

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikka / Voimalaitoksen käynnissäpito

Esa Hildén

Kattilan hyötysuhteen määrittäminen

Opinnäytetyö 2010

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikka

HILDÉN, ESA

Opinnäytetyö

Työn ohjaajat

Toimeksiantaja

Huhtikuu 2010

Avainsanat

Kattilan hyötysuhteen määrittäminen

44 sivua + 5 liitesivua

Lehtori Risto Korhonen

Tutkimusinsinööri Mikko Nykänen

Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, päästömittauslaboratorio

hyötysuhde, häviöt, standardi, päästöt, laskentaohjelma

Tämä opinnäytetyö on laadittu Kymenlaakson ammattikorkeakoulun päästömittauslaboratoriolle. Työn tarkoituksena oli tutkia ja määrittää kattilan hyötysuhdetta sekä kehittää päästömittauslaboratorion käytössä olevaa laskentaohjelmaa. Päästömittauslaboratorio tekee päästöjä vähentävää tutkimustyötä ja määrittää asiakkaiden kattiloiden hyötysuhteita häviöiden kautta. Laboratorion käytössä oleva laskentaohjelma tarvitsi kehitystä hyötysuhteen määrittämistä varten.

Opinnäytetyön teko alkoi laskentaohjelman tutkimisella. Oli selvitettävä, mistä laskentakaavat tulevat ja mitä ne pitävät sisällään. Laskentaohjelmaan kaivattiin lisää tarkkuutta laskentaan ja selkeyttä sen käyttöön sekä ulkonäköön. Haluttiin yhden sivun laskentapohja, jossa laskettaisiin kaikki tarpeelliset laskennat kattilan hyötysuhteen määrittämisessä epäsuoralla menetelmällä täydellä sekä puolella polttoaineteholla.

Tietoa työhön kerättiin pääasiassa energia-alan kirjallisuudesta ja Internetistä. Laskentaohjelman laskentaan saatiin lisää kaivattua tarkkuutta sekä ulkonäköä saatiin kokennettua. Toivon, että tämä työ auttaa selventämään kattilan hyötysuhteen määrittämistä ja että laskentapohjan kehityksestä olisi hyötyä päästömittauslaboratoriolle.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Energy Engineering

HILDÉN, ESA

Bachelor's Thesis

Supervisor

Commissioned by

April 2010

Keywords

Evaluation of Boiler Efficiency

44 pages + 5 pages of appendices

Risto Korhonen, Senior Lecturer

Mikko Nykänen, R&D Engineer

Kyminlaakso University of Applied Sciences, Emission
Measurement Laboratory

efficiency, losses, standard, emission, calculation program

This thesis was commissioned by Kymenlaakso University of Applied Sciences' emission measurement laboratory. The purpose of the work was to investigate and determine its boiler's efficiency and improve the current calculation program. The emission measurement laboratory does research regarding emission cut downs and determines the efficiency of customers' boilers through losses. The laboratory's current calculation program is in need of development for determining the efficiency.

The thesis began by investigating the calculation program. First, it was necessary to clarify where the calculation equations come from and what they consist of. The calculation program needed more precise computing, and the user-interface and its management needed a cleaner look. The aim was to have a one-page calculation layout where all the needed calculations regarding the boiler's efficiency could be calculated. The calculations would be done with an indirect method with both full and half fuel power settings.

The information for the work was gathered mainly from literature in the field of energy and from the Internet. The calculation program got the desired precision improvement and the user-interface got a new cleaner look. The wish is that the result of this work will be of help to determining the boiler's efficiency and that the improvement made in the calculation layout would be to the benefit of the emission measurement laboratory.

ALKUSANAT

Tämän työn toimeksiantaja on Kymenlaakson ammattikorkeakoulun päästömittauslaboratorio.

Haluan kiittää työni ohjaajia tutkimusinsinööri Mikko Nykästä päästömittauslaboratoriolta sekä lehtori Risto Korhosta Kymenlaakson ammattikorkeakoulusta.

Eriyisesti haluan myös kiittää päästömittauslaboratorion projekti-insinööri Hannu Sarvelaista.

Kiitokset haluan myös osoittaa tyttöystävälleni Virvelle sekä opiskelutoverilleni Perttu Isomäelle taustatukena toimimisesta.

Kotkassa 20.4.2010

Esa Hildén

SYMBOLIT JA LYHENTEET

A	kattilan ulkoseinän pinta-ala, m ²
a_k	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin
a_r	säteilyn lämmönsiirtokerroin
$c_{p(i)}$	ilman ominaislämpö, kJ/kgK
$c_{p(pa)}$	polttoaineen ominaislämpö, kJ/kgK
$c_{p(tuhka)}$	tuhkan ominaislämpö (lentotuhka 0,84 kJ/ kgK; pohjatuhka 1,00 kJ/kgK)
c_{psk}	savukaasun ominaislämpö, kJ/kgK
H_{CO}	palamattomien kaasujen lämpöarvo MJ/kg
H_{tuhka}	palamattoman lämpöarvo, MJ/kg
H_u	polttoaineen lämpöarvo, MJ/kg
$H_{u(kuiva)}$	kuivan polttoaineen tehollinen lämpöarvo, MJ/kg
h_{evt}	höyryn entalpia ennen välitulistusta, kJ/kg
h_{jvt}	höyryn entalpia välitulistimen jälkeen, kJ/kg
h_{sv}	syöttöveden entalpia, kJ/kg
h_{th}	tuorehöyryn entalpia, kJ/kg
h_{UP}	ulospuhallusveden entalpia, kJ/kg
k	kosteuskerroin
l	veden höyrystymislämpö (2,443 MJ/kg kun t = 25 °C)
luvo	ilman esilämmitin
\dot{m}_i	palamisilmavirta, kg/s
\dot{m}_{pa}	polttoainevirta, kg/s
\dot{m}_{pal}	palamatta jäänyt kiintoaineena poistuva polttoaine, kg/s
\dot{m}_{sk}	savukaasun massavirta, kg/s
\dot{m}_{sk} / \dot{m}_p	kuiva savukaasuvirta (m ³ sk/kgpa)
\dot{m}_{UP}	ulospuhalluksen massavirta, kg/s
\dot{m}_{vt}	välitulistushöyryn massavirta, kg/s
p	tuhkan hehkutushäviö, %

\dot{Q}	kattilaan tuotuja energiavirtoja ja kattilahäviöt
q_{CO}	palamattomien kaasujen (CO) häviö
q_{lhs}	lämpöhäviöt säteilyinä
q_p	savukaasuja muodostavan polttoaineen osuus
q_{pal}	savukaasuja muodostavan polttoaineen osuus (palamattomien kiintoainesten häviö)
q_{sk}	savukaasuhäviö
q_{tuhka}	tuhkan mukana poistuva terminen lämpöenergia
t	aineen lämpötila kattilaan tullessa, °C
$t_{seinä}$	kattilan ulkoseinän lämpötila, °C
t_{sk}	savukaasun loppulämpötila, °C
t_{ymp}	ympäristön lämpötila, °C
t_0	vertailulämpötila, °C
u	polttoaineen kosteussuhde (veden ja kuivan polttoaineen suhde)
x_{CO}	palamattomien kaasujen (CO) pitoisuus kuivissa savukaasuissa (kg CO/m ³ sk)
x_{H_2O}	polttoaineen kosteus, %
x_t	polttoaineen tuhkapitoisuus, %
x_{tuhka}	polttoaineen tuhkapitoisuus kuivasta polttoaineesta, %
η	kattilan hyötysuhde, %

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SYMBOLIT JA LYHENTEET

1	JOHDANTO	9
2	KATTILAN HYÖTYSUHTTEEN MÄÄRITTÄMISEN TEORIA	10
	2.1 Suora menetelmä	10
	2.2 Taseraja	11
	2.3 Epäsuora menetelmä	12
	2.3.1 Palamattomien häviöt	12
	2.3.1.1 Palamattomien kaasujen häviöt	13
	2.3.1.2 Palamattomien kiintoaineiden häviöt	13
	2.3.2 Savukaasujen terminen lämpöhäviö	13
	2.3.3 Tuhkan mukana poistuva terminen lämpö	14
	2.3.4 Säteilyhäviöt	14
3	KATTILAN HYÖTYSUHTTEEN MÄÄRITTÄMINEN LASKENTAKAAVOILLA	16
	3.1 Hyötysuhteen määrittäminen suoralla menetelmällä	16
	3.2 Hyötysuhteen määrittäminen epäsuoralla menetelmällä	20
	3.2.1 Palamattomien häviöt	21
	3.2.2 Savukaasujen ja tuhkan termisen lämmön häviö	23
	3.2.3 Säteilyhäviöt	25
4	KATTILAN HYÖTYSUHTTEEN LASKENTAMALLI	25
	4.1 Hyötysuhteen laskenta suoralla menetelmällä	25
	4.2 Hyötysuhteen laskenta epäsuoralla menetelmällä	27
5	PÄÄSTÖT	29
	5.1 Hiilimonoksidi	30
	5.2 Hiilivedyt	30
	5.3 Kiintoainepäästöt	30
	5.4 Rikkidioksidi	31
	5.5 Typen oksidi	31

5.6 Hiilidioksidi	31
6 ESIMERKKEJÄ KATTILAN HYÖTYSUHTEEN HEIKKENEMISEEN	32
6.1 Kattilan hyötysuhteen heikkenemiseen liittyvä laskuesimerkki	33
7 LASKENTAOHJELMAN KEHITTÄMINEN	35
7.1 Ulkonäkö	35
7.2 Lämmönsiirtokertoimen määrittäminen	36
7.3 Ominaislämpökapasiteettien määrittäminen	39
7.4 Kaasumaisten polttoaineiden lämpöarvot	41
7.5 Muut uudistukset	41
8 YHTEENVETO	42

LIITTEET

Liite 1. Kuvaajat 2 kpl

Liite 2. Taulukot

Liite 3. Laskentaohjelmapohja

1 JOHDANTO

Kymenlaakson ammattikorkeakoulun päästömittaustalaboratorio keskittyy maalaitosten ja moottoreiden poistokaasujen päästömittauksiin. Jo vuodesta 1993 lähtien päästömittaustalaboratorio on osallistunut TEKESin tutkimusohjelmiin ja tehnyt päästöjä vähentävää tutkimustyötä. Päästömittaustalaboratorio on akkreditoitu talaboratorio ja helmikuussa 2010 akkreditoinnin laajennuksen myötä talaboratorio sai pätevyysalueen laajennuksen. Vastaavia akkreditoituja moottoreiden päästömittaustalaboratorioita on Suomessa vain kaksi.

Tämä opinnäytetyö käsittelee kattilan hyötysuhteen määrittämistä ja siihen tarkoitettun laskentaohjelman kehittämistä päästömittaustalaboration käyttöön. Laskentaohjelma on Excel-taulukkolaskentapohjainen ja se on luotu vuonna 2002.

Kattilan hyötysuhde on tässä työssä määritetty sekä suoralla että epäsuoralla menetelmällä. Kattilan häviöt on myös otettu huomioon laskennassa. Kattilan hyötysuhteen on paneuduttu niin teorian kuin laskennan kautta. Laskemista varten on kehitetty laskentaohjelma, jolla pystytään määrittämään kattilan hyötysuhde epäsuoralla menetelmällä. Laskentaohjelmalla pystytään laskemaan kattilan hyötysuhteet 50 %:n ja 100 %:n kuormitukselle.

Opinnäytetyön keskeisenä tavoitteena onkin kehittää laskentaohjelma tämän hetken käyttövaatimusten mukaiseksi sekä selvittää kattilan hyötysuhteen laskentaa. Kattilasta aiheutuvat päästöt ovat myös tutkinnan kohteena. Laskentaohjelman tulisi olla käytännöllinen ja selkeästi luettavissa, koska päästömittauksia tehdään asiakkaille. Asiakkaille annetaan laskentaohjelman laskennan tulokset, josta he näkevät kattilansa hyötysuhteen sekä häviöt ja voivat tehdä tarvittaessa kattilan hyötysuhteen parantamiseen korjauksia, jos se on mahdollista.

Opinnäytetyö on jaettu kahteen eri vaiheeseen. Ensimmäinen vaihe on hyötysuhteen määrittäminen niin teoriassa kuin laskentakaavoilla. Samalla paneudutaan kattilan päästöihin sekä kattilan hyötysuhteen heikkenemiseen vaikuttaviin tekijöihin. Toisessa vaiheessa paneudutaan laskentaohjelman kehitykseen ja siihen tehtyihin muutoksiin.

2 KATTILAN HYÖTYSUHTTEEN MÄÄRITTÄMISEN TEORIA

Kattilan hyötysuhteella tarkoitetaan kattilasta hyödyksi saadun lämpövirran suhdetta kattilaan tuotuun energiavirtaan. Euroopassa kattilan hyötysuhteen määrittämisessä noudatetaan yleisesti saksalaista DIN 1942 -standardia. Amerikkalainen standardi poikkeaa eurooppalaisesta lähinnä määrittämiseen valitun polttoainelämpöarvojen osalta. [1]

Kattilan hyötysuhteen määrittämisessä on käytössä kaksi hieman toisistaan poikkeavaa menetelmää: suora menetelmä ja epäsuora menetelmä. Suora menetelmä perustuu kattilasta hyödyksi saatavan energiavirran määrittämiseen. Epäsuora menetelmä perustuu puolestaan kattilan häviöiden määrittämiseen sekä hyötysuhteen määrittämiseen häviöiden kautta. [1]

Yleisesti kattilan tehon laskiessa maksimista kattilan hyötysuhde hieman kasvaa. Tämä johtuu siitä, että pienemmillä tehoilla kattiloiden lämmönsiirtimet toimivat pienemmällä lämpötilaeroilla, jolloin on mahdollista jäähdyttää savukaasut kylmemmiksi ja sitä kautta pienentää savukaasuhäviöitä. Pienemmällä kuormalla hyötysuhde alkaa voimakkaasti laskea. Tämä johtuu mm. kuormasta riippumattomista lämpöhäviöistä. [1]

Kattiloiden hyötysuhteeseen vaikuttavat myös mm. polttoaine ja polttotapa.

2.1 Suora menetelmä

Kattilan hyötysuhdetta, jossa mitataan suoraan kattilasta saatu hyötylämpövirta sekä kattilaan viety energiavirta nimitetään suoralla menetelmällä määritetyksi hyötysuhteeksi. [1]

Kattilaan tuotava energia voidaan jakaa polttoainevirtaan verrannolliseen osaan ja polttoainevirrasta riippumattomaan osaan. Polttoainevirtaan verrannollisia kattilaan tuotavia energiavirtoja ovat [2, s. 101]

- polttoaineeseen sitoutunut kemiallinen energia

- polttoaineen esilämmitykseen sitoutunut energia
- palamisilman esilämmitykseen sitoutunut energia

Kattilan hyötysuhteen määrittämisessä käytetään polttoaineeseen sitoutuneen kemiallisen energian mittana DIN 1942 –standardissa polttoaineen alemmaa tehollista lämpöarvoa, jolloin ajatellaan, että savukaasuihin muodostuneen vesihöyryn lauhtumislämpöä ei ole mahdollista saada kattilassa talteen. Amerikkalaisissa standardeissa hyötysuhteen määrittämisessä käytetään puolestaan polttoaineen ylempää lämpöarvoa. [2, s.101]

Polttoaineen ja palamisilman esilämmityksen mukana kattilaan tuodut energiavirrat saadaan laskettua, kun tunnetaan ainevirrat, ominaislämpö ja lämpötilat. Kattilaan tulee myös polttoainemäärästä riippumattomia energiavirtoja, kuten

- höyrytoimisen ilman esilämmittimen lämmitys
- polttoaineen hajotushöyry (öljyllä)
- myllyjen, pumppujen ja puhaltimien sähkömoottoreiden käyttö
- tulistuksen säätöön käytetty ruiskutusvesi.

Näidenkin määrä on selvitettävä tapauskohtaisesti ja otettava huomioon tarkemmissa laskelmissa. [1]

2.2 Taseraja

Kattilan hyötysuhteen määrittämistä varten tulee määritellä tarkasti taseraja, jonka yli meneviä energiavirtoja tarkastellaan. Kattilan taserajaa määriteltäessä on otettava huomioon, että energiavirrat voidaan määrittää riittävän tarkasti. Taseraja laaditaan DIN 1942 –standardin mukaan. Sen mukaisesti kattilaan katsotaan kuuluvaksi itse kattilan lämpötilojen lisäksi

- polttoaineen jauhatuslaitteisto
- ilman esilämmitykseen käytetty luvo
- pakkokierto-pumppu
- savukaasujen kierrätyspuhallin.

Sen sijaan taserajan ulkopuolelle on jätetty savukaasu- ja ilmapuhaltimet.

Kattilan taseraja voidaan määritellä myös tapauskohtaisesti, jolloin esim. savukaasun puhdistuslaitteisto sisällytetään taserajan sisäpuolelle. [2, s. 101]

2.3 Epäsuora menetelmä

Epäsuora menetelmä perustuu kattilan häviöiden määrittämiseen ja hyötysuhteen määrittämiseen häviöiden kautta. [1] Tätä menetelmää käytettäessä saadaan parempi käsitys siitä, mitkä tekijät huonontavat kattilan hyötysuhdetta ja minkälaisiin toimenpiteisiin kannattaisi ryhtyä hyötysuhteen korjaamiseksi. [2, s. 104]

Kattilan häviöt koostuvat

- palamattomien häviöistä (palamaton aines tuhkassa, palamattomat kaasut)
- tuhkan termisestä lämmöstä
- savukaasujen termisestä lämmöstä
- säteily- ja johtumishäviöistä.

Näiden lisäksi kattilan hyötysuhdetta heikentävät kattilan epäjatkuvasta käytöstä aiheutuvat häviöt, kuten käynnistyshäviö, pysäytyshäviö ja läpivirtaushäviö. [2, s.104-105]

2.3.1 Palamattomien häviöt

Kattilassa osa polttoaineesta voi jäädä palamatta. Palamishyötysuhteella tarkoitetaan palaneen polttoaineen suhdetta kattilaan syötettyyn polttoaineeseen. Nykyaikaisten polttolaitteiden palamishyötysuhde on hyvin lähellä yhtä. Palamatta jäänyt polttoaine voi kattilasta poistua joko kaasumaisessa muodossa savukaasujen mukana tai kiinteässä muodossa tuhkan ja kuonan mukana. Palamishyötysuhde määritetään määrittämällä savukaasuissa olevien palamattomien kaasujen ja tuhkan sisältämän palamatta jääneen polttoaineen määrän. [2, s. 105]

2.3.1.1 Palamattomien kaasujen häviöt

Palamatta jääneet kaasut voivat olla epätäydellisesti palanutta hiiltä eli hiilimonoksidia tai erilaisia hiilivetyjä. Suurten voimalaitoskattiloiden savukaasuissa esiintyvät palamattomat kaasut ovat lähinnä hiilimonoksidia eli häkää. [2, s.105]

Mikäli savukaasujen CO-pitoisuus on 0,5 %, tämä vastaa muutaman prosentin laskua kattilahyötysuhteessa. Palamattomien hiilimonoksidikaasujen päästöt voimalaitoskattiloissa ovat yleensä kuitenkin hyvin pieniä (luokkaa 50 ppm), joten niistä aiheutuvat häviöt ovat vain prosentin osia. [2, s. 105]

2.3.1.2 Palamattomien kiintoaineiden häviöt

Kattilasta palamatonta polttoainetta voi poistua myös lentotuhkan tai kattilan tulipesän pohjalta poistuvan pohjatuhkan mukana. Palamatta jääneen polttoaineen osuus tuhkasaa saadaan määritettyä polttamalla tuhka laboratoriossa eli määrittämällä tuhkan ns. hehkutushäviö. [2, s.106]

Palamatta jäävän polttoaineen aiheuttama häviö riippuu polttoaineesta ja polttotekniikasta sekä laitteiden kunnosta ja säädöistä. Huonolaatuiset, alhaisen lämpöarvon omaavat polttoaineet pyrkivät kasvattamaan palamatta jääneen polttoaineen häviötä useisiin prosentteihin. Sen sijaan hyvin säädetyillä polttolaitteilla ja hyväkuntoisilla nestemäisillä ja kaasumaisilla polttoaineilla häviöt jäävät alle prosentin luokkaan. [2, s. 107]

2.3.2 Savukaasujen terminen lämpöhäviö

Kuumien savukaasujen mukana kattilasta poistuva energia edustaa yleensä suurinta osaa kattilan häviöistä. Häviötä, jota kutsutaan yleensä lyhyesti savukaasuhäviöksi. Sen suuruus riippuu savukaasujen loppulämpötilasta ja savukaasujen määrästä. [2, s. 108]

Jotta savukaasuhäviö olisi mahdollisimman pieni, tulisi savukaasujen poistua kattilasta mahdollisimman kylminä. Rikkiä sisältävien polttoaineiden savukaasun loppulämpötilan tulee kuitenkin olla happokastepistelämpötilan 140 – 150 °C yläpuolella lämpöpintojen syöpmisen ehkäisemiseksi. [2, s. 108]

Lämpöpintojen likaantumisen seurauksena lämmönsiirto huononee kattilassa, jolloin savukaasujen loppulämpötila nousee ja savukaasuhäviö kasvaa. Edelleen savukaasuhäviön kannalta käytetyn ilmakertoimen tulisi olla mahdollisimman lähellä teoreettista minimiarvoa, sillä palamiseen osallistumattoman ilmankierrätys kattilan läpi lisää kaasuvirtaa ja siten myös savukaasuhäviöitä. Ilmakerrointa ei kuitenkaan ole tarkoituksenmukaista pienentää niin alas, että epätäydellisen palamisen seurauksena palamattomien häviöt kasvavat enemmän kuin savukaasuhäviöt pienenevät. [2, s. 108]

2.3.3 Tuhkan mukana poistuva termien lämpö

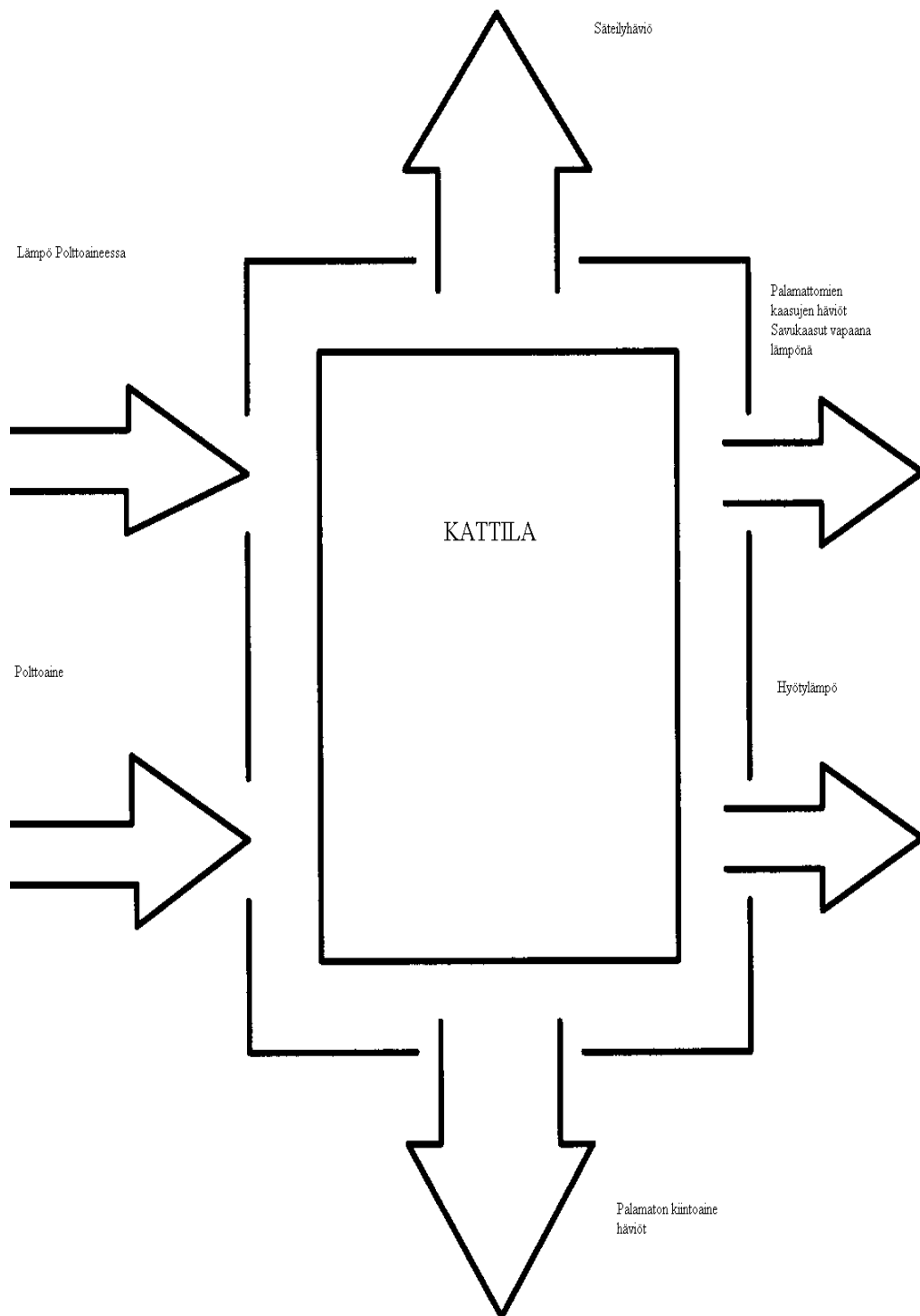
Kattilasta poistuu energiaa lämpimien savukaasujen lisäksi myös kuumen tuhkan mukana. Tuhkavirtaan kuuluu sekä polttoaineen varsinainen tuhka, että myös sen mukana kulkeva, palamatta jäänyt polttoaine. Tuhkahäviöihin lasketaan tulipesästä poistuva pohjatuhka sekä lentotuhka. [2, s.108]

Mikäli polttoaineen tuhkapitoisuus on pieni, jää tuhkan termisen lämpöhäviön vaikutus kattilahyötysuhteeseen vähäiseksi. Merkittävää osaa tuhkan termien lämpöhäviö näyttelee esim. soodakattiloissa, joissa tuhka poistuu kattiloista kuumana (700 – 800 °C) sulana pohjatuhkana ja poistuvan tuhkan määrä on n. 40 % syötetystä polttoaineesta.

2.3.4 Säteilöhäviöt

Koska kattilassa on huomattavasti ympäristöä korkeampi lämpötila, lämpöä siirtyy häviöinä ympäristöön, vaikka kattilat yleensä ovat hyvin eristettyjä. Hyvin eristetyn kattilan, jonka seinämän lämpötila on alle 55 °C, lämpöhäviöt ovat 200–300 W/m²K. Koska kattilan ulkoseinän pinta-ala ei kasva suorassa suhteessa kattilan tehoon, ovat suurempien kattiloiden suhteelliset lämpöhäviöt pienemmät kuin pienten kattiloiden. Kattiloiden lämpöhäviöitä arvioidaan yleensä kokemustietojen pohjalta laadittujen käyrästöjen avulla. [2, s.110]

Kattilan seinämien läpi siirtyvää energiaa pystytään ottamaan osittain talteen, kun se lämmittää kattilanhuoneen ilmaa. Tätä talteen saatua energiaa käytetään yleensä kattilan palamisilmana. [2, s.110]



Kuva 1. Yksinkertainen toimintamalli siitä, miten kattilan hyötysuhde määrittyy.

3 KATTILAN HYÖTYSUHTTEEN MÄÄRITTÄMINEN LASKENTAKAAVOILLA

Hyötysuhteen määrittämiseen tarvittavat kaavat on otettu tähän työhön saksalaisen DIN 1942 –standardin /11/ mukaan.

3.1 Hyötysuhteen määrittäminen suoralla menetelmällä

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{hyöty}}}{\dot{Q}_{\text{tuotu}}}$$

missä	η	= kattilan hyötysuhde
	$\dot{Q}_{\text{hyöty}}$	= kattilasta hyödyksi saatu lämpövirta
	\dot{Q}_{tuotu}	= kattilaan tuotu energiavirta

Kun kattilasta on saatu suoraan mittaamalla hyötylämpövirta sekä kattilaan viety energiavirta, saadaan määritettyä kaavan avulla hyötysuhde suoralla menetelmällä. [2, s.101]

Taseraja

Taseraja on valittu DIN 1942 –standardin, kohdan /11/ mukaisen perusvaihtoehdon mukaan.

Kattilaan tuotava energia voidaan jakaa polttoainevirran verrannolliseen osaan sekä polttoainevirrasta riippumattomaan osaan. Polttoainevirtaan verrannollisia kattilaan tuotavia energiavirtoja ovat

H_u	= polttoaineeseen sitoutunut kemiallinen energia
\dot{Q}_{pa}	= polttoaineen esilämmitykseen sitoutunut energia
\dot{Q}_i	= palamisilman esilämmitykseen sitoutunut energia.

DIN 1942 –standardin mukaan, polttoaineeseen sitoutuneen kemiallisen energian mitana käytetään polttoaineen alempaa tehollista lämpöarvoa. [2,101]

Kun ainevirrat, ominaislämmöt ja lämpötilat ovat selvillä, saadaan lasketuksi polttoaineen ja palamisilman esilämmityksen mukana kattilaan tuodut energiavirrat seuraavasti: [2, s.102-103]

$$\dot{Q}_{pa} = \dot{m}_{pa} \cdot c_{p(pa)} \cdot (t - t_0)$$

$$\dot{Q}_i = \dot{m}_i \cdot c_{p(i)} \cdot (t - t_0)$$

missä	\dot{Q}_{pa}	= polttoaineen esilämmityksen kattilaan tuoma energiavirta, kW
	\dot{Q}_i	= ilman esilämmityksen kattilan tuoma energiavirta, kW
	\dot{m}_{pa}	= polttoainevirta, kg/s
	\dot{m}_i	= palamisilmavirta, kg/s
	$c_{p(pa)}$	= polttoaineen ominaislämpö, kJ/kgK
	$c_{p(i)}$	= ilman ominaislämpö, kJ/kgK
	t	= aineen lämpötila kattilaan tullessa, °C
	t_0	= vertailulämpötila (yleensä 25 °C)

Kattilaan tulee myös polttoainemäärästä riippumattomia energiavirtoja, jotka tulisi tapauskohtaisesti selvittää ja ottaa huomioon tarkemmissa laskelmissa. Tämänlaisia ovat esim. höyryluvon lämmitys, polttoaineen hajotushöyry, myllyjen, pumppujen ja puhaltimien sähkömoottorien käyttö sekä tulistuksen säätöön käytetty ruiskutusvesi. [2, s.103]

Laskentakaavoissa nämä on kuvattu yksiköllä \dot{Q}_{muu} .

Kattilaan tuodusta energiasta hyödyksi saatava osa käytetään syöttöveden lämmittämiseen, höyrystämiseen ja edelleen tulistamiseen eli tuorehöyryn tuottamiseen sekä lisäksi välitulistushöyryn lämmittämiseen.

Näin ollen hyödyksi saatavan lämmön määrä voidaan laskea seuraavasti: [2, s.103]

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_{th} \cdot (h_{th} - h_{sv})$$

$$\dot{Q}_{VT} = \dot{m}_{vt} \cdot (h_{jvt} - h_{evt})$$

missä \dot{Q}_H = teho syöttöveden lämmittämiseen, höyrystämiseen ja tulistamiseen, kW

\dot{Q}_{VT} = teho höyryn välitulistukseen, kW

\dot{m}_{th} = tuorehöyryvirta, kg/s

h_{th} = tuorehöyryn entalpia, kJ/kg

h_{sv} = syöttöveden entalpia, kJ/kg

\dot{m}_{vt} = välitulistushöyryn massavirta, kg/s

h_{jvt} = höyryn entalpia välitulistimen jälkeen, kJ/kg

h_{evt} = höyryn entalpia ennen välitulistusta, kJ/kg

Näiden lisäksi osa kattilaan tuodusta energiasta tulee tietyissä kattiloissa lieriöistä ulospuhallusvetenä. DIN 1942 –standardissa ulospuhalluksen mukana tuleva energiavirta lasketaan kuuluvaksi kattilalla tuotettuun hyötyenergiaan. Useimmiten käytännön hyötysuhdemittauksissa ulospuhallus pidetään kuitenkin suljettuna.

Ulospuhallusveden lämmittämiseen käytetty teho saadaan lasketuksi: [2, s.103]

$$\dot{Q}_{UP} = \dot{m}_{UP} \cdot (h_{UP} - h_{sv})$$

missä	\dot{Q}_{UP}	= ulospuhallukseen sitoutuva lämmitysteho, kW
	\dot{m}_{UP}	= ulospuhalluksen massavirta, kg/s
	h_{UP}	= ulospuhallusveden entalpia, kJ/kg
	h_{sv}	= syöttöveden entalpia, kJ/kg

Näiden perusteella kattilan hyötysuhteen laskentakaava saadaan muotoon: [2, s.104]

$$\eta = \frac{\dot{Q}_H + \dot{Q}_{VT} + \dot{Q}_{UP}}{\dot{m}_p \cdot H_u + \dot{Q}_{pa} + \dot{Q}_i + (Q_{muu})}$$

Lopuksi sijoitetaan edelliset kaavat lausekkeeseen, jonka jälkeen saadaan kattilan hyötysuhteen laskemiseksi seuraavanlainen kaava: [2, s.104]

$$\eta = \frac{\dot{m}_{th} \cdot (h_{th} - h_{sv}) + \dot{m}_{vt} \cdot (h_{jvt} - h_{evt}) + \dot{m}_{UP} \cdot (h_{UP} - h_{sv})}{\dot{m}_{pa} \cdot (H_u + c_{p(pa)} \cdot (t - t_0)) + \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{pa}} \cdot c_{p(i)} \cdot (t - t_0)) + \dot{Q}_{muu}}$$

Kaavan merkinnät ovat edellä esitettyjä.

3.2 Hyötysuhteen määrittäminen epäsuoralla menetelmällä

$$\dot{Q}_{\text{hyöty}} = \dot{Q}_{\text{tuotu}} - \dot{Q}_{\text{häviö}}$$

missä $\dot{Q}_{\text{hyöty}}$ = kattilasta hyödyksi saatu lämpövirta

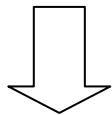
\dot{Q}_{tuotu} = kattilaan tuotu energiavirta

$\dot{Q}_{\text{häviö}}$ = kattilan häviöt

Sijoittamalla kaava aikaisemmin esitettyyn lausekkeeseen, saadaan kaavaksi seuraavanlainen lauseke: [2, s.104]

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{tuotu}} - \dot{Q}_{\text{häviö}}}{\dot{Q}_{\text{tuotu}}}$$

η = kattilan hyötysuhde



$$\eta = 1 - \frac{\dot{Q}_{\text{häviö}}}{\dot{Q}_{\text{tuotu}}} = 1 - \sum q$$

Tässä q :lla tarkoitetaan yksittäisten häviöiden osuutta kattilaan tuodusta energiavirrasta.

Seuraavaksi johdetaan kattilan häviöistä koostuvat lausekkeet, jotka koostuvat palamattomista häviöistä, savukaasujen ja tuhkan termisestä lämmön häviöistä sekä säteilyhäviöistä.

3.2.1 Palamattomien häviöt

Ensin esitetään palamattomien kaasujen häviöt kaavalla: [2, s.105]

$$q_{CO} = (1 - q_{pal}) \cdot \frac{x_{CO} \cdot H_{CO} \cdot \dot{m}_{sk}}{\dot{m}_p \cdot H_u + \dot{Q}_{pa} + \dot{Q}_i + \dot{Q}_{muu}}$$

missä	q_{CO}	= palamattomien kaasujen (CO) häviö
	q_{pal}	= savukaasuja muodostavan polttoaineen osuus (palamattomien kiintoaineiden häviö)
	x_{CO}	= palamattomien kaasujen (CO) pitoisuus kuivissa savukaasuissa (kg CO/m ³ sk)
	H_{CO}	= palamattomien kaasujen lämpöarvo, MJ/kg
	\dot{m}_{sk} / \dot{m}_p	= kuiva savukaasuvirta (m ³ sk/kgpa)
	H_u	= polttoaineen lämpöarvo, MJ/kg
	\dot{Q}	= tuotuja energiavirtoja (kattilaan)

Tästä kaavasta saadaan laskettua ulos hiilimonoksidikaasujen aiheuttama kattilahäviö.

Savukaasuissa esiintyy myös muita palamattomia kaasuja kuin edellä mainittu hiilimonoksidi, joiden aiheuttama hyötysuhteen heikkeneminen saadaan laskettua samalla kaavalla. Sijoitetaan vain lausekkeeseen kyseisen kaasun pitoisuus savukaasuissa sekä sen kaasun lämpöarvo. [2, s. 105]

Palamattomien kaasujen häviöt voidaan selvittää myös diagrammin avulla, jossa polttoaineen kosteutta kuvaa standardin SFS 5624 mukaisesti kosteuskerroin. [Liite 1]
Kaavana kosteuskerroin määritetään apuna käyttäen kuivan polttoaineen lämpöarvoa ja veden höyrystymiseen kuluvaa energiaa. [2, s.105]

$$k = \frac{H_{u(kuiva)}}{H_{u(kuiva)} - u \cdot l}$$

missä	k	= kosteuskerroin
	$H_{u(kuiva)}$	= kuivan polttoaineen tehollinen lämpöarvo, MJ/kg
	u	= polttoaineen kosteussuhde (veden ja kuivan polttoaineen suhde)
	l	= veden höyrystyslämpö (2,443 MJ/kg kun $t = 25 \text{ °C}$)

Palamattomien kiintoaineiden häviöt voidaan laskea: [2, s.106]

$$q_{pal} = \frac{\dot{m}_{pal} \cdot H_{tuhka}}{\dot{m}_{pa} \cdot H_u + \dot{Q}_{pa} + \dot{Q}_i + \dot{Q}_{muu}}$$

missä	q_{pal}	= palamatta jääneen polttoaineen häviö
	H_{tuhka}	= palamattoman lämpöarvo, MJ/kg, liite SFS 5624
	H_u	= polttoaineen tehollinen lämpöarvo, MJ/kg
	\dot{Q}	= tuotuja energiavirtoja (kattilaan)

Nyt kaavasta on saatu tuhkan mukana poistuvan palamatta jääneen polttoaineen aiheuttama häviö. Kun halutaan ratkaista palamatta jääneen kiintoaineina poistuvan polttoaineen suhde kattilaan syötettyyn polttoainemäärään, kaava on:

$$\frac{\dot{m}_{pal}}{\dot{m}_{pa}} = p \cdot \frac{x_t}{1-p} \cdot (1 - x_{H_2O})$$

missä	\dot{m}_{pal}	= palamatta jäänyt kiintoaineena poistuva polttoaine, kg/s
	\dot{m}_{pa}	= polttoainevirta, kg/s

p	= tuhkan hehkutushäviö, %
x_t	= polttoaineen tuhkapitoisuus, %
x_{H_2O}	= polttoaineen kosteus, %

Nämä pystyy laskemaan kaavan avulla, kun on mitattu valmiiksi polttoaineen kosteuspitoisuus, tuhkan hehkutushäviö ja polttoaineen tuhkapitoisuus (kuivasta polttoaineesta). [2, s. 106]

3.2.2 Savukaasujen ja tuhkan termisen lämmön häviö

Savukaasuhäviön suuruus saadaan laskettua: [2, s.108]

$$q_{sk} = (1 - q_p) \cdot \frac{\dot{m}_{sk} \cdot c_{p(sk)} \cdot (t_{sk} - t_0)}{\dot{m}_{pa} \cdot H_u + \dot{Q}_{pa} + \dot{Q}_i + \dot{Q}_{muu}}$$

missä	q_{sk}	= savukaasuhäviö
	q_p	= savukaasuja muodostaman polttoaineen osuus
	\dot{m}_{sk}	= savukaasun massavirta, kg/s
	\dot{m}_{pa}	= polttoaineen massavirta, kg/s
	c_{psk}	= savukaasun ominaislämpö, kJ/kgK
	t_{sk}	= savukaasun loppulämpötila, °C
	t_0	= vertailulämpötila, °C
	H_u	= polttoaineen lämpöarvo, MJ/kg
	\dot{Q}	= tuotuja energiavirtoja (kattilaan)

Tuhkan mukana poistuva termien lämpöenergia saadaan selvitettyä seuraavanlaisen laskukaavan avulla: [2, s.108]

$$q_{\text{tuhka}} = \frac{\dot{m}_{\text{tuhka}} \cdot c_{p(\text{tuhka})} \cdot (t_{\text{tuhka}} - t_0)}{\dot{m}_{\text{pa}} \cdot H_u + \dot{Q}_{\text{pa}} + \dot{Q}_i + \dot{Q}_{\text{muu}}}$$

missä q_{tuhka} = tuhkan mukana poistuva terminen lämpöenergia

$c_{p(\text{tuhka})}$ = tuhkan ominaislämpö (lentotuhka 0,84 kJ/ kgK; pohjatuhka 1,00 kJ/kgK)

t_{tuhka} = tuhkan lämpötila, °C

t_0 = vertailulämpötila, °C

Kaavassa oleva $\frac{\dot{m}_{\text{tuhka}}}{\dot{m}_{\text{pa}}}$ = massavirta polttoainevirtaa kohti, saadaan selvitettyä kaavalla:

[2, s.109]

$$\frac{\dot{m}_{\text{tuhka}}}{\dot{m}_{\text{pa}} \cdot H_u} = \frac{x_{\text{tuhka}}}{1 - p} \cdot (1 - x_{H_2O})$$

missä x_{tuhka} = polttoaineen tuhkapitoisuus kuivasta polttoaineesta, %

x_{H_2O} = polttoaineen kosteus, %

p = tuhkan hehketushäviö, %

Tuhkavirtaan kuuluu siis polttoaineen varsinainen tuhka sekä sen mukava kulkeutuva, palamatta jäänyt polttoaine.

Viimeksi esitetyllä kaavalla voidaan myös määrittää erikseen tulipesästä poistuvan pohjatuhkan ja lentotuhkan aiheuttama häviö. On vain tiedettävä molempien tuhkan suhteellinen osuus, joka kerrotaan kaavasta saadulla tuloksella. [2, s.109]

3.2.3 Säteilyhäviöt

Säteilyhäviöt saadaan laskettua, kun tunnetaan lämmönsiirtopinta-alat, lämpötilat ja lämmönsiirtokerroimet kaavalla: [2, s.110]

$$q_{lhs} = (a_k + a_r) \cdot A \cdot (t_{seinä} - t_{ymp})$$

missä	q_{lhs}	= lämpöhäviöt säteilynä
	a_r	= säteilyn lämmönsiirtokerroin
	a_k	= konvektiivinen lämmönsiirtokerroin
	A	= kattilan ulkoseinän pinta-ala, m ²
	$t_{seinä}$	= kattilan ulkoseinän lämpötila, °C
	t_{ymp}	= ympäristön lämpötila, °C

4 KATTILAN HYÖTYSUHTEN LASKENTAMALLI

Käytetään tässä laskussa esimerkkinä koulun uutta St1 Multistoker Fx -kattilaa ja lasketaan sille hyötysuhde suoralla ja epäsuoralla menetelmällä. Polttoaineena käytetään pellettiä, jonka tiheys on 500 kg/m³ ja sen lämpöarvo on tässä tapauksessa 17,34 MJ/kg ja polttoaika 5 tuntia. Polttoaineen kulutus tässä ajassa on 0,2 m³.

4.1 Hyötysuhteen laskenta suoralla menetelmällä

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{hyöty}}{\dot{Q}_{tuotu}}$$

missä	η	= kattilan hyötysuhde
	$\dot{Q}_{hyöty}$	= kattilasta hyödyksi saatu lämpövirta
	\dot{Q}_{tuotu}	= kattilaan tuotu energiavirta

Laskenta aloitetaan määrittämällä kattilaan tuodun energiavirran määrä eli polttoaineteho. Määrittäminen aloitetaan laskemalla polttoaineen tilavuusvirta, joka saadaan jakamalla kattilan polttoaineen kulutus, polttoajalla:

$$\frac{0,2m^3}{5h} = 0,04 \text{ m}^3/h$$

Sen jälkeen pystytään määrittämään polttoaineen massavirta:

$$\dot{m}_{pa} = \text{Polttoaineen tilavuusvirta} \cdot \text{Polttoaineen tiheys}$$

$$\dot{m}_{pa} = 0,04 \text{ m}^3/h \cdot 500 \text{ kg/m}^3 = 20 \text{ kg/h}$$

Muutetaan saatu arvo tunneista sekunneiksi:

$$\frac{20 \text{ kg/h}}{3600 \text{ s/h}} = 0,005556 \text{ kg/s}$$

Nyt voidaan laskea polttoaineteho, kun siihen tarvittavat arvot on tiedossa:

$$\dot{Q}_{uotu} = \dot{m}_{pa} \cdot c_{pa} \cdot 1000 \text{ kJ/MJ}$$

$$\dot{Q}_{uotu} = 0,005556 \text{ kg/s} \cdot 17,34 \text{ MJ/kg} \cdot 1000 \text{ kJ/MJ} = 96,3 \text{ kW}$$

missä \dot{m}_{pa} = polttoaineen massavirta, (kg/s)

c_{pa} = polttoaineen lämpöarvo, (MJ/kg)

Seuraavaksi selvitetään kattilasta hyödyksi saatu lämpövirta eli lämpöteho. Lämpömittari näyttää veden ulos tullessa 90 °C ja sisään tullessa 60 °C. Oletetaan veden ominaislämpökapasiteetiksi on 4,2 kJ/kg°C ja veden tiheydeksi 1000 kg/m³. Mittarista katsotaan vielä veden tilavuusvirta ja arvoksi saadaan 2430 l/h. Muutetaan arvo vielä sekunneiksi:

$$\frac{2430l/h}{3600s/h} = 0,675 \text{ l/s}$$

Veden massavirta on 0,675 kg/s, joka saadaan kertomalla tilavuusvirta veden tiheydellä (1000 kg/m^3) ja jakamalla ne 1000 l/m^3 . Nyt kun arvot ovat selvillä, voidaan laskea kattilan lämpöteho,

$$\dot{Q}_{\text{hyöty}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

$$\dot{Q}_{\text{hyöty}} = 0,675 \text{ kg/s} \cdot 4,2 \text{ kJ/kgC} \cdot (90\text{C} - 60\text{C}) = 85 \text{ kW}$$

Kattilan hyötysuhde suoralla menetelmällä on:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{hyöty}}}{\dot{Q}_{\text{uotu}}}$$

$$\eta = \frac{85 \text{ kW}}{93,3 \text{ kW}} \cdot 100 = 88,31 \%$$

4.2 Hyötysuhteen laskenta epäsuoralla menetelmällä

$$\dot{Q}_{\text{hyöty}} = \dot{Q}_{\text{uotu}} - \dot{Q}_{\text{häviö}}$$

Polttoaineteho on sama joka määritettiin jo aiemmin suoralla menetelmällä eli 100 kW.

Hyötysuhde epäsuoralla menetelmällä määritettiin laskentaohjelmaa apuna käyttäen ja samalla testattiin sen toimivuutta. Sijoitetaan laskuarvot kaavoihin.

Savukaasuhäviöt

$$q_{sk} = (1 - q_p) \cdot \frac{\dot{m}_{sk} \cdot c_{p(sk)} \cdot (t_{sk} - t_0)}{\dot{m}_{pa} \cdot H_u + \dot{Q}_{pa} + \dot{Q}_i + \dot{Q}_{muu}}$$

$$q_{sk} = 0,106$$

$$0,106 \cdot 100 = 10,6 \%$$

Palamattomien kaasujen häviöt

$$q_{CO} = (1 - q_{pal}) \cdot \frac{x_{CO} \cdot H_{CO} \cdot \dot{m}_{sk}}{\dot{m}_p \cdot H_u + \dot{Q}_{pa} + \dot{Q}_i + \dot{Q}_{muu}}$$

$$q_{CO} = 0,000383$$

$$0,000383 \cdot 100 = 0,038 \%$$

Palamattomien kiintoaineiden häviöt

$$q_{pal} = \frac{\dot{m}_{pal} \cdot H_{tuhka}}{\dot{m}_{pa} \cdot H_u + \dot{Q}_{pa} + \dot{Q}_i + \dot{Q}_{muu}}$$

$$q_{pal} = 0,0061$$

$$0,0061 \cdot 100 = 0,61 \%$$

Säteilyhäviöt

$$q_{lhs} = (a_k + a_r) \cdot A \cdot (t_{seinä} - t_{ymp})$$

$$q_{lhs} = 0,0038$$

$$0,0038 \cdot 100 = 0,38 \%$$

Nyt ovat kattilan häviöt saatu määritettyä prosenteissa. Lasketaan ne yhteen niin saadaan kattilan kokonaishäviö.

$$10,6 + 0,038 + 0,61 + 0,38 = 11,628 \%$$

Hyötysuhteeksi saadaan epäsuoralla menetelmällä:

$$\eta = 100 - 11,88372 = 88,37\%$$

Kattilan hyötysuhteen laskemiseen apuna käytetyn laskentaohjelman laskupohja nähtävissä liitteenä. [Liite 3]

5 PÄÄSTÖT

Polttoaineen pääpalamisreaktion seurauksena savukaasut sisältävät palamistuotteina vedyn palaessa muodostunutta vettä, hiilen palaessa muodostunutta hiilidioksidia ja rikin palaessa muodostunutta rikkidioksidia. Savukaasuissa on lisäksi polttoaineesta tai palamisilmasta muodostunutta typpeä, palamisilmasta tullutta argonia, ilman ylimäärään käytön vuoksi happea sekä polttoaineen palamattomista aineosista muodostunutta lentotuhkaa. [2, s.91]

Vesi on varsinaisista palamistuotteista ainoa, jota yleisesti pidetään vaarattomana ympäristölle mutta ilmasta peräisin olevat kaasut typpi, happi ja argon eivät myöskään ole haitallisia komponentteja. Ympäristölle vahingollisia palamistuotteita ovat hiilidioksidi, rikkidioksidi ja lentotuhka. Näiden lisäksi savukaasuihin muodostuu hiili-

monoksia (CO), hiilivetyjä (C_xH_y) ja typen oksideja (NO_x), jotka ovat ympäristöä pilaavia kaasuja. [2, s.91]

5.1 Hiilimonoksidi

Kun hiili reagoi hapen kanssa epätäydellisessä palamisessa syntyy hiilimonoksidia ja lämpöä vapautuu vain noin neljäsosa siitä, mitä vapautuisi, jos hiili reagoisi hapen kanssa muodostaen hiilidioksidia.

Savukaasuissa esiintyy myös usein jonkin verran häkää, koska ilmaylimäärää käytettäessä polttoaineen ja palamisilman sekoittuminen on epätäydellistä. Hyvin toimivien polttolaitteiden savukaasujen häkäpitoisuudet ovat luokkaa 30 – 100 ppm. Vaikka häikä on ihmiselle vaarallista, ei kattilalaitosten nykytasoinen häkäpäästöjen katsota haittaavan ympäristöä. [2, s.91]

5.2 Hiilivedyt

Savukaasujen hiilivedyt ovat palamatta jäänyttä polttoainetta. Tämän vuoksi hiilivety-päästöjä esiintyy yleensä häkä- ja palamattomien kiintoainepäästöjen yhteydessä. Samoin kuin häkäpäästöjen, hiilivety-päästöjen syynä on polttoaineen ja palamisilman huono sekoittuminen. Tulipesän alhainen lämpötila edistää hiilivety-päästöjen syntymistä.

Haitallisimpia hiilivety-päästöistä ovat polyaromaattiset hiilivedyt. Näistä ns. PAH-yhdisteistä osa on karsinogeenisia. Kattilalaitosten PAH-yhdistepäästömittaukset osoittavat päästöjen noudattavan samansuuntaista riippuvuutta kattilan tehosta. [2, s.92]

5.3 Kiintoainepäästöt

Kiintoainepäästöt muodostuvat polttoaineessa olleesta palamattomasta tuhkasta ja tulipesässä palamatta jääneistä hiukkasista. Analysoimalla tuhkasta palamattomien osuus saadaan selville palamattomien kiintoaineiden kattilahyötysuhdetta huonontava vaikutus. Mikäli palamattomien osuus tuhkassa on suuri, on se merkki polttimien tai jauhatuslaitteiden säädön tai huollon tarpeesta. [2, s.92]

5.4 Rikkidioksidi

Polttoaineen rikki hapettuu tulipesässä rikkidioksidiksi. Siitä pieni osa hapettuu edelleen rikkitrioksidiksi, joka puolestaan veden kanssa muodostaa rikkihappoa. Sen vaikutuksesta kattilan lämpöpintojen syöpyminen pyritään estämään rikkiä sisältävien polttoaineita poltettaessa pitämällä savukaasujen lämpötila kattilan peräpäässä kaste pistettä korkeampana.

Vaikka kattilan lämpöpinnat saadaan näin suojelluksi, rikkidioksidipäästöt vahingoittavat luontoa. Rikkilaskeumat happamoittavat maaperää ja vesistöjä. Ympäristöä kuormittavista rikkidioksidipäästöistä pääosa on peräisin teollisuuden ja voimalaitosten kattilalaitoksista. Rikkipitoisia polttoaineita ovat polttoöljy ja turve. [2, s.92]

5.5 Typen oksidi

Typen oksideja typpimonoksidia NO ja typpioksidia NO₂, syntyy typen ja hapen reagoimissa keskenään. Tulipesässä muodostuu pääasiassa typpimonoksidia joka lämpötilan laskiessa pyrkii hapettumaan typpioksidiksi. Kattilan typpioksidipäästöjä mitattaessa ei erotella monoksidien ja dioksidien välillä vaan puhutaan niiden yhteenlaskeutuista NO_x-päästöistä. Ympäristöä NO_x-päästöt happamoittavat samalla tavalla kuin rikkidioksidit, minkä vuoksi niitä pyritään rajoittamaan.

Typpioksidipäästöjä voidaan vähentää joko poistamalla palamisessa syntyneitä NO_x-kaasuja savukaasuista erilaisin puhdistusmenetelmin tai pienentämällä typpioksidien muodostumista tulipesässä. [2, s.92-93]

5.6 Hiilidioksidi

Hiilidioksidi on tärkein kasvihuonekaasu. Muita ovat mm. typpioksiduuli, metaani ja vesihöyry. Kasvihuonekaasut päästävät auringon säteilyn mukanaan tuoman lämpöenergian maanpinnalle mutta heijastavat maasta lähtevän lämpösäteilyn takaisin maahan. Maapallon pinnan lämpötila riippuu siis paljolti näiden kasvihuonekaasujen pitoisuudesta ilmakehässä.

Kaikissa kaupallisesti käytetyissä polttoaineissa on hiiltä, jonka palamisesta hiilidioksidia syntyy, mutta eri polttoaineiden hiilipitoisuudet ovat erilaiset. Edullisin polttoaine pitoisuuksien perusteella on maakaasu. [2, s.94]

6 ESIMERKKEJÄ KATTILAN HYÖTYSUHTEN HEIKKENEMISEEN

Päästöt aiheuttavat kattilan hyötysuhteen heikkenemistä eri tavoin. Tyypillisiä tuhkaongelmia ovat esimerkiksi kuonaantuminen sekä likaantuminen.

Kuonaantuminen on yleensä seuraus tuhkan osittaisesta sulamisesta. Erityisesti silikaattisulat aiheuttavat vaikeita kerrostumia hiilen tai turpeen pölypoltossa kattilan säteilyosassa. Hiilen tai turpeen pii, alumiini ja kalium, jotka esiintyvät polttoaineessa erillisinä savimineraaleina, muodostavat silikaattihiukkasia, jotka sulavat korkeissa lämpötiloissa. Hiukkaset kulkeutuvat pinnoille iskeytymällä ja muodostavat harjamaisen kerrostuman savukaasuvirtausta kohti oleville pinnoille. [4, s. 285]

Likaantumista kuvataan yleensä kerrostumien muodostumista kattiloissa. Tässä yhteydessä likaantumis-sanaa käytetään kuvaamaan kuitenkin konvektiopinnoille muodostuvien pääosin ei-sulien kerrostumien yhteydessä. Tällaiset kerrostumat kasvavat yleensä hitaammin kuin osittain sulassa tilassa olevat kuonakerrostumat. Kerrostumien muodostus alkaa yleensä ohuella alkukerrostumalla. Kerääntyneet hiukkaset ovat saavuttaneet pinnan erityyppisillä diffuusiomekanismeilla tai muodostuneet kaasumaisista yhdisteistä kondensoitumalla pinnalle. Alkukerrostuman päälle takertuu tämän jälkeen muita hiukkasia, jotka ajan kuluessa kasvavat voimakkaammin kiinni pintaan. Ominaista tämän tyyppisille kerrostumille on niiden hidas kovettuminen. Kattilasta tällaiset kerrostumat voidaan poistaa nuohouksella. [4, s. 286]

Puuta käytettäessä polttoaineena kattilan hyötysuhteeseen vaikuttaa eniten polttoaineen kosteus. Esimerkiksi lämpökattiloissa, jotka on mitoitettu polttamaan vain tietyt kosteista haketta, kattilan hyötysuhde laskee, kun kosteuspitoisuus nousee liikaa. Polttoaineen kosteus aiheuttaa myös muita ongelmia, kuten alentaa tulipesän lämpötilaa, vaikuttaa palamisen stabiilisuteen, alentaa laitoksen maksimitehoa sekä vaikeuttaa kattilan säätöä. Myös kattilan päästöt lisääntyvät ja omakäyttösähkön tarve lisääntyy, mikä näkyy myös kattilan hyötysuhteen heikkenemisenä. [5, s. 23-24]

6.1 Kattilan hyötysuhteen heikkenemiseen liittyvä laskuesimerkki

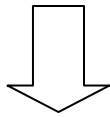
Seuraavassa laskussa on esitetty, kuinka paljon hyötysuhteen heikkeneminen vaikuttaa polttoainetehon määrään ja polttoaineen kulutukseen. Polttoaineena laskussa käytetään puuta.

Kun hyödyksi saatu lämpöteho on:

$$\dot{Q}_{\text{hyöty}} = 5000 \text{ kW}$$

lasketaan, paljonko polttoainetehon tarve lisääntyy, kun kattilan hyötysuhde laskee 95 %:sta 85 %:iin.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{hyöty}}}{\dot{Q}_{\text{tuotu}}}$$



$$\dot{Q}_{\text{tuotu}} = \frac{\dot{Q}_{\text{hyöty}}}{\eta}$$

Kun kaava on saatu oikeaan muotoonsa, lasketaan siitä molempien hyötysuhteiden polttoainetehot, että huomataan vaikutukset.

$$\dot{Q}_{\text{tuotu1}} = \frac{\dot{Q}_{\text{hyöty}}}{\eta_1}$$

$$\dot{Q}_{\text{tuotu1}} = \frac{5000 \text{ kW}}{0,95} = 5260 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{\text{tuotu2}} = \frac{5000 \text{ kW}}{0,85} = 5880 \text{ kW}$$

$$5880 \text{ kW} - 5260 \text{ kW} = \mathbf{620 \text{ kW}}$$

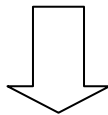
$$\text{missä } \eta_1 = 0,95$$

$$\eta_2 = 0,85$$

Kattilan hyötysuhteen heikentyessä 95 %:sta 85 %:iin, polttoainetehon tarve kasvaa 620 kW.

Katsotaan vielä, kuinka paljon kattilan hyötysuhteen heikkeneminen vaikuttaa polttoaineen kulutukseen. Lämpöarvona käytetään puun lämpöarvoa 9,2 MJ/kg.

$$\dot{Q}_{\text{uotu}} = \dot{m}_{pa} \cdot H_u$$



$$\dot{m}_{pa} = \frac{Q_{\text{uotu}}}{H_u}$$

Ennen laskua muutetaan vielä polttoainetehot megawateiksi, jotta saadaan oikeat arvot laskentaan.

$$\dot{m}_{pa1} = \frac{5,88 \text{ MW}}{9,2 \text{ MJ / kg}} = 0,64 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{pa2} = \frac{5,26 \text{ MW}}{9,2 \text{ MJ / kg}} = 0,57 \text{ kg/s}$$

$$0,64 \text{ kg/s} - 0,57 \text{ kg/s} = \mathbf{0,07 \text{ kg/s}}$$

Näin huomataan kuinka paljon kattilan hyötysuhteen heikkeneminen lisää polttoaineen kulutusta. Tässä tapauksessa polttoaineen tarve kasvaa 0,07 kg/s.

7 LASKENTAOHJELMAN KEHITTÄMINEN

Opinnäytetyöni pääaiheena oli parannella ja kehittää Kymenlaakson ammattikorkeakoulun päästömittauslaboratorion käytössä olevaa laskentaohjelmaa laboratorion tarpeiden mukaisesti. Laskentaohjelma on Excel-taulukkolaskentapohjaan tehty ja se on luotu vuonna 2002 hyötysuhteen määrittämiseen standardien mukaan. Laskentaohjelmalla pystytään määrittämään kattilan hyötysuhde epäsuoralla menetelmällä, joten myös häviöt pystytään määrittämään ohjelman avulla.

Laskentaohjelma koostuu taulukoista, joissa on standardien mukaan koottuja arvoja esimerkiksi päästöille. Taulukoihin syötetään mitattuja arvoja, joita saadaan mittaus- töiden tuloksena työkohteissa tai polttoaineiden lämpöarvoja, jotka saadaan selville niille tehdyistä taulukoista. Syötettyjä arvoja ovat esim. kaasun paineet ja nopeudet. Laskentaohjelma huomioi myös mittausepävarmuudet.

Minun työkseni tuli kehittää kattilan hyötysuhteen määrittämiseen epäsuoralla menetelmällä tehtyä laskentapohjaa. Laskentapohjalle on koottu päästöistä, kiintoaineen määrittämiseen manuaalisesti, kaasun tilavuusvirran ja nopeuden määrittämiseen sekä mittausepävarmuuksille omat taulukkosivut, joista kerätään arvoja itse kattilan hyötysuhteen määrittämiseen olevalle laskentapohjalle.

Alkupalavereiden jälkeen tulin siihen lopputulokseen, että pääkehityskohteet tulisivat olemaan laskennan saaminen tarkemmaksi ja laskentapohjan käytettävyyden sekä ulkonäön parantaminen. Koska laskentapohjasta annetaan asiakkaalle hyötysuhteen määrittämisen tulokset, joista tulee näkyä kattilan hyötysuhde sekä häviöt käytetyillä ja saaduilla tehoilla, on erityisen tärkeää, että tulokset ovat selkeästi luettavissa. Näistä asiakas pystyy tarvittaessa korjaamaan kattilan hyötysuhdetta, jos se on suinkin mahdollista. Tarkoituksena oli myös saada laskentaohjelmaa käytännöllisemmäksi sen käyttäjille.

7.1 Ulkonäkö

Laskentaohjelman ulkonäön selkeys ja siisteys on tärkeä asia, koska se parantaa käytön mielekkyyttä. Siisti ulkonäkö tuo myös paremman kuvan työn tuloksista asiakkaalle, koska saadut tulokset on esitetty selkeästi annettavalla tulostusarkilla.

Alkuperäisessä laskentaohjelmapohjassa oli laskettu kattilan hyötysuhde 50 %:n ja 100 %:n tehoille erillisillä sivuilla. Päätin yhdistää sivut ja laittaa nämä samalla laskentapohjalle, josta on parempi havainnoida saadut kattilan hyötysuhteet kyseisillä prosenteilla.

Lisäksi loin erillisen tulosarkin, joka annetaan asiakkaalle, kun tehdyt mittaukset ja niistä saadut tulokset ovat valmiit. Tulosarkista nähdään määritetty kattilan hyötysuhde epäsuoralla menetelmällä sekä kattilan häviöt. Tulosarkilla on nähtävissä myös käytetty polttoaineteho.

7.2 Lämmönsiirtokertoimen määrittäminen

Laskennan tarkkuutta parannettaessa säteilyhäviöiden määrittämisessä käytettävää lämmönsiirtokerrointa oli muutettava. Alkuperäisessä laskentaohjelmassa lämmönsiirtokerroin oli annettu perussuosituksen mukaan $10 \text{ W/m}^2\text{K}$. Tämä arvo pysyi aina samana eikä ollut suhteessa kattilan pintalämpötilan muutoksiin.

	Pinta-ala A_v (m ²)	Ls. kerroin (W/m ² K)	Pintalt. t_m (°C)	Häviö Q_k (W)
1	9	10	25	423
2	9	10	25	423
3	9	10	24	333
4	9	10	31	963
5	9	10	37	1503
6	9	10	35	1323
7	9	10	40	1773
8	9	10	27	603
9	9	10	28	693
10	9	10	25	423
11	9	10	22	153
12	9	10	23	243
13	20	10	58	7540
14				0
15				0
16				0
17				0
18				0
19				0
20				0
				16396

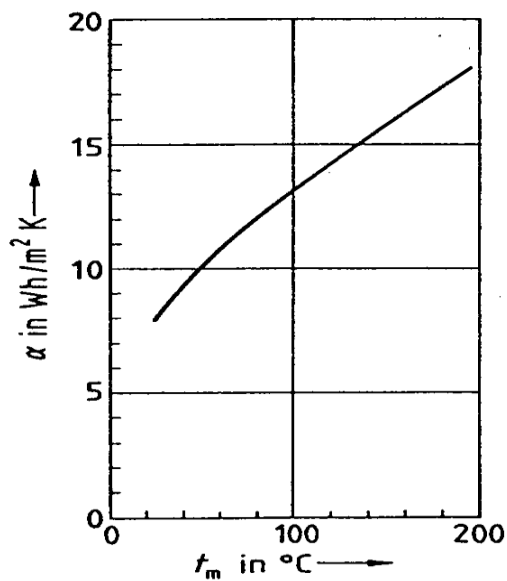
Kuva 2a. Alkuperäinen laskentaohjelma (arvot kuvitteellisia)

Insinööriyö1 kopio - Microsoft Excel

	Pinta-ala	Ls. Kerroin 50 %	Ls. Kerroin 100 %	Pintalt. 50 %	Häviö 50 %	Pintalt. 100 %	Häviö 100 %	
Pinta	A_x (m ²)	(W/m ² K)	(W/m ² K)	t_m (°C)	Q_x (W)	t_m (°C)	Q_x (W)	
54	1	10	12.5	8.595	100	10000	29	1125
55	2	10	8.375	8.65	25	418.75	30	837.5
56	3	12	8.485	8.87	27	712.74	34	1425.48
57	4	10	8.65	8.925	30	865	35	1297.5
58	5	10	8.595	8.925	29	773.55	35	1289.25
59	6	12	8.815	8.98	33	1375.14	36	1692.48
60	7	12	9.145	9.915	39	2085.06	53	3621.42
61	8	9	8.76	10.025	32	946.08	55	2759.4
62	9	20	8.32	10.025	24	665.6	55	5824
63	10	12	8.375	10.685	25	502.5	67	4723.5
64	11	12	8.54	15.25	28	819.84	150	13322.4
65	12	10	10.135	18	57	3749.95	200	18243
74				yht.		22914.21	yht.	56160.93

Kuva 2b. Uusi versio laskentaohjelmasta (arvot kuvitteellisia)

Määritin lämmönsiirtokerroimen DIN 4702 –standardissa annetun lämmönsiirtokerroimen kaaviokuvan perusteella. [8, s. 23]



Kuva 3. Lämmönsiirtokerroimen määrittämisen kuvaaja

Kaaviokuvasta kulmakerroin on laskettu käyttämällä kuvaajan ylä- ja ala-arvojen erotusta ja jakamalla sen lämpötilan maksimilla:

$$a = \frac{18-7}{200} = 0,055$$

Kun kulmakerroin oli saatu kuvasta esille, pystyin määrittämään lämmönsiirtokerroimen seuraavasti:

$$\alpha = 7 - a \cdot t_m$$

$$\alpha = 7 - 0,055 \cdot 50 = 9,75$$

missä α = lämmönsiirtokerroin (W/m²K)

a = kulmakerroin

t_m = kattilan pintalämpötila (°C)

Laskuesimerkissä käytin kattilan pintalämpönä 50 °C:ta.

Tällä lämmönsiirtokerroimen määrittystavalla laskentatarkkuus paranee jonkin verran alkuperäisestä, jossa käytettiin koko ajan samaa arvoa lämmönsiirtokerroimenä. Nyt lämmönsiirtokerroin on riippuvainen kattilan pintalämpötilan vaihteluista ja arvo määrittyy sen mukaan.

Tässä muutama lämmönsiirtokerroimen esimerkki tietyille kattilan pintalämpötiloille:

kun 50 °C = 9,75 W/m²K

100 °C = 12,5 W/m²K

150 °C = 15,25 W/m²K

200 °C = 18 W/m²K

7.3 Ominaislämpökapasiteettien määrittäminen

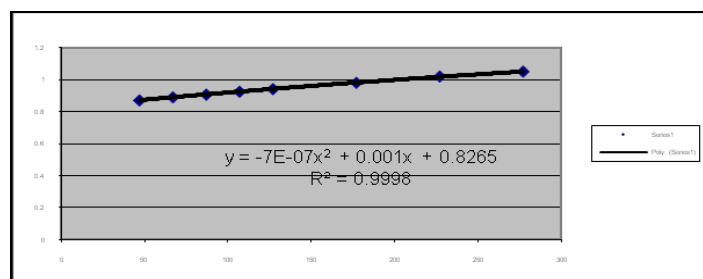
Ominaislämpökapasiteettien (c_p) arvot vakiopaineessa oli määritetty alkuperäiseen laskentapohjaan suoraan taulukosta. Arvot eivät olleet suhteessa lämpötilan muutoksiin. Päätin suhteuttaa ne lämpötilan muutoksiin, jotta saataisiin laskentatarkkuutta parannettua.

Kirjasta määritin hiilimonoksidin, hapen, typen, ja veden ominaislämpökapasiteettiarvot 50–250 °C:lle noin 50 °C:n välein. [7, s]

Taulukko 1. Hiilidioksidin c_p -arvoja eri lämpötiloille

CO ₂	K	°C	c_p (kJ/kgK)
	320	47	0,872
	340	67	0,891
	360	87	0,908
	380	107	0,926
	400	127	0,942
	450	177	0,981
	500	227	1,02
	550	277	1,05

Tein laskentaohjelmahojaan erillisen sivun, jossa määritin taulukon perusteella c_p -arvot lämpöfunktiona jokaiselle edellä mainitulle aineelle.



Kuva 4. Hiilidioksidin c_p :n lämpötilafunktio

Laskukaava on toisen asteen yhtälö, ja tässä tapauksessa on muotoa:

$$y = a \cdot T^2 + b \cdot T + c$$

missä T = Lämpötila (°C)

Kaavio antaa a:n, b:n ja c:n arvot, josta muodostuu valmis yhtälö. Näin ominaislämpökapasiteettien arvot ovat suhteessa lämpötilan muutoksien kanssa.

Käytin ominaislämpökapasiteettien muodostuksessa makroja, jotta arvot voitaisiin määrittää tarvittaessa missä tahansa laskentaohjelman kohdassa. Esimerkiksi, jos laskentaohjelmaan kirjoitetaan cp_co2(T), laskentaohjelma määrittää kyseisellä kaavalla hiilidioksidin c_p:n edellyttäen, että lämpötilalle on annettu jokin arvo. Myös makrojen pitää olla luettavissa, että tämä toimii. Tämä sama kaava toimii myös kaikkien muidenkin aineiden ominaislämpökapasiteettien määrittämisessä.

Taulukko 2. Ominaislämpökapasiteettien määrittäminen 50 %:n hyötysuhteella

50 %	cp (kJ/kgK)	osuus	
CO ₂	0,9495528	0,157172	0,149243
O ₂	0,9472488	0,065026	0,061596
N ₂	1,0458784	0,610041	0,638028
SO ₂	0,64	6,42E-05	4,11E-05
H ₂ O	2,016572	0,167698	0,338174
		yht.	1,187082
			(kJ/kgK)

7.4 Kaasumaisten polttoaineiden lämpöarvot

Palamattomien kaasujen häviöissä oli huomioitu ainoastaan hiilidioksidi ja sen lämpöarvo ($12,6 \text{ MJ/m}^3$) toimi laskennassa vakiona. Päästömittauslaboratorion pyyntö oli, että ainakin hiilivedyt tulisi huomioida laskennassa. Tutkiessani päätin lisätä vedyn lisäksi laskentaan myös metaanin ja propaanin.

Loin laskentaohjelmaan taulukon, josta nähdään kunkin polttoaineen lämpöarvo, jonka voi tarvittaessa lisätä laskentaan.

Laskentaohjelma laskee kullekin kaasumaiselle polttoaineelle siitä palamatta jääneen kaasun häviön. Jos polttoaineita käytetään useampia, lasketaan kunkin polttoaineen häviö erikseen ja sen jälkeen häviöt summataan keskenään. Näin saadaan palamattomien kaasujen häviöt tarkemmin esiin, kun huomioidaan muitakin polttoaineita kuin hiilimonoksidi.

Taulukko 3. Kaasumaisten polttoaineiden lämpöarvojen taulukko laskentapohjassa

Lämpöarvoja (MJ/m ³)			
12,64			
12,64	10,8	35,3	93,6
hiilimonok.	vety	metaani	propaani
CO	H ₂	CH ₄	C ₃ H ₈

7.5 Muut uudistukset

Palamattomien kiintoaineiden häviöissä käytettiin alkuperäisessä laskentapohjassa kivihiilen lämpöarvoa $33,6 \text{ MJ/kg}$ vakiona laskennassa. Muutin kaavaa siten, että arvon voi nyt itse syöttää laskentapohjaan. Laskentaohjelma huomioi nyt syötetyn arvon laskentaan eikä laske enää pelkän kivihiilen lämpöarvon mukaan. Esimerkiksi ruskohiilen arvo $27,2 \text{ MJ/kg}$ voidaan nyt tarvittaessa vaihtaa laskentaan.

Laskentaohjelmassa on nyt myös eroteltu palamaton tuhka lentotuhkaan ja pohjatuhkaan. Näin pystytään havainnoimaan kummankin osuus palamattoman tuhkan kokonaismäärästä.

Omakäyttöhyötysuhde on myös huomioitu laskentapohjassa. Siihen sisältyy esimerkiksi hiilimylyt ja arinan käyttölaitteet, ilma- ja savukaasupuhaltimet, lauhduttimien jäähdytysvesi- ja ilmapumput sekä tehonsiirtohäviön syöttöpumppu. [9]

Laskentapohjaan voidaan syöttää kilowatteina, kuinka paljon kattila kuluttaa energia-tehoa esim. edellä mainittuihin laitteisiin. Laskentapohja vähentää arvon käytetystä polttoainetehosta ja näin se ilmenee myös hyötysuhteessa.

Tulosarkki on myös uudistus tähän laskentaohjelmaan. Asiakkaalle annettavaan arkkiin on kerätty kattilan hyötysuhteet 50 %:n ja 100 %:n tehoille. Lisäksi siitä näkee prosenteissa kattilan kokonaishäviöt molemmilla hyötysuhteilla ja mistä häviöt ovat muodostuneet. Arkista nähdään myös käytettävä polttoaineteho.

8 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli määrittää kattilan hyötysuhdetta suoralla ja epäsuoralla menetelmällä sekä kehittää päästömittauslaboratorion käytössä olevaa kattilan hyötysuhteen laskemista varten tehtyä laskentaohjelmaa. Tarkastelun pääpaino on kohdistettu laskentaohjelman kehittämiseen.

Työssä selvennetään kattilan hyötysuhteen laskemista. Käydään läpi hyötysuhteen laskemista niin suoralla kuin epäsuoralla menetelmällä. Laskemista havainnoidaan teorian avulla. Työssä on laskettu esimerkkilaskuja, jotka auttavat myös selventämään kattilan hyötysuhteen määrittämistä.

Laskentaohjelman kehityksessä oli kaksi selvää päämäärää, laskentatarkkuus ja sen parantaminen sekä laskentaohjelman ulkonäkö. Laskentaan saatiin lisää tarkkuutta esimerkiksi ominaislämpökapasiteettien määrittämisen avulla. Ulkonäköä saatiin paranteltua luomalla selkeä tulosarkki, josta voidaan havainnoida saadut tulokset. Työhön luotiin myös yksi sivu hyötysuhteen laskentaa varten, jossa saadaan laskettua hyötysuhteet 50 %:n ja 100 %:n kuormituksille.

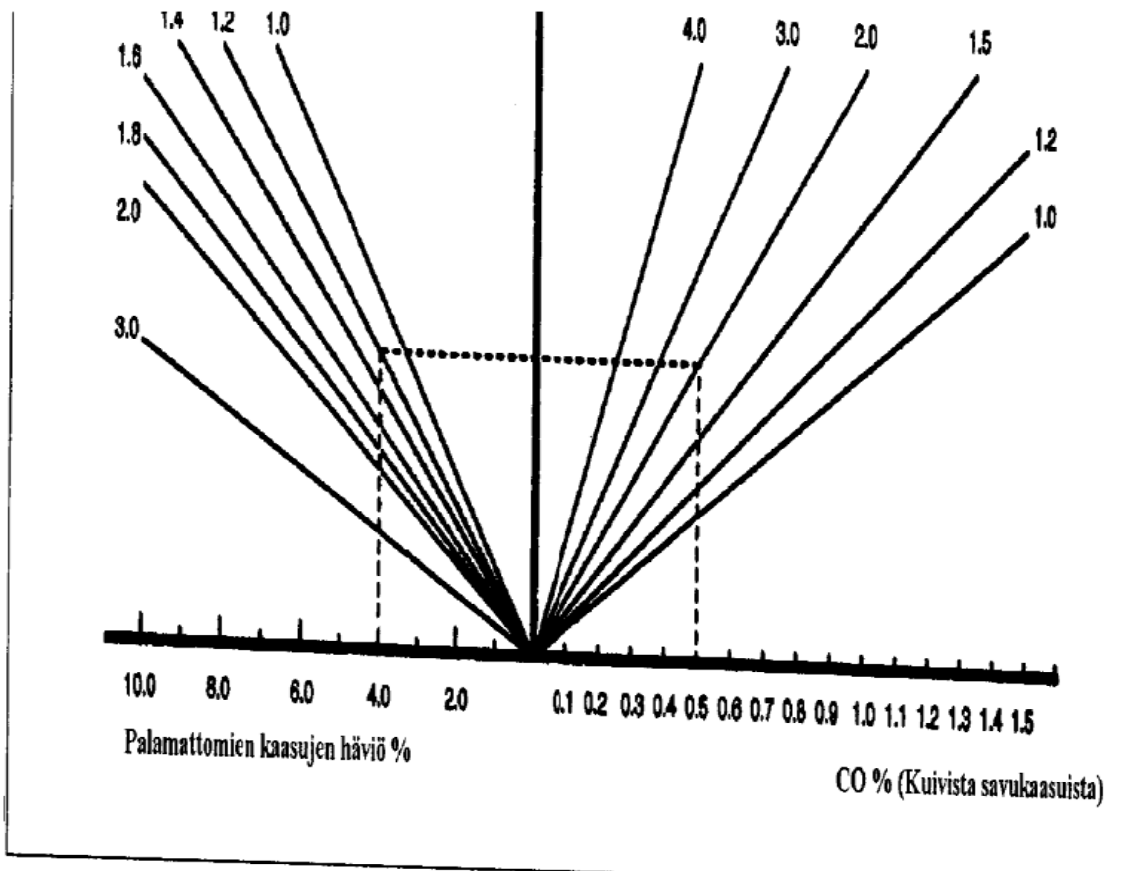
Haastetta työssä oli riittävästi. Materiaalin etsiminen oli haasteellista, koska suuri osa käytetystä materiaalista oli saksaksi tai englanniksi. Suurta ihmetystä herätti se, ettei todella vanhaa saksalaista DIN 1942 –standardia ole käännetty vielä ainakaan kokonaan englannin kielelle. Onneksi kääntöapua oli tarjolla aina kun sitä tarvitsi, joten se

ei haitannut työn kulkua liiaksi. Laskentaohjelman kehityksessä oli myös omat ongelmansa, mutta niistä selvittiin maltilla ja tulosta saatiin aikaan.

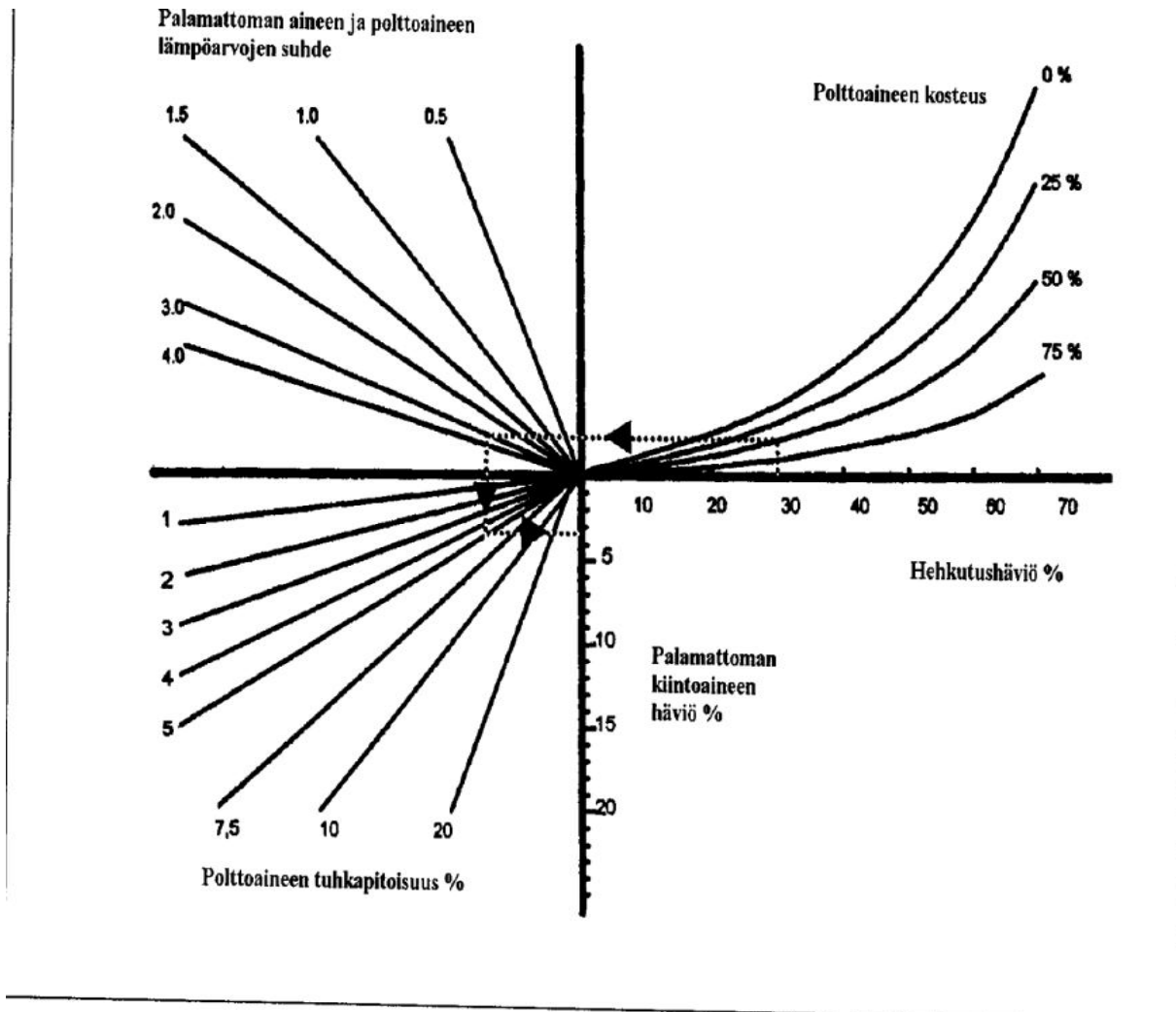
Työstä hyötyvät niin opiskelijat kuin muutkin, jotka tarvitsevat apua kattilan hyötysuhteen määrittämisessä. Kaikki tarvittavat kaavat saadaan työstä ja se mahdollistaa hyötysuhteen laskemisen mille tahansa lämpökattilalle. Laskentaohjelman kehitys auttaa päästömittaustaloutta mittaustöissä ja laboratorio sai kaivattua tarkkuutta laskentaan. Myös käytettävyyttä saatiin paremmaksi ja ulkonäköä selkeämmäksi.

LÄHTEET

1. Knowenergyn www-sivut. Saatavissa:
http://www.knowenergy.net/suomi/monipoltt_kattilat/8_haviot/fr_text.htm#1 [viitattu 11.3.2010].
2. Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P, & Pakkanen H. 2000. Höyrykattilatekniikka 5. painos. Helsinki : Edita Prima Oy
3. DIN 1942 -standardi: Abnahmeversuche an Dampferzeugern
4. Hupa, M., Kurki-Suonio, I., Raiko, R., Saastamoinen, J. 2002 Poltto ja palaminen. Jyväskylä: Gummerus
5. Halme, M. 2005 Hakelämmitys. Insinööriyö. Kotka: Kymenlaakson ammattikorkeakoulu
6. Wärtsilä Biopower Oy, Muistio: Nurmeksen takuumittauksista 2003
7. Bergman, DeWitt, Incropera, Lavine. 2007. Fundamentals of Heat and Mass transfer
8. DIN 4702 –standardi: Heizkessel
9. Tampereen teknillisen yliopiston www-sivut. Saatavissa:
<http://www.tut.fi/units/me/ener/kurssit/ENER-8100/Tuki.pdf> [viitattu 5.4.2010]



Kuva 5. Nomogrammi palamattomien kaasujen häviön määrittämiseksi [2, s.106]



Kuva 6. Palamatta jäävän kiintoaineen aiheuttama häviö [2, s.107]

Taulukko4. Kaasumaisten polttoaineiden lämpöarvoja. [2, s.45]

Polttoaine	Kemiallinen lyhenne	Lämpöarvo MJ/m ³
Hiilimonoksidi	CO	12,6
Vety	H ₂	10,8
Metaani	CH ₄	35,3
Propaani	C ₃ H ₈	93,6
Butaani	C ₄ H ₁₀	122,6
Eteeni	C ₂ H ₄	59,5
Etyyni	C ₂ H ₂	56,5

Kattilan hyötysuhteen määrittäminen		Päästömittaust laboratorio	
		Aika :	
		Paikka :	
		Tilaaaja :	
Hyötysuhde epäsuora menetelmä	<input type="text" value="50%"/>	50%	
	<input type="text" value="88.38"/>	100%	
Kattilan ajo	<input type="text" value="100"/>	%	
Kattilahuoneen lämpötila	<input type="text" value="20"/>	t _L (°C)	
	<input type="text" value="50%"/>	<input type="text" value="100%"/>	
q _A	<input type="text"/>	<input type="text" value="0.106029"/>	
q _U	<input type="text"/>	<input type="text" value="0.000383"/>	
q _F	<input type="text"/>	<input type="text" value="0.006056"/>	
q _S	<input type="text"/>	<input type="text" value="0.003769"/>	
q _A = Savukaasuhäviö vapaana lämpönä q _U = Palamattomien kaasujen häviöt q _F = Palamattomien kiintoaineiden häviöt q _S = Säteilähäviö			
		<input type="text" value="50%"/>	<input type="text" value="100%"/>
		<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0.000383"/>
		<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
		<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
		<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
			CO
			H ₂
			CH ₄
			C ₃ H ₈
Lämpöarvoja (MJ/m³)			
<input type="text" value="12.64"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
12.64	10.8	35.3	93.6
hiilimonok.	vety	metaani	propaani
CO	H ₂	CH ₄	C ₃ H ₈
Polttoaineen lämpöarvo		(MJ/kg)	<input type="text" value="17.34"/>
Lentotuhka		<input type="text"/>	<input type="text" value="0"/>
Pohjatuuhka		<input type="text"/>	<input type="text" value="0.2"/>
Palamaton tuhassa		(kg/kg)	yht. <input type="text" value="0.2"/>
Polttoaineteho 100%	(kW)	<input type="text" value="100"/>	QB (kW) <input type="text" value="100"/>
Polttoaineteho ajo %			QB (kW) <input type="text" value="100"/>
Omakäyttöhyöty	(kW)	<input type="text"/>	

	Pinta-ala	Ls. Ker- roin 50 %	Ls. Ker- roin 100 %	Pintalt. 50 %	Häviö 50 %	Pintalt. 100 %	Häviö 100 %
Pinta	A_x (m ²)	(W/m ² K)	(W/m ² K)	t_m (°C)	Q_x (W)	t_m (°C)	Q_x (W)
1	3		8.375			25	125.625
2	3		8.375			25	125.625
3	1		8.375			25	41.875
4	1		8.375			25	41.875
5	1		8.375			25	41.875
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
				yht.	376.875	yht.	376.875

Ls. Kerroin esimerkkejä:

50 °C =	9.75
100 °C =	12.5
150 °C =	15.25
200 °C =	18

50%	cp (kJ/kgK)	osuus	
CO ₂			
O ₂			
N ₂			
SO ₂			
H ₂ O			
		yht.	
			(kJ/kgK)

100%	cp (kJ/kgK)	osuus	
CO ₂	0.9471177	0.157172	0.14886
O ₂	0.9464067	0.065026	0.061541
N ₂	1.0456156	0.610041	0.637868
SO ₂	0.64	6.42E-05	4.11E-05
H ₂ O	2.019623	0.167698	0.338686
		yht.	1.186996
			(kJ/kgK)

Kuva 7. Laskentaohjelma pohja. Laskettu kattilan hyötysuhde 100 %:n kuormitukselle.