

Fredrik Kuokkanen

# HÖYRYKATTILAN KÄYTÖNAIKAISEN HYÖTYSUHTEEN MÄÄRITTÄMINEN

Laitosmittauksiin perustuvien menetelmien vertailu

Diplomityö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: yliopistonlehtori Henrik Tolvanen  
Tarkastaja: yliopisto-opettaja Niko Niemelä  
Toukokuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Fredrik Kuokkanen: Höyrykattilan käytönaikaisen hyötysuhteen määrittäminen:  
Laitosmittauksiin perustuvien menetelmien vertailu  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Energia- ja biojalostustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Toukokuu 2022

---

Tämän diplomityön tavoitteena oli perehtyä höyrykattilan käytönaikaisen hyötysuhteen määrittämissä käytettäviin menetelmiin. Työn tarkastelu painottui prosessihöyryn tuotannolle yleisiin sovelluksiin. Kattilatekniikoissa keskityttiin arina- ja leijupetitekniikoihin, jotka käyttävät kiinteitä polttoaineita. Työn hyötysuhdelaskentaa testattiin 12 MW:n kiinteän polttoaineen leijupetikattilan laitosdatalla.

Hetkellinen energivirtojen, kuten polttoainevirran tarkka määrittäminen on kiinteitä polttoaineita käyttävillä laiteyksiköillä haasteellista, mikä osaltaan vaikuttaa yleisesti käytettäviin hyötysuhteen määrittämissä menetelmiin. Tarkasteltavan kokoluokan laiteyksiköissä höyrykattilan hyötysuhde määritetään usein esimerkiksi kuukausitasolla energivirtoihin perustuen. Käytönaikainen hyötysuhde mahdollistaisi tehokkaammin hyötysuhdetarkastelun ja laiteprosessien kehittämisen hyötysuhteen parantamiseksi. Tarve käytönaikaisen hyötysuhteen määrittämiselle oli olemassa. Tarpeeseen perustuen työssä tarkasteltiin mahdollisuuksia määrittää hyötysuhde tarkastelun kohteena olevalla laiteyksikölle olemassa olevien laiteyksiköiden avulla.

Työssä perehdyttiin prosessihöyryn tuotannon ominaispiirteisiin, kuten käytettäviin polttoaineisiin, sekä kattilatekniikoihin. Hyötysuhteen määrittäminen laskentatavoissa tukeuduttiin standardiin SFS-EN 12952-15. Laiteyksiköistä kerättävää mittausdataa prosessoitiin laskennan tarpeisiin. Tarkastelun kohteena olevalla laiteyksiköllä mittausdataa kerättiin eri aikaväleihin eri mittauksilta. Laskennassa käytettiin prosessoitua puolen tunnin tai tunnin aikavälein keskiarvoistettua mittausdataa. Laskenta toteutettiin epäsuoralla- ja suoralla menetelmällä. Polttoainevirran määrittämiseen sovellettiin kahta rinnakkaisista menetelmää perustuen savukaasun virtausmittaukseen sekä polttoaineen syöttöruuvien käyntitietoon. Tuloksia tarkasteltiin lyhyellä 6 tunnin tarkastelujaksolla sekä kuukausitasolla.

Työn tuloksena saatiin selville käytönaikaisen hyötysuhteen määrittämiseen tarvittavat laiteyksiköiden mittaukset. Laskentamenetelmät pyrittiin valitsemaan siten, että ne olisivat mahdollisimman pienin muutoksin toteutettavissa myös muille vastaavan kokoluokan laiteyksiköille. Laskennassa määritetyn kuukausitason hyötysuhteen keskiarvoksi saatiin käänteisellä laskutavalla 87,8 % ja suoralla 82,9 %. Todellisiin kuukausitason toteutuneisiin energivirtoihin perustuva laiteyksikön hyötysuhde oli 86,0 %. Laskentaa arvioitiin ja saatiin lisäksi selville mitkä alkuarvot vaikuttavat tuloksiin eniten ja miten työssä toteutettu hyötysuhdelaskenta vastaa todellisuutta. Hyötysuhteen suoralla määrittämisellä kattilaan syötettävän polttoaineen ominaisuuksien merkitys korostui. Epäsuoralla määrittämisellä puolestaan suurimman yksittäisen häviön, savukaasuhäviön, ja siihen vaikuttavan savukaasun loppulämpötilan vaikutus hyötysuhteeseen oli selkeästi havaittavissa.

Avainsanat: höyrykattila, prosessihöyry, hyötysuhde

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Fredrik Kuokkanen: Determining steam plant's real time boiler efficiency: Comparing the calculating methods based on plant data  
Master of Science Thesis  
Tampere University  
Master's Programme in Environmental and Energy Engineering  
May 2022

---

The purpose of this work is to find out the methods to determine steam plant's real time boiler efficiency. Review concentrates on process steam production with grate- and fluidized bed boiler technologies which use solid fuels. Efficiency calculating methods were tested on plant data of 12 MW solid fuel fluidized bed burner.

It is often hard to determine the real time energy streams precisely, particularly with solid fuels. That affects the methods used in calculating the efficiency of solid fuel burners. On this scale and type of plants the efficiency is often determined with long time energy streams. If the efficiency could be determined more real time that could support the observation of connections between efficiency and processes and help to improve efficiency. There was need for improving the efficiency calculating methods. Based on that need this work aims to calculate the real time efficiency based on plant measurements.

Work orientates the special features of process steam production like fuels and burner technologies used. Calculating methods were based on European standard SFS-EN 12952-15. The plants' measurement data was processed to serve the calculating needs. With interpolated data we could determine efficiency on 30 minutes and 1 hour time scale. We used both direct and indirect calculating methods and developed two parallel methods to determine the real time solid fuel stream to boiler. Other based on flue gas measurements and other solid fuel's feed screw operation data. Results were observed on six hours short period and one month longer term.

As result of this work we found out the measurements needed to determine real time efficiency. The methods were developed so that the calculation of this work could be used for other similar plants with minor changes. As monthly average real time efficiency we got 87,8 % with indirect method and 82,9 % with direct method. The efficiency calculated with real monthly energy streams was 86,0 %. The results were evaluated and found out which factors affect most and how the results compare with reality. With direct calculating method fuel properties affect significantly on energy input to steam boiler. Indirect method highlights the impact of flue gas losses and flue gas temperature when calculating overall boiler efficiency.

Keywords: steam boiler, process steam, boiler efficiency

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

# ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Adven Oy:n tarpeisiin. Advenilta haluan erityisesti kiittää Jari Heikkilää työn ammattitaitoisesta ohjauksesta, sekä Antti Salomaata työn joustavista järjestelyistä. Tampereen Yliopistolta kiitokset ansaitsee yliopistonlehtori Henrik Tolvanen, jonka asiantunteva ohjaus ja motivoiva ote edesauttoivat työn etenemistä.

Kiitokset kuuluvat myös opiskelukavereilleni, jotka tekivät opiskeluajasta Tampereella ikimuistoisen kokemuksen. Lisäksi haluan kiittää perhettä ja läheisiä tarjoamastanne tuesta.

Tampereella, 9.5.2022

Fredrik Kuokkanen

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. HÖYRYKATTILAT PROSESSITEOLLISUUDESSA .....	4
2.1 Höyrykattilan toimintaperiaate .....	4
2.2 Polttoaineet ja palaminen .....	6
2.3 Kattiloissa käytettävät polttotekniikat .....	9
2.4 Höyrykattilan säätäminen .....	11
3. HÖYRYKATTILAN HYÖTYSUHTEN MÄÄRITYS .....	14
3.1 Taserajan määrittäminen .....	14
3.2 Savukaasuhäviö .....	16
3.3 Palamattomien häviöt .....	18
3.4 Säteilyhäviöt ja muut häviöt .....	20
3.5 Hyötysuhteen määrittäminen suoralla menetelmällä .....	21
3.6 Hyötysuhteen määrittäminen epäsuoralla menetelmällä .....	23
3.7 Prosessihöyryn tuotannon erityispiirteet .....	24
4. AINEISTO JA MENETELMÄT .....	25
4.1 Tutkimuksen rakenne .....	25
4.2 Tarkastettava laitostyyppi .....	26
4.3 Laitosmittaukset .....	28
4.4 Laitosdatan prosessointi ja hyödyntäminen .....	31
4.5 Polttoaineen massavirran määrittäminen savukaasuanalysillä .....	32
4.6 Polttoaineen massavirran määrittäminen syöttöruuvien käyntitiedon avulla .....	36
4.7 Laskennan alkuarvot ja tehdyt oletukset .....	40
4.8 Hyötysuhteen määrittäminen .....	45
5. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU .....	49
5.1 Laskentamenetelmien vertailu .....	49
5.2 Kuukausitason hyötysuhteen määrittäminen .....	52
5.3 Osakuormatarkastelu .....	57
5.4 Herkkyystarkastelu .....	59
5.5 Tutkimuksen analysointi .....	60
6. YHTEENVETO .....	63
LÄHTEET .....	65

# KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b>	<i>Höyrykattilan vesihöyrypiiri ja ainevirrat, muokattu lähteestä [10].....</i>	<i>5</i>
<b>Kuva 2.</b>	<i>Energiankäyttö Suomen teollisuudessa [15].....</i>	<i>6</i>
<b>Kuva 3.</b>	<i>Puupolttoaineen koostumus, muokattu lähteestä [19] .....</i>	<i>7</i>
<b>Kuva 4.</b>	<i>Arina- ja leijupetikattilan rakenne, muokattu lähteistä [12, 22] .....</i>	<i>10</i>
<b>Kuva 5.</b>	<i>Kiinteän paineen säätö, muokattu lähteestä [8].....</i>	<i>12</i>
<b>Kuva 6.</b>	<i>Höyrykattilan hyötysuhteen määrittämisen taseraja.....</i>	<i>15</i>
<b>Kuva 7.</b>	<i>Työn toteutus ja tutkimuskysymykset (TK) -vuokaavio .....</i>	<i>26</i>
<b>Kuva 8.</b>	<i>Havainnekuva tarkasteltavasta laitoksesta ja laskennassa hyödynnetyt laitosmittaukset .....</i>	<i>27</i>
<b>Kuva 9.</b>	<i>Energiavirrat kattilaan .....</i>	<i>29</i>
<b>Kuva 10.</b>	<i>Energiavirrat kattilasta.....</i>	<i>30</i>
<b>Kuva 11.</b>	<i>Esimerkki mittausdatasta ja sen prosessoinnista .....</i>	<i>32</i>
<b>Kuva 12.</b>	<i>Syöttöruuvin käyntitieto ja päähöyryn teho, (tietokannasta).....</i>	<i>37</i>
<b>Kuva 13.</b>	<i>Polttoaineen massavirran riippuvuus syöttöruuvin käyntitiedosta .....</i>	<i>38</i>
<b>Kuva 14.</b>	<i>Polttoainevirran sovitteet ruuvin käyntitiedon funktiona .....</i>	<i>39</i>
<b>Kuva 15.</b>	<i>Laskennan vaihe 1 tulokset.....</i>	<i>50</i>
<b>Kuva 16.</b>	<i>Tarkastelujakson hyötysuhteet.....</i>	<i>50</i>
<b>Kuva 17.</b>	<i>Joulukuun energiovirrat kattilaan ja nettoteho, savukaasun virtausmittaukseen perustuvalla menetelmällä .....</i>	<i>53</i>
<b>Kuva 18.</b>	<i>Joulukuun polttoaineen massavirta, savukaasun virtausmittaukseen perustuvalla menetelmällä .....</i>	<i>54</i>
<b>Kuva 19.</b>	<i>Joulukuun hyötysuhteet .....</i>	<i>55</i>
<b>Kuva 20.</b>	<i>Savukaasun lämpötilan vaikutus epäsuoraan hyötysuhteeseen.....</i>	<i>56</i>
<b>Kuva 21.</b>	<i>Savukaasun virtausmittaukseen perustuvalla menetelmällä määritetty epäsuora hyötysuhde savukaasun lämpötilan funktiona .....</i>	<i>57</i>
<b>Kuva 22.</b>	<i>osakuormatarkastelu.....</i>	<i>58</i>

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

EU	Euroopan unioni	
JUP	jatkuva ulospuhallus	
MW	Megawatti	
PA	polttoaine	
SYVE	syöttövesi	
SK	savukaasu	
TJ	Terajoule	
TK	tutkimuskysymys	
$c_{p,i}$	ilman ominaislämpökapasiteetti	kJ/kgK
$c_{p,sk}$	savukaasun ominaislämpökapasiteetti	kJ/kgK
$c_{p,tuhka}$	tuhkan ominaislämpökapasiteetti	kJ/kgK
$c_{p,pa}$	polttoaineen ominaislämpökapasiteetti	kJ/kgK
$H_{CO}$	hiilimonoksidin lämpöarvo	J/kg
$H_{tuhka}$	tuhkan lämpöarvo	J/kg
$H_u$	polttoaineen lämpöarvo	J/kg
$h_{sv}$	syöttöveden entalpia	kJ/kg
$h_{th}$	tuorehöyryn entalpia	kJ/kg
$M_{st}$	polttoaineen saapumistilan kosteus	-
$m_i$	palamisilman massavirta	kg/s
$m_{pa}$	polttoaineen massavirta	kg/s
$m_{pal}$	palamattoman kiintoaineen massavirta	kg/s
$m_{sk}$	savukaasun massavirta	kg/s
$m_{th}$	tuorehöyryn massavirta	kg/s
$m_{tuhka}$	tuhkan massavirta	kg/s
$p$	tuhkan hehkutushäviö	-
$m_i$	normaalitilan paine	bar
$Q_{CO}$	palamattomien kaasujen lämpöenergia	W
$Q_{haj}$	hajoitushöyryn tuoma lämpöenergia	W
$Q_{hluvo}$	höyrytoim. esil. tuoma lämpöenergia	W
$Q_{hyöty}$	hyödyksi saatava lämpöenergia	W
$Q_{i,esil}$	ilman esilämmitykseen sitoutunut lämpö	W
$Q_{in}$	kattilaan tuodut energiavirrat	W
$Q_{muu}$	muut energiavirrat kattilaan	W
$Q_{netto}$	hyödyksi saatava netto lämpöenergia	W
$Q_{pa}$	polttoaineen palamisessa vapautuva lämpö	W
$Q_{pal}$	palamattoman kiintoaineen lämpöenergia	W
$Q_{pa,esil}$	PA esilämmitykseen sitoutunut energia	W
$Q_{RC}$	säteilyn mukana poistuva lämpöenergia	W
$Q_{sk}$	savukaasun mukana poistuva lämpöenergia	W
$Q_{tuhka}$	tuhkan mukana poistuva lämpöenergia	W
$q_{kal,k}$	kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo	J/kg

$q_{teh,k}$	kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo	J/kg
$q_{teh,st}$	pa tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	J/kg
$t_i$	palamisilman lämpötila	°C
$t_n$	normaalitilan lämpötila	°C
$t_{pa}$	polttoaineen saapumislämpötila	°C
$t_{ref}$	referenssi lämpötila	°C
$t_{sk}$	savukaasun lämpötila	°C
$t_{tuhka}$	tuhkan lämpötila	°C
$V_{sk,kuiva}$	kuiva savukaasuvirta	nm <sup>3</sup> /s
$w(H)_k$	vedyn osuus polttoaineen kuiva-aineesta	-
$w(O)_k$	hapen osuus polttoaineen kuiva-aineesta	-
$w(N)_k$	typen osuus polttoaineen kuiva-aineesta	-
$x_{H_2O,sk}$	veden mooliosuus kosteassa savukaasussa	kJ/kgK
$x_t$	polttoaineen tuhkapitoisuus	-
$y_{CO,kuiva}$	CO-pitoisuus kuivassa savukaasussa	g/nm <sup>3</sup>
$\eta$	hyötysuhde	-



# 1. JOHDANTO

Energiasektorilla kestävydestä on tullut keskeinen prioriteetti. Viime vuosina ilmastonmuutoksen vastaiset toimet ovat voimistuneet ja Glasgow'n ilmastokokouksen kaltaiset globaalit sitoumukset kiihdyttävät muutoksen tahtia. Poliittinen päätöksenteko pyrkii ohjaamaan energiasektorin tulevaisuuden kehitystä markkinamekanismien, kuten verotuksen ja kannustimien avulla. [1] Teollisuusasiakkaat käyttävät prosesseissaan voimalaitoksissa tuotettua lämpö- ja sähköenergiaa. Yhä enemmän huomio kiinnittyy energiantuotannon ympäristövaikutuksiin ja energialähteiden alkuperään.

Vastuullisuusajattelu ja halu toimia edelläkävijänä yhdessä taloudellisen kannattavuuden kanssa toimivat ajureina teollisuusasiakkaiden vaatimuksille tuotetun energian suhteen. Poliittisten päätösten keinoin uusiutuvista energianlähteistä pyritään luomaan niin ekologisesti kuin taloudellisestikin kannattavampia vaihtoehtoja fossiilisiin tuotantomuotoihin nähden. Samaan aikaan bio- ja kierrätyspolttoaineiden tekniset sovellukset ovat kehittyneet. [2] Konkreettinen esimerkki Suomessa teollisuusenergiantuotannon muutoksesta on energiantuottajien ja teollisuusasiakkaiden halu korvata öljyn ja turpeen käyttö biopohjaisilla polttoaineilla kustannus- ja vastuullisuussyistä.

Uusiutuviin energianlähteisiin ja kierrätyspolttoaineisiin siirtymisen ohella toiminnassa pyritään energiatehokkuuteen ja prosessien optimointiin. Energiantuotannossa tämä tarkoittaa erityisesti pyrkimystä laitosten korkeaan käyttöasteeseen, toimintavarmuuteen ja mahdollisimman hyvään hyötysuhteeseen. [3] Nämä tavoitteet mahdollistavat kannattavan ja kestäväen liiketoiminnan muuttuvassa toimintaympäristössä, jossa polttoaineiden hinnoitteluun liittyy epävarmuutta ja lainsäädäntö kiristää päästötavoitteita kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa.

Teollisuuden energiatehokkuuden kehittäminen hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi, samoin kuin uusiutuvien energianlähteiden käyttöönotto ovat keskeisiä toimenpiteitä EU:n ilmastoneutraaliuteen tähtäävien toimien listalla. [4] Suomessa biopolttoaineiden käytöllä on pitkä historia ja ne muodostavat suuren osan uusiutuvan energian tuotannosta. Noin kolme neljäsosaa biopolttoaineista käytetään kaukolämmön ja teollisuuden prosessihöyryn tuotantoon, sisältäen myös yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotannon.

Kansallisen energiastrategian mukaisesti bio- ja kierrätyspolttoaineiden käyttöä halutaan lisätä fossiilisten polttoaineiden vähentämiseksi. Biopolttoaineiden alhainen lämpöarvo ja kosteus asettavat haasteita käytettäville polttotekniikoille. [5] Hyötysuhde kertoo prosessin tehokkuudesta, voimalaitosprosessissa se kuvastaa prosessista hyödyksi saatavien energiavirtojen suhdetta prosessiin vietyihin energiavirtoihin. [6] Tyypillisesti biopolttoaineita käyttävien kattiloiden hyötysuhde on 85-90 % välillä riippuen kattilatyyppistä ja polttoaineesta. [7]

Voimalaitoksen prosessiautomaatio ja käyttötoiminta tekevät päätöksiä laitosmittauksiin perustuen. Automaatio huolehtii tehonsäädöstä, tehokkaasta palamisesta ja hyötysuhteesta. Laitosdata tallentuu usein reaaliaikaisesti myöhempää tarkastelua varten. Laitoksen mittausdatasta voi saada informaatiota laitoksen toimivuudesta ja laitteiden kunnosta, mutta haasteeksi voi muodostua mittausdatan prosessointi ja tehokas hyödyntäminen. [8]

Tämä työ pyrkii osaltaan kehittämään laitoksen mittausdatan hyödyntämistä tutkimalla laitoksen käytönaikaista hyötysuhdetta laitosmittauksiin perustuen. Tavoitteena on luoda käytönaikaisen hyötysuhteen laskennan yksinkertainen laskentamalli olemassa olevien laitosmittausten avulla. Käytönaikainen hyötysuhde tarjoaa laitokkäyttäjälle työkalun laitoksen toiminnan analysoimiseksi ja päätöksenteon tueksi. Reaaliaikainen tieto laitoksen toiminnasta auttaa hahmottamaan syy-seuraussuhteita ja tekemään perusteltuja valintoja. Työ on ajankohtainen, sillä käytössä oleva hyötysuhteen arviointi perustuu tällä hetkellä kuukausitason energialukemiin, joista määritetään kuukausitason hyötysuhde.

Työ pyrkii vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin laitoksen käytönaikaiseen hyötysuhteeseen liittyen:

1. Mitä tapoja höyrykattilan hyötysuhteen määrittämiseksi on olemassa ja mitkä tekijät vaikuttavat niihin voimakkaimmin?
2. Miten ja mitä kautta osakuorma-ajo vaikuttaa hyötysuhteeseen?
3. Mitä tekijöitä työssä käytetyissä laskentatavoissa pitää ottaa huomioon ja mille alkuarvoille ne ovat kaikkein herkimpiä?
4. Kuinka hyvin työssä rakennettu laskentamalli vastaa todellisuutta tarkastellussa tilanteessa?

5. Mitä mittauksia höyrykattilalaitokselta tulisi löytyä, jotta hyötysuhteen määrittämisen tarkkuus olisi riittävän hyvä?

Tutkimuskysymyksiin 1 ja 2 pyritään vastaamaan kirjallisuuden ja standardien teorian avulla. Prosessihöyryn tuotantoa käsitellään teorialuvussa kaksi ja hyötysuhteen laskennan teoriaa sekä työn laskentaosiossa käytettyjä keskeisiä laskentamenetelmiä luvussa kolme. Tutkimuskysymyksiin 3, 4 ja 5 vastataan työn laskentaosion perusteella. Luvussa neljä käsitellään laitospäiväkirjan hyödyntämistä ja esitellään laskentamalli. Luvussa viisi esitellään tulokset ja analysoidaan niitä sekä arvioidaan työssä rakennetun laskentamallin toimivuutta ja luotettavuutta. Luvussa 6 työn keskeiset havainnot kootaan yhteenvetoon. Tässä työssä keskitytään yhden tarkastelun kohteeksi valitun laitoksen mittausdataan. Myöhemmin mallia on mahdollista testata ja tuloksia arvioida myös muiden laitosten mittausdataan avulla.

## 2. HÖYRYKATTILAT PROSESSITEOLLISUUDESSA

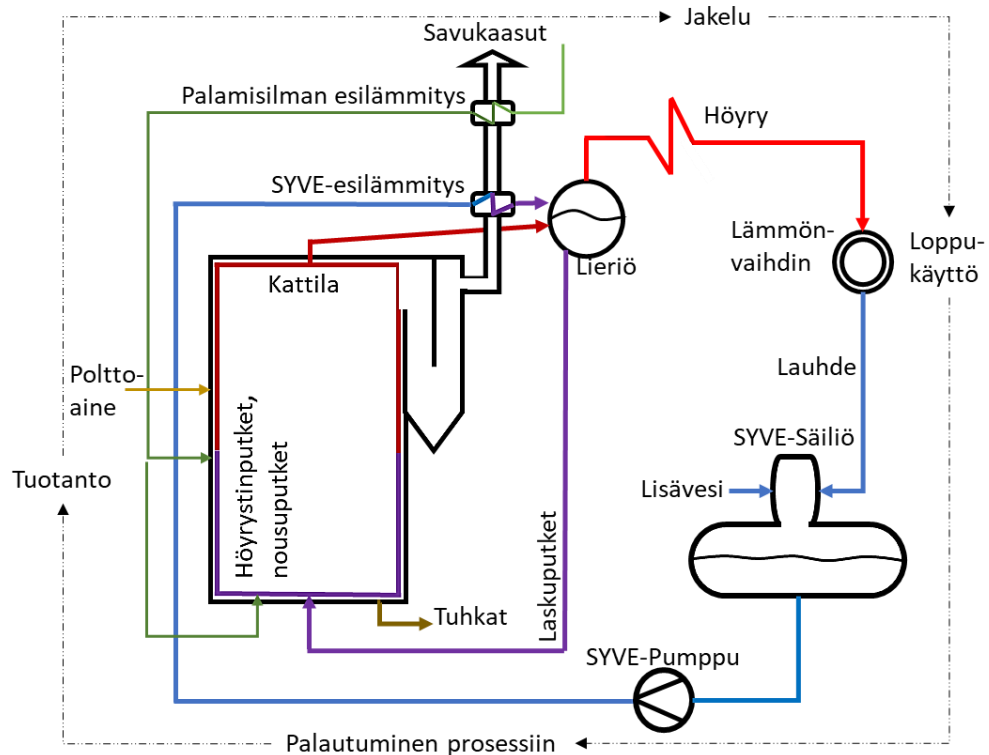
Höyry soveltuu suurten lämpötehojen siirtämiseen ja kohteiden nopeaan lämmitykseen lämmönsiirto-ominaisuuksiensa ansiosta. Yleisimmät teollisen mittakaavan energiantuotannon sovellutukset perustuvat veden höyrystämiseen ja höyryn käyttämiseen lämmönsiirron väliaineena lämmön tai sähkön tuotannossa. [9] Tässä työssä laitoksen käytönaikeisen hyötysuhteen tarkastelu on rajattu koskemaan teollisuuden prosessihöyryä ja kaukolämpöä tuottavia lämpölaitoksia, jotka tuotannollaan vastaavat teollisuusprosessien lämmöntarpeeseen esimerkiksi nesteiden ja prosessituotteiden sekä tuotantotilojen lämmittämiseksi. [10] Työn tarkastelu painottuu biopolttoaineita ja teollisuusprosessien sivujakeita hyödyntäviin kiinteän polttoaineen lämpölaitoksiin, jotka ovat yleisiä tarkastelun kohteena olevassa alle 30 MW:n teholuokassa. [11] Prosessihöyryn tuotantoon liittyy erityispiirteitä käytettäviin polttoaineisiin, kattilateknikoihin ja laitoskuormiin liittyen. Näitä käsitellään tässä luvussa.

### 2.1 Höyrykattilan toimintaperiaate

Höyryntuotanto lämpölaitoksessa sisältää useita ainevirtoja. Polttoaineen varastointi, käsittely ja kuljetus muodostavat polttoainevirran. Kiinteiden polttoaineiden palaminen muodostaa myös merkittäviä määriä tuhkaa. Polttoaineensyötön ja tuhkan käsittelyn tekniset ratkaisut valitaan käytettävien polttoaineiden ja kattilatyypin mukaan. [11] Poltto-prosessin keskeinen ainevirta on ilma. Palamisessa polttoaine reagoi ilman hapen kanssa, joten ilmansyötöllä vaikutetaan palamisen tehokkuuteen ja puhtauteen. Ilmansyöttö jaetaan yleisesti primääri- ja sekundääri-ilmoihin, joilla hallitaan palamisprosessia kattilassa. Kattilassa ilman happi reagoi polttoaineen kanssa muodostaen polton savukaasuja. [12] Savukaasut kulkevat edelleen savukanavaa pitkin savupiippuun, luovut-taen samalla lämpöenergiaansa kattilan ja savukanavan lämpöpinnoille. Ennen johta-mista takaisin ulkoilmaan savukaasujen lämpötila pyritään laskemaan riittävän alhaiseksi ja ne puhdistetaan tarvittaessa lainsäädännön vaatimiin pitoisuuksiin. [12]

Höyrykattilassa polttoaineen sisältämä kemiallinen energia muutetaan savukaasujen lämpöenergiaksi. Savukaasujen lämpö siirtyy edelleen kattilan vesihöyrypiiriin säteily-lämmönsiirron ja konvektion kautta. [12] Vesihöyrypiiri voi olla avoin tai suljettu. Vesi johdetaan putkistoja pitkin syöttöveden esilämmittimen kautta syöttövesisäiliöön, josta vesi lähtee kiertämään kattilan seinämällä kulkevia putkistoja. Putkistoissa vesi höyrystyy

ja höyry kerääntyy höyrylieriöön, josta se johdetaan edelleen lämmönvaihtimille esimerkiksi teollisuusasiakkaan tai kaukolämmön tarpeisiin. Prosessihöyryntuotannossa kattiloiden veden kierto perustuu yleisesti tiheyseroon ja tapahtuu luonnonkierrolla kattilan suhteellisen pienen kokoluokan ja alhaisen painetasen vuoksi. Lämmönvaihtimissa luovuttaessaan energiaa höyry lauhtuu takaisin vedeksi ja palautuu vesihöyrypiiriin. [12]

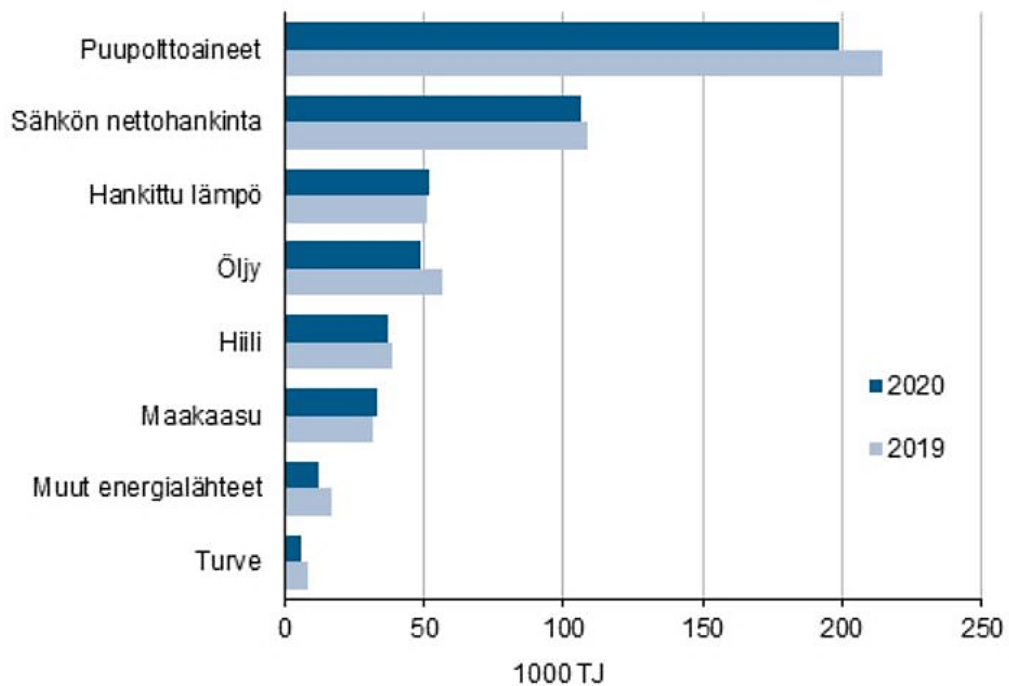


**Kuva 1.** Höyrykattilan vesihöyrypiiri ja ainevirrat, muokattu lähteestä [10]

Kuva 1 esittää höyrykattilan vesihöyrypiirin ja prosessin keskeiset ainevirrat. Prosessihöyryn tuotannon voi ajatella jakautuvan viiteen pääosaan, joita ovat polttoaineensyöttö, savukaasujärjestelmä, höyryn tuotanto- ja jakelu sekä syöttövesijärjestelmä. Näiden lisäksi veden käsittely on merkittävä prosessi, jolla huolehditaan kattilan vesikemiasta. [10] Painetasosta riippuen höyry voi olla kylläistä tai tulistettua. [12] Yleisesti kattilalla tuotetun höyryn paine ja lämpötila kasvavat laitokseen kasvaessa. Sähköntuotanto edellyttää korkeampia painetasoja, kuin pelkkä kaukolämmön tai prosessihöyryn tuotanto. Höyrykattilalla voidaan tuottaa höyryn välitöiden kautta eripaineista höyryä eri käyttötarkoituksiin siten, että samalla laitoksella mahdollistuu sekä lämmön, että sähkön tuotanto. [9] Teollisuuden prosessihöyry on yleisesti kylläistä höyryä, jonka painetaso määräytyy teollisuusasiakkaan lämmöntarpeen mukaan. [12]

## 2.2 Polttoaineet ja palaminen

Energiantuotannossa käytettäviä polttoaineita ohjataan poliittisilla päätöksillä. Näiden pääasiallisena tavoitteena on hiilidioksidipäästöjen vähentäminen verotuksen ja tukien avulla. Tämä on näkynyt 2000-luvulla fossiilisten lämmityspolttoaineiden valmisteveron ja päästöoikeuksien hintojen korotuksina. Yleisten päästöoikeuksien hinta hiilidioksiditonnia kohden EU:n jäsenmaiden huutokauppajärjestelmässä nousi 2010 luvun alun muutamasta eurosta vuoteen 2020 mennessä lähelle 30 euron tonnihintaa. [13] Taloudellinen ohjaus on tehnyt vähäpäästöisempien polttoaineiden käytöstä kannattavampaa. Päästökauppa on nostanut esimerkiksi Suomessa turpeen hintaa ja johtanut nopeaan polttoturpeen käytön vähentymiseen viime vuosina. Prosessihöyryn tuotannossa turvetta on korvattu puuperäisillä polttoaineilla. Turvepolttoaineen korvaaminen tai polttoaineseoksen muuttaminen edellyttää kuitenkin usein laitosinvestointeja. Toisinaan turvetta on käytetty seos- tai tukipolttoaineena biopolttoaineiden rinnalla, eikä sen korvaaminen edellytä merkittäviä muutostöitä. [14]

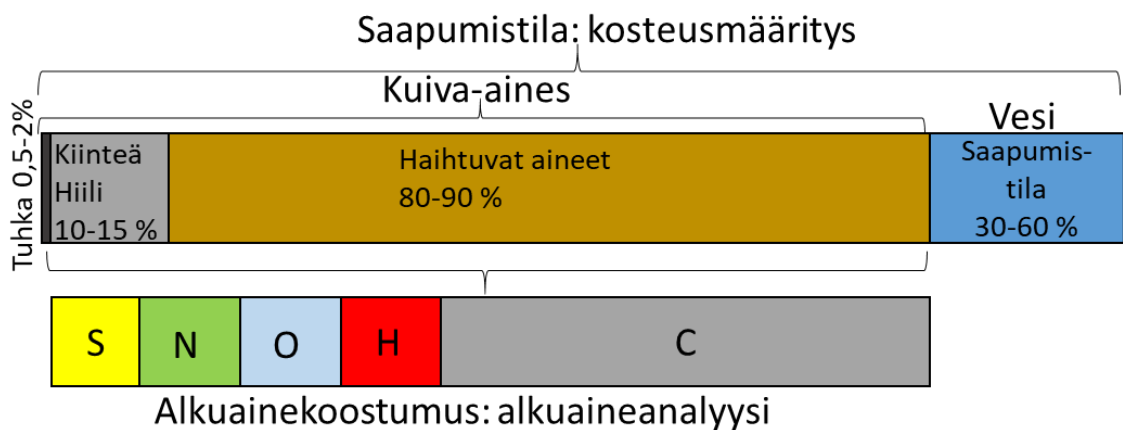


**Kuva 2.** Energiankäyttö Suomen teollisuudessa [15]

Teollisuusenergian eli kaiken teollisuuden kuluttaman energian kulutus vuonna 2020 oli n. 500 000 terajoulea (TJ). Sen osuus energian loppukäytöstä oli lähes puolet Suomen kokonaisenergiankulutuksesta. Kuvan 2 mukaan noin kymmenes teollisuuden energiankäytöstä koostuu hankitusta lämmöstä. Tämä tarkoittaa esimerkiksi höyrynä tai kaukolämpönä hankittavaa lämpöenergiaa ulkopuolisilta toimijoilta. [15] Kaikki teollisuuden prosessilämpö ei kuitenkaan lukeudu hankittavaan lämpöön, sillä mikäli teollisuustoimija

tuottaa prosessien tarvitseman lämmön tai höyryn omana tuotantona tämä osuus lukeutuu kuvan kaksi taulukon polttoaineisiin. Tilastokeskuksen mukaan vuonna 2020 Suomen kaukolämmöstä ja teollisuuslämmöstä tuotettiin noin 63 % uusiutuvilla polttoaineilla. Noin viidennes teollisuuslämmöstä tuotettiin lämmön erillistuotantona ja loput sähkön ja lämmön yhteistuotantona [16]

Biopolttoaineet sisältävät runsaasti happea ja suhteellisen paljon kosteutta, minkä vuoksi niiden lämpöarvo on alhainen fossiilisiin polttoaineisiin nähden. [17] Fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna biopolttoaineiden käyttö energiantuotannon polttoaineina on haastavaa niiden sisältämän kosteuden, vaihtelevan laadun ja alhaisemman lämpöarvon vuoksi. Suomessa pitkäjänteinen biopolttoaineiden polton kehitystyö on johtanut polttotekniikoiden kehittymiseen ja biopolttoaineiden erityispiirteiden tuntemukseen. [18]



**Kuva 3.** Puupolttoaineen koostumus, muokattu lähteestä [19]

Laitokselle toimitettavista polttoainetoimituksista määritetään kuvan 3 mukaisesti tietyt laadulliset ominaisuudet, jotka ovat edellytyksiä polttoainekaupankäynnille ja vaikuttavat laitoksen käyttöön. Yleinen käytäntö on, että polttoaine-erä punnitaan ja siitä otetaan edustavat näytteet standardien mukaista kosteusmääritystä varten. Polttoainetoimituksen tuorekosteus, eli kuivattamattoman polttoaineen kosteus määritetään kuivattamalla näyte uunissa. Jakamalla uunissa haihtunut vesimäärä näytteen painolla ennen kuivatuksen aloitusta saadaan polttoaineen kosteuspitoisuus saapumistilassa. Tuorekosteus vaikuttaa polttoaineen hinnoitteluun ja lämpöarvoon. Polttoainetoimituksesta arvioidaan myös esimerkiksi palakokoa, laatua ja mahdollisia poikkeavuuksia. Polttoaineelle voidaan toteuttaa myös tekninen analyysi, josta käy ilmi polttoaineen haihtuvat aineet, hiili ja tuhkapitoisuus, sekä elementaarianalyysi, joka kertoo polttoaineen alkuainekoostumuksen. [19]

Biomassa sisältää alkuainekoostumukseltaan hiiltä, happea, vetyä ja typpeä, jotka muodostavat biomassan kuiva-aineessa orgaanisia yhdisteitä. Osa kuiva-aineesta on haihtuvia aineita, jotka poistuvat kuiva-aineesta polttoaineen lämpötilan kasvaessa. Puupolttoaineilla haihtuvien osuus on huomattavan suuri, mikä on huomioitava polttotekniikoissa esimerkiksi palotilan mitoituksessa ja ilmansyötön vaiheistuksessa. Kun suuri osa kuiva-aineesta on haihtuvia aineita, palaminen tapahtuu suurella alueella ja pitkällä liekillä. [19] Pieni haihtuvien osuus kasvattaa jäännöshiilen ja syntyvän tuhkan määrää, suuri haihtuvien osuus puolestaan päinvastoin. [18]

Palamisessa polttoaineen alkuaineet reagoivat polttoilman hapen kanssa luovuttaen lämpöä ja muodostaen savukaasua seuraavien yhtälöiden mukaisesti. [9]



Lämpöarvo kertoo polttoaineen palamisessa vapautuvan lämpöenergian määrän polttoainekiloa kohden. Kiinteillä polttoaineilla lämpöarvon tarkka määrittäminen tapahtuu pommi-kalorimetrillä, jolla saadaan polttoaineen kalorimetrinen, eli ylempi lämpöarvo. Kalorimetrisessä lämpöarvossa palaminen tapahtuu täydellisesti ja polttoaineen sisältämä kosteus sekä polttoaineen sisältämän vedyn palamistuotteena syntynyt vesi esiintyvät nesteinä 25 °C referenssilämpötilassa. Eurooppalaisissa standardeissa käytetään polttoaineelle alemmaa eli tehollista lämpöarvoa, joka olettaa, että palamistuotteena syntyvä vesi höyrystyy ja jäähtyy alkulämpötilaan pysyen höyrynä. Näin ollen tehollinen lämpöarvo on veden höyrystymisenergian verran pienempi kuin kalorimetrinen lämpöarvo. [20] Tehollinen lämpöarvo voidaan määrittää kuivalle polttoaineelle kalorimetrin lämpöarvon kautta, kun polttoaineen alkuainekoostumus tiedetään. [19]

$$q_{teh,k} = q_{kal,k} - 212,2 w(H)_k - 0.8 [w(O)_k - w(N)_k] \quad (1)$$

, jossa  $q_{teh,k}$  on kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo,  $q_{kal,k}$  kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo ja  $w(H)_k$ ,  $w(O)_k$  sekä  $w(N)_k$  vedyn, hapen ja typen pitoisuudet kuivan polttoaineen alkuainekoostumuksessa.

Mikäli polttoaineelle ei ole tehty tarkkaa elementaarianalyysia, voidaan käyttää alkuainekoostumuksen likiarvoja, jotka ovat puupolttoaineille suhteellisen vakioita. Puupolttoaineen tuhkapitoisuus vaihtelee hieman sen mukaan, mistä puun osasta, puulajista ja



ikäisestä puusta polttoaine on valmistettu. Tuhkapitoisuus vaihtelee tyypillisesti noin 0,5-3 % välillä, siten että puun runko-osassa on vähemmän tuhkaa kuin kuoressa ja oksistoissa, sekä vanhemmassa puussa vähemmän, kuin nuoremmassa. [21] Tuhkapitoisuus vaikuttaa polton tuhkan muodostukseen ja tuhkan sulamiskäyttäytymiseen. Puupolttoaineilla tuhkan sulaminen ei muodosta yleisillä polttomenetelmillä ongelmaa, sillä puupolttoaineiden tuhkan sulamislämpötila on yleisesti yli 1400 °C. [18]

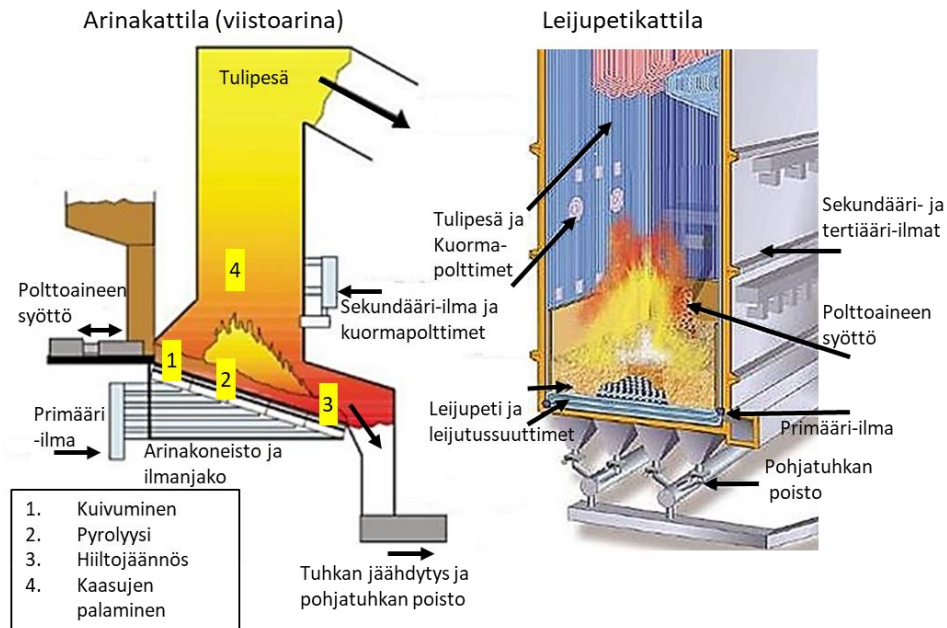
Polttoaineen sisältämä kosteus vaikuttaa lämpöarvoon ja tehollinen lämpöarvo saapumistilassa saadaan laskettua kuivan polttoaineen tehollisesta lämpöarvosta saapumiskosteuden avulla. [18, 19]

$$q_{teh,st} = q_{teh,k} \left( \frac{100 - M_{st}}{100} \right) - 0.02443M_{st} \quad (2)$$

, jossa  $q_{teh,st}$  on tehollinen lämpöarvo saapumistilassa ja  $M_{st}$  on polttoaineen kosteus saapumistilassa. Kosteuden kasvaessa tehollinen lämpöarvo saapumistilassa alenee ja palaminen muuttuu epäpuhtaammaksi. [3] Polttoaineen kosteuden lisäksi koostumus, palakoko ja tuhkapitoisuus yhdessä polttotekniikan kanssa vaikuttavat palamisnopeuteen ja palamisprosessiin lämpölaitoskattilassa. [19]

### 2.3 Kattiloissa käytettävät polttotekniikat

Edellä käsiteltyjen puuperäisten biopolttoaineiden polttamiseen käytettäviltä kattilatekniikoilta edellytetään kykyä polttaa vaihtelevan laatuista ja suhteellisen kosteaa polttoainetta. Biopolttoaineille ominaista on kosteuden vaihtelu vuodenajan ja sääolosuhteiden mukaan, sekä palakoon ja koostumuksen vaihtelut. Esimerkiksi tarkasteltavassa kokoluokassa yleisesti käytettävien kokopuu- ja metsätähdehakkeen kosteusvaihtelu on tyypillisesti välillä 35 - 55 %. [19]



**Kuva 4.** Arina- ja leijupetikattilan rakenne, muokattu lähteistä [12, 22]

Suomen lämpölaitoksilla puuperäisten polttoaineiden polttoon ovat vakiintuneet arina- ja leijukerros-kattilatekniikat. [7] Kattilatekniikoita on havainnollistettu kuvassa 4. Yleisessä arinakattilasovelluksessa, viistoarinassa, polttoaine syötetään kallistetulle tulipesän tasolle, jossa se valuu arinan liikkeen ja painovoiman vaikutuksesta alaspäin. Esilämmitetty palamisilma syötetään arinan alapuolelta. Arinan yläosaan syötetty polttoaine alkaa kuivua. Kuivuessaan polttoaine siirtyy arinan liikkeen ja painovoiman vaikutuksesta alaspäin. Arinan palorintamassa tapahtuu pyrolyysi, jossa polttoaineen haihtuvat aineet kaasuuntuvat ja palavat. Lopuksi jäljelle jää polttoaineen kiinteä jäännöshiili, joka palaa hitaasti arinan alaosassa. Tuhka poistuu pohjatuhkana arinan alaosasta. [18]

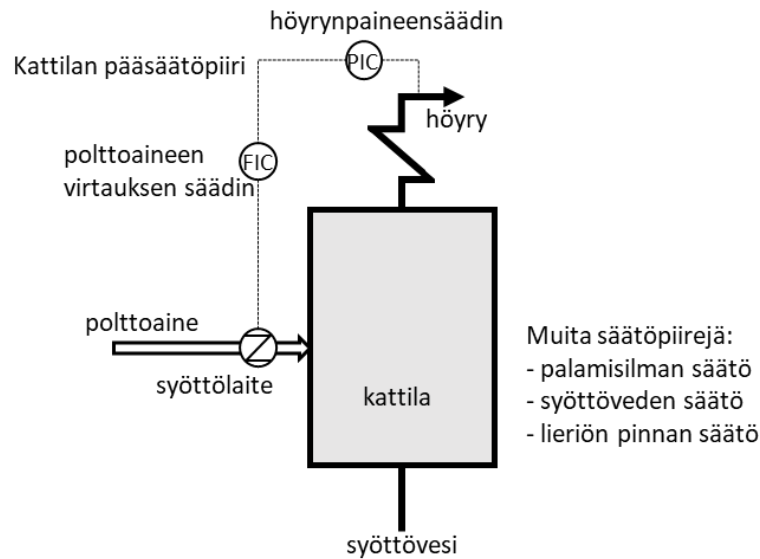
Toinen yleinen kattilatyyppejä on leijukattila, jossa palaminen tapahtuu nopeasti polttoaineen sekoittuessa leijutusmateriaaliin. Petimateriaalin leijuminen saadaan aikaan syötämällä primääri palamisilmaa rakeisen petimateriaalin läpi. Leijukattilat voivat olla kuplivia leijupetikattiloita, joissa leijutushiekka pysyy kattilan alaosassa tai kiertoleijukattiloita, joissa hiekka kiertää savukaasujen mukana ja palautuu takaisin kattilaan. [9] Leijupoltossa suurin osa syntyvästä tuhkasta on lentotuhkaa, pohjatuhka on pääosin käytöstä poistettavaa leijupetimitateriaalia, jota vaihdetaan säännöllisesti petin leijutusominaisuuksien pitämiseksi hyvinä. [18] Arina- ja leijukattilat eroavat kattilan osalta, mutta muuten laitosprosessit polttoaineen- ja ilmansyötön, sekä lämmönsiirron osalta noudattavat samoja peruseriaatteita.

Perinteisesti arinapoltto on ollut pienten alle 10 MW:n laitosten polttoratkaisu ja leijupoltteknikoita on käytetty suuremman kokoluokan laitoksissa. Tähän ovat vaikuttaneet arinatekniikan yksinkertaisuus ja alhaisemmat investointikustannukset, sekä pienempi omakäyttöteho leijupolttoon nähden. [9] Leijukattilassa palamisilma ja kiintoaine sekoituvat tehokkaasti, tämä yhdessä petin suuren lämpökapasiteetin kanssa mahdollistaa kosteamman polttoaineen polton tehokkaammin kuin arinakattilassa. Leijupoltolla pystytään reagoimaan nopeasti kuorman muutoksiin, kun taas arinapolton nopea säädettävyys on heikompi, sillä kattilassa on kerralla enemmän polttoainetta eri palamisen vaiheissa ja polttoainepartikkelin viipymäaika kattilassa on huomattavasti leijupolttoa pidempi. Leijukattilan säädettävyys on hyvä ja se soveltuu epäpuhtaan tai vaihtelevaalatuisen polttoaineen tehokkaaseen polttoon hyvällä hyötysuhteella. [7] Nämä tekijät ovat vaikuttaneet leijupetisovellusten yleistymiseen pienemmissäkin laitoskokoluokissa.

## 2.4 Höyrykattilan säätäminen

Säätöpiireillä säädetään esimerkiksi polttoaineen, ilman ja veden syöttöä kattilaan, laitokselta mitatun datan perusteella. Laitosautomaatio prosessoi mittausdataa ja antaa toimilaitteille käskyjä muuttaa esimerkiksi pumppujen ja puhaltimien käyntitietoja, jotta laitoksen toiminnot pysyvät niille asetettujen reunaehtojen sisällä. Automaatio huolehtii jatkuvasta säätämisestä ja laituskäyttäjän tehtävänä on usein tarkkailla ja arvioida laitoksen toimivuutta. Poikkeavissa tilanteissa laituskäyttäjä voi kokemuksen perusteella käyttää laitteita manuaalisesti tai asettaa tavoitearvoja laitoslogiikan avulla. Tämä edellyttää käyttäjältä keskeisten säätöpiirien tuntemusta ja tietoa toimien syy-seuraussuhteista. [12]

Kattilalla voidaan tuottaa höyryä joko kiinteän tai liukuvan paineen ajotavalla. Laitosautomaatio säätää tuotettua höyrytehoa siten, että polttoteho vastaa kullakin ajanhetkellä vaadittua tehoa. Kuorma eli kattilan tuottaman tehontarve on harvoin vakio, vaan se vaihtelee esimerkiksi teollisuusasiakkaan prosessien tai kaukolämpöverkon kysynnän perusteella. Laitosautomaatio huolehtii siitä, että kattila vastaa jatkuvasti muuttuvaan tehontarpeeseen siten, että laitosprosessi toimii mahdollisimman tehokkaasti ja palaminen on puhdasta. [8]



**Kuva 5.** Kiinteän paineen säätö, muokattu lähteestä [8]

Kuva 5 esittää yksinkertaistettuna kiinteän paineen ajotavan kattilan pääsäätöpiirin peruskytkenä. Tuotettaessa kiinteäpaineista höyryä tuotetun höyryn paine pysyy likipitään vakiona. [9] Kiinteän paineen ajotapa on yleinen tehonsäätöratkaisu pienehköissä ja yksinkertaisissa laitossovellutuksissa esimerkiksi prosessihöyryn- ja kaukolämmön tuotannossa, joissa kattilalta ei edellytetä yhtä nopeaa reagointikykyä tehonmuutoksiin kuin esimerkiksi sähköntuotannossa. [12] Kuvan 5 mukaisesti höyrynpaineensäädin mittaa tuotetun höyryn painetta, jonka mukaan laitosautomaatio antaa asetusarvon polttoaineen syöttölaitteelle. Höyrynpainetta säädetään siis polttoaineensyötön avulla. Pääsäätöpiiriin lisäksi kattilassa on muitakin säätöpiirejä, joista keskeisimmät on mainittu kuvassa. Säätöpiirit ovat vuorovaikutuksessa toistensa kanssa. [12]

Kattilaan syötettävän polttoainevirran säätö edellyttää palamisilmamäärien säätöä. Palamisilmoja säädetään esimerkiksi syötettävän polttoainemäärän ja savukaasun jäänöshapen perusteella. [12] Palamisilman syötössä pyritään mahdollisimman vähäiseen yli-ilmamäärään, joka kasvattaa savukaasuhäviöitä ja palamisen epäpuhtauksia. Primaari-, sekundaari- ja kokonaisilmamäärät vaihtelevat tehotason mukaan ja polttoaineen laatu vaihtelee aiheuttavat haasteita laitosautomaatiolle. [8] Kattilan syöttöveden virtausta säädetään esimerkiksi syöttövesisäiliön pinnanmittauksen sekä syöttövesiventtiin paine-ero mittauksen perusteella. Säätö voidaan toteuttaa esimerkiksi syöttövesipumppujen kierrosnopeuden säädöllä. [12]

Laitoksilla voi myös olla tarkempia mittauksia ja käytännön sovellutuksissa säädöt ovat monimutkaisempia kuin edellä mainitut säätöpiirien perusperiaatteet. Kattilan säätötavat

vaihtelevat laitokseen ja teknisten ratkaisujen perusteella. [12] Palamista hallitaan tulipesän paineen ja lämpötilan mittausten avulla. Tulipesässä pidetään tyypillisesti pientä alipainetta savukaasupuhaltimen kierrossäädön avulla. Tulipesän lämpötilaan vaikutetaan palamisilmojen syötöllä ja esimerkiksi kiertokaasun käytöllä. Kiertokaasu on savukaasua, joka johdetaan takaisin kattilaan palamisilman mukana. Vähähappinen kiertokaasu hidastaa palamisprosessia ja alentaa savukaasujen lämpötilaa. Kiertokaasua käytetään etenkin leijupetikattiloissa petin lämpötilan säätöön, jotta leijutusominaisuudet eivät vaarantuisi. [8]

Laitoksen säädön peruseräitä voi tarkastella edellä esitettyjen pääsäätöpiirien avulla. Otetaan esimerkiksi kuviteltu tilanne, jossa teollisuusasiakkaan tehontarve kasvaa. Kiinteän paineen ajotavassa kattilan pääsäätöpiirin höyrynpaineensäädin havaitsee paineen muutoksen. Automaatiojärjestelmä reagoi ja polttoaineen virtauksen säädin asettaa polttoaineen syöttölaitteelle korkeamman käyntitiedon, jotta kattilaan kulkeutuu enemmän polttoainetta ja polttoteho kasvaisi. Polttoainevirran lisääntyessä palamisilman säätö lisää palamisilman määrää. Laitoksen teho alkaa nousta ja samalla syöttöveden säätö reagoi höyryn tarpeeseen. Kattila on pystynyt saavuttamaan siltä pyydetyn tehotason. Mikäli kattila ei olisi kyennyt vastaamaan muuttuneeseen tehontarpeeseen riittävän nopeasti olisi seurauksena voinut olla esimerkiksi teollisuusasiakkaan tuotannon häiriintyminen tai kaukolämpöverkon lämpötilan lasku. Skenaarion kuorman muutos on yksinkertaistettu esimerkki laitosedynamiikasta, jota laitoksen säätöpiirit operoivat jatkuvasti. Kun tilanteeseen yhdistetään esimerkiksi polttoaineen laadunvaihtelut tai odottamattomat kuorman muutokset, laitospääkäyttö saattaa häiriintyä. Tällöin laitospääkäyttäjä voi osallistua laitoksen operointiin hyvän tilannekuvan ja kokemuksen tuoman tietotaidon ansiosta. [12]

### 3. HÖYRYKATTILAN HYÖTYSUHTEEN MÄÄRITYS

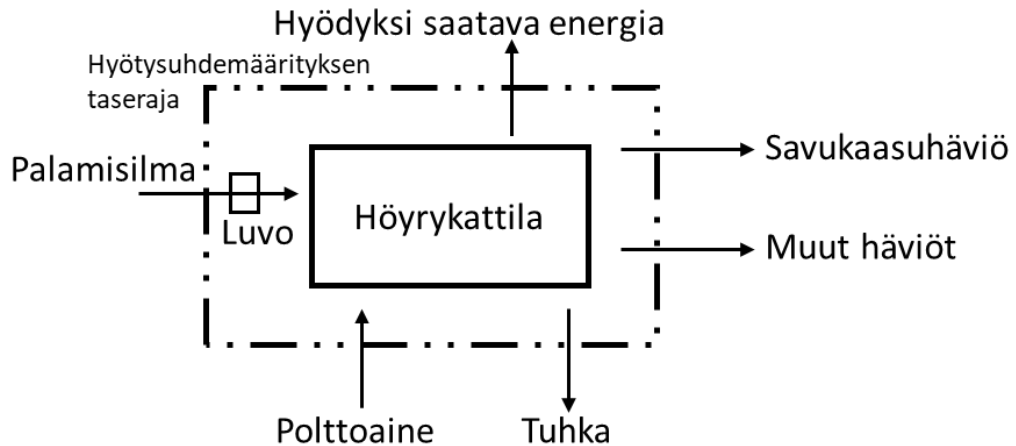
Kattilan hyötysuhde kuvastaa kattilaan tuotujen lämpövirtojen suhdetta hyödyksi saattaviin lämpövirtoihin. Hyötysuhde on yleinen mittari prosessin tehokkuudelle. Kaikkea prosessiin syötettävää energiaa ei pystytä hyödyntämään, vaan osa menetetään erilaisten häviöiden muodossa. Hyötysuhde kuvastaa hyötykäyttöön saatavan lämpötehon ja prosessiin tuodun energiavirran suhdetta. Se kertoo prosessin tehokkuudesta ja toiminnasta. Kattilan hyötysuhde saadaan laskettua kaavalla. [9]

$$\eta = \frac{Q_{hyöty}}{Q_{tuotu}} \quad (3)$$

missä  $\eta$  on kattilahyötysuhde,  $Q_{hyöty}$  hyödyksi saatava lämpövirta ja  $Q_{tuotu}$  kattilaan tuotu energiavirta. Prosessista saatava lämpöteho sisältää kaiken lämpöenergian, joka siirtyy kattilasta lämmitettävään veteen tai höyryyn. Tämä lämpöenergia on peräisin kattilassa tapahtuvasta palamisprosessista, sekä kattilaan tuoduista lämpövirroista. Palamisessa polttoaineen sisältämä kemiallinen energia muuttuu lämpöenergiaksi. Polttoaineen lisäksi kattilaan tuodaan muitakin energiavirtoja, kuten esilämmitettyä palamisilmaa. [20] Hyötysuhteen laskennallisessa määrittämisessä tukeudutaan kansainvälisiin standardeihin. Tässä työssä on käytetty standardia SFS-EN 12952-15, ”Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot. osa 15: Vastaanottokokeet”. Standardissa on määritetty standardiolosuhteet joihin vallitsevia olosuhteita verrataan. Standardin mukaiseksi normaali-tilaksi on määritetty  $p_n = 1,01325$  bar ja  $t_n = 0$  °C, laskennan referenssilämpötilana käytetään standardin mukaisesti  $t_{ref} = 25$  °C. [20]

#### 3.1 Taserajan määrittäminen

Taseraja on kuvitteellinen raja, joka määritetään siten, että taserajan yli menevät energiavirrat otetaan huomioon kattilan hyötysuhteen määrittämisessä. Taseraja määritetään tapauskohtaisesti, siten että halutut energiavirrat pystytään määrittämään hyötysuhdelaskentaa varten. [9] Kattilahyötysuhteelle on standardin SFS-EN 12952-15 mukaisesti vakioratkaisuja, joissa tarkastelun taserajan yli meneviä energiavirtoja ovat kattilan lämpöpintojen lämpövirrat, sekä polttoaineen jauhatuslaitteisto, palamisilman lämmityksen höyrytoiminen esilämmitin, pakkokierto-pumppu ja savukaasujen kierrätyspuhallin. [20]



**Kuva 6.** Höyrykattilan hyötysuhteen määrittämisen taseraja

Tarkastellaan taserajan yli meneviä energiavirtoja, taserajaan johtavat nuolet kuvastavat kattilaan syötettäviä energiavirtoja ja taserajan yli kattilasta poispäin suuntaavat nuolet kattilassa tapahtuvan palamisprosessin tuottamia energiavirtoja. Taserajan yli voidaan muodostaa energiatase, eli sisään virtaa yhtä paljon energiaa, kuin sieltä ulos. [23] Ulostulevat energiavirrat muodostuvat hyödyksi saatavista energiavirroista ja häviöistä. Kattilaan syötettävät energiavirrat koostuvat pääosin polttoainevirran sisältämästä kemiallisesta energiasta, polttoaineen esilämmitykseen sitoutuneesta energiasta, sekä esilämmitettyyn palamisilmaan sitoutuneesta energiasta. Kattilasta hyödyksi saatava energiavirta on kattilan lämpöpintojen kautta vesikiertoon sitoutunutta lämpöenergiaa, joka kulkeutuu taserajan yli kuumana vetenä tai höyrynä. Loppu kattilan luovuttamasta energiavirrasta on häviöitä, jotka poistuvat esimerkiksi savukaasujen ja tuhkan mukana taserajan yli. [9]

Hyötysuhde voidaan määrittää joko suoralla menetelmällä hyödyksi saatavan energiavirran avulla tai epäsuoralla menetelmällä häviöiden kautta. Standardin mukaisessa esimerkkiratkaisussa esitettyä vesipiirin pakkokiertoa ei yleisesti esiinny tässä työssä tarkasteltavan kokoluokan laitteilla, jotka ovat luonnonkiertokattiloita. Polttoaineen jauhatuslaitteisto puolestaan on lähinnä hiiltä käyttävien laitteiden komponentti. [12] Kattilahyötysuhteeseen ei yleisesti huomioida polttoaineen kuljetuksen, ilmansyöttöjen ja vesikierron pumppuja ja puhaltimia, kuten ei myöskään savukaasupuhaltimia. [20]

Hyötysuhteen määrittämisessä käytettävä menetelmä valitaan mitattavan prosessin teknisten ratkaisujen ja tiedossa olevien mitattavien suureiden perusteella. Suora menetelmä edellyttää tuotujen ja tuotettujen energiavirtojen tarkkaa tuntemista, joten se soveltuu prosesseihin, joissa esimerkiksi polttoaine on homogeenistä ja polttoainevirta kat-

tilaan pystytään määrittämään tarkasti. Suuremmissa prosesseissa ainevirrat ovat yleisesti suuria ja esimerkiksi polttoainevirran tarkka määrittäminen voi olla haastavaa. Tällöin hyötysuhteen määrittäminen epäsuoralla tavalla häviöiden kautta saattaa tuottaa tarkemman tuloksen. Laskentatapojen tarkkuutta on arvioitava tapauskohtaisesti ja valittava tilanteeseen sopiva tarkin määrittäystapa. [20]

### 3.2 Savukaasuhäviö

Merkittävä osa palamisen energiasta poistuu kuumien savukaasujen mukana savupiipusta ulos. Nämä häviöt muodostavat yleisesti suurimman yksittäisen häviön kattilalahyötysuhteessa. [9] Hyvä kattilalahyötysuhde edellyttää hyvän palamisen lisäksi mahdollisimman pieniä lämpöhäviöitä, joista poistokaasut muodostavat suurimman osan. Poisto- eli savukaasuhäviö on pieni, kun palaminen tapahtuu mahdollisimman pienellä ilmamäärällä, jolloin syntyvä savukaasuvirta on mahdollisimman alhainen. Lisäksi savukaasujen poistumislämpötila tulee olla mahdollisimman alhainen, jolloin niiden entalpiavirta ja siten savukaasuhäviöt ovat mahdollisimman pieniä. Mahdollisimman pienellä yliilmamäärällä palamislämpötila on suuri, mikä on yleisesti hyvä kattilalahyötysuhteen kannalta. Palamisilma määrää ei saa kuitenkaan laskea liian alas, jottei palaminen muutu epäpuhtaaksi ja palamattomien häviöt nouse. [18]

Savukaasujen mukana poistuva lämpömäärä saadaan laskettua, kun savukaasuvirta, sen lämpötila ja ominaisuudet tiedetään.

$$Q_{sk} = m_{sk} c_{p(sk)} (t_{sk} - t_{ref}) \quad (4)$$

, missä  $m_{sk}$  on savukaasun massavirta,  $c_{p(sk)}$  savukaasun ominaislämpökapasiteetti ja  $t_{sk}$  savukaasun lämpötila. Savukaasun ominaislämpötila määritetään standardin mukaisella polynomisovitteella, jossa kosteiden savukaasujen ominaislämpökapasiteetti määritetään savukaasun lämpötilan ja kostean savukaasun veden mooliosuuden perusteella. [20] Aluksi polynomisovitteella määritetään standardin mukaisesti kuivan savukaasun ominaislämpökapasiteetti  $c_{pAd0}$  ja vakio  $P_{1m}$ .

$$c_{pAd0} = a + \frac{b}{2}t + \frac{c}{3}t^2 + \frac{d}{4}t^3 + \frac{e}{5}t^4 + \frac{f}{6}t^4 \quad (5)$$

$$P_{1m} = a_1 + \frac{b_1}{2}t + \frac{c_1}{3}t^2 + \frac{d_1}{4}t^3 + \frac{e_1}{5}t^4 \quad (6)$$



Näissä kaavoissa  $t$  on savukaasun lämpötila ja vakiot taulukon 1 polynomisovitteiden vakioarvoja.

Taulukko 1. *Polynomisovitteiden vakiot*

<i>Polynomisovitteiden vakiot</i>			
$a$	0,1004173 E + 01	$a_1$	0,8554535
$b$	0,1919210 E - 04	$b_1$	0,2036005 E - 03
$c$	0,5883483 E - 06	$c_1$	0,4583082 E - 06
$d$	- 0,7011184 E - 09	$d_1$	- 0,2798080 E - 09
$e$	0,3309525 E - 12	$e_1$	0,5634413 E - 13
$f$	- 0,5673876 E - 16		

Seuraavaksi saadaan määritettyä kostean savukaasun ominaislämpökapasiteetti  $c_p A0$  kostean savukaasun veden mooliosuuden avulla.

$$c_p A0 = c_p A d0 + P_{1m} x_{H2O,sk} \quad (7)$$

, missä  $x_{H2O,sk}$  on veden mooliosuus kosteassa savukaasussa, jolle on käytetty laskennassa vakioarvoa 1,2 kJ/kgK. Savukaasuhäviön laskentakaava hyödyntää savukaasun massavirtaa, joka saadaan määritettyä tilavuusvirrasta tiheyden avulla. Tilavuusvirtaa ei kuitenkaan kaikilla laitoksilla mitata, jolloin savukaasuvirran voi arvioida esimerkiksi polttoaineen massavirran perusteella savukaasuanalyysin avulla. [20]

Savukaasuhäviö  $q_{sk}$  tarkoittaa savukaasujen mukana poistuvan lämpömäärän suhdetta kattilaan syötettävistä energioista. Häviöt määritetään jakamalla kyseisen häviön lämpömäärä kattilaan syötetyllä kokonaisenergiavirralla. Savukaasuhäviö saadaan laskettua kaavalla

$$q_{sk} = \frac{Q_{sk}}{Q_{in}} \quad (8)$$

, missä  $Q_{sk}$  on savukaasujen mukana poistuva lämpömäärä ja  $Q_{in}$  kattilaan syötetyt energiavirrat. Kaavan 8 mukaisella laskutavalla saadaan määritettyä häviön prosentuaalinen osuus kattilaan syötetyistä energiavirroista. Kaikki epäsuoran hyötysuhteen määrittävän yksittäiset häviöt on määritetty vastaavalla tavalla. [20]

Savukaasujen lämpöenergiaa hyödynnetään usein esimerkiksi syöttöveden esilämmitykseen, jolloin hukkaenergiaa saadaan talteen ja savukaasujen loppulämpötila alenee. [10] Poistumislämpötilaa ei kuitenkaan voida laskea liian alhaiseksi, jottei se alita savukaasulle ominaista happokastepistelämpötilaa, jolloin lämpöpinnoille saattaisi tiivistyä

syövyttäviä rikin yhdisteitä. [9] Savukaasuhäviön optimointi on tasapainoilua palamisilmamäärän ja savukaasun loppulämpötilan kanssa. Loppulämpötilaan vaikuttaa olennaisesti lämmönsiirtopintojen kunto. Kun lämmönsiirripinnat likaantuvat niiden lämmönsiirtoteho heikkenee ja savukaasut poistuvat kattilasta korkeammassa lämpötilassa. [18] Lämmönsiirron tehokkuuteen lämmönsiirtopinnoilla vaikutetaan usein nuohoamalla esimerkiksi höyryn, äänen tai mekaanisten menetelmien avulla. [12]

### 3.3 Palamattomien häviöt

Kaikki kattilaan syötetty polttoaine ei vapauta kemiallista energiaansa palamisessa, vaan osa siitä voi jäädä palamatta ja poistua prosessista palamattomina kaasuna savukaasujen mukana tai palamattomana kiintoaineena tuhkan mukana. Hyvälaatuisilla polttoaineilla vakiintuneessa polttoprosessissa palamishyötysuhde on yleisesti korkealla tasolla, eli palamattomien osuus polttoainevirrasta pieni. [9] Palamattomat kaasut ovat pääosin hiilimonoksidia eli häkää, jolloin palamattomien kaasujen häviö voidaan määrittää savukaasun häkäpitoisuuden avulla kaavalla

$$Q_{CO} = V_{sk,kuiva} y_{CO,kuiva} H_{CO} \quad (9)$$

, missä  $V_{sk,kuiva}$  on kuiva savukaasuvirta,  $y_{CO,kuiva}$  häkäpitoisuus kuivassa savukaasussa ja  $H_{CO}$  hiilimonoksidin lämpöarvo. Savukaasuvirta ja savukaasun koostumus tiedetään yleisesti laitosmittauksien perusteella. Mikäli laitoksella ei ole näitä mittauksia savukaasun määrää ja koostumusta voidaan arvioida savukaasuanalyysin avulla. Savukaasuanalyysi perustuu palamisen reaktioyhtälöihin, kun polttoaineen koostumus, polttoainevirta ja palamisilmamäärät tunnetaan. Yllä esitetyn laskentakaavan lisäksi palamattomien kaasujen häviö voidaan määrittää polttoaineen kosteuskertoimen ja palamisilmakertoimen avulla erilaisten käyrästöjen avulla. [9] Mitä pienempi polttoaineen kosteuskerroin on ja mitä lähempänä palamisen ilmakerroin on teoreettista palamisilmamäärää, sitä pienempi hiilimonoksidin osuus savukaasuista on ja siten myös palamattomien kaasujen häviö. [18]

Palamattomien kiintoaineiden häviö puolestaan aiheutuu lentotuhkan mukana kulkeutuvista tai pohjatuhkan mukana poistuvista polttoaineen palamattomista kiintoainepartikkeleista. Palamattoman kiintoaineen osuus polttoaineesta pystytään määrittämään, kun tiedetään tuhkan hehikutushäviö, polttoaineen kosteus ja kuivan polttoaineen tuhkapitoisuus. [9] Palamattoman kiintoaineen määrä saadaan laskettua kaavalla,

$$m_{pal} = p \frac{x_t}{1-p} (1 - M_{st}) m_{pa} \quad (10)$$

missä  $p$  on tuhkan hehkutushäviö,  $x_t$  polttoaineen tuhkapitoisuus,  $M_{st}$  polttoaineen saapumistilan kosteus ja  $m_{pa}$  polttoaineen massavirta. [20] Kun palamattoman kiintoaineen massavirta tunnetaan, voidaan siitä aiheutuva häviö määrittää kaavalla kertomalla sen määrä tuhkan lämpöarvolla. Palamattoman kiintoaineen häviö saadaan määritettyä kaavalla

$$Q_{pal} = m_{pal} H_{tuhka} \quad (11)$$

, missä  $m_{pal}$  on palamattoman kiintoaineen massavirta ja  $H_{tuhka}$  tuhkan lämpöarvo. Tuhkahäviöt puolestaan tarkoittavat kattilasta poistettavan tuhkan mukana poistuvaa termistä lämpömäärää, joka määritetään poistettavien tuhkien massavirran ja lämpötilan perusteella. Hetkellinen tuhkamäärä saadaan määritettyä polttoaineen massavirran ja polttoaineominaisuuksien avulla kaavan avulla

$$m_{tuhka} = \left\{ \frac{x_t}{1-p} (1 - M_{st}) H_u \right\} m_{pa} \quad (12)$$

, missä  $p$  on tuhkan hehkutushäviö,  $x_t$  polttoaineen tuhkapitoisuus,  $M_{st}$  polttoaineen saapumistilan kosteus,  $m_{pa}$  polttoaineen massavirta ja  $H_u$  polttoaineen lämpöarvo. Vuositason tuhkista voidaan olettaa laitoskohtaisesti pohjatuhkan ja lentotuhkan muodostumisen suhde ja määrittää molempien tuhkajakeiden mukana poistuva lämpömäärä tuhkan ominaislämpökapasiteetin ja poistumislämpötilan avulla

$$Q_{tuhka} = m_{tuhka} c_{p,tuhka} (t_{tuhka} - t_0) \quad (13)$$

, missä  $m_{tuhka}$  on tuhkajakeen massavirta,  $c_{p,tuhka}$  tuhkan ominaislämpökapasiteetti ja  $t_{tuhka}$  tuhkan poistumislämpötila. Sekä lentotuhkalle, että pohjatuhkalle määritetään laitoskohtaisten ominaisuuksien perusteella omat lämpömääränsä, joista yhteensä muodostuu tuhkan mukana poistuvat termiset häviöt. [20]

Palamattomien häviöihin ja tuhkahäviöihin voidaan vaikuttaa polttoaineen laadulla ja polttotekniikalla. Tuhkahäviö on suoraan verrannollinen kiinteän polttoaineen poltosta syntyvän tuhkan massaan ja se on arinakattiloilla leijupetikattiloita suurempi. [7] Edellä

esitetty tuhkan massavirran kaava ei huomioi leijupetikattiloissa poistettavaa petimateriaalia, vaan ainoastaan polttoaineen ominaisuuksien perusteella muodostuvan tuhkamäärän. Tämän vuoksi edellä esitettyjen kaavojen voidaan olettaa toimivan paremmin arinakattiloille, kuin leijupetikattiloille. [9] Lämpöhäviöiden lisäksi tuhkanpoisto aiheuttaa energiantuottajalle kustannuksia jatkokäsittelyn kautta.

### 3.4 Säteilyhäviöt ja muut häviöt

Kattiloissa palamislämpötila vaihtelee useista sadoista yli tuhanteen asteeseen. [12] Kattilan lämpötila on huomattavasti ympäröivän kattilasalin lämpötilaa korkeampi, jolloin lämpöä siirtyy säteilemällä kattilan pinnoilta ympäröivään tilaan paksusta eristekerroksesta huolimatta. Työturvallisuuden ja työolosuhteiden vuoksi kattilan eristämällä pyritään rajoittamaan lämpötilan nousu eristeiden pellityksen pinnalla enintään 55 asteeseen. [9] Säteilyhäviöt aiheuttavat kattilasalin lämpötilan nousua, toisaalta kattilasalin lämpöä hyödynnetään yleisesti palamisilman lämmityksessä. Säteilyhäviö  $Q_{RC}$  voidaan arvioida standardin mukaisella empiirisesti määritetyllä sovitteella, joka huomioi kattilatyypin ja kattilaan syötetyt energiavirrat.

$$Q_{RC} = CQ_N^{0,7} \quad (14)$$

, missä  $C$  on leijupetikattilalle määritetty vakioarvo 0,0315 ja  $Q_N$  on suurin mahdollinen hyödyksi saatava lämpöteho. Kattilan lämpöhäviöitä voidaan pienentää eristämällä. Hyvin eristetyllä kattilalla lämpöhäviöt ovat 200-300 W/m<sup>2</sup>K suuruusluokkaa, aiheuttaen noin 0,2-1 %:n häviön polttoainetehoon nähden. [9] Kattilan palamisen liekin lämpötila ja siten kattilan seinämien lämpötila ei juurikaan riipu laitoksen kuormasta. Tämän vuoksi osakuorma-ajon pienemmillä kuormilla säteilyhäviöiden suhteellinen osuus on suurempi, kuin isommilla kuormilla. [12]

Edellä mainittujen häviöiden lisäksi on muitakin häviöitä, jotka määritetään usein tapauskohtaisesti. Näistä keskeisimmät ovat nuohous ja ulospuhallus. Höyrynuohouksessa menetetään höyryenergiaa ja nuohouksen seurauksena savukaasupäästöt hetkellisesti nousevat. Toisaalta nuohous on välttämätöntä lämmönsiirron tehokkuuden kannalta. Käytännössä nuohousvälin määrittäminen edellyttää usein laitospäälliköltä tilannekohtaista arviointia nuohouksen tarpeesta. [12] Ulospuhalluksessa kattilan kiertovedestä poistetaan epäpuhtauksia, mutta samalla menetetään energiaa. Ulospuhallushöyryä voidaan hyödyntää esimerkiksi syöttöveden esilämmityksessä. Ulospuhallettavan vesi johdetaan

yleisesti viemäriin ja sen määrä on keskimäärin 1-2 % kattilan höyryn tuotannosta. [12]  
Ulospuhalluksen määrään voi oleellisesti vaikuttaa kattilavesikemialla. [10]

### 3.5 Hyötysuhteen määrittäminen suoralla menetelmällä

Hyötysuhde voidaan määrittää suoralla menetelmällä kattilasta hyödyksi saatavien ja kattilaan syötettyjen energiavirtojen suhteen avulla. Kattilaan syötetään polttoainetta, josta vapautuu palamisessa kemiallista energiaa lämpönä. Lisäksi kattilaan tuodaan ulkoisia energiavirtoja, esimerkiksi esilämmitetyn palamisilman muodossa. Kokonaisenergiamäärä määritetään kattilaan syötettyjen polttoaineiden ja muiden tuotujen energioiden summana. Hyötysuhde kuvaa kuinka tehokkaasti kattilaan syötetyt energiat saadaan hyödynnettyä. [20]

Kattilaan tuotavat energiavirrat voidaan jaotella polttoainevirrasta riippuviin ja riippumattomiin virtoihin. Polttoainevirtaa säädetään tehontarpeen, sekä polttoaineen ominaisuuksien mukaan. Mikäli tehontarve kasvaa, polttoainevirtaa kasvatetaan. Vastaavasti jos polttoaineen laatu ja lämpöarvo heikkenevät täytyy polttoainevirtaa kasvattaa halutun tehon aikaansaamiseksi suhteessa korkeamman lämpöarvon polttoaineeseen. Polttoaineeseen sitoutunut kemiallinen energia on verrannollinen polttoainevirtaan, samoin polttoaineen esilämmitykseen sitoutunut energia  $Q_{pa,esil}$ . Yleisesti palamisilmavirran voidaan ajatella olevan myös verrannollinen polttoainevirtaan, joten palamisilman esilämmitykseen sitoutunut energia  $Q_{i,esil}$  on myös riippuvainen polttoainevirrasta. Polttoaineen kosteus ja muut ominaisuudet vaikuttavat kuitenkin tarvittavan yli-ilman määrään, joten ilmamäärä vaihtelee tilannekohtaisesti. [9]

Polttoaineen ja ilman esilämmitykseen sitoutuneet energiat saadaan määritettyä, kun tiedetään niiden massavirrat, ominaislämpökapasiteetit ja lämpötilat, joissa ne tulevat kattilaan. [20]

$$Q_{pa,esil} = m_{pa}c_{p,pa}(t_{pa} - t_{ref}) \quad (15)$$

$$Q_{i,esil} = m_i c_{p,i}(t_i - t_{ref}) \quad (16)$$

, missä  $m_{pa}$  on polttoaineen massavirta,  $c_{p,pa}$  polttoaineen ominaislämpökapasiteetti ja  $t_{pa}$  lämpötila, jossa polttoaine syötetään kattilaan. Vastaavasti esilämmitetyn ilman mukana kulkeutuvan lämpömäärän laskennassa  $m_i$  on palamisilman massavirta,  $c_{p,i}$  ilman

ominaislämpökapasiteetti ja  $t_i$  lämpötila, jossa palamisilma syötetään kattilaan. Polttoaineen palamisessa vapautuva kemiallinen energia  $Q_{pa}$  saadaan kertomalla polttoaineen lämpöarvo sen massavirralla

$$Q_{pa} = H_u m_{pa} \quad (17)$$

, missä  $H_u$  on polttoaineen lämpöarvo eli energia massayksikköä kohti ja  $m_{pa}$  polttoaineen massavirta. Aineiden esilämmitykseen sitoutunut energia on yleisesti hyvin pieni verrattuna palamisessa vapautuvaan kemialliseen energiaan. [12]

Voimalaitosprosessista riippuen kattilaan voi tulla myös polttoainemäärästä riippumattomia energiavirtoja, joita voi ottaa huomioon hyötysuhteen tarkassa määrittämisessä. Tällaisia voivat olla esimerkiksi höyrytoimisen palamisilman esilämmittimen lämmitys  $Q_{hluvo}$ , polttoaineen hajoitushöyry  $Q_{haj}$ , sekä muut energiavirrat  $Q_{muu}$ . [9] Tarkastelun taseraja osaltaan määrittää mitä tekijöitä otetaan tarkasteluun mukaan ja kuinka tarkasti hyötysuhde halutaan määrittää. Kattilaan syötettävä energiavirta  $Q_{in}$  muodostuu edellä esitetyistä energiavirroista.

$$Q_{in} = Q_{pa,esil} + Q_{i,esil} + Q_{pa} + Q_{hluvo} + Q_{haj} + Q_{muu} \quad (18)$$

Kattilasta saadaan hyödyksi vesihöyrypiiriin siirtyvää lämpöenergiaa, kun kattilan syötövä lämmitetään käyttötarkoituksen mukaan kuumaksi vedeksi tai höyryksi, joka luovuttaa lämpöenergiansa ja palaa prosessiin lauhteena. Höyry voidaan edelleen lämmitellä tulistetuksi höyryksi. Standardin mukaisesti hyödyksi saatava energia saadaan massavirtojen ja entalpioiden avulla määritettyä,

$$Q_{netto} = m_{th}(h_{th} - h_{sv}) \quad (19)$$

, missä  $m_{th}$  on tuorehöyryn massavirta ja  $h_{th}$  sen entalpia, sekä  $h_{sv}$  syöttöveden entalpia. Höyrykattilassa höyry voidaan edelleen lämmitellä tulistetuksi höyryksi, jolloin hyödyksi saatava energia saadaan vastaavasti entalpioiden avulla jakamalla tuote tuorehöyryyn ja tulistettuun höyryyn. [20] Suorassa hyötysuhteen määrittämisessä kattilahyötysuhde, jossa hyödyksi saatava lämpöenergia jaetaan kattilaan tuoduilla energiavirroilla, saa alla esitetyn yksinkertaistetun muodon.

$$\eta = \frac{Q_{netto}}{Q_{in}} \quad (20)$$

Suora hyötysuhteen määrittystapa soveltuu tilanteisiin, joissa polttoprosessiin vietävät ja hyödyksi saatavat energiavirrat tunnetaan riittävän tarkasti. Tämä toteutuu yleisesti pidemmillä ajanjaksoilla esimerkiksi vuosi tai kuukausitason keskiarvoina, jolloin käytetyt energiat pystytään määrittämään riittävän tarkasti kulutusmittarien ja varastotasojen muutosten kautta, samoin kuin asiakkaille tuotettavan hyödyksi saatavan lämpöenergian määrä. [3]

### 3.6 Hyötysuhteen määrittäminen epäsuoralla menetelmällä

Epäsuora hyötysuhteen määrittäminen lähestyy hyötysuhteen määrittämistä häviöiden kautta. Kun yksittäisten prosessien häviöiden suuruus tiedetään, pystytään kokonaishyötysuhde määrittämään näiden summana. [20] Edellä esiteltiin voimalaitosprosessin keskeisimmät kattilahuötysuhteeseen vaikuttavat häviöt, joita ovat palamattomien kaasujen ja kiintoainesten häviöt sekä lämpöhäviöt ja muut häviöt. Lämpöhäviöitä ovat savukaasuhäviöt, tuhkan mukana poistuva lämpö, sekä säteilyhäviöt. Kokonaishyötysuhde saadaan vähentämällä 100 %:sta kaikkien tunnettujen häviöiden summa.

$$\eta = 1 - \Sigma q \quad (21)$$

Eri tekijät vaikuttavat näihin häviöihin eri tavoin ja prosessikokonaisuuden kokonaishäviön pienentäminen on optimointia eri häviöiden välillä. Häviöihin vaikutetaan laitospölyssä esimerkiksi polttoaineen laadulla, palamisilmamäärällä ja muilla palamisen asetuksilla, sekä lämmönsiirtopintojen nuohouksella. Kattilan hyötysuhteen määrittäminen epäsuoralla menetelmällä häviöiden kautta saattaa olla suoraa menetelmää tarkempi tapa, mikäli taserajan ylittäviä energiavirtoja ei tiedetä tarkasti. [9]

Polttoaineen laatu vaikuttaa hyötysuhteeseen monen eri tekijän kautta. Tätä voidaan tarkastella epäsuoran hyötysuhteen häviöiden kautta. Heikkolaatuinen ja kostea polttoaine omaa alhaisemman lämpöarvon kuin kuivempi ja parempilaatuinen. Alhaisemman lämpöarvon vuoksi polttoaineensyöttöä on lisättävä tietyn energiamäärän tuottamiseksi suhteessa parempaan polttoaineeseen. Suurempi polttoainevirta kasvattaa savukaasuvirtaa ja polttoaineen sisältämä kosteus edellyttää yleisesti korkeampaa palamisen yli-ilmamäärää, joka entisestään lisää savukaasun virtausta. Näin ollen savukaasun lämpöhäviöt savukaasuvirran kasvaessa yleisesti suurenevät. [12] Lisäksi heikkolaatuinen polttoaine aiheuttaa palamisen epäpuhtauksia, jotka altistavat lämpöpinnat likaantumislle ja vaikuttavat hyötysuhteeseen alentavasti. Myös palamattomien häviöt lisääntyvät ja

tuhkaa syntyy enemmän, jolloin myös tuhkahäviö kasvaa. Epäsuora menetelmä mahdollistaa eri häviöiden vertailun. Tämä auttaa hahmottamaan mitkä häviöistä ovat merkittävimpiä ja olennaisia prosessin kehittämisessä. [9]

### **3.7 Prosessihöyryn tuotannon erityispiirteet**

Prosessihöyryn tuotannolle ominaista on kuormien vaihtelu asiakkaan tuotannon mukaan. Asiakkaan teollisuusprosessit ovat riippuvaisia kattilan toiminatavarmuudesta ja käyttöhäiriöt tai odottamattomat huoltoseisakit aiheuttavat taloudellisia kustannuksia molemmille osapuolille. Koska teollisuusasiakkaat ovat usein yhden lämmötoimittajan piirissä, käyttövarmuuden merkitys korostuu. Ennakkohuoltojen ja kunnossapitotoimien lisäksi lämpölaitoksilla on usein varakattiloita odottamattomien häiriöiden varalle. [12]

Tuotetulle höyrylle on usein tietyt laatuvaatimukset puhtauden suhteen, jos höyryä käytetään suoraan asiakkaan prosessituotteiden lämmitykseen esimerkiksi elintarviketeollisuudessa. Sama pätee vastaavasti palautuvaan lauhteeseen, joka saattaa sisältää epäpuhtauksia teollisuusprosessista. Toisinaan prosessihöyryn tuotannosta ei palaudu lauhtetta, vaan höyry jää kokonaisuudessaan teollisuusprosessiin. [9] Höyryn ja lauhteen laatuvaatimukset, sekä prosessihöyryntuotannon erityispiirteet korostavat höyrykattilalaitoksen vesikemian ja vedentuotannon laatuvaatimuksia. Vesikemia on keskeinen tekijä myös kattilan pitkäikäisen toiminnan ja lämmönsiirron kannalta. [10]

Prosessihöyryn tuotannossa painetasot ovat yleisesti sähköntuotantoa sekä yhdistettyä sähkön- ja lämmöntuotantoa alhaisemmat. [12] Kattilalla tuotettu tuorehöyry on yleisesti kylläistä höyryä, eikä sitä edelleen tulisteta. Kylläisessä tilassa oleva höyry on tiettyä painetta vastaavassa kyllästymislämpötilassa, jolloin höyryn lämpötilaa saadaan säädettyä tarkasti paineen avulla. Tämän lisäksi kylläinen höyry soveltuu korkean lämmönsiirtokykynsä puolesta hyvin lämmönsiirrin sovelluksiin, jotka ovat yleisiä teollisuuden prosessihöyryn jakelussa. [10]

Biopolttoaineisiin siirtyminen on vaikuttanut myös prosessihöyryn tuotannossa käytettävien polttoaineisiin. Tämän lisäksi prosessihöyryn tuotannossa pyritään yhä enemmän hyödyntämään teollisuuden sivuvirtoja polttoaineena. [12] Parhaimmillaan tällä saavutetaan merkittäviä kustannussäästöjä polttoainekustannuksien ja logistiikkakulujen kautta. Toisaalta erilaiset sivutuote jakeet asettavat poltto- ja kattilatekniikalle haasteita. Sopiva kattilatyyppe, seospolttoaineet ja ajotapa edesauttavat tehokkaan ja puhtaan palamisen saavuttamista.

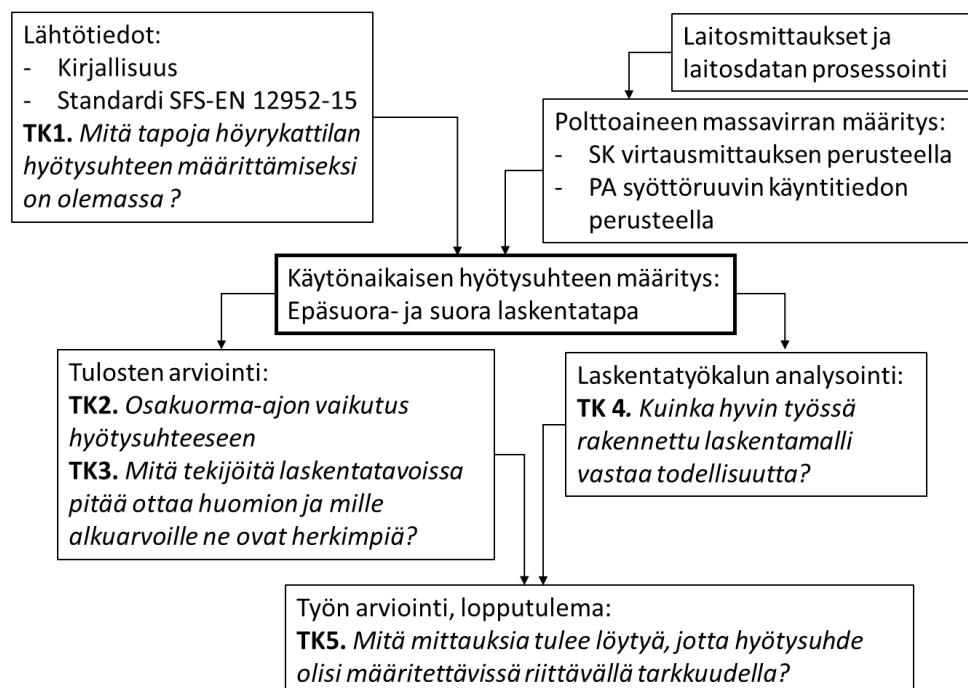


## 4. AINEISTO JA MENETELMÄT

Kun laitoksen hyötysuhde määritetään kuukausitasolla kulutetun ja tuotetun energian suhteena, saadaan käsitys yleisellä tasolla laitoksen toimivuudesta ja toiminnan tehokkuudesta. Kuukausitasolla hyötysuhteet vaihtelevat vuodenaikojen välillä riippuen esimerkiksi polttoaineen laadusta ja kosteudesta, sekä laitosten kuormasta. Tyypillisesti hyötysuhde paranee kuorman laskiessa hieman laitoksen maksimi tehosta ja alenee kohti osakuorma-ajoa. [12] Pitkän aikavälin hyötysuhde ei kuitenkaan tarjoa keinoja havainnoida päivä- ja tuntitasolla tapahtuvia poikkeamia tai käyttöhäiriöitä, jotka käytönaikainen hyötysuhde paljastaisi parhaimmassa tapauksessa reaaliajassa. Tämän työn yksi tärkeimmistä tehtävistä onkin selvittää käytönaikaisen hyötysuhteen laskentamahdollisuuksia laitosmittausten avulla ja havainnoida hyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä.

### 4.1 Tutkimuksen rakenne

Laitosmittausten perusteella tuotetusta prosessoidusta laitosdatasta saadaan laskettua standardin mukaisilla laskentamenetelmillä käytönaikaiset hyötysuhteet epäsuoralla- ja suoralla menetelmällä. Tuloksia pystytään vertailemaan näiden kahden menetelmän välillä kuukausitason hyötysuhteeseen ja kirjallisuusarvoihin nähden. Lisäksi tuloksille toteutetaan herkkyysanalyysi, jossa arvioidaan keskeisimpiä muuttujia, epävarmuustekijöitä ja laskennan luotettavuutta.



### ***Kuva 7. Työn toteutus ja tutkimuskysymykset (TK) -vuokaavio***

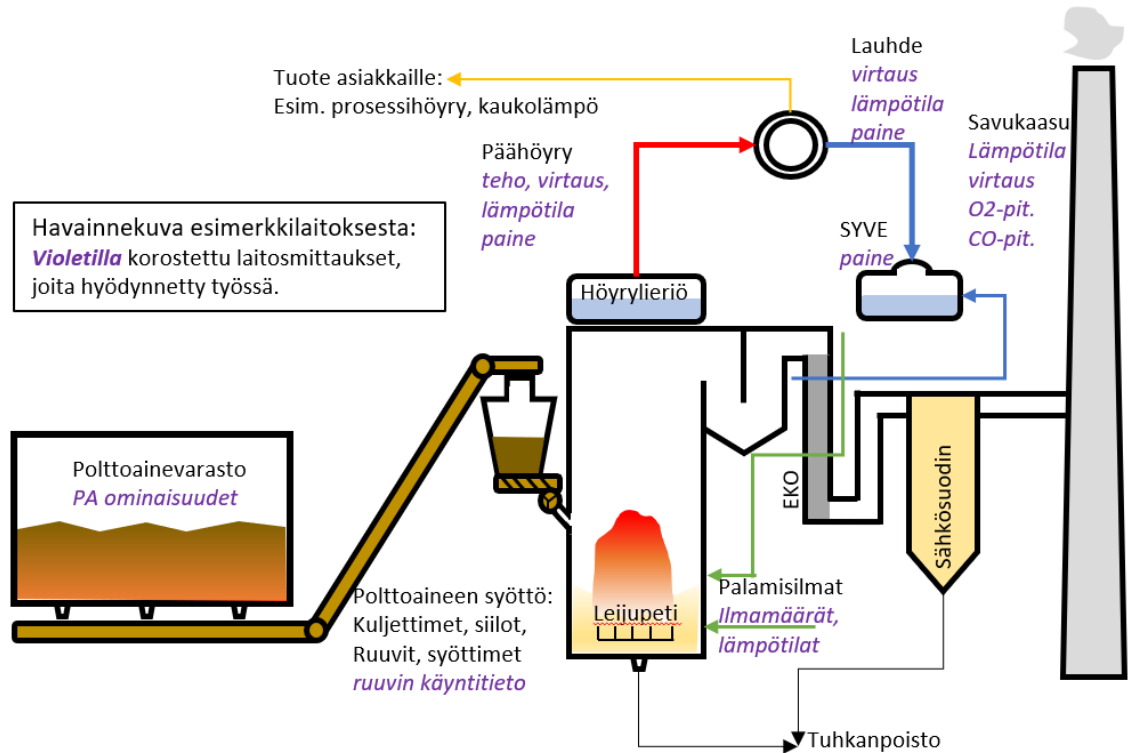
Työn alkuvaiheessa perehdyttiin höyrykattilan hyötysuhteen määrittämisen menetelmiin kirjallisuuden ja standardin SFS-EN 12952-15 avulla. Työn laskennassa käytetyt menetelmät tukeutuvat kyseiseen standardiin. Samalla hankittiin riittävät lähtötiedot höyrykattilatekniikoista ja niiden prosessihöyryn tuotannon sovellusten erityispiirteistä. Tarkastelun kohteena olevan laitoksen mittausdataa tarkasteltiin ja prosessoitiin laskentamenetelmien tarpeisiin soveltuvaksi. Käytönaikaisen hyötysuhteen energiavirtojen määrittämiseksi hetkellisen polttoaineen massavirran määritykseen sovellettiin kahta rinnakkaisista menetelmää, joista toinen hyödynsi savukaasun virtausmittausta ja toinen polttoaineen syöttöruuvien käyntitietoa.

Työssä kehitettiin hyötysuhdelaskenta, jolla saadaan määritettyä höyrykattilan käytönaikainen hyötysuhde suora- ja epäsuoraa laskentamenetelmää hyödyntäen. Tuloksia arvioitaessa tarkasteltiin mille tekijöille ja alkuarvoille laskennan tuloksena saatu hyötysuhde on kaikkein herkin ja miten osakuorma-ajo vaikuttaa hyötysuhteeseen. Työssä kehitettyä laskentatyökalua analysoitiin herkkyytstarkastelun avulla, jossa arvioitiin kuinka hyvin työssä rakennettu laskentamalli vastaa todellisuutta tarkastellussa tilanteessa. Lisäksi työn tuloksia vertailtiin epäsuoran- ja suoran menetelmän välillä, sekä toteutuneeseen kuukausitason hyötysuhteeseen nähden. Työn lopputulemana haluttiin selvittää työssä sovellettujen laskentamenetelmien edellyttämät laitosmittaukset, jotta tarkasteltavan kokoluokan prosessihöyryä tuottavien höyrykattiloiden hyötysuhde pystytään määrittämään riittäväällä tarkkuudella. Vaadittavien mittausten lisäksi pyrittiin selvittämään mahdolliset epävarmuustekijät ja tyypilliset virhelähteet tarkastelun kaltaisissa laitossovelluksissa.

## **4.2 Tarkasteltava laitostyyppi**

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää laitosmittauksiin perustuen käytönaikainen hyötysuhde tyypilliselle teollisuuden prosessihöyryä tuottavalle lämpölaitokselle. Hyötysuhdelaskentaa kehitettiin nimellistehoaltaan 12 MW:n puuperäisiä kiinteitä polttoaineita käyttävälle leijupetikattilalle, jonka toimintavarmuus, käyttöaste ja hyötysuhde ovat valmiiksi hyvällä tasolla. Tutkimuksen lähtökohtana oli kuitenkin pyrkimys kehittää menetelmiä, jotka sopivat tyypillisille kiinteitä polttoaineita käyttäville teollisuushöyryä tuottaville laitosille. Tämän tavoitteen myötä tarkastelussa ei pyritty selvittämään yksittäisen laitoksen mittauksia ja hyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä mahdollisimman tarkasti, vaan

hyödyntää olennaisia mittauksia, jotka löytyvät useimmilta tarkasteltavan kokoluokan laitoksilta ja ratkaista hyötysuhde standardien mukaisilla laskentamenetelmillä. Laskentamenetelmien tulisi olla suhteellisen yksinkertaisia ja helposti monistettavissa.



**Kuva 8.** Havainnekuva tarkasteltavasta laitoksesta ja laskennassa hyödynnetyt laitosmittaukset

Kuva 8 esittää havainnekuvan tarkastelun kohteena olevasta lämpölaitoksesta. Siinä näkyy hyötysuhdelaskennan kannalta keskeiset komponentit, sekä laitosmittaukset, joita laskennassa on hyödynnetty. Kiinteiden polttoaineiden syöttöä kattilaan säädetään polttoaineen syöttöruuvilla. Palamista kattilassa säädellään palamisilmojen syötöllä ja poltosta syntyvät savukaasut puhdistetaan sähkösuodattimella. Savukaasujen lämpöenergiaa hyödynnetään syöttöveden ja ilman esilämmityksessä. Puhdistuksen jälkeen savukaasuista mitataan yleisesti ainakin jäännöshappi-, hiilimonoksidi-, ja kiintoainepitoisuudet. Prosessituotteena syntyvä kylläinen höyry luovuttaa energiansa asiakkaille ja palaa takaisin laitosprosessiin lauhteena. Tuhkanpoisto tapahtuu pohja- ja lentotuhkana. [12]

Yllä esitetty prosessikuvaus on yksinkertaistettu malli tutkimuksen kohteena olevasta yleisesti käytettävästä prosessikytkennästä. Ideaali tilanteessa työssä sovellettava hyötysuhteen määrittäminen olisi toteutettavissa mahdollisimman pienin muutoksin olemassa olevia laitosmittauksia hyödyntäen useille samantyyppisille laitoksille, jotka kuitenkin poikkeavat toisistaan esimerkiksi käytettävän polttoaineen, teholuokan ja teknisten ratkaisuu-

jen suhteen. Tämä tavoite yhdessä rajallisten laitosmittausten kanssa edellyttävät hyötysuhdelaskennassa yksinkertaistuksien ja oletusten tekemistä, jotka on huomioitu laskennan tuloksia arvioitaessa.

### 4.3 Laitosmittaukset

Määritettäessä käytönaikaista hyötysuhdetta suoralla laskentamenetelmällä, tarvitaan tieto kattilaan syötettävistä ja hyödyksi saatavista energiavirroista, vastaavasti kuin kuu-kausitason hyötysuhteen määrittämisessä. Määritettäessä hyötysuhdetta epäsuorasti häviöiden kautta tarvitaan lisäksi useampia laitosmittauksia ja aineominaisuuksia häviöiden määrittämiseen liittyen.

Kattilasta hyödyksi saatavan tehon eli nettotehon määrittäminen tapahtuu pähöyryn tehon ja lauhteen tehon avulla. Nettoteho on näiden entalpioiden erotus kerrottuna massavirralla. Pähöyry on oletettu kylläiseksi höyryksi tietyssä paineessa ja lämpötilassa, lauhde puolestaan on oletettu kylläiseksi vedeksi tietyssä lämpötilassa ja syöttövesisäiliön paineessa. Nettoteho on ratkaistu excelin xsteam -sovelluksen entalpia arvoja käyttäen. Tarvitavat virtaustiedot, paineet ja lämpötilat on saatu laitosmittauksina, jotka on esitelty taulukossa alla.

Taulukko 2. *Nettotehon laskennassa käytetyt mittaukset*

	mittaus	yksikkö
Pähöyry	teho	MW
	lämpötila	°C
	virtaus	kg/s
	paine	bar
Lauhde	lämpötila	°C
	paine	bar
Pähöyryn ja lauhteen entalpioiden avulla:		
Nettoteho	teho	MW

Taulukossa höyryn ja veden entalpiat on määritetty paineeseen perustuen kylläiselle tilalle, ne voitaisiin määrittää myös lämpötilan avulla. Pähöyryllä ja lauhteella on sama massavirta tapauksissa, joissa lauhde palautuu kokonaisuudessaan takaisin, eikä sitä jää esimerkiksi asiakkaan prosesseihin, tässä tapauksessa nettoteho on laskettu pähöyryn virtausmittausta käyttäen. Laskettaessa laitosmittausten perusteella edellytyksenä on tiedostaa prosessin aine- ja massavirrat, sekä mittausten sijainti prosessissa ja mittauksen yksikkö.

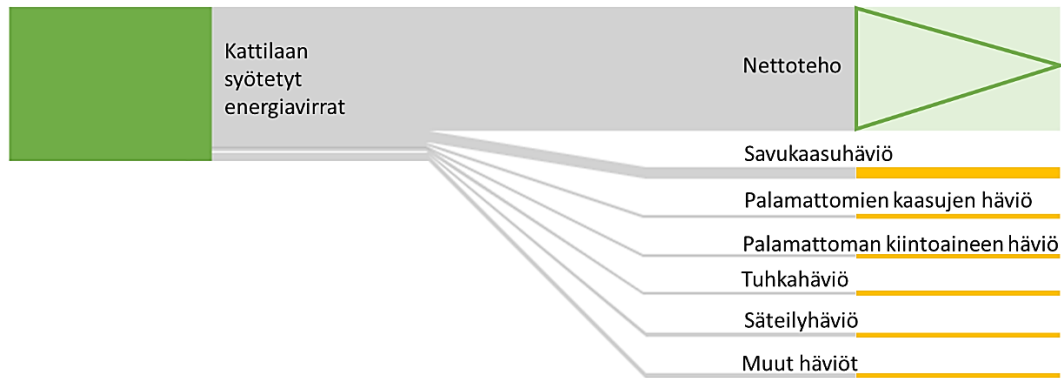
Kattilaan syötettävät energiat koostuvat pääosin polttoaineen sisältämästä kemiallisesta energiasta. Tämän lisäksi energiaa prosessiin tulee esilämmitetyn palamisilman ja polttoaineen esilämmityksen, sekä muiden energiavirtojen mukana alla esitetyn sankey-kaavion mukaisesti.



**Kuva 9.** Energiavirrat kattilaan

Polttoainevirran sisältämä kemiallinen energia muodostaa yleisesti lähes 100 % kattilaan syötetyistä energiavirroista. Myös esilämmitettyyn palamisilmaan sitoutunut lämpöenergia otetaan yleisesti laskennassa huomioon. Kuvassa 9 myös esitetyt polttoaineen esilämmitykseen sitoutunut energia, sekä muut kattilaan tuotavat energiavirrat on jätetty tämän työn laskentaosiossa huomiotta. Kattilaan syötettävien energiavirtojen määrittämiseen hyödynnetään tässä työssä savukaasun virtausmittausta ja polttoaineen syöttöruuvin käyntitietoa, sekä palamisilmojen virtausmittauksia ja lämpötilamittausta.

Pienehköissä tarkasteltavan kokoluokan laitoksissa ei tyypillisesti ole polttoaineen massavirran tai savukaasuvirran määrittämiseen virtausmittausta. Tämä on otettu laskennassa huomioon määrittämällä kattilaan syötettävät energiavirrat kahdella vaihtoehtoisella tavalla. Ensimmäinen tapa hyödyntää laitoksella olevaa savukaasun virtausmittausta ja määrittää savukaasun virtauksen perusteella polttoaineen massavirran iteratiivisesti savukaasuanalyysin avulla. Toinen tapa toteutetaan ilman savukaasun määrittämistä ja polttoaineen massavirta määritetään työssä laaditun polttoaineen syöttöruuvin sovitteen funktiona. Tavat eroavat polttoainevirran ja savukaasuvirran määrittämisen osalta. Hyötysuhteen laskenta toteutetaan kummassakin samoilla laskentamenetelmillä hyödyntäen laitosmittauksia.



**Kuva 10. Energiavirrat kattilasta**

Kattilaan syötetyt energiavirrat jakautuvat hyödyksi saatavaan nettotehoon ja häviöihin. Savukaasuhäviö on suurin kaikista häviöistä, ja sen määrittämiseen hyödynnetään savukaasun lämpötilan mittausta, sekä mahdollisesti savukaasun määrämittausta. Palamattomien kaasujen häviö puolestaan käyttää savukaasun CO-pitoisuus mittausta. Muiden häviöiden määrittämisessä on lisäksi käytetty pähöyryn tehoa ulospuhalluksen häviön määrittämiseen.

**Taulukko 3. Olennaiset mittaukset hyötysuhteen määrittämiseksi**

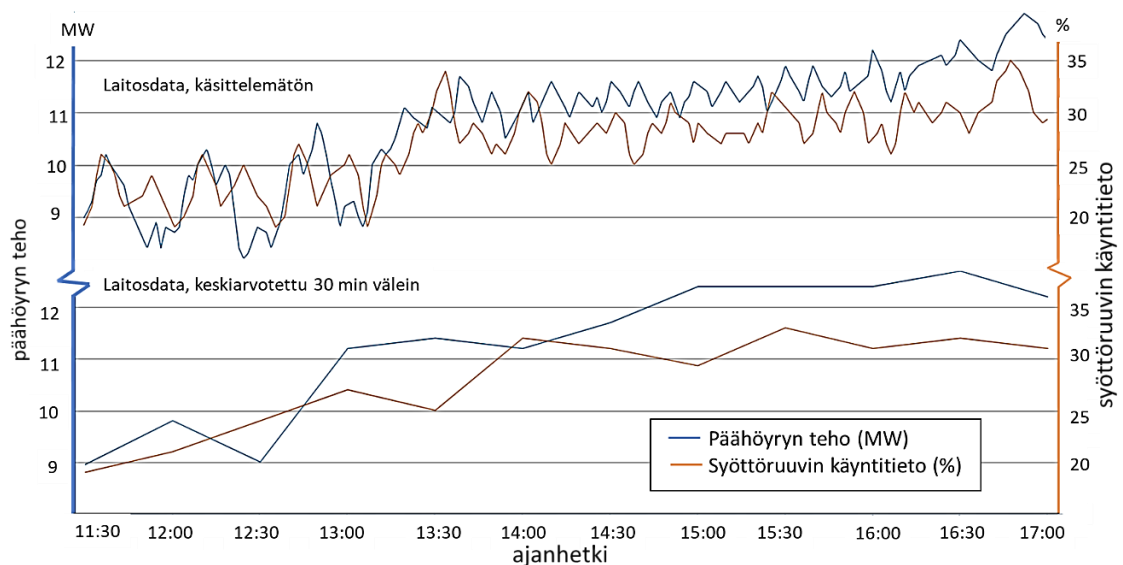
	mittaus	yksikkö
PA syöttöruuvi	käyntitieto	%
Savukaasu	virtaus	nm <sup>3</sup> /s
	lämpötila	°C
	CO-pitoisuus	mg/nm <sup>3</sup>
	O <sub>2</sub> -pitoisuus	%
Primääri-ilma	virtaus	nm <sup>3</sup> /s
Sekundääri-ilma	virtaus	nm <sup>3</sup> /s
	lämpötila	C

Laitosmittausten lisäksi hyötysuhteen määrittämisessä on hyödynnetty kirjallisuudesta saatavia aineominaisuuksia ja likiarvoja, sekä muuta laitokselta kerättävää dataa mitausten lisäksi. Kuormien punnitustiedoista tiedetään esimerkiksi polttoaineiden ja tuhkan massavirrat tarkastelun kohteena olevalle laitokselle. Polttoaineen kosteusmäärittämisessä on hyödynnetty polttoaineen keskimääräisen lämpöarvon määrittämiseen ja kuukausitasoenergiälaskentoihin on hyödynnetty tulosten arvioinnissa.

#### 4.4 Laitosdatan prosessointi ja hyödyntäminen

Tarkastelun kohteena olevilla laitoksilla laitosmittaukset tallentuvat lähes reaaliajassa tietokantaan, mikä mahdollistaa käytönaikaisen hyötysuhteen määrittämisen. Tietokannassa mittausdataa pystyy hakemaan ja tarkastelemaan mittauskohtaisesti valitulla aikavälillä. Dataa pystyy tarkastelemaan kuvaajien muodossa ja sitä saa vietyä lukujen muodossa exceliin, jossa varsinaista hyötysuhdelaskentaa tässä työssä tehdään. Työn alkuvaiheessa perehdyttäessä mittausdataan havaittiin, että tietoa kerätään eri mittauksista eri aikaväleihin. Vaikka laitosmittaus on jatkuvatoiminen ja reaaliaikainen, tieto mittaukselta tallentui tietokantaan keskimäärin muutaman minuutin välein, siten että eri mittauksilla tallennusväli vaihteli, eivätkä eri mittareiden mittausdatat olleet samoilta ajanhetkiltä.

Tietokannassa mittausdataa pystyi suodattamaan ja prosessoimaan. Mittausdataa prosessoitiin ajan mukaan puolen tunnin välein. Näin saatiin tietylle aikavälille jokaiselle valitulle mittaukselle keskiarvoistetut arvot samoilla ajanhetkillä valitulla puolen tunnin aikavälillä. Keskiarvoistus mahdollisti hyötysuhteen luotettavan laskennan mittausdatan perusteella, joskin täysin reaaliaikaista tietyn ajanhetken hyötysuhdetta ei mittausdatan avulla pystyisi määrittämään. Puolen tunnin määrittämisvälin arvioitiin riittävän tämän työn käyttötarkoitukseen ja mahdollistavan syy-seuraussuhteiden selvittämisen hyötysuhteen ja laitostapahtumien välillä. Tietyistä mittauksista tietoa kerättiin harvakseltaan vain muutamana kerran tunnissa, joten lyhyempi tarkasteluväli korostaisi yksittäisten mittauksien poikkeamien vaikutusta. Myöhemmin työn kuukausitason laskennassa käytettiin mittausdatalle myös tunnin aikaväliä.



### ***Kuva 11. Esimerkki mittausdatasta ja sen prosessoinnista***

Yllä olevasta kuvasta nähdään tarkastelun kohteena olevan laitoksen päähöyryn teho ja syöttöruuvien käyntitieto valitulta tarkasteluväliltä. Kuvaajat on piirretty mittausdata tietokannan työkalulla. Ylemmässä kuvaajassa on piirrettynä ”raaka data”, joka tallentuu tietokantaan. Tarkasteluvälin aikana päähöyryn tehon mittauksia tallentui 220 ja polttoaineen syöttöruuvien käyntitiedon ohjearvoja 242 kappaletta. Alemmassa kuvaajassa saman aikavälin mittausdata on keskiarvoistettu puolen tunnin välein, siten että kummankin mittauksen arvot ovat samoilla ajanhetkillä puolen tunnin välein. Datat prosessointi yksinkertaistaa näiden mittauksien kuvaajia huomattavasti ja vähentää yksittäisiä heilahte-  
luja. Mittausdatan tarkkuus heikkenee, mutta edelleen keskiarvoistuksen jälkeen ruuvien käyntitiedon ja päähöyryn tehon välinen riippuvuus on selkeästi havaittavissa. Hyötysuhdelaskennassa jokaisen käytettävän laitosmittauksen arvot ovat keskiarvoistettu samalle ajanhetkelle.

## **4.5 Polttoaineen massavirran määrittäminen savukaasuanalyysillä**

Hyötysuhteen määrittämisessä kattilaan syötettyjen energiavirtojen tarkka tietäminen on tärkeää. Kattilaan syötetty polttoaine muodostaa suurimman osan tästä energiavirrasta. Pienikin virhe polttoainevirran arvioinnissa aiheuttaa suuren poikkeaman hyötysuhteeseen etenkin suorassa määrittäytavassa. Laskettaessa esimerkiksi kuukausitason hyötysuhdetta hetkellisen polttoainevirran tarkka tunteminen ei ole merkityksellistä, sillä hyötysuhde saadaan laskettua suoralla laskentatavalla kuukausitason kattilaan tuotujen ja hyödyksi saatujen energiavirtojen suhteena. Tietyn ajanhetken hyötysuhteen määrittämisessä polttoainevirran tarkka tunteminen korostuu. Koska kiinteiden polttoaineiden massavirralla ei ole tyypillisesti määrämittausta tarkasteltavan kokoluokan laitoksilla, tulee polttoainevirta arvioida muilla tavoin.

Tarkasteltavalla laitoksella jokainen polttoainetoimittajien toimittama kuorma punnitaan ja sille tehdään standardien mukaisesti polttoaineen kosteusmäärittäminen. Näin jokaiselle kuormalle saadaan tehollinen lämpöarvo ja kuorman energiasisältö, joiden avulla kuukausitason energiavirrat saadaan määritettyä suhteellisen tarkasti. Vaikka laitokselle toimitettava polttoaine olisi suhteellisen tasalaatuista, kiinteille polttoaineille on ominaista polttoaineiden laatuvariaatioita polttoaine-erien ja vuodenaikojen välillä. Variaatioita esiintyy esimerkiksi kosteuteen, palakokoon ja koostumukseen liittyen. Etenkin kosteina vuodenaikoina ja talvikuukausina ulkona varastoitavien puuperäisten polttoaineiden kosteuspitoisuudet saattavat vaihdella merkittävästi lyhyenkin ajan sisällä. [19] Kosteaa polttoainetta



aiheuttaa haasteita laituskäytölle ja polttoaineen laatuvariaatiot tuovat epävarmuustekijän tämän työn hyötysuhteen määrittämiseen.

Tarkasteltavalla laitoksella punnituksen ja kosteusmäärittämisen jälkeen polttoaine varastoidaan suljetussa polttoainevarastossa, josta se kuljetetaan ketjukolakuuljettimilla polttoainesiloihin ja silloista edelleen syöttöruuvien kautta kattilaan. Laskennassa on oletettu, etteivät polttoaineen ominaisuudet merkittävästi muutu varastossa oloaikana, sillä varasto on säältä suojassa. Todellisuudessa polttoaineen kosteus saattaa muuttua varastointiajasta ja olosuhteista riippuen esimerkiksi käymisreaktioiden tapahtuessa ja ilman kosteuden muuttuessa. [19]

Taulukko 4. *Laskennassa käytetyt polttoainetiedot*

alkuainekoostumus (osuus kuiva-aineesta)		polttoaine joulukuu (tarkasteltava laitos)		
C	0,504	toimitukset	2443,1	t
H <sub>2</sub>	0,062	keskikosteus	44,55	%
S	0			
O <sub>2</sub>	0,425	lämpöarvo:		
N <sub>2</sub>	0,005	tehollinen	19,14	MJ/kg
H <sub>2</sub> O	0	saapumistilassa	10,60	MJ/kg
Tuhka	0,004			

Taulukossa 4 on esitetty kaikkien polttoainetoimitusten kosteuksien joulukuun keskiarvo 44,5 %, jonka avulla polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa on määritetty luvussa kaksi esitellyillä laskentamenetelmillä. Lisäksi taulukossa on puupolttoaineen alkuainekoostumus, jota käytetään laskennassa polttoaineen massavirran määrittämiseksi savukaasuanalyysiin perustuen. Savukaasuanalyysi perustuu teoreettiseen palamiseen, jossa tietty määrä polttoainetta palaa muodostaen savukaasuja. [18]

Kun tiedetään laitosmittausten perusteella tietyt palamisprosessin tekijät, voidaan savukaasuanalyysi laatia tarkasteltavan laitosprosessin palamiselle ja ratkaista sen avulla polttoaineen massavirta. Savukaasuanalyysin lähtötietoina polttoaineelle käytetään massavirtaa 1 kg ja kosteutena kuukausitason keskiarvokosteutta. Koska polttoaineen massavirta on tarkasteltava suure, myöhemmin sen arvo selvitetään iteroimalla muiden savukaasuanalyysiin osallistuvien laitosmittausten mittausarvojen perusteella.

Taulukko 5. *Polttoaineen hapen tarve*

komponentti	kuiva PA m-%	kosteaa PA kg	moolimassa (kg/kmol)	ainemäärä (kmol/pa)	hapen tarve (kmol/pa)
C	0,504	0,279	12,01	0,023	0,023
H <sub>2</sub>	0,062	0,034	2,02	0,017	0,009
O <sub>2</sub>	0,425	0,236	32,00	0,007	-0,007
N <sub>2</sub>	0,005	0,003	28,02	0,000	0,000
H <sub>2</sub> O	-	0,446	18,02	0,025	-
yht.	0,996	0,998	92,06	0,073	0,024

Taulukossa 5 savukaasuanalyysillä selvitetään aluksi taulukon 4 mukaisen polttoaineen yhden polttoainekilon stökiometrisen palamisen hapen tarve. Taulukosta havaitaan, että kuiva-aineen massakoostumuksesta puuttuu kuvan 3 alkuainekoostumuksessa esitetyt rikki ja tuhkapitoisuudet. Näiden osuus puupolttoaineissa on suhteellisen pieni, eikä niitä sen vuoksi oteta savukaasuanalyysissä mukaan tarkasteluun. Tuhkapitoisuus huomioidaan kuitenkin palamattomien polttoaineen häviöiden määrittämisessä. Palamisessa polttoaineen alkuaineet reagoivat polttoilman hapen kanssa luovuttaen lämpöä ja muodostaen savukaasua luvussa 2 esitettyjen reaktioyhtälöiden R1 ja R2 mukaisesti. [18]

Seuraavaksi savukaasuanalyysissä siirrytään palamisen reaktioyhtälöiden kautta tarkastelemaan teoreettisen palamisen savukaasujen muodostumista tarkasteltavalle polttoaineelle.

Taulukko 6. *Teoreettinen palaminen, ilmakerroin 1*

<b>Savukaasu (SK), teoreettinen palaminen, ilmakerroin 1:</b>							
Teor. Savukaasu (SK)	Syntyvä kostea SK	Syntyvä kuiva SK	Mooliosuus kosteassa SK:ssa	Mooliosuus kuivassa SK:ssa	Kostean SK:n massakoostumus	Kostean SK:n tilavuuskoostumus	Massaosuus SK:ssa
	kmol	kmol	(-)	(-)	kg/s	m <sup>3</sup> /s	(-)
CO <sub>2</sub>	0,023	0,023	0,148	0,202	1,024	0,518	0,235
H <sub>2</sub> O	0,042	0,000	0,266	0,000	0,753	0,936	0,173
N <sub>2</sub>	0,092	0,092	0,586	0,798	2,575	2,059	0,592
O <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-
yht.	0,157	0,115	1,000	1,000	4,352		1,000

Taulukosta 6 nähdään, että teoreettisen palamisen palamistuotteina syntyy hiilidioksidia ja vesihöyryä. Jäännöshapetta ei synny lainkaan, sillä teoreettisessa tapauksessa hapetta on vain sen verran, mitä palamistapahtuma tarvitsee. Todellisissa palamisprosesseissa polttotapahtumaan syötetään ilmaa enemmän kuin teoreettinen palaminen edellyttäisi. Yleisesti kiinteille polttoaineille ilmakerroin on 1,2 – 1,5 kertainen teoreettiseen

ilmamäärään nähden. [18] Yli-ilmaa käytetään polttoaineen laadusta ja poltintyyppistä riipuen tarvittava määrä, jotta palaminen olisi mahdollisimman tehokasta ja puhdasta. Ilmansyötön lisääminen kasvattaa savukaasun määrää ja siten lisää savukaasuhäviöitä. Ilmakertoimen kasvatus saattaa myös kasvattaa savukaasun loppulämpötilaa ja lisätä palamattomien määrää savukaasuissa. [12] Käsiteltävässä esimerkki savukaasuanalyysissä todellista palamista on havainnollistettu käyttämällä ilmakerrointa 1,3.

Taulukko 7. *Todellinen syntyvä savukaasu*

Todellisen savukaasun määrä:			ilmakerroin ( $\lambda$ ): <b>1,3</b>				
Komponentit	Määrä kosteassa SK:ssa ( $\lambda=1$ )	ilma-yli-määrä	Todellinen savukaasu (ilmakertoimella 1,3)				
	kmol/s	kmol/s	kmol/s	kg/s	m <sup>3</sup> /s	mol-%	m-%
CO <sub>2</sub>	0,023		0,023	1,024	0,518	12,13 %	19,11 %
H <sub>2</sub> O	0,042		0,042	0,753	0,936	21,78 %	14,05 %
N <sub>2</sub>	0,092	0,028	0,119	3,348	2,676	62,28 %	62,47 %
O <sub>2</sub>	-	0,007	0,007	0,235	0,164	3,82 %	<b>4,38 %</b>
yht.	0,157	0,035	0,192	<b>5,359</b>	4,295	100 %	100 %

Taulukko 7 esittää savukaasuanalyysin tuloksena syntyvän savukaasun todellisen koostumuksen. Havaitaan että ilmakertoimella 1,3 todellinen savukaasumäärä kasvoi noin 1 kg/s verrattuna teoreettiseen palamiseen arvosta 4,3 kg/s arvoon 5,3 kg/s. Yli-ilman seurauksena kaikki happi ei osallistu palamiseen, vaan savukaasut sisältävät jäännöshappia, esimerkkitapauksessa 4,38 %. Savukaasuanalyysin tuottamaan savukaasun määrään ja koostumukseen vaikuttavat polttoaineen kuiva-ainekoostumus, polttoaineen kosteus ja sen massavirta. Tässä luvussa läpikäyty savukaasuanalyysi on tehty polttoaineen massavirralla 1 kg/s. Kun halutaan selvittää polttoaineen käytönaikaista massavirtaa savukaasuanalyysin avulla, käytetään edellä esitetyn esimerkin tavoin polttoaineen alkuaikakoostumusta ja valittua kosteutta, jolloin polttoainevirta voidaan ratkaista iteratiivisesti laitosmittausten avulla.

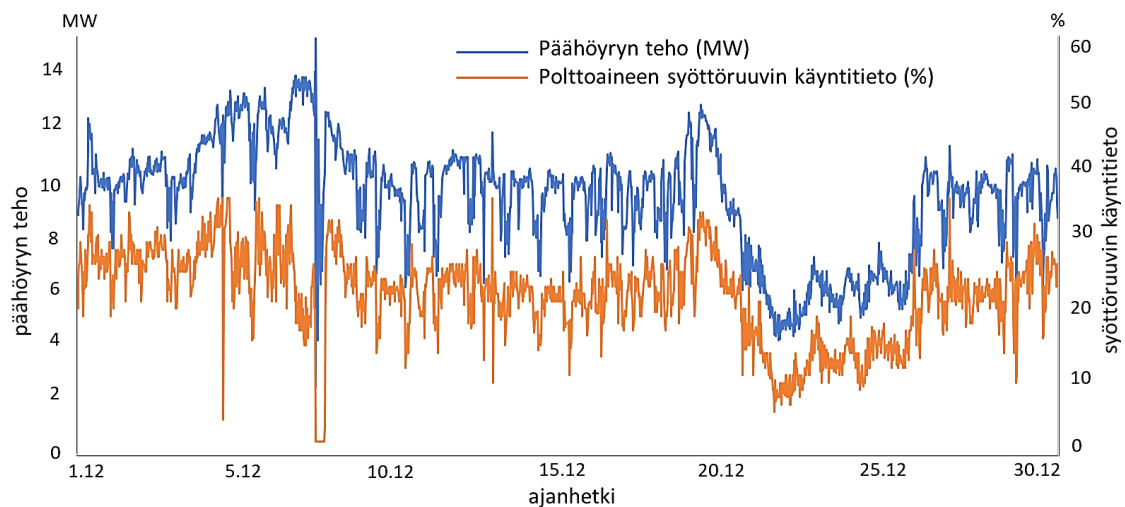
Polttoaineen massavirran määrittämisessä on otettu huomioon kaksi laitosmittausta. Nämä ovat savukaasun virtausmittaus ja jäännöshappi, jotka on korostettu taulukossa 7. Savukaasuanalyysin avulla toteutettu iteratiivinen ratkaisu on kaksivaiheinen. Tietyille ajanhetkelle ratkaistaan ensin ilmakerroin, ja tämän jälkeen polttoaineen massavirta excellin "goal seek" -toimintoa käyttäen. Ensin polton ilmakertoimen arvo iteroidaan määrittämällä tavoitearvoksi savukaasun happipitoisuuden laitosmittauksen arvo. Ilmakerroin määritetään savukaasun happipitoisuuden laitosmittauksen avulla, sillä savukaasuanalyysissä ilmakerroin ja palamisprosessin jäännöshappi ovat toisiinsa verrannollisia. Kun

ilmakerroin on määritetty, iteroidaan polttoaineen massavirta asettamalla syntyvän todellisen savukaasumäärän tavoitearvoksi savukaasuvirran laitosmittauksen arvo. Polttoaineen massavirta määritetään syntyvän todellisen savukaasuvirran perusteella, sillä todelliseen savukaasuvirtaan vaikuttaa polton ilmakertoimen lisäksi vain polttoaineen massavirta, kun polttoaineen ominaisuudet tiedetään.

Tällä menetelmällä saadaan ratkaistua polttoaineen massavirta kattilaan tietyn ajanhetken savukaasuvirran ja savukaasun happipitoisuuden laitosmittauksia hyödyntäen. Menetelmä edellyttää tämän mittausdatan saatavuutta. Savukaasun virtausmittausta ei ole kaikilla tarkasteltavan kokoluokan laitoksilla, joten seuraavassa luvussa on tutkittu vaihtoehtoisia menetelmiä määrittää polttoaineen massavirta syöttöruuvin käyntitiedon perusteella, mikäli savukaasun virtausmittausta ei ole käytettävissä. Tällöin savukaasuvirta voidaan määrittää syöttöruuvin sovitteella saadun polttoainevirran perusteella iteratiivisesti savukaasuanalyysin avulla, samoilla menetelmillä, mutta päinvastoin kuin yllä esitetty polttoainevirran määrittäminen.

#### 4.6 Polttoaineen massavirran määrittäminen syöttöruuvin käyntitiedon avulla

Polttoaineen syöttöruuvilla säädetään kattilaan kulkeutuvaa polttoainevirtaa, jota voidaan arvioida syöttöruuvin käyntitietojen perusteella. Käyntitiedot tallentuvat laitosdataan prosentteina 1–100 %. Laskennan kannalta on tärkeää tietää käyntitietoa vastaava polttoainemäärä. Suurilla laitostehoilla tarvitaan enemmän polttoainetta ja ruuvi käy korkeammilla kierroksilla, kuin pienillä laitostehoilla. Syöttöruuvin käyntitiedon ja laitostehon välillä on verrannollisuutta, jota voidaan tarkastella laitosdatan trendien avulla.



**Kuva 12.** Syöttöruuvun käyntitieto ja päähöyryn teho, (tietokannasta)

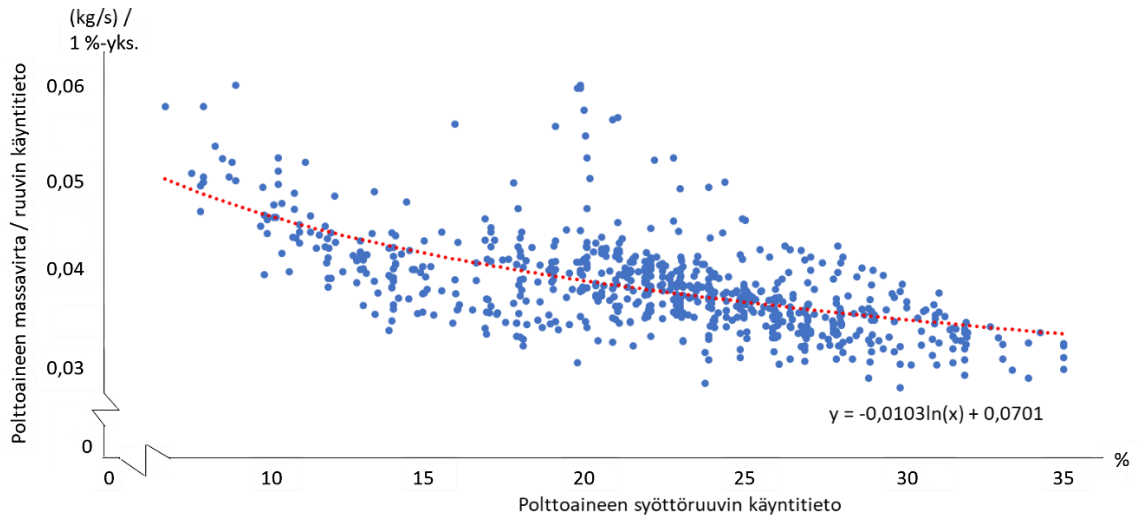
Kuvan 12 trendeissä on esitetty joulukuun syöttöruuvun käyntitieto (oranssi) ja päähöyryn teho (sininen). Kuvasta havaitaan, että pienetkin muutokset ruuvien käyntitiedossa näkyvät vastaavalla ajanhetkellä myös päähöyryn tehossa. Ruuvien käyntitiedon ja höyrytehon välillä on verrannollisuutta, mutta tarkasteltaessa koko kuukauden trendejä havaitaan trendeissä myös poikkeamia. Koska polttoaine ei ole tasalaatuista, vaan sen kosteus ja lämpöarvo vaihtelevat, vaaditaan toisina ajanhetkinä suurempi polttoainevirta saman tehon aikaansaamiseksi kuin toisina. Etenkin talvikuukausina polttoaineen laatu- vaihtelut erien välillä voivat olla merkittäviä. Syöttöruuvien toiminnallisuus aiheuttaa oman muuttujansa verrannollisuuteen ruuvien käyntitiedon ja höyrytehon välillä, sillä hakkeen kosteus ja palakoko vaikuttavat sen kulkeutumiseen ruuvissa. Trendien perusteella oletettiin, että ruuvien suurilla kierroksilla polttoainetta kulkeutuu suhteutettuna kierrosnopeuteen vähemmän, kuin pienemmillä ruuvien kierroksilla, eikä syöttöruuvien kierrosnopeus ole suoraan verrannollinen sen kuljettamaan polttoainemäärään. Tätä tutkittiin tarkemmin ruuvien käyntitiedon avulla.

Syöttöruuvien käyntitiedon ja höyryn nettotehon puolen tunnin välein prosessoitu mittausdata kerättiin koko joulukuulta. Joulukuun datasta poistettiin ne muutamat ajanhetket, jolloin syöttöruuvien toiminnassa on ollut häiriöitä ja ruuvien kierrosnopeus on ollut selvästi liian alhainen tai kokonaan pysähdyksissä. Jokaisen ajanhetken nettoteho ja sitä vastaava ruuvien käyntitieto järjestettiin tehon mukaan suuruusjärjestykseen pienimmästä suurimpaan. Tämän jälkeen määritettiin jokaisen ajanhetken tehon tuottamiseen tarvittava polttoainevirta joulukuun polttoaineen alemman tehollisen lämpöarvon ja laitoshyötysuhteen avulla. Polttoainevirran määrittämiseen käytettiin koko joulukuun tuotetun ja kulutetun energian kautta määritettyä suoraa laitoshyötysuhdetta, 0,86.

Taulukko 8. Polttoainevirta kuukauden hyötysuhteen avulla.

toteutunut hyötysuhde	nettoteho	ruuvien käyntitieto	PA virta	PA virta / 1% käyntitieto
(-)	MW	%	kg/s	kg/s
0,86	3,39	8	0,373	0,0466

Taulukossa 8 on määritetty kuukauden oletetun hyötysuhteen ja polttoaineen lämpöarvon perusteella tehoa vastaava polttoainevirta. Tämän jälkeen polttoainevirta on jaettu ruuvien käyntitiedolla. Taulukon 8 arvot ovat yhden ajanhetken esimerkkiarvoja. Kuukauden jokaisen ajanhetken arvoille tehtiin taulukon 8 mukainen laskenta ja ruuvien 1%-yksikön käyntitietoa vastaavat polttoaineen massavirrat piirrettiin kuvaajaan syöttöruuvien käyntitiedon funktiona.



**Kuva 13.** Polttoaineen massavirran riippuvuus syöttöruuvin käyntitiedosta

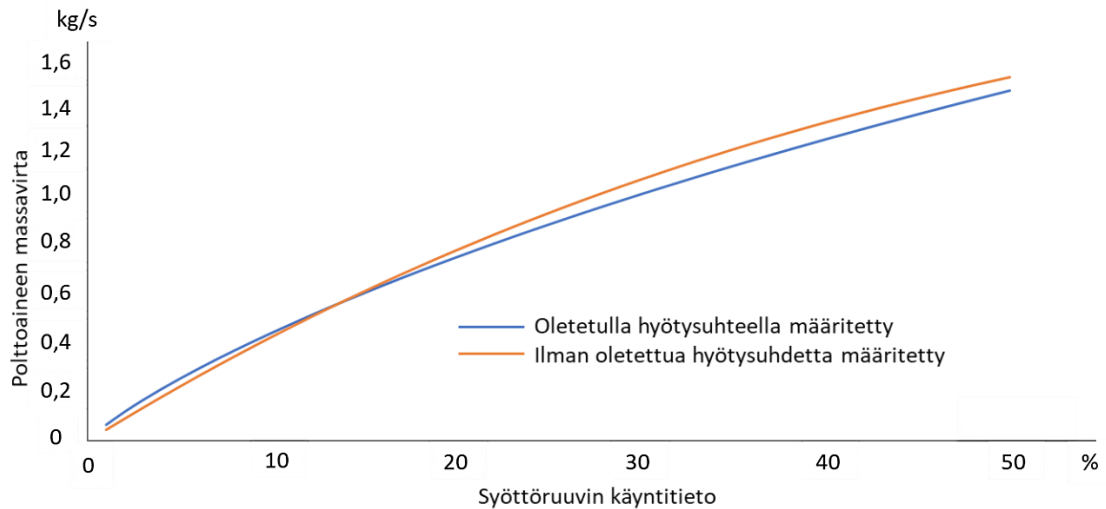
Kuvan 13 trendiviivasta havaitaan, että ruuvin käyntitiedon 1 %-yksikköä vastaava polttoaineen massavirta pienenee ruuvin kierrosluvun kasvaessa. Pienillä ruuvin kierroksilla massavirta 1 %-yksikköä kohden on lähellä 0,05 kg/s, kun taas korkeammilla kierroksilla massavirta on noin 0,04 kg/s prosenttiyksikköä kohden. Muutos ei trendiviivan perusteella tapahdu lineaarisesti, vaan ”ruuvin hyötysuhde” muuttuu aluksi voimakkaammin, kuin isommilla kierroksilla. Trendiviiva tukee oletusta siitä, että pienillä kierroksilla ruuvi toimii tehokkaammin, kuin suuremmilla. Tämä saattaa selittyä esimerkiksi sillä, että nopeammilla kierroksilla ruuvi ”haukkaa tyhjää” tai ruuvin ja polttoainepartikkelien välinen kitka muuttuu kierrosnopeuden kasvaessa. Sovitteen trendiviivan funktion avulla laskettiin jokaisen ajanhetken todellinen massavirta ruuvin käyntitiedon avulla. Sovite on muotoa

$$m_{pa} = (-0,0103 \ln(x) + 0,0701) x \quad (21)$$

, missä  $x$  on kyseisen ajanhetken syöttöruuvin käyntitieto.

Näin saatiin jokaiselle ajanhetkelle kaavan 21 sovitteen avulla polttoaineen massavirta ja sen myötä joulukuun polttoaineen kulutus. Kuukauden kulutukseksi saatiin noin 2 250 000 kg. Joulukuussa polttoainetoimituksia oli noin 2 440 000 kg, joten kuukauden hyötysuhteen avulla tehty sovitteella tuotti hieman alhaisen massavirran. Todellista kuukauden polttoainekulutusta ei tiedetä, sillä varaston muutoksesta ei ole mittausdataa, joten osaltaan polttoainemäärien eroa saattaa aiheuttaa muutos varastomäärissä kuun alun ja lopun välillä. Ruuvin sovitteessa on kuitenkin se haaste, että massavirran ratkaisu

edellyttää kuukausitason hyötysuhteen määrittämistä. Tässä työssä kyseisen kuukauden laitoshyötysuhde pystyttiin tarkistamaan jälkikäteen, mutta käytönaikaisessa laskennassa se ei olisi mahdollista. Lisäksi tässä työssä halutaan selvittää polttoaineen massavirta hyötysuhteen määrittämiseksi, joten arvioidun hyötysuhteen käyttö massavirran määrittämiseen ei ole laskennallisesti perusteltua. Ruuvin sovitetta kehitettiin edelleen, siten ettei oletettua hyötysuhdetta tarvittaisi.



**Kuva 14.** Polttoainevirran sovitteet ruuvien käyntitiedon funktiona

Kuvassa 14 on esitetty molemmat polttoainevirran sovitteet ruuvien käyntitiedon funktiona. Sininen sovitte esittää aiemmin esitettyä tapausta, jossa on käytetty oletettua kuukausitason hyötysuhdetta. Oranssi sovitte on luotu ilman hyötysuhde olettaa iteroimalla ja haarukoimalla. Haarukointimenetelmällä polttoaineensyötölle saatiin funktio, jossa on muuttujana ruuvien käyntitieto  $x$ , sekä vakio  $z$ . Funktiota muutettiin haarukoimalla siten, että polttoaineensyöttö vastaisi mahdollisimman hyvin sinisen käyrän sovitetta ja siten ruuvien toiminnallisuutta todellisuudessa. Tämän jälkeen vakiota iteroitiin excelin "goal seek" -toiminnolla, siten että kuukausitason polttoaineenkulutus vastaisi oletetulla hyötysuhteella saatua 2 250 000 kg. Sovitteessa päädyttiin muotoon

$$y = 0.99^{0.9x} xz, \quad (22)$$

, missä  $y$  on polttoaineen massavirta,  $x$  ruuvien käyntitieto ja  $z$  iteroimalla saatu vakioarvo (0,048 kg/s).

Kuvasta 14 nähdään, että tällä menetelmällä päästiin suhteellisen lähelle oletetulla hyötysuhteella laadittua polttoaineen massavirran sovitetta. Haarukoimalla ja iteroimalla saatu funktio ei ole täysin riippumaton oletetusta hyötysuhteesta, sillä haarukoimalla on tavoiteltu oletetulla hyötysuhteella saatua polttoaineensyötön funktiota. Tämän työn hyötysuhdelaskennassa polttoainevirran arvioimiseksi on käytetty savukaasuanalyysin lisäksi kaavan 22 mukaista polttoainevirran ruuvin käyntitiedon sovitetta.

Edellisessä luvussa hyödynnettiin savukaasun virtausmittausta polttoaineen massavirran määrittämiseen. Tässä luvussa on esitelty menetelmä polttoainevirran määrittämiseen syöttöruuvin käyntitietoon perustuen tilanteissa, joissa savukaasuvirtaa ei tiedetä. Savukaasuvirtaa tarvitaan kuitenkin savukaasuhäviön määrittämiseen epäsuorassa hyötysuhdelaskennassa. Tämä voidaan määrittää niin ikään iteratiivisesti savukaasuanalyysin avulla vastaavasti kuin määritettäessä polttoaineen massavirtaa savukaasuanalyysillä.

Tässä tapauksessa iterointi on yksivaiheinen. Tietyn ajanhetken savukaasuvirtaa määritettäessä syötetään ruuvin sovitteella saatu polttoainevirta savukaasuanalyysin polttoainevirraksi. Tämän jälkeen ratkaistaan iteratiivisesti polton ilmakerroin asettamalla savukaasuanalyysin jäännöshapen tavoitearvoksi savukaasun happipitoisuuden laitosmittauksen arvo. Syntyneiden todellisten savukaasujen määrä saadaan luettua savukaasuanalyysin tuloksena. Kummallakin menetelmällä saadaan määritettyä savukaasun- ja polttoaineen massavirrat, jotka ovat edellytyksenä hyötysuhteen määrittämiseksi.

#### **4.7 Laskennan alkuarvot ja tehdyt oletukset**

Taulukoissa 2 ja 3 esiteltiin laitosmittaukset, joita hyötysuhteen määrittämisessä käytetään. Nettotehon määrittämiseen hyödynnetään päänhöyryn ja palautuvan lauhteen laitosmittauksia. Polttoaineen massavirran määrittämiseen käytetään toisessa määrittämisessä savukaasun virtausmittausta ja jäännöshappimittausta, toisessa menetelmässä syöttöruuvin käyntitietoa ja savukaasuvirtaa määritetään ensin määritetyn polttoainevirran avulla. Hyötysuhteen määrittämisessä käytetään lisäksi palamisilmojen virtaus- ja lämpötilamittauksia, sekä savukaasun lämpötila ja häikäpitoisuusmittausta. Polttoaineen massavirran ja käytönaikaisen hyötysuhteen määrittäminen hyödyntää muutamia keskeisimpiä laitosmittauksia, jotka löytyvät useimmilta tarkasteltavan kokoluokan laitoksilta.



Taulukko 9. *Nettotehon määrittäminen tarkasteltavalla aikavälillä*

Nettoteho määritetään pähöyryn ja lauhteen entalpioiden avulla								
teho MW	pähöyry (kyll. höyry)				lauhde (kyll. vesi)			nettoteho MW
	lämpötila C	virtaus t/h	paine bar	entalpia kJ/kg	lämpötila C	paine bar	entalpia kJ/kg	
9,0	235,8	11,4	29,7	2803,2	120,9	2,0	504,7	7,3
9,8	235,6	12,6	29,8	2803,3	121,1	2,0	503,5	8,0
9,0	235,4	11,5	29,8	2803,3	120,4	1,9	499,6	7,4
11,2	235,2	14,4	29,3	2803,2	120,3	2,0	501,3	9,2
11,4	235,8	14,7	29,7	2803,2	120,2	1,9	497,8	9,4
11,2	234,5	13,8	29,1	2803,2	120,4	2,0	503,3	8,8
11,7	234,4	15,0	29,2	2803,2	120,6	2,0	501,3	9,6
12,4	235,3	16,1	29,3	2803,2	120,4	2,0	501,3	10,3
12,4	234,8	16,0	29,0	2803,2	120,7	2,0	504,7	10,2
12,4	234,9	15,7	29,3	2803,2	120,5	2,0	504,7	10,0
12,7	235,1	16,2	29,4	2803,2	120,7	2,0	504,2	10,3
12,2	235,1	15,8	29,4	2803,2	120,4	1,9	500,1	10,1

Tietyn ajanhetken nettoteho saatiin määritettyä pähöyryn ja lauhteen entalpioiden avulla. Taulukossa 9 on esitetty nettotehon määrittäminen laitosmittausten avulla kuuden tunnin tarkastelujaksolla. Taulukon arvot ovat tarkasteltavan ajanhetken keskiarvoistettuja arvoja.

Taulukko 10. *Tarkasteluvälin keskiarvoistettujen mittausarvot*

Savukaasu					Primääri-ilma		Sekundääri-ilma			Syöttör.
vir- taus nm <sup>3</sup> /s	kerroin 1,3 kg/s	lämpö- tila °C	CO- pit. mg/ nm <sup>3</sup>	O <sub>2</sub> - pit. %	vir- taus nm <sup>3</sup> /s	vir- taus kg/s	vir- taus nm <sup>3</sup> /s	vir- taus kg/s	lämpö- tila °C	ohje- arvo %
2,20	3,70	146,40	102,5	4,30	1,00	1,30	2,10	2,60	60,00	19,00
2,80	4,70	150,20	107,5	4,60	1,10	1,30	2,60	3,20	58,50	21,00
2,80	4,70	149,00	115,0	4,40	1,00	1,30	2,50	3,10	59,30	24,00
2,60	4,40	153,10	95,00	4,60	1,20	1,50	2,80	3,50	60,00	27,00
3,00	5,10	153,20	110,0	4,60	1,20	1,50	2,70	3,40	59,00	25,00
3,60	6,00	153,90	102,5	5,20	1,20	1,50	3,20	4,00	59,00	32,00
3,50	6,00	154,90	127,5	3,50	2,10	2,70	2,90	3,60	63,00	31,00
3,70	6,20	158,00	82,50	5,20	1,00	1,20	3,20	4,00	57,50	29,30
3,90	6,60	156,30	87,50	5,40	1,30	1,60	3,30	4,10	59,00	33,00
3,90	6,50	156,00	102,5	4,80	1,30	1,60	3,30	4,10	59,00	31,00
3,70	6,30	157,30	77,50	4,60	1,30	1,60	3,30	4,10	58,30	32,00
3,60	6,20	156,80	95,00	4,90	1,30	1,60	3,30	4,20	58,00	31,00

Taulukossa 10 on esitetty tarkastelujakson mittausarvot, joita hyötysuhteen määrittämisessä hyödynnetään. Laitosmittaukset ilmoittavat virtaustiedot normikuutiaina. Laskennassa on käytetty taulukon 10 kiloiksi sekunnissa muutettuja virtausarvoja. Ne on saatu kertomalla normikuutiot savukaasun ja ilman taulukossa 11 esitetyllä normaalitiheydellä. Laitosmittausten lisäksi hyödynnetään kirjallisuudesta saatavia aineominaisuuksia ja vakioita. Savukaasuanalyysi hyödyntää puupolttoaineen alkuainekoostumusta. Polttoaineen massatiedot, kosteus ja lämpöarvo ovat peräisin taulukon 4 polttoaineominaisuuksista. Lisäksi hyötysuhdelaskennassa standardien mukaisissa kaavoissa on käytetty muutamia aineominaisuuksien vakioita, jotka on koottu alla olevaan taulukkoon 11.

Taulukko 11. Laskennassa käytetyt vakiot

lämpöarvo CO	$H_{CO}$	10,7	MJ/kg
lämpöarvo tuhka	$H_{tuhka}$	27,2	MJ/kg
hehkutushäviö tuhka	$p_{tuhka}$	0,003	-
ominaislämpökapasiteetti, pohjatuhka	$C_{p,pohjat.}$	1	kJ/kgK
ominaislämpökapasiteetti, lentotuhka	$C_{p,lentot.}$	0,84	kJ/kgK
lämpötila, pohjatuhka	$T_{pohjat.}$	750	C
lämpötila, lentotuhka	$T_{lentot.}$	150	C
ominaislämpökapasiteetti, ilma	$C_{p,ilma}$	1,01	kJ/kg
jatkuva ulospuhallus	JUP	2 %	(tuot. höyrystä)
savukaasun kosteus	$x_{H_2O,sk}$	20 %	
savukaasun tiheys normaalitilassa	$\rho_{sk}$	1,3	kg/m <sup>3</sup>
ilman tiheys normaalitilassa	$\rho_{ilma}$	1,25	kg/m <sup>3</sup>

Kaikki taulukon 11 vakiot liittyvät hyötysuhteen määrittämiseen epäsuoralla laskutavalla häviöiden kautta. Myöhemmin tulosluvussa nähdään, että savukaasuhäviöiden osuus on merkittävästi suurin kaikista häviöistä. Näin ollen savukaasun ominaislämpökapasiteetin määrittämiseen käytettävän savukaasun kosteuspitoisuuden vakiolla on suurin merkitys hyötysuhteeseen taulukon vakioista. Tarkasteltaessa laskentaa kokonaisuutena, tehdyillä oletuksilla ja polttoaineen massavirran määrittämisellä, on huomattavasti yksittäisiä vakioita suurempi vaikutus laskennan lopputuloksiin.

Palamattomien kaasujen lämpöarvona käytettiin hiilimonoksidin lämpöarvoa 10,7 MJ/kg ja palamattoman kiintoaineen lämpöarvona ruskohiilen kaksin lämpöarvoa 27,2 [9] Pohja- ja lentotuhkien ominaislämpökapasiteetit saatiin niin ikään kirjallisuudesta, ja tuhkan muodostumisen suhde määritettiin tarkasteltavan laitoksen vuositason tuhkadatan perusteella. [12] Ilman ominaislämpökapasiteettina ja tiheytenä käytettiin standardin mukaisia arvoja. [20] Savukaasun tiheys ja kosteus on valittu savukaasuanalyysin avulla ja esimerkiksi tuhkien lämpötilat ja jatkuvan ulospuhalluksen määrä on valittu tapauskohtaisesti tarkastelun kohteena olevan laitoksen perusteella.

Polttoaineeseen liittyen laskennassa on käytetty kuukausitason keskiarvokosteutta ja sen perusteella määritettyä tehollista lämpöarvoa saapumistilassa. Keskikosteus on määritetty jokaisen polttoainekuorman kosteusmäärityksen keskiarvona huomioiden yksittäisen kuorman massa. Lisäksi on oletettu, että kattilaan syötettävä polttoaine on saapumistilan mukaisessa keskikosteudessa, eikä kosteus muutu varastoinnin aikana. Todellisuudessa kosteus vaihtelee kuormien välillä ja muuttuu vielä polttoainevarastossakin. Nämä oletukset ovat kuitenkin tarkastelun kohteena olevalla laitoksella perusteltuja, sillä kosteuden määrittäminen saapumishetken jälkeen ei ole mahdollista. Tämä on yleinen tilanne tarkasteltavan kokoluokan laitoksilla. Varastoinnin aikaiset kosteusmuutokset voidaan olettaa vähäisiksi laitoksella, jossa varastointi tapahtuu kokonaisuudessaan suljetussa polttoainevarastossa. Suljettu varasto on yleinen ratkaisu, etenkin pienten kokoluokan lämpölaitoksilla ja teollisuuden prosessilaitoksilla. Mikäli laitoksella varastoitaisiin polttoainetta pitkiä aikoja ulkotiloissa ennen käyttöä, olisi kattilaan menevän polttoaineen kosteuden määrittäminen saapumistilan kosteuksien perusteella epäluotettavampaa.

Nettoteho määritetään pähöyryn ja palautuvan lauhteen avulla. Laskenta olettaa, että kaikki lauhde palautuu takaisin lämpölaitokselle ja käytetään uudelleen syöttövetenä. Tietyissä tapauksissa tuotettua höyryä johdetaan myös asiakkaan prosesseihin ja se jää palaamatta takaisin kiertoon tai siitä palautuu vain osa. Tarkastelun kohteenakin olevalla laitoksella pieni osa höyrystä käytettiin teollisuusasiakkaan kostutushöyrynä, mutta tämä jätettiin laskennassa huomiotta. Pähöyry oletetaan kylläiseksi höyryksi ja palautuva lauhde kylläiseksi vedeksi syöttövesisäiliön paineessa, sillä lauhteelle ei ole omaa painemittausta. Todellisuudessa lauhteen paine on todennäköisesti hieman korkeampi lauhteen lämpötilamittauksen ja syöttövesisäiliön välisen putkilinjan painehäviöiden myötä. Tässäkin tapauksessa tukeudutaan kuitenkin saatavilla oleviin laitosmittauksiin, siitä huolimatta, että ne aiheuttavat hieman epävarmuutta laskennan tuloksiin. Mahdollisimman tarkka tulos ei ole tämän työn päätavoite, sen sijaan tärkeä on tiedostaa mahdolliset virhelähteet.

Laskentaa on sovellettu yksinkertaiselle laitosratkaisulle ja pyritty yksinkertaistamaan todellisesta prosessista. Tämän vuoksi hyötysuhteen määrittäminen käytetyillä menetelmillä ei huomioi esimerkiksi kiertokaasun vaikutusta hyötysuhteeseen. Kiertokaasu on takaisin kierrätettyä savukaasua, joka syötetään uudelleen palamisilmana kattilaan. Kiertokaasu on ulkoilmasta otettuun palamisilmaan nähden vähähappisempaa ja korkeammassa lämpötilassa. Tarkasteltavalla laitoksella kiertokaasu syötettiin primääri-ilman mukana kattilaan ja sen virtaus lukeutui laskennassa käytettyyn primääri-ilman virtausmittauk-

seen. Muihin häviöihin otettiin huomioon ainoastaan jatkuva ulospuhallus, jonka suuruudeksi arvioitiin 2 % pähöyryn tehosta. [12] Laskennassa ei ole myöskään huomioitu laitoksia, joissa on savukaasun märkäpesuri, eivätkä laskentamenetelmät sellaisenaan soveltuisi tällaiselle laitossovellukselle.

Kattilaan syötetyistä energiavirroista huomioidaan polttoaineen ja palamisilmojen mukana kattilaan tuotu energia. Polttoaineen esilämmitys ja muut energiavirrat kattilaan jätettiin huomiotta. Niin ikään häviöistä määritettiin keskeisimmät, jotka olivat luotettavasti määritettävissä laitosmittausten avulla. Yksi merkittävä häviö, höyrynuohous on jätetty käytönaikaisessa hyötysuhteessa huomiotta. Nuohouksessa höyryä puhalletaan kattilan lämmönsiirtopinnoille ja se tapahtuu hetkellisesti vaihtelevin väliajoin. Höyryä kuluu ja savukaasun lämpötila, sekä kosteuspitoisuus nousevat hetkellisesti. Nuohous vaikuttaa kuukausitason hyötysuhteeseen ja aiheuttaa eroa käytönaikaiseen hyötysuhteeseen nähden. Työn laskenta ei myöskään huomioi starttipolttimen ja tukiöljypolttimen kattilaan syöttämiä energiavirtoja. Näiden merkitys arvioitiin epäolennaiseksi käytönaikaisen hyötysuhteen kannalta, sillä käyttö on satunnaista.

Työn merkittävin epävarmuustekijä liittyy kattilaan syötettäviin energiavirtoihin ja etenkin polttoaineen massavirran määritykseen. Kumpikaan savukaasuanalyysiin tai ruuvin käyntitietoon perustuva määrittystapa ei pysty huomioimaan polttoaineominaisuuksien hetkellisiä vaihteluita. Savukaasuanalyysiin ja savukaasun virtausmittaukseen perustuva menetelmä edellyttää mittauksen toimivuutta. Tarkastelun kohteena olevan laitoksen savukaasun virtausmittaukseen kohdistui epävarmuutta. Savukaasun sekä palamisilmojen muodostaman taseen perusteella savukaasun virtausmittauksen arvioitiin olevan liian alhainen. Tätä käsitystä tuki savukaasuanalyysillä saatu savukaasun virtausmittaukseen perustuva polttoaineen massavirta.

Mikäli syötettävät energiavirrat ovat alhaiset nettotehoon nähden, suoralla määrittävällä saatu hyötysuhde on epärealistisen korkea. Näin tapahtui käytettäessä savukaasun virtausmittausta polttoainevirran määritykseen. Tässä työssä päädyttiin ratkaisemaan ongelma kertomalla savukaasun virtausmittauksen arvoa kertoimella 1,3, siten että sen perusteella määritetty polttoainevirta saavutti realistisemmat arvot. Työn puitteissa ei ollut mahdollista todentaa mittauksen toimivuutta ja siihen liittyen laskennan tuloksiin aiheutui merkittävä epävarmuus. Myös ruuvin sovitteeseen liittyi epävarmuutta, mutta sen tiedettiin tuottavan kuukausitasolla oikean suuruusluokan polttoaineen kulutus. Työssä olennaista oli kuitenkin keskittyä laskentamenetelmien kehittämiseen ja laitosmittausten

hyödyntämiseen, joten mittausdatan epävarmuus hyväksyttiin työn puitteissa. Mahdollista käytönaikaisen hyötysuhteen jatkokäyttöä ajatellen mittausdatan luotettavuus olisi tarkistettava.

## 4.8 Hyötysuhteen määrittäminen

Tämän työn laskentaosion voi jakaa kolmeen vaiheeseen, jotka on kuvattu alla esitetyssä kaaviossa. Vaihe 1 sisältää polttoaineen massavirran ja savukaasuvirran määrittämisen, vaiheen 2 hyötysuhteen määrittämistä varten. Vaiheissa 1 ja 2 on kaksi rinnakkaista menetelmää. Vaiheessa 1 polttoaineen massavirta määritetään savukaasun virtausmittauksen, sekä polttoaineen syöttöruuvin käyntitiedon avulla. Vaiheessa kaksi hyötysuhde puolestaan määritetään epäsuoralla- ja suoralla menetelmällä. Vaiheessa 3 vertaillaan ja arvioidaan tuloksia.

Taulukko 12. *Hyötysuhteen määrittämisen vaiheet*

Hyötysuhteen määrittämisen vaiheet:	
<b>Vaihe 1: Savukaasuanalyysi</b>	
<p><b>Menetelmä 1</b>, hyödyntää: SK virtausmittausta</p> <p><b>tiedetään:</b> SK virtaus SK O<sub>2</sub>-pitoisuus</p> <p><b>ei tiedetä:</b> polttoainevirta</p> <p><b>ratkaistaan:</b> ilmakerroin polttoainevirta</p>	<p><b>Menetelmä 2</b>, hyödyntää: Polttoaineen syöttöruuvin käyntitietoa</p> <p><b>tiedetään:</b> polttoainevirta SK O<sub>2</sub>-pitoisuus</p> <p><b>ei tiedetä:</b> SK virtaus</p> <p><b>ratkaistaan:</b> ilmakerroin SK virtaus</p>
<b>Vaihe 2: Hyötysuhdelaskenta</b>	
<p><b>Epäsuora menetelmä</b></p> <p><b>Määritetään:</b> Savukaasuhäviöt, <math>q_{sk}</math> Palamattomien kaasujen häviö, <math>q_{CO}</math> Palamattoman polttoaineen häviö, <math>q_{pal}</math> Tuhkan mukana poistuva häviö, <math>q_{tuhka}</math> Säteilyhäviöt, <math>q_{sät}</math> Muut häviöt, <math>q_{muut}</math></p> <p><b>Ratkaistaan:</b> kokonaishäviö, <math>\sum q_{häviöt}</math></p> <p><b>Määritetään käänteinen hyötysuhde:</b> <math display="block">\eta_{epäsuora} = 1 - \sum q_{häviöt}</math></p>	<p><b>Suora menetelmä</b></p> <p><b>Määritetään:</b> Kattilaan syötetyt energiavirrat, <math>Q_{in} = Q_{pa} + Q_{ilmat}</math></p> <p>Kattilan nettoteho, <math>Q_{net}</math></p> <p><b>Määritetään suora hyötysuhde:</b> <math display="block">\eta_{suora} = \frac{Q_{net}}{Q_{in}}</math></p>
<b>Vaihe 3: Tulosten arviointi ja vertailu</b>	

Kattilaan syötetyt energiavirrat puolestaan määritetään polttoaineen ja palamisilmojen sisältämien energioiden summana. Suora hyötysuhde saadaan määritettyä suhteellisen yksinkertaisesti nettotehon ja kattilaan syötettyjen energioiden suhteena. Epäsuora laskentatapa hyödyntää niin ikään kattilaan syötettyä energiavirtaa, mutta nettotehon sijaan siinä määritetään jokaisen häviön osuus erikseen ja hyötysuhde määritetään häviöiden summan ja kattilaan syötettyjen energiavirtojen suhteena.

Häviöt määritetään luvussa 3 esitettyjen standardin mukaisten laskentamenetelmien avulla. Häviöt muodostuvat savukaasujen häviöstä, palamattomien kaasujen häviöstä, palamatta jääneen polttoaineen häviöstä, tuhkan mukana poistuvasta termisestä lämmöstä, säteilyhäviöistä, sekä muista häviöistä.

Taulukko 13. Hyötysuhteen määrittäminen vaiheittain molemmilla laskentatavoilla (arvot yhden ajanhetken esimerkkiarvoja)

Energiavirrat kattilaan:					
Energia polttoaineen mukana:			Energia palamisilmojen mukana:		
$m_{pa}$ määritetty menetelmällä 1 (SK-virtausmittaus)			$T_i$	57,5	°C
$m_{pa}$	1,1	kg/s	$m_i$	5,24	kg/s
$H_u$	10,6	MJ/kg	$c_{p,i}$	1	kJ/kgK
$Q_{pa}$	11,68	MW	$Q_i$	0,17	MW
Kattilaan tuodut energiat yhteensä: $Q_{in}$ 11,85 MW					
Hyötysuhteen määrittäminen:					
Epäsuora hyötysuhde				Suora hyötysuhde	
<b>1) Savukaasujen häviö</b>					
$m_{sk}$	6,17	kg/s	$Q_{sk}$	0,97	MW
$T_{sk}$	157,97	°C	$q_{sk}$	8,2	%
$c_{p,sk}$	1,185	kJ/kgK			
<b>2) Palamattomien kaasujen häviö</b>					
$m_{CO}$	0,0003	kg/s	$Q_{CO}$	0,00034	MW
$H_{CO}$	10,7	MJ/kg	$q_{CO}$	0,03	%
<b>3) Palamatta jääneen kiintoaineen häviö:</b>					
$m_{pal}$	0,000007	kg/s	$Q_{pal}$	0,000184	MW
$H_{pal}$	25	MJ/kg	$q_{pal}$	0,002	%
<b>4) Tuhkan mukana poistuva termien häviö</b>					
pohjatuuhka:			lentotuuhka:		
$m_{pt}$	0,016	kg/s	$m_{lt}$	0,01	kg/s
$c_{p,pt}$	1	kJ/kgK	$c_{p,lt}$	0,84	kJ/kgK
$T_{pt}$	750	°C	$T_{lt}$	150	°C
$Q_{pt}$	0,011	MW	$Q_{lt}$	0,0011	MW
$q_{pt}$	0,095	%	$q_{lt}$	0,01	%
tuhkahäviöt yhteensä:			$Q_{tuhkat}$	0,012	MW
			$q_{tuhkat}$	0,105	%
<b>5) Säteily- ja konvektiohäviöt</b>					
$C_{leiijupeti}$	0,0315	-	$Q_{sät}$	0,18	MW
$Q_{in}$	11,85	MW	$q_{sät}$	1,5	%
<b>6) Muut häviöt</b>					
$JUP_{osuus}$	2	%	$Q_{muut}$	0,248	MW
$Q_{päähöyry}$	12,4	MW	$q_{muut}$	2,09	%
$Q_{JUP}$	0,248	MW			
<b>Epäsuora hyötysuhde:</b>			$\sum q_{häviöt}$	11,93	%
			$\eta_{käänteinen}$	88,07	%
<b>Suora hyötysuhde:</b>					
	$Q_{in}$	11,85	MW		
	$Q_{net}$	10,29	MW		
	$\eta_{suora}$	86,87	%		

Taulukosta 13 havaitaan suoran ja epäsuoran hyötysuhteen määrittämisen eroavaisuudet. Taulukkoon on koottu laskennan kannalta keskeisimmät muuttujat, eikä kaikkia välivaiheita häviöiden määrittämisessä ole näkyvillä. Taulukon laskennassa käytetyt arvot ovat tarkasteltavan aikavälin yhden ajanhetken esimerkki arvoja. Niiden avulla pystytään hahmottamaan etenkin häviöiden suuruusluokkaa suhteessa toisiinsa. Häviöistä savukaasuhäviöt ovat merkittävimpiä, tämän jälkeen säteilyhäviöt ja muut häviöt muodostavat merkittävän osan. Normaalitilanteessa tuhkan mukana poistuva termien lämpö ja palamattomien häviöt ovat erittäin pieniä.

Mikäli palaminen häiriintyy ja esimerkiksi heikentyneen polttoaineen laadun takia palamattomien osuus kasvaisi ja näiden häviöiden osuus kasvaisi. Laitoksen toimiessa normaalisti puuperäisillä kiinteillä polttoaineilla palamattomien häviöt ovat kokonaisuuden kannalta käytännössä merkityksettömiä. Suoran hyötysuhteen määrittäminen puolestaan on melko suoraviivaista sen jälkeen, kun kattilaan syötettävät energiavirrat on saatu ratkaistua. Suora hyötysuhde saadaan ratkaistua jakamalla hyödyksi saatava nettoteho kattilaan syötettävien energiavirtojen summalla.

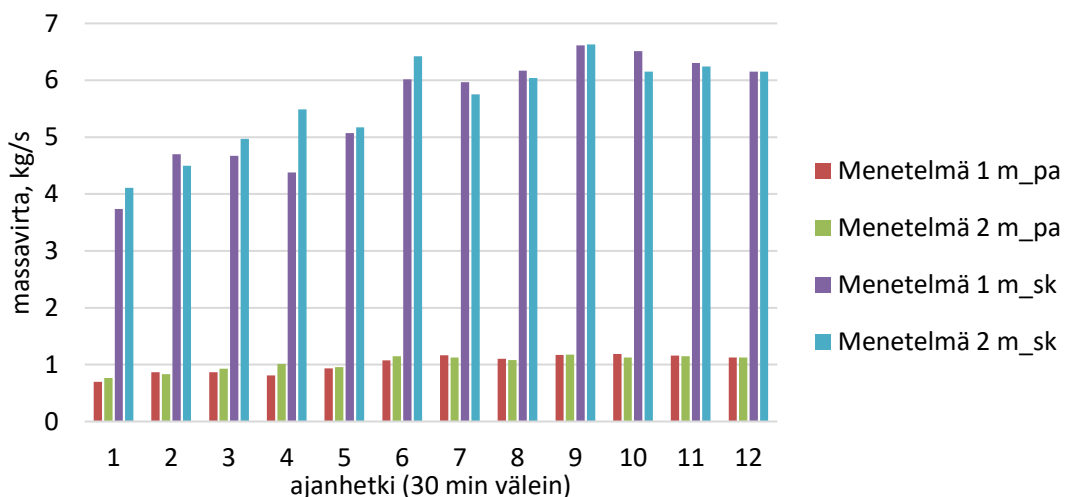


## 5. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Laskentamenetelmät pyrittiin valitsemaan suhteellisen yksinkertaisiksi käytössä olevien laitosmittausten perusteella. Prosessoidun laitosdatan ja vakioarvojen avulla käytönai- kainen hyötysuhde määritettiin suoralla ja epäsuoralla tavalla kahta eri menetelmää hyö- dyntäen. Laskenta toteutettiin kuuden tunnin tarkastelujaksolle, sekä kokonaiselle kuu- kaudelle. Lyhyemmällä tarkastelujaksolla käytettiin puolen tunnin välein keskiarvoistet- tua mittaustietoa ja pidemmällä kuukauden tarkastelujaksolla tunnin välein keskiarvois- tettua dataa. Lyhyempi tarkastelujakso havainnollistaa tässä työssä lähinnä laskentapro- sessia, kun taas koko kuukauden tulokset mahdollistavat hyötysuhteeseen vaikuttavien tekijöiden perusteellisemmän analysoinnin. Tässä luvussa analysoidaan laskennallisesti määritettyjä tuloksia ja arvioidaan laskentamenetelmien luotettavuutta.

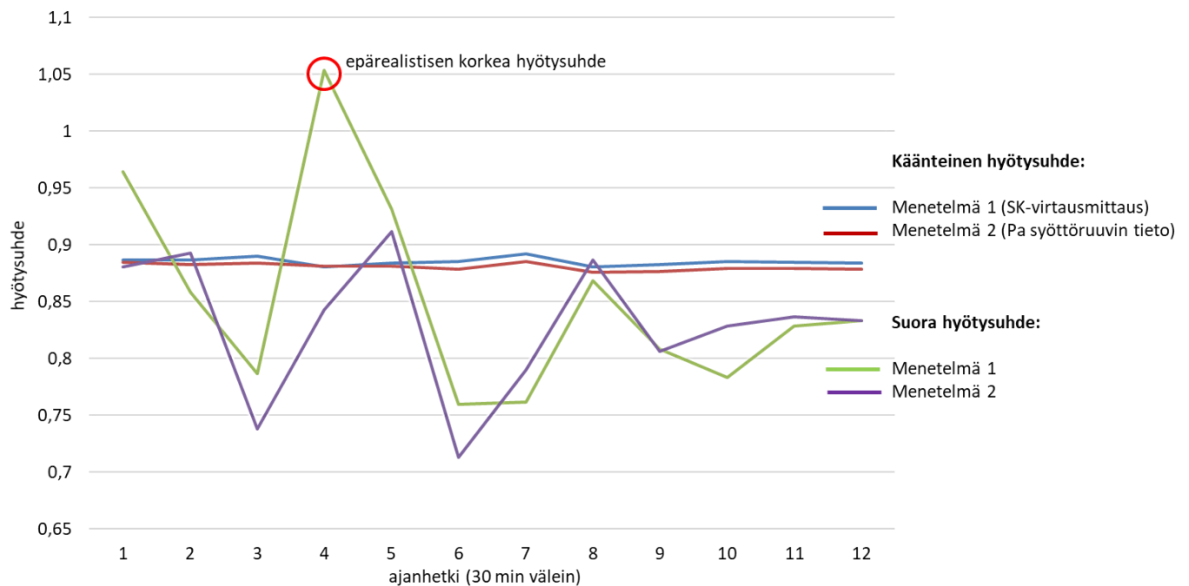
### 5.1 Laskentamenetelmien vertailu

Kuvaan 15 on koottu tarkasteltavan 6 tunnin ajanjakson laskennan vaiheen 1 tulokset, jossa polttoainevirta ja savukaasuvirta määritettiin savukaasuanalyysin avulla. Mene- telmä 1 hyödyntää savukaasun virtausmittauksen laitosmittausta (liila) ja määrittää sen avulla polttoaineen massavirran savukaasuanalyysillä (punainen). Menetelmä 2 käyttää syöttöruuvien käyntitiedon sovitetta polttoainevirran (vihreä) määrittämiseen ja määrittää tämän avulla savukaasuvirran savukaasuanalyysillä (sininen). Tuloksia analysoitaessa on otettava huomioon, että kummassakin menetelmässä tietyn ajanhetken polton ilma- kerroin määritetään savukaasun jäännöshappimittauksen avulla. Eli kummassakin me- netelmässä ilmakerroin on sama tietyillä ajanhetkillä. Näin ollen polttoaineen massavirta on ainoa tekijä mallien välillä, joka aiheuttaa eroa savukaasuvirran määrissä.



### Kuva 15. Laskennan vaihe 1 tulokset

Tuloksista havaitaan, että arvot ovat kummallakin menetelmällä määritettyinä melko lähellä samaa suuruusluokkaa. Menetelmällä 2 ruuvin sovitteella saatu polttoainevirta on keskimäärin hieman suurempi kuin menetelmällä 1 määritetty. Tämän vuoksi myös menetelmän 2 savukaasuvirta on keskimäärin hieman suurempi, mutta hajontaa kumpaankin suuntaan on eri ajanhetkien välillä. Menetelmässä 1 epävarmuutta luo savukaasuvirran laitosmittauksen mahdolliset poikkeamat ja mittauksen luotettavuus. Kuten aiemmin todettu tulosten vertailtavuuden vuoksi tässä työssä savukaasuvirran laitosmittauksen arvoja on kerrottu painokertoimella 1,3, jotta tulokset olisivat todenmukaisempia. Menetelmän 2 epävarmuustekijänä on puolestaan ruuvin sovitteen toiminta oletetulla kuukauden keskiarvopolttoaineella.



### Kuva 16. Tarkastelujakson hyötysuhteet

Kuvassa 16 on esitetty hyötysuhdelaskennan vaiheessa kaksi määritettyä käänteistä ja suorat hyötysuhteet kummallakin vaiheessa 1 käytetyllä menetelmällä. Epäsuoralla menetelmällä lasketut hyötysuhteet (sininen ja punainen) ovat koko tarkastelujakson ajan melko tasaisia noin 88 %. Kuuden tunnin tarkastelujakson aikana laitoksen kuormassa tapahtui muutoksia. Laitoksen nettoteho nousi alun noin 7,5 MW:sta lopun 10 MW:iin. Häviöiden perusteella määritetystä hyötysuhteista ei pysty päättämään yhteyksiä tehotason muutokseen ainakaan valitulla suhteellisen lyhyellä tarkasteluvälillä. Tehotason noustessa myös polttoainevirta ja savukaasuvirta kasvavat, kuten kuvasta 15 havaitaan. Polton ilmakerroin pysyi jäännöshapteen perustuvassa määrittäksessä lähes vakiona 1,3 tasolla koko tarkastelun ajan. Savukaasuvirran kasvaessa savukaasuhäviöt lisääntyvät. Koska tässä laskennassa savukaasuvirta ja polttoainevirta määritetään toistensa

avulla, ilmakertoimen pysyessä vakiona niiden kasvu tapahtuu samassa suhteessa ja näin ollen savukaasuhäviöiden osuus suhteessa kattilaan tuotuihin energiavirtoihin pysyy käytännössä muuttumattomana. Tehon lisäys aiheuttaa savukaasun loppulämpötilan nousun mittausjakson aikana noin 146:stä 155:een °C asteeseen. Tämä aiheuttaa savukaasuhäviöön pienen kasvun mittausjakson aikana.

Niin ikään palamattomien kaasujen CO häviö on savukaasuvirran kautta riippuvainen polttoainevirrasta ja sen suhteellinen osuus tuotuihin energiavirtoihin pysyy lähes vakiona, sillä savukaasun CO-pitoisuudessa ei tapahdu merkittäviä muutoksia. Palamattoman kiintoaineen ja tuhkan häviöt ovat myös riippuvaisia kattilaan syötetyn polttoaineen määrästä, joten laskennassa tehtyjen oletusten myötä niidenkään suhteellinen osuus kattilaan syötettyihin energiavirtoihin ei muutu mittausjakson aikana. Palamattomien ja tuhkahäviöiden osuus normaalilanteessa on käytännössä merkityksetön. Standardin mukaisella laskutavalla määritetyt säteilyhäviöt sen sijaan pysyvät lähes vakiona laitostehon kasvaessa, joten niiden suhteellinen osuus on suurempi alhaisella, kuin suuremmalla laitosteholla. Muutos on suhteellisen pieni, eikä merkittävästi näy tarkastelujakson hyötysuhteessa. Muista häviöistä huomioitiin jatkuva ulospuhallus, jonka suuruudeksi arvioitiin 2 % tuotetusta päähöyrystä. Se kasvaa tehotason noustessa, mutta suhteellinen osuus siinäkin säilyy lähes samana koko tarkastelujakson ajan. Yhteenvetona voidaan todeta, että valituilla laskutavoilla häviöiden suhteelliset osuudet kattilaan syötettyihin energiavirtoihin nähden pysyvät lähes muuttumattomina tarkastelujakson aikana.

Nettotehon ja kattilaan syötettyjen energiavirtojen suhteena määritetyssä suorassa hyötysuhteessa havaitaan enemmän vaihtelua, kuin epäsuorassa määrittävällä. Tämä aiheutuu osittain laskentamenetelmistä ja käytetystä mittausdatasta. Nettoteho on määritetty päähöyrin ja lauhteen entalpioiden avulla ja sen voidaan olettaa olevan suhteellisen tarkka. Heilahtelu aiheutuu siis kattilaan syötettyjen energiavirtojen arvioinnissa. Periaatteellisesti polttoainevirta, savukaasuvirta ja laitosteho ovat kytköksissä toisiinsa, mutta tarkastelun perusteella laskennassa käytetty kattilaan syötettyjen energiavirtojen arviointi ei kykene arvioimaan syötettyjä energiavirtoja suhteessa laitostehoon kaikkina ajanhetkinä riittävän tarkasti. Tämän seurauksena kattilaan syötetyt energiavirrat, joista lähes kaiken muodostaa polttoainevirta ovat kuvan 16 perusteella ajoittain epäsuhdassa laitostehon kanssa aiheuttaen epärealistisen korkeita tai heikkoja hyötysuhteen arvoja. Laskennan vaiheessa yksi toteutettu polttoaineen massavirran määrittäminen ei ole suoraan kytköksissä laitostehoon, vaan ensimmäisessä menetelmässä savukaasuvirtaan ja toisessa menetelmässä syöttöruuvin käyntitietoon.

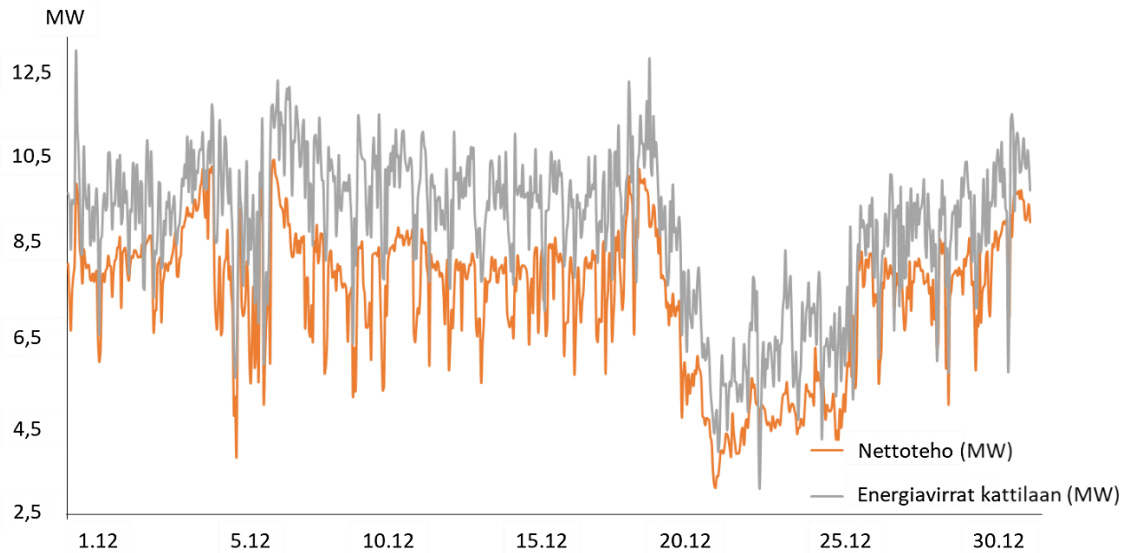
Tämä korostuu kuvassa 16 esitetystä menetelmän 1 mittaushetken 4 hyötysuhteen arvossa, joka on yli 100 %. Epärealistisen korkea hyötysuhde aiheutuu siitä, että mittaushetken laitosmittaukselta luettu savukaasuvirta on vähäinen suhteessa laitostehoon ja siten savukaasuvirran perusteella määritetty polttoainevirta on epärealistisen pieni suhteessa hyödyksi saatavaan laitostehoon. Tämä saattaa johtua esimerkiksi yksittäisestä laitospoikkeamasta tai mittausvirheestä. Pidemmällä aikavälillä suoran hyötysuhteen keskiarvo asettuu kuitenkin suhteellisen lähelle tarkastelulaitoksen kuukausitason keskiarvohyötysuhdetta 86,0 %. Menetelmän heikkoutena voidaan pitää kattilaan syötettyjen energiavirtojen arvioinnin haastavuutta ja sen aiheuttamia poikkeamia suoran hyötysuhteen määrittämisessä. Tämä ei aiheuta vastaavaa ongelmaa epäsuorassa hyötysuhteen määrittämisessä, sillä häviöitä verrataan nettotehon sijaan kattilaan syötettyihin energiavirtoihin. Tämän vuoksi epäsuora hyötysuhteen määrittäminen sopii paremmin käytönaikaiseen hyötysuhteen määrittämiseen tietyissä tilanteissa.

## 5.2 Kuukausitason hyötysuhteen määrittäminen

Laskentamenetelmän luotettavuuden arvioimiseksi käytönaikainen hyötysuhde haluttiin määrittää myös koko kuukaudelle, sillä olemassa oleva hyötysuhdetieto määritettiin laitokselta kuukausitason energiamittauksiin perustuen. Valitsimme tarkastelun kohteeksi laskennassa jo aiemmin käytetyn joulukuun. Joulukuussa on keskimäärin suhteellisen korkea kuormataso ja joulun pyhäpäivien mukanaan tuomaa kuorman vaihtelua, jonka avulla pyrittiin päättämään, miten laskentamenetelmät huomioivat hyötysuhteen muutosta laitoskuorman muuttuessa. Laskettaessa koko kuukautta selkeyden ja luotettavuuden kannalta olisi parasta, ettei laitoksen käytössä olisi paljon poikkeamia. Joulukuulle osui yksi selkeä laitospoikkeama, kun kuun alussa 8.12 leijupetikattilalle suoritettiin peltinvaihto. Toimenpiteen ajan kiinteän polttoaineen kattila oli alhaalla noin 6 tuntia. Öljykattila tuki huollon ajan, sekä myös edeltävinä päivinä.

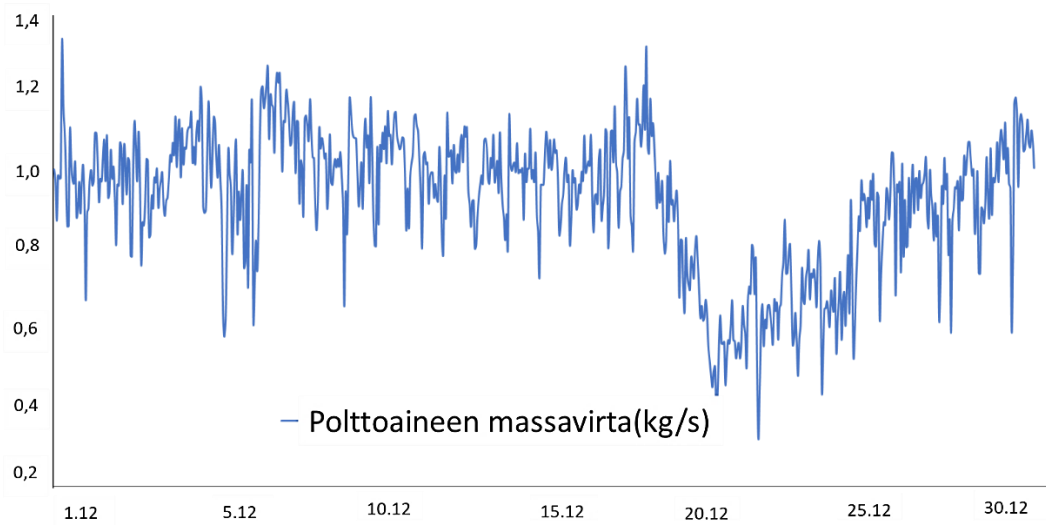
Joulukuun hyötysuhteen määrittämistä varten tarkastelujakson laitosdataa prosessoitiin, siten että se olisi kiinteän polttoaineen kattilan kannalta mahdollisimman häiriötön. Tämä toteutettiin poistamalla tarkastelusta 7- 8.12 ne tunnit, jolloin kattila oli alhaalla, sekä ne tunnit, jolloin öljykattila kävi rinnalla merkittäväällä teholla. Lisäksi poistettiin muutamia yksittäisiä tunteja joulukuulta, jolloin öljykattila oli käynyt hetkellisesti. Yhteensä tunteja poistettiin noin 30 ja vastaavasti tarkastelua jatkettiin tammikuun puolelle vastaava määrä. Laskennan toteuttaminen muokatulla kuukausidatalla ei merkittävästi vaikuta tarkastelujakson edustavuuteen.

Joulukuun laskenta toteutettiin savukaasun virtausmittaukseen perustuvaa laskentamenetelmää käyttäen. Aiemmin käytetyn puolen tunnin tarkasteluvälin sijaan kuukausitason laskenta toteutettiin 1 tunnin välein keskiarvoistetulla laitosdatalla. Savukaasun virtausmittauksen kertoimena käytettiin aikaisemmin määritettyä 1,3 kerrointa.



**Kuva 17.** Joulukuun energiavirrat kattilaan ja nettoteho, savukaasun virtausmittaukseen perustuvalla menetelmällä

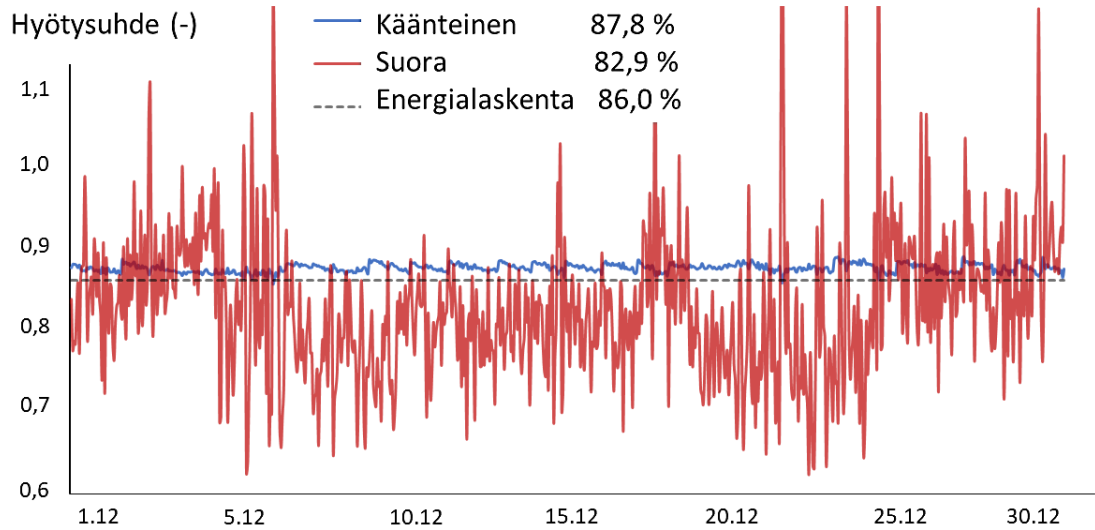
Kuvaajassa on esitetty joulukuun nettoteho ja energiavirrat kattilaan. Nettoteho on määritetty pähöryryn ja lauhteen laitosmittauksien avulla. Laskennassa käytetystä datasta poistettiin edellä kuvattu häiriö 7 - 8.12, mutta tuloksissa on silti nähtävissä kiinteän polttoaineen nettotehon ja kattilaan syötettyjen energiavirtojen alentumaa häiriöstä johtuen. Tällöin kiinteän polttoaineen kattilan rinnalla kävi öljykattila ja kuvassa 17 esitetty laskennassa käytetty nettoteho on määritetty vähentämällä kiinteän polttoaineen kattilan nettotehosta öljykattilan teho. Mittausdatan muokkauksen ja tämän nettotehon määrittämisen avulla halutaan tarkastella vain kiinteän polttoaineen kattilaa, eikä öljykattilan käynti vääristä laskennassa määritettyä hyötysuhdetta. Energiavirrat kattilaan muodostuvat polttoaineen ja ilman mukana kattilaan syötetyistä energiavirroista ja niihin vaikuttavat pääosin laskennassa savukaasun virtausmittauksen avulla määritetty polttoaineen massavirta, joka on esitetty alla olevassa kuvaajassa.



**Kuva 18.** Joulukuun polttoaineen massavirta, savukaasun virtausmittaukseen perustuvalla menetelmällä

Kuva 18 esittää laskennan tuloksena saadun joulukuun polttoaineen massavirran kattilaan. Laskentamenetelmässä polttoaineen massavirta määritetään savukaasun jäänöshapen ja savukaasuvirran laitosmittausten avulla. Havaitaan, että polttoaineen massavirta noudattaa melko tarkasti kuvan 17 esittämää pähöyryn laitosmittauksen ja syöttöruuvin käytitiedon trendiä. Laskennan tuloksena saatu polttoainevirta tuotti 2 492 000 kg kuukausikulutuksen, kun jokaisen tunnin polttoainevirta laskettiin yhteen.

Laitokselle tuotiin joulukuussa kiinteitä polttoaineita 2 443 000 kg, tarkempaa tietoa laitoksen todellisesta polttoaineiden kulutuksesta ei ole, sillä varaston muutosta ei mitata. Laskennan kuukausitason kulutus asettuu melko lähelle oletettua todellista ja tulosten perusteella savukaasun virtausmittausta hyödyntävää savukaasuanalyysiin perustuvaa polttoainevirran määrittäytapaa voidaan pitää toimivana myös hetkellisen polttoainevirran arvioimiseksi.



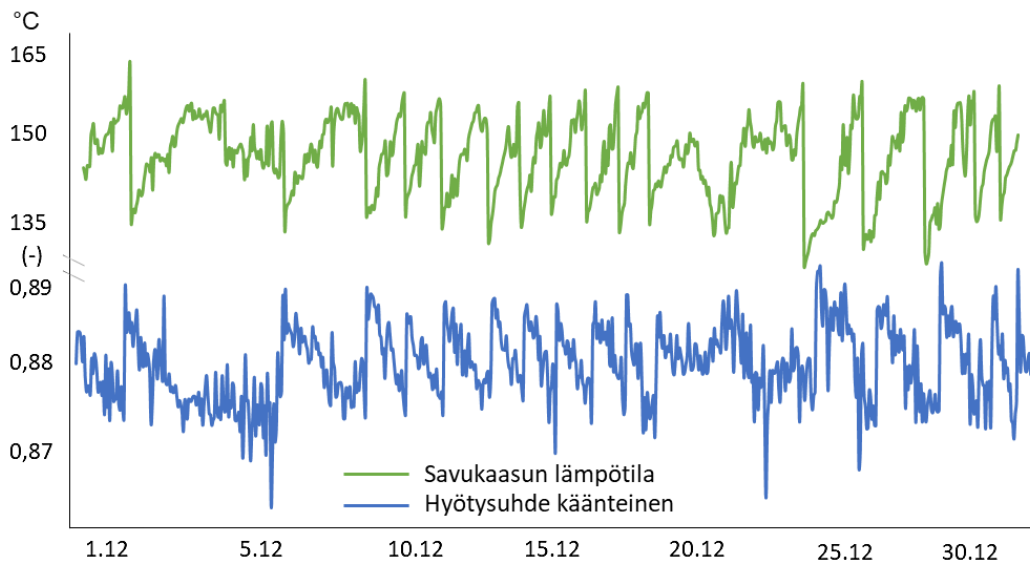
**Kuva 19.** Joulukuun hyötysuhteet

Kuva 19 esittää joulukuun hyötysuhteet käänteisellä ja suoralla laskutavalla. Tulokset kuvastavat lyhyemmälläkin tarkastelujaksolla tehtyjä havaintoja. Epäsuora hyötysuhde pysyy melko tasaisena ja sen joulukuun keskiarvo on 87,8 %, suora hyötysuhde puolestaan vaihtelee enemmän ja se kuukauden keskiarvo on 82,9 %. Laitoksen kuukauden energialukemien perusteella määritetty 86,0 % hyötysuhde asettuu laskennallisesti määritettyjen keskiarvohyötysuhteiden väliin. Epäsuoran ja suoran määrittämisen välillä on hieman alle 5 %:n ero.

Tähän voi vaikuttaa usea tekijä. Laskennassa polttoaineen kosteutena on käytetty joulukuun keskikosteutta kaikille ajanhetkille, mikä ei kuvasta todellista tilannetta. Laskentamenetelmällä saatu kuukauden polttoainekulutus on noin 50 000 kg suurempi kuin laitokselle tuotu polttoainemäärä. Jos laskennallisesti määritetty polttoainevirta on suurempi kuin todellinen, se heikentää laskennassa määritettyä suoraa hyötysuhdetta. Polttoainevirran arviointi on yksi keskeinen virhelähde varsinkin suorassa hyötysuhteessa.

Epäsuora hyötysuhde pysyy suhteellisen vakiona, sillä häviöt, joista keskeisin on savukaasuhäviö pysyvät melko stabiileina suhteessa kattilaan tuotuihin energiavirtoihin. Monet häviöt, kuten palamattomien häviö ja tuhkahäviö ovat verrannollisia polttoaineen massavirtaan, joka puolestaan muodostaa käytännössä kattilaan syötettävän energiavirran. Savukaasuhäviöön puolestaan vaikuttaa savukaasun virtaus, jonka perusteella polttoainevirta on tässä menetelmässä määritetty. Näin ollen merkittävimmät häviöt ovat tässä määrittämistavassa verrannollisia kattilaan syötettäviin energiavirtoihin, eikä epäsuora

rassa hyötysuhteessa tapahdu olennaisia muutoksia laitoskuorman muuttuessa. Yksittäisistä tekijöistä erityisesti savukaasun häkäpitoisuus ja loppulämpötila aiheuttavat vaihtelua epäsuoraan hyötysuhteeseen. Häkäpitoisuuden kasvaessa palamattomien kaasujen häviö kasvaa, mutta häviö pysyy kokonaisuutena hyvin vähäisenä. Käytännössä vain savukaasun loppulämpötila aiheuttaa hyötysuhteeseen merkittävää vaihtelua.

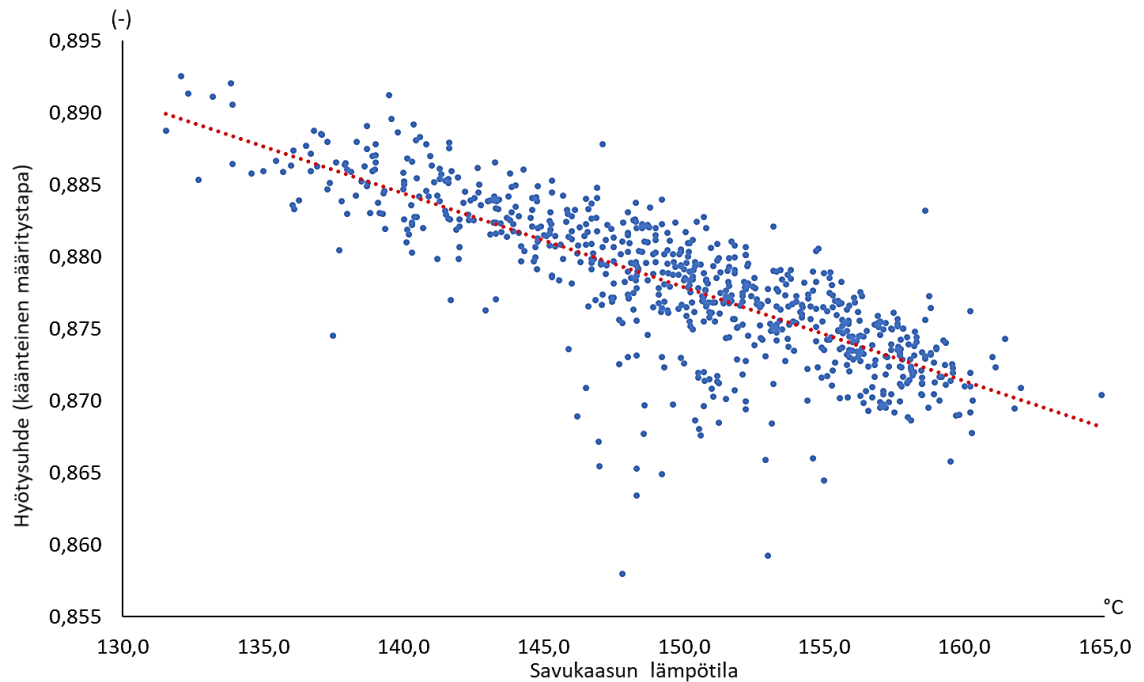


**Kuva 20.** Savukaasun lämpötilan vaikutus epäsuoraan hyötysuhteeseen

Kuvassa 20 on esitetty joulukuun savukaasun lämpötila ja laskennallisesti määritetty epäsuora hyötysuhde. Savukaasun lämpötila on suoraan verrannollinen savukaasuhäviöön ja siten sen ja käänteisen hyötysuhteen on selvästi havaittava verrannollisuus. Savukaasun lämpötilassa on havaittavissa keskimäärin kahden päivän välein savukaasun lämpötilan nousua ja nopea lasku, joka aiheutuu kattilan nuohouksesta. Nuohous vaikuttaa hetkellisesti merkittävästi savukaasun lämpötilaan, joka näkyy käänteisen hyötysuhteen nousuna.

Todellisuudessa höyrynuohous myös heikentää hyötysuhdetta, mutta tämän työn laskenta ei huomio nuohoushöyrystä aiheutuvaa häviötä hetkellisen hyötysuhteen määrittämisessä. Laitoksen kuorman kasvu kasvattaa savukaasun lämpötilaa ja siten savukaasuhäviöitä. Kuvasta 20 ei kuitenkaan pysty päättelemään merkittävää vaihtelua kuormatason ja hyötysuhteen välillä. Ainoastaan selkeän yhteyden nuohouksen ja savukaasun loppulämpötilan välillä, sekä savukaasun lämpötilan ja laskennallisesti määritetyn epäsuoran hyötysuhteen välillä.





**Kuva 21.** Savukaasun virtausmittaukseen perustuvalla menetelmällä määritetty epäsuora hyötysuhde savukaasun lämpötilan funktiona

Kuvaan 21 on havainnollistettu käänteisen hyötysuhteen riippuvuutta savukaasun lopulämpötilasta, piirtämällä tarkastelujakson laskennallisesti määritetyt käänteiset hyötysuhteet savukaasun lämpötilan funktiona. Joulukuun aikana savukaasun lämpötila vaihteli noin 135 ja 165 asteen välillä. Tämä aiheuttaa hyötysuhteeseen noin 2 %:n vaihtelun 87-89 % välillä. Laskentamallin tulosten perusteella voidaan karkeasti todeta, että savukaasun lämpötilan kasvaessa noin 10 asteella käänteisen hyötysuhteen havaitaan alenevan hieman alle 1 %.

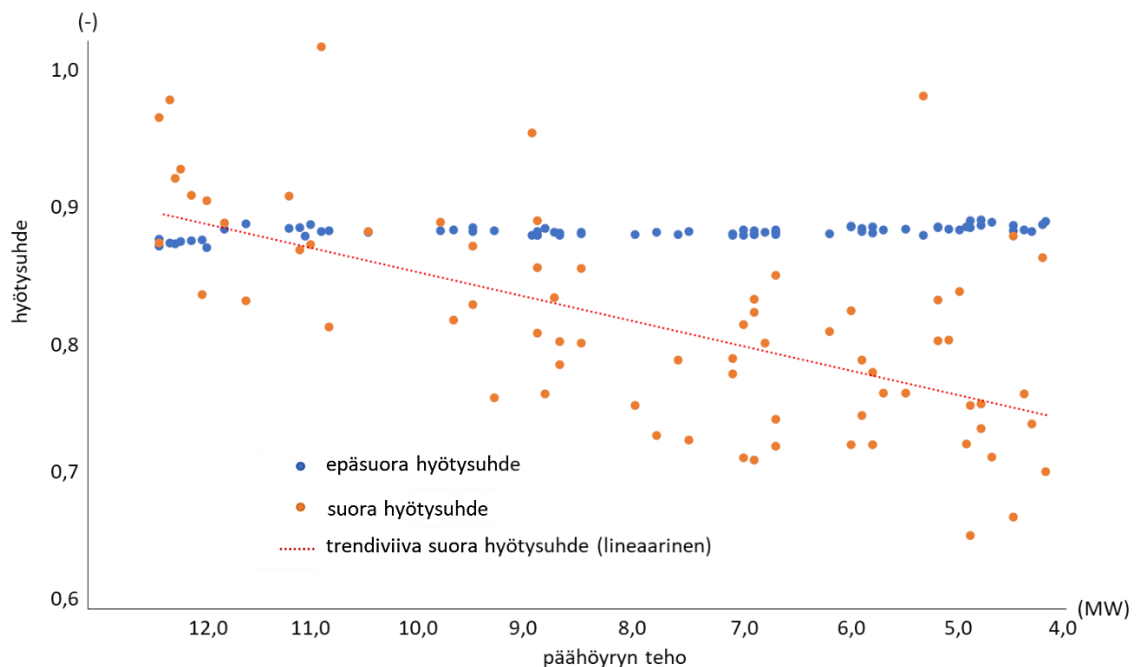
### 5.3 Osakuormatarkastelu

Yksi tämän työn tutkimuskysymyksistä liittyi siihen, miten laitoksen kuormataso vaikuttaa laskennassa määritettyihin hyötysuhteisiin. Yleisesti kattilalla on optimi tehoalue, jossa prosessi toimii parhaalla hyötysuhteella. Tarkasteltavan kattilan optimitehoalue 9-12 MW sijaitsee lähellä kattilan maksimi tehoa. Tämän optimitehoalueen alapuolella hyötysuhteen tulisi oletettavasti hieman heiketä. Keskeisimmät häviöt, joihin kuormitustason muutos vaikuttaa ovat säteilyhäviöt ja savukaasuhäviöt. Säteilähäviöt pysyvät likipitään vakiona kattilan ollessa käynnissä, joten pienillä tehotasoilla niiden hyötysuhdetta heikentävä vaikutus on suurempi kuin suurilla tehotasoilla.

Savukaasuhäviöt käyttäytyvät päinvastoin, sillä laitoskuorman kasvaessa savukaasun lämpötila tyypillisesti kasvaa ja siten savukaasuhäviöt suurenevät. Edellisessä luvussa

esiteltiin savukaasun loppulämpötilan vaikutusta hyötysuhteeseen ja havaittiin, että laitosten lisäksi nuohouksella ja lämpöpintojen puhtaudella on selvästi havaittava yhteys savukaasun lämpötilaan ja siten savukaasuhäviöihin. Näiden tekijöiden vuoksi savukaasuhäviöillä ei ole yhtä selkeää riippuvuutta kuormitustasoon, kuin säteilyhäviöillä tarkastelun kohteena olevalla laitoksella. Tarkasteltavan joulukuun ajanjakson aikana pähöyryn teho vaihteli 4-13 MW välillä. Kuorman vaihtelu on laitokselle ominaista, joulukuussa pyhäpäivien vaikutus korostaa kuorman vaihtelua ja tarjoaa mahdollisuuden tarkastella osakuorma-ajon vaikutusta hyötysuhteeseen.

Aluksi pyrittiin selvittämään koko kuukauden tarkastelujakson suoraa- ja epäsuoraa hyötysuhdetta pähöyryn tehon funktiona. Pisteparvet muodostuivat hyvin hajanaisiksi, eikä selvää trendiviivaa pystytty määrittämään hyötysuhteen ja tehotason välille kuukauden ajanjaksolla. Tästä johtuen tarkastelun kohteeksi valittiin joulukuulta kahden vuorokauden tarkastelujakso 21.12 klo 13.00 - 23.12 klo 13.00. 48 tunnin tarkastelujakson aikana kuormatase laski suhteellisen tasaisesti pähöyryn tehon laskiessa noin 12 MW:sta 4 MW:iin. Tarkastelimme kuormataseen muutoksen vaikutusta laskennallisesti määritettyihin hyötysuhteisiin. Kuukausitaseen hyötysuhdelaskennassa käytettiin savukaasun virtausmittausta hyödyntävää menetelmää ja tunnin välein keskiarvoistettua laitosdataa.



**Kuva 22. osakuormatarkastelu**

Valitulla tarkastelujaksolla epäsuora hyötysuhde pysyi suhteellisen vakiona välillä 87-88 %, eikä riippuvuutta kuormataseen muutokseen pystytty toteamaan. Voidaan todeta, ettei tarkastelukattilan kohdalla käänteisen hyötysuhteen laskentamallin tulosten ja laitoksen

kuormatason välillä ole selkeää riippuvuutta. Laskennan tulosten perusteella ainoastaan savukaasun lämpötilalla voidaan todeta olevan selvästi havaittava vaikutus epäsuoraan hyötysuhteeseen, kuten kuvasta 20 havaittiin. Suoralla hyötysuhteella sen sijaan voidaan havaita alkuolettamusten mukaisesti hyötysuhteen alentumista tehotason laskeessa kattilan optimitehoalueen alapuolelle. Tarkastelujakson aikana suorassa hyötysuhdelaskennassa esiintyi työssä aiemminkin havaittua lähinnä polttoaineen hetkellisen massavirran arvioinnista aiheutuvaa hyötysuhteen heilahtelua. Tästä huolimatta työssä laaditun laskentamallin suora hyötysuhdelaskenta vaikuttaa huomioivan kuormatason muutokset käännteistä määrittystapaa todenmukaisemmin.

## 5.4 Herkkyystarkastelu

Laskentamallille toteutettiin herkkyystarkastelu, jossa testattiin mallin toimivuutta prosessin ominaisuuksien muuttuessa. Skenaariomallinnus toteutettiin savukaasun virtausmittaukseen perustuvalla epäsuoran hyötysuhteen laskentamenetelmälle. Tarkastelu toteutettiin työn laskennassa käytetylle kuuden tunnin tarkastelujaksolle. Savukaasun loppulämpötilan vaikutusta hyötysuhteeseen tarkasteltiin kertomalla tarkasteluhetken todellisia savukaasun lämpötiloja 5, 10 ja 15 % kertoimilla. Jokaiselle ajanhetkelle laskettiin laskentamallilla epäsuora hyötysuhde ja tarkasteltiin hyötysuhteen muutosta savukaasun lämpötilan kasvaessa. Muut laitosmittaukset pysyivät ennallaan, sellaisina kuin ne tarkastelujakson kyseisinä ajanhetkinä todellisuudessakin olivat.

Taulukko 14. Skenaariomallinnus, savukaasun lämpötila

ajanh.	T <sub>sk</sub>	$\eta$	T <sub>sk</sub> *1,05	$\eta$	T <sub>sk</sub> *1,10	$\eta$	T <sub>sk</sub> *1,15	$\eta$
	°C	(-)	°C	(-)	°C	(-)	°C	(-)
1	146,4	0,887	153,7	0,882	161,0	0,878	168,4	0,874
2	150,2	0,887	157,7	0,882	165,2	0,878	172,7	0,873
3	149,0	0,890	156,5	0,885	163,9	0,881	171,4	0,877
4	153,1	0,881	160,8	0,876	168,4	0,871	176,1	0,867
5	153,2	0,884	160,9	0,879	168,5	0,875	176,2	0,870
6	153,9	0,885	161,6	0,880	169,3	0,875	177,0	0,871
7	154,9	0,892	162,6	0,888	170,4	0,884	178,1	0,879
8	158,0	0,881	165,9	0,876	173,8	0,871	181,7	0,866
9	156,3	0,883	164,1	0,878	171,9	0,873	179,7	0,868
10	156,0	0,886	163,8	0,881	171,6	0,876	179,4	0,871
11	157,3	0,884	165,2	0,880	173,0	0,875	180,9	0,870
12	156,8	0,884	164,6	0,879	172,5	0,875	180,3	0,870
<b>KA</b>	153,8	<b>88,5 %</b>	161,4	<b>88,1 %</b>	169,1	<b>87,6 %</b>	176,8	<b>87,1 %</b>

Savukaasuhäviöt muodostavat merkittävimmän yksittäisen häviön. Skenaariomallinnuksen tulosten perusteella hyötysuhteen havaittiin laskevan noin 1 % savukaasun lämpö-

tilan kasvaessa 10 %. Vastaavan suuntaista kehitystä savukaasun lämpötilan ja epäsuoran hyötysuhteen välillä havaittiin joulukuun epäsuoran hyötysuhteen tuloksissa, joita tarkasteltiin kuvissa 20 ja 21. Joulukuun aikana savukaasun lämpötila vaihteli noin 135 ja 165 asteen välillä, kyseinen lämpötilan nousu näkyi hyötysuhteessa noin 2 % laskuna. Herkkyystarkastelun perusteella epäsuoran hyötysuhteen laskentamalli reagoi odotetusti savukaasun loppulämpötilan muutoksiin.

Herkkyystarkastelu toteutettiin laskennassa muutenkin käytetylle kuuden tunnin ajanjaksolle, jonka aikana kuormataso ja savukaasun lämpötila olivat jo todellisessa tilanteessa melko korkeat. Tämän vuoksi herkkyystarkastelun savukaasun lämpötilat ovat osin epätodellisen korkeita. Tämä ei kuitenkaan vaikuta herkkyystarkastelun perusteella tehtäviin johtopäätöksiin olennaisesti. Etenkin suoran hyötysuhteen tapauksessa olisi hyvä tarkastella myös polttoaineen aineominaisuuksien, etenkin kosteuden vaikutusta laskentamallin hyötysuhteeseen. Tätä testattiin, mutta havaittiin että pelkkä polttoaineen kosteuden muutos laskentamallissa ei vastaa todellisuutta kovinkaan hyvin. Polttoaineen kosteuden muutos vaikuttaa esimerkiksi käytettäviin palamisilmamääriin ja syntyneen savukaasun määrään ja ominaisuuksiin. Herkkyystarkastelussa polttoaineen kosteuden muutos olisi vaikuttanut hyötysuhteeseen vain muuttuneen lämpöarvon kautta, joten sen tarkastelu ei olisi mielekäästä, eikä antaisi kuvaa todellisesta vaikutuksesta.

## 5.5 Tutkimuksen analysointi

Ennen varsinaista hyötysuhdelaskentaa määritettiin kattilaan syötettävät energiavirrat, mikä tämän työn laskennassa tarkoitti lähinnä kattilaan syötettävän polttoainevirran määritystä. Työssä sovellettiin polttoainevirran määritykseen kahta rinnakkaista määrittäytapaa. Toinen hyödynsi savukaasun virtausmittausta ja toinen polttoaineen syöttöruuvin käyntitietoa. Kummallakin menetelmällä saatiin määritettyä polttoaineen massavirran hetkellinen arvo melko samansuuruisiksi. Ainoa tieto mihin näiden menetelmien luotettavuutta pystyttiin arvioimaan, oli tarkasteltavan laitoksen kuukausitason polttoaine toimitukset. Niihin suhteutettuna hetkellisen määrityksen menetelmät tuottivat kuukausitason tarkastelun perusteella saman suuruusluokan polttoaineen kulutuksen. Hetkelliseen polttoainevirran arviointiin aiheuttaa kuitenkin epävarmuutta polttoaineen ominaisuuksien vaihtelu, mikä on merkittävin virhelähde kattilaan syötettäviä energiavirtoja määrittäessä. Laskennassa polttoaineominaisuuksina käytettiin tarkastelujakson keskiarvo ominaisuuksia.

Kattilaan syötettävien energiavirtojen määrittämiseen liittyvä epävarmuus aiheutti suurta hajontaa erityisesti laskettaessa hyötysuhdetta suoralla määrittämällä. Suora määrittämistapa määrittää hyötysuhteen kattilasta hyödyksi saatavien ja sinne syötettävien energiavirtojen suhteena. Hyödyksi saatavat energiavirrat määritetään lauhteen ja päähöyryn laitosmittausten perusteella. Kattilaan syötettävät energiavirrat puolestaan arvioidaan laskennallisesti savukaasuanalyysin avulla menetelmästä riippuen joko savukaasun virtausmittauksen tai polttoaineen syöttöruuvien avulla. Tällöin poikkeamat savukaasun virtausmittauksessa tai syöttöruuvien käyntitiedossa yhdessä polttoaineen aineominaisuuksien vaihtelun kanssa aiheuttavat epävarmuutta energiavirtojen arviointiin ja näkyvät voimakkaana hajontana suoran hyötysuhteen määrittämisessä.

Epäsuorassa hyötysuhteessa vastaavaa hajontaa ei ilmennyt, sillä hyötysuhdetta ei määritetä hyödyksi saatavien ja kattilaan syötettävien energiavirtojen suhteena, vaan yksittäisten häviöiden summan ja kattilaan syötettävien energiavirtojen suhteena. Yksittäisten häviöiden määrittäminen perustuu pitkälti laitosmittauksiin, eikä syötettävien energiavirtojen määrittämiseen liittyvä epävarmuus aiheuta suurta hajontaa epäsuoraan hyötysuhteeseen. Tutkimuksessa havaittiin savukaasuhäviön merkittävä vaikutus epäsuoralla laskentatavalla määritettyyn hyötysuhteeseen. Savukaasuhäviö muodostaa ylivoimaisesti suurimman yksittäisen häviön ja sen myötä savukaasun loppulämpötilalla ja savukaasun tilavuusvirralla havaittiin olevan merkittävä vaikutus tällä laskentatavalla määritettyyn hyötysuhteeseen.

Osakuorma-ajon vaikutusta hyötysuhteeseen ei pystytty epäsuoralla määrittämällä todentamaan. Epäsuora hyötysuhde pysyi suhteellisen vakiona 87-89 %, eikä yhteyttä kuormatason vaihtelun ja laskentamallilla määritetyn epäsuoran hyötysuhteen välille pystytty toteamaan. Eräs keskeinen tähän vaikuttava tekijä on savukaasuhäviön suuri vaikutus epäsuoraan hyötysuhteeseen. Havaintojen perusteella savukaasun lämpötila ei ollut niinkään riippuvainen kuormatasosta, vaan tarkastelun kohteena olevalla laitoksella suhteellisen säännöllisesti tapahtuvasta nuohouksesta. Nuohous vaikutti lämpöpintojen puhtauden kautta olennaisesti savukaasun loppulämpötilaan ja sitä kautta savukaasuhäviöön ja epäsuoraan hyötysuhteeseen. Suora hyötysuhteen määrittämistapa sen sijaan huomioi osakuorma-ajon tarkastelujakson tulosten perusteella. Suoralla laskentatavalla määritetty hyötysuhde laski hieman kuormatason laskiessa laitoksen optimi tehoalueelta.

Laskentaa toteutettiin aluksi kuuden tunnin tarkastelujaksolle, jolle hyödynnettiin sekä savukaasun virtausmittausta, että polttoaineen syöttöruuvien käyntitietoa hyödynnettävää

menetelmää. Myöhemmin laskenta toteutettiin koko kuukauden tarkastelujaksolle, johon valikoitui savukaasun virtausmittausta hyödyntävä laskentamenetelmä. Kuukauden tarkastelujakson tulokset epäsuoran ja suoran laskentatavan välillä poikkesivat jonkin verran toisistaan. Epäsuoran määrittämisen kuukauden keskiarvo oli 87,8 % ja suoran 82,9 %. Laitoksen energialaskentaan pohjautuva kuukauden hyötysuhde oli 86,0 %.

Yhtenä työssä laaditun laskentamallin heikkoutena voidaan pitää tulosten suhteellisen suurta hajontaa, minkä johdosta on haastavaa todeta, kumpi määrittämistapa tuottaa luotettavamman tuloksen. Epäsuora määrittämistapa tuottaa hieman laitoksen omaa energialaskentaa suuremman kuukausitason keskiarvo hyötysuhteen. Työssä rakennettu laskentamalli ei todennäköisesti huomioi kaikkia todellisia häviöitä, kuten erilaisia vuotoja tai höyrynuohouksen häviöitä. Kuukausitason tulosten perusteella suora hyötysuhde näyttää huomioivan melko hyvin osakuorma-ajon. Suoran laskentatavan heikkoutena hetkellisen hyötysuhteen määrittämisessä voidaan kuitenkin pitää hetkellisten energiavirtojen arviointiin liittyviä haasteita, jotka aiheuttavat tuloksiin hajontaa ja heikentävät suoran määrittämisen luotettavuutta.

Työn voidaan monilta osin todeta onnistuneen tavoitteessaan, joskin tuloksiin liittyvän epävarmuuden vuoksi jatkotutkimuksia olisi tehtävä, jotta työssä kehitettyjä laskentamenetelmiä voitaisiin hyödyntää laajemmassa mittakaavassa. Tiettyihin tässä työssä käytettyihin laitosmittauksiin kohdistui epävarmuutta, joten tiettyjen laitosmittausten oikeellisuus tulisi todentaa tulosten luotettavuuden arvioimiseksi. Tämän lisäksi työn laskentamallia voisi tarkastella myös muilla vastaavan kokoluokan ja tekniikan laitoksilla laskentamallin kehittämiseksi ja arvioimiseksi. Työn tulokset osoittivat kuitenkin, että käytönäikaisen hyötysuhteen määrittäminen muutamien keskeisimpien laitosmittausten datan avulla on mahdollista ja toimiva käytönäikaisen hyötysuhteen laskenta voisi toimia tulevaisuudessa yhtenä lisätyökaluna laitoksen toiminnan tehokkuutta tarkasteltaessa.

## 6. YHTEENVETO

Työssä määritettiin käytönaikainen hyötysuhde tarkastelun kohteena olevalle lämpölaitoskattilalle epäsuoralla- ja suoralla määrittävällä standardin SFS-EN 12952-15 laskentamenetelmiä hyödyntäen. Laskenta toteutettiin puolen tunnin ja tunnin välein keskiarvoistetulle laitosdatalle. Käytettävissä oleva mittaustiedot ei mahdollista lyhyemmän aikavälin tarkastelua, eikä se myöskään työn tavoitteiden valossa olisi tarpeellista. Työn laskennassa kattilaan syötettävien energiavirtojen määrittämiseen sovellettiin kahta rinnakkaista menetelmää. Savukaasun virtausmittauksen avulla pystyttiin määrittämään polttoaineen massavirta savukaasuanalyysillä, tämän lisäksi massavirta pystyttiin arvioimaan työssä tehdyllä polttoaineen syöttöruuvin sovitteella. Savukaasun virtausmittausta hyödyntävää menetelmää käytettiin lopulta kuukausitason laskennassa.

Työssä suoritettuun laskentaan liittyy epävarmuuksia, joista olennaisin aiheutuu kattilaan syötettävien energiavirtojen arvioinnista polttoaineen massavirtaa ja polttoaine ominaisuuksia arvioitaessa. Tämä korostuu etenkin suorassa hyötysuhteen määrittävällä. Epäsuorassa määrittävällä korostuu puolestaan savukaasun loppulämpötilan vaikutus, joka vaikuttaa olennaisesti merkittävimpään häviöön eli savukaasuhäviöön ja sitä kautta koko epäsuoraan hyötysuhteeseen.

Tuloksissa esiintyi jonkin verran hajontaa. Epäsuoran määrittävällä kuukauden hyötysuhteiden keskiarvo oli 87,8 % ja suoran 82,9 %. Laitoksen energialaskentaan pohjautuva kuukauden hyötysuhde oli 86,0 %. Tulosten ja herkkyysanalyysin perusteella laskentamalli vastaa monilta osin todellisuutta, mutta niin epäsuora- kuin suora laskentamallikin sisältävät runsaasti olettamuksia ja yksinkertaistuksia, eivätkä siten täysin vastaa todellisuutta tarkastelun kohteena olevalla laitoksella. Kuorman vaihtelun vaikutus hyötysuhteeseen nousi esille ainoastaan suoran hyötysuhteen laskentamallissa.

Työn laskenta pyrittiin toteuttamaan keskeisimpien laitosmittauksien arvoja hyödyntäen, jotta laskentamallia voitaisiin hyödyntää myös muilla saman tyyppisillä laitoksilla mahdollisimman vähäisin muutoksia. Laskennassa hyödynnettiin lauhteen ja pähöyryn, palamisilmojen ja savukaasun, sekä polttoaineen syöttöruuvin laitosmittauksia. Näiden lisäksi hyödynnettiin polttoainemäärityksen aineominaisuuksia ja joitakin aineominaisuuksien vakio arvoja.

Työn keskeisin tavoite oli tutkia käytönaikaisen hyötysuhteen määrittämisen mahdollisuuksia käytettävissä olevien laitosmittausten datan avulla. Työn tulokset osoittivat, että käytönaikainen hyötysuhde on mahdollista määrittää suhteellisen yksinkertaisin menetelmin ja vain olennaisimpia laitosmittauksia hyödyntäen. Tämä luo edellytykset työssä luodun laskentamallin soveltamiselle myös muille vastaavan kokoluokan ja kattilatyypin laitoksille melko vähäisin muutoksin.



# LÄHTEET

- [1] Ympäristöministeriön verkkojulkaisu. Glasgown ilmastokokous COP26. Saatavilla (viitattu 20.3.2022): <https://ym.fi/etusivu> > Vastuualueet > Ilmasto > Kansainvälinen ilmastopolitiikka > Glasgown ilmastokokous COP26
- [2] Työ- ja elinkeinoministeriön verkkojulkaisu. 2017. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Saatavilla (viitattu 20.2.2022): <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-190-6>, s.35-40
- [3] Raiko, M., Lyytikäinen, R., Vessonen, K., Mielonen, P. 1991. Voimalaitoksen hyötysuhteeseen vaikuttavat tekijät. s.1,19
- [4] Euroopan komission verkkojulkaisu. 2019. Tavoitteena ilmastoneutraalius vuoteen 2050 mennessä: strateginen pitkän aikavälin visio kukoistavasta, nykyaikaisesta, kilpailukykyisestä ja ilmastoneutraalista EU:n taloudesta. Saatavilla (viitattu 20.3.2022): <https://data.europa.eu/doi/10.2834/810964>, s. 9-10
- [5] IRENA, International Renewable Energy Agency. 2018. Bioenergy from Finnish Forests: Sustainable, efficient and modern use of wood. s. 9-15
- [6] Borman, G., Ragland, K. 1998. Combustion engineering. s. 203
- [7] Jalovaara, J., Aho, J., Hietämäki, E., Hyytiä, H. 2003. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5-50 MW:n polttolaitoksissa Suomessa, Suomen ympäristökeskus. Saatavilla (viitattu 20.3.2022): <http://hdl.handle.net/10138/40560>. s. 16-19, 28-33
- [8] Joronen, T., Kovacs, J., Majanne, Y. 2015. Voimalaitosautomaatio. 4. painos. s. 9, 150
- [9] Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P., Pakkanen, H. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. painos. s. 12, 84, 101-110, 146-159, 186, 263, 298

- [10] Merrit, C. 2016. Process Steam Systems. s. 22-26, 68, 272
- [11] Ympäristöministeriön julkaisut. 2012. Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta. s. 11, 30
- [12] Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T., Urpalainen, S. 2013. Voimalaitostekniikka. 4. painos. s. 21, 35-43, 64-65, 103, 154-171
- [13] Energiavirasto. päästöoikeuksien huutokaupat 2013-2020. Saatavilla (viitattu 21.3.2022): <https://energiavirasto.fi/etusivu> > Toimialat > Päästökauppa > Päästöoikeuksien huutokauppa > Toteutuneet kaupat > Päästöoikeuksien huutokaupat 2013-2020 (excel).
- [14] Sitra. 2020. Turpeen rooli ja sen käytöstä luopumisen vaikutukset Suomessa. Saatavilla (viitattu 15.1.2022): <https://www.sitra.fi/julkaisut/turpeen-rooli-ja-senkaytosta-luopumisen-vaikutukset-suomessa/>
- [15] Suomen virallinen tilasto (SVT): verkkojulkaisu ISSN=1798-775X. 2020. Teollisuuden energiankäyttö. Saatavilla (viitattu 24.3.2022): [http://www.stat.fi/til/tene/2020/tene\\_2020\\_2021-11-01\\_tie\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/tene/2020/tene_2020_2021-11-01_tie_001_fi.html).
- [16] Suomen virallinen tilasto (SVT): verkkojulkaisu ISSN=1798-5072. 2020. Sähkön ja lämmön tuotanto. Saatavilla (viitattu 1.4.2022): [http://www.stat.fi/til/salatu/2020/salatu\\_2020\\_2021-11-02\\_tie\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/salatu/2020/salatu_2020_2021-11-02_tie_001_fi.html).
- [17] Supajärvi, H., Iljana, M., Haapakangas, J. 2013. Biomateriapohjaisten ja vaihtoehtoisten raaka-aineiden ja tuotteiden fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet. s.62
- [18] Raiko, R., Kurki-Suonio, I., Saastamoinen, J., Hupa, M. 1995. Poltto ja palaminen. s. 20-22, 49, 105, 174, 257, 397, 398
- [19] VTT Technical Research Centre of Finland. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Saatavilla (viitattu 15.1.2022):<https://publications.vtt.fi/pdf/technology/2016/T258.pdf>. s. 18-24, 40-55, 197, 204
- [20] Standardi SFS-EN 12952-15

- [21] Pesonen, J., Kuokkanen, T., Kaipainen, E. 2014. Chemical and physical properties of short rotation tree species. saatavilla (viitattu 20.3.2022):  
<https://doi.org/10.1007/s00107-014-0841-5>
- [22] Jätelaitosyhdistys verkkosivut > Arinapoltto. Saatavilla (viitattu 21.3.2022):  
<http://vanha.jly.fi/energia31.php?treeviewid=tree3&nodeid=3>.
- [23] Thirumaleshwar, M. 2007. Fundamentals of Heat and Mass transfer. 6th edit.

