yhteensä</b>		€		<b>6 680 €</b>	<b>6 680 €</b>	<b>6 680 €</b>
<b>Projektointi [8% investoinnista]</b>						
<b>Yhteensä</b>		€		<b>12 300 €</b>	<b>12 300 €</b>	<b>12 300 €</b>
<b>Valvonta [3 % investoinnista]</b>						
<b>Yhteensä</b>		€		<b>4 613 €</b>	<b>4 613 €</b>	<b>4 613 €</b>
<b>Varaukset [5 % investoinnista]</b>						
<b>Yhteensä</b>		€		<b>7 688 €</b>	<b>7 688 €</b>	<b>7 688 €</b>
<b>Kustannukset yhteensä</b>						
Investointikustannukset		€		<b>186 730 €</b>	<b>117 160 €</b>	<b>127 560 €</b>
<b>Investoinnin kannattavuus</b>						
Laskentakorkokanta			5 %	5 %	5 %	5 %
Investoinnin takaisinmaksuaika [vuotta]			10,3	6,5	7,0	15,5
Investoinnin korollinen takaisinmaksuaika [vuotta]			14,9	8,0	8,9	30,7

## Liite 20. Toimittajan 1 budjettitarjous (Osa 1/2)



Liite 21. Toimittajan 1 budjettitarjous (Osa 2/2)

## Liite 22. Toimittajan 4 budjettitarjous (Osa 1/2)

## Liite 23. Toimittajan 4 budjettitarjous (Osa 2/2)

Liite 24. Toimittajan 4 lämmönvaihdin (Osa 1/2)

Liite 25. Toimittajan 4 lämmönvaihdin (Osa 2/2)