

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikan koulutusohjelma / Automaatio- ja prosessitekniikka

Mikko Salminen

VESIPUTKIKATTILAN HYÖTYSUHTEN MÄÄRITTÄMINEN  
LASKENTAOHJELMALLA

Opinnäytetyö 2014

## TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikan koulutusohjelma

SALMINEN, MIKKO

Vesiputkikattilan hyötysuhteen määrittäminen  
laskentaohjelmalla

Opinnäytetyö

73 sivua + 5 liitesivua

Työn ohjaaja

pt. tuntiopettaja Hannu Sarvelainen

Toimeksiantaja

Insinööritoimisto AX-LVI Oy

Toukokuu 2014

Avainsanat

kattila, standardi, hyötysuhde, polttoaine

Tämän työn aiheena on vesiputkikattiloiden hyötysuhteen määrittäminen laskentaohjelman avulla. Työ perustuu standardiin SFS-EN 12952-15 ja se tehdään Excel-laskentaohjelman pohjalle. Työn ensimmäisessä osiossa on käsitelty kattiloita, joiden hyötysuhde määritellään. Toisessa osassa käsiteltiin standardin mukaisia laskentakäy-  
voja. Kolmannessa osiossa käsiteltiin laskentaohjelmaa Excel-taulukoissa ja laskentaohjelmasta saatavia arvoja.

Työn tarkoituksena on auttaa laskentaohjelman tekemisessä. Laskentaohjelman tulee soveltua yrityskäyttöön. Työssä määriteltiin laskentaohjelmaan tulevat asiat, jotka koostuivat syötettävistä arvoista hyötysuhteen määrittämiseen asti.

Kaikki työhön kuuluvat matemaattiset kaavat selvitettiin ja ne sijoitettiin Excel-taulukoihin. Excel-laskentaohjelma muotoiltiin halutulla tavalla. Laskentaohjelmaan syötettiin kattilasta otettuja mittausarvoja, minkä perusteella ohjelma laskee hyötysuhteen kattilalle. Lisäksi kattilan toiminnasta saatiin lisätietoa. Työ antoi eri vaihtoehtoja hyötysuhteen määrittämiseen. Ne ovat suora - ja epäsuora menetelmä. Hyötysuhde saatiin laskettua tehojen, entalpia-arvojen tai prosenttiosuuksien kautta.

Työhön ei sisälly yhtään esimerkkiä laskentaohjelmasta tietojen salaamisen takia. Laskentaohjelmalla päästiin lähelle hyötysuhdetta, joka on määritelty ilman laskentaohjelmaa. Työ soveltuu yrityskäyttöön.

## ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Energy Engineering

SALMINEN, MIKKO

Determining Water Tube boiler efficiency with calculation program

Bachelor's Thesis

73 pages + 5 pages of appendices

Supervisor

Hannu Sarvelainen, Lecturer

Commissioned by

Insinööritoimisto AX-LVI Oy

May 2014

Keywords

boiler, standard, efficiency, fuel

The object of the thesis was to determine the efficiency of water tube boiler with calculation program. The research was based on standard SFS-EN 12952-15 and Excel-program was used to calculate boiler data. The first part of the thesis gives information about boilers that is used in the calculation program. The second part gives information about standard SFS-EN 12952-15. The third part gives information about Excel-program and results of the calculation program.

This thesis was assisted to design a calculation program. The calculation program should be used also in companies. In this thesis, all values of the calculation program were estimated between input values and the efficiency of the boiler.

All mathematical formulas was determined and placed into Excel-program. Excel-program was edited for the calculation program. The real measurement from the boiler was input values for the calculation program. The thesis introduced two choices to calculate the efficiency. They are indirect and direct method. The efficiency was calculated to base on power, enthalpy or share of lost.

This thesis not includes examples of calculation program because they were confidential data. The results of the calculation program were almost same than results who were calculated without the calculation program. This thesis can be used in companies.

## ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö tehtiin vuosina 2013 – 2014 Insinööritoimisto AX-LVI Oy:n toimeksiannosta. Ohjaavana opettajana toimi tuntiopettaja Hannu Sarvelainen ja yrityksen ohjaavana henkilönä toimi yksikön johtaja Seppo Heinänen.

Haluan kiittää ohjaavaa opettajaani ja Seppo Heinästä opinnäytetyön avustamisesta ja hyvistä neuvoista. Haluan kiittää Veikko Tolppaa opinnäytetyön mahdollistamisesta.

Tämä työ on tehty Excel-laskentaohjelman pohjalta. Tässä työssä ei ole kuvia eikä esimerkkejä suoraan vesiputkikattilan hyötysuhteen määrittämisestä laskentaohjelmalla tietojen salaamisen takia.

Kotkassa 30.5.2014

Mikko Salminen

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

## ALKUSANAT

|   |  |    |
|---|--|----|
| 1 | JOHDANTO   | 7  |
| 2 | HÖYRYKATTILA                                     | 8  |
|   | 2.1 Vesiputkikattila                             | 8  |
|   | 2.1.1 Läpivirtauskattila                         | 9  |
|   | 2.1.2 Luonnonkierto- ja pakkokiertokattilat      | 10 |
|   | 2.2 Suurvesikattilat                             | 12 |
|   | 2.3 Energiatase                                  | 13 |
|   | 2.4 Höyryprosessi                                | 13 |
|   | 2.5 Savukaasut ja tuhkat laitoksessa             | 15 |
|   | 2.6 Syöttöveden ja ilman esilämmittimet          | 16 |
|   | 2.7 Kattilan seinät                              | 17 |
| 3 | STANDARDIN MUKAISEN LASKENTAPERIAATTEEN ESITTELY | 18 |
|   | 3.1 SFS-EN 12952-15 standardi                    | 18 |
|   | 3.2 Kattilaan syötetty teho                      | 18 |
|   | 3.2.1 Kattilaan syötetty kokonaisteho            | 18 |
|   | 3.2.2 Polttoaineet ja lämpöarvo                  | 19 |
|   | 3.2.3 Kattilaan syötetty kemiallinen energia     | 23 |
|   | 3.2.4 Palaminen                                  | 23 |
|   | 3.3 Kattilasta saatu hyötyteho                   | 31 |
|   | 3.3.1 Höyrykattila                               | 32 |
|   | 3.3.2 Lämmönsiirtolaitteisto                     | 34 |
|   | 3.3.3 Tulitorvi-tuliputkikattila                 | 35 |
|   | 3.4 Kattilan häviöt                              | 36 |
|   | 3.4.1 Savukaasuhäviöt                            | 37 |
|   | 3.4.2 Palamattomien kaasujen häviöt              | 38 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3.4.3 | Tuhkahäviöt   | 39 |
| 3.4.4 | Säteily- ja konvektiohäviöt                             | 43 |
| 3.4.5 | Jäähdytyslaitteisto                                     | 45 |
| 3.5   | Kattilan laskennallisia arvoja                          | 46 |
| 3.5.1 | Savukaasut  | 46 |
| 3.5.2 | Tuhkat  | 53 |
| 3.5.3 | Vertailulämpötila                                       | 54 |
| 3.5.4 | Hajotushöyry  | 55 |
| 3.6   | Hyötysuhteen määrittäminen                              | 55 |
| 3.6.1 | Suora menetelmä   | 57 |
| 3.6.2 | Epäsuora menetelmä                                      | 57 |
| 3.6.3 | Savukaasu- tai polttoainevirta                          | 58 |
| 4     | LASKENTAOHJELMAN TESTAUS                                | 59 |
| 4.1   | Lähtöarvot  | 59 |
| 4.2   | Tulokset  | 60 |
| 5     | EXCEL-TAULUKON HYÖDYNTÄMINEN                            | 62 |
| 5.1   | Tarkoitus   | 62 |
| 5.2   | Hyödyt  | 62 |
| 5.3   | Ongelmakohtia   | 63 |
| 5.4   | Laskentaohjelman suunnittelu                            | 64 |
| 5.5   | Käyttöohjeet  | 66 |
| 6     | YHTEENVETO  | 70 |
|       | LÄHTEET   | 71 |
|       | LIITTEET  |    |
|       | Liite 1. Polttoaineen koostumustaulukko                 |    |
|       | Liite 2. Palamiskolmio                                  |    |
|       | Liite 3. Hyötysuhteen vaikutuslohkot EN-12952-15 mukaan |    |
|       | Liite 4. Vesihöyryn h,s-piirros                         |    |
|       | Liite 5. Vesiputkikattilan energiatase                  |    |

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on höyrykattilan hyötysuhteen määrittäminen laskentaohjelmalla. Tässä työssä höyrykattilaa käsitellään laskentaohjelman kannalta. Työ perustuu standardiin SFS-EN 12952-15. Laskentaohjelman on tarkoitus soveltua useisiin erilaisiin kattiloihin. Siksi teoriaosuudessa kerrotaan kattiloista vain yleiset asiat. Tässä työssä huomioidaan vesiputkikattilat ja tulitorvi-tuliputkikattila, jotka on määritelty standardissa SFS-EN 12952-15. Suurvesitilakattiloissa kattila on täynnä vettä ja niitä lämmitetään tuliputkien avulla. Laskentaohjelman pohjana on Excel-  
taulukkolaskentaohjelma. Laskentaohjelmalla pystytään laskemaan höyrykattiloista arvoja, joita tarvitaan höyrykattilan testauksissa. Pääsääntöisesti höyrykattilasta laskeaan hyötysuhde, josta nähdään kuinka paljon lämpöenergiaa saadaan hyötykäyttöön.

Tämä työ on tehty Insinööritoimisto AX-LVI Oy:n toimeksiannosta. Työ on tehty yritysten käyttöön, jotta yritys voi hyödyntää työtä vesiputkikattiloiden hyötysuhteen määrittämisessä. Yritys voi määrittää oman höyrykattilansa hyötysuhteen tämän työn neuvojen avulla. Insinööritoimisto AX-LVI Oy:lle on tehty laskentaohjelma höyrykattilan hyötysuhteen määrittämisestä, mutta tässä työssä ei ole esimerkkejä laskentaohjelmasta tietojen salaamisen vuoksi.

Työn tekemisessä käytettiin hyödyksi Excel-laskentaohjelmaa ja energia-alan kirjallisuutta. Insinööritoimisto AX-LVI Oy antoi käytännön neuvoja höyrykattilan käytöstä ja mittauksista. Aluksi tutustuttiin standardiin SFS-EN 12952-15, jonka pohjalta laskentaohjelma on tehty. Laskentaohjelman arvoja tarkasteltiin ja niitä verrattiin ilman laskentaohjelmaa saatuihin arvoihin. Ensimmäisessä osiossa on teoriaa laskentaohjelmaan kuuluvista kattiloista laskentaohjelman kannalta. Toisessa osiossa käsitellään laskentaohjelmaa standardin SFS-EN 12952-15 pohjalta. Kolmannessa osiossa käydään läpi Excel-taulukko-ohjelman soveltamista laskentaohjelmassa.

Työn tarkoituksena oli selvittää, miten laskentaohjelmalla voidaan määrittää höyrykattilan hyötysuhde annettujen arvojen avulla. Annetut arvot tuli määrittää itse esimerkiksi mittaukset. Laskentaohjelmasta selvitettiin, miten lähelle laskentaohjelma pääsee hyötysuhdetta, mikä on määritelty ilman laskentaohjelmaa. Lisäksi laskentaohjelman antamia arvoja tarkasteltiin kriittisesti. Esimerkiksi savukaasun tiheyden määrittäminen oikein on vaikeaa pelkällä laskentaohjelmalla.

## 2 HÖYRYKATTILA

Höyrykattila tarkoittaa paineastiaa, jolla tuotetaan lämpöenergiaa höyrypiiriin. Polttoainetta polttamalla, kuumasta kaasusta, kemiallisesta reaktiosta tai sähköenergiasta tehdyllä lämpöenergialla siirretään lämpöä kattilasta veteen, joka ohjataan höyrynä ulos kattilasta energiatuotannon käyttöön. Höyrykattiloita ovat vesiputkikattilat ja suurvesikattilat. (Huhtinen 1994, 7.)

### 2.1 Vesiputkikattila

Vesiputkikattiloita on pääsääntöisesti kolme eri mallia, jotka jaetaan pääsääntöisesti primääri-vesikierron mukaan. Vesiputkikattilatyyppejä ovat läpivirtauskattilat, pakkokiertokattilat ja luonnonkiertokattilat. Pakkokierto- ja luonnonkiertokattiloissa on höyrylieriö. (SFS-EN 12952-15.)

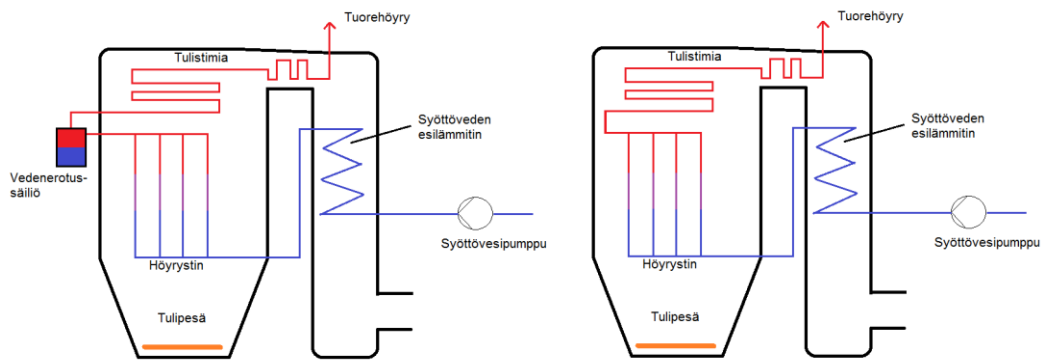
Vesiputkikattiloissa poltetaan polttoainetta lämpöenergiaksi. Savukaasujen sisältämä lämpöenergia siirtyy säteilemällä, johtumalla ja konvektion avulla kattilan höyrystimen läpi menevään vesiputkeen. Poltosta saatu energia ohjataan kattilasta höyryputkea pitkin tulistimille ja savukaasuista siirretään lämpöä höyryyn ennen höyryn käyttöönottamista. Polttaminen tuottaa savukaasuja ja häkää, mitkä aiheuttavat kattilaan lämpöhäviötä, koska savukaasut ja häkä poistetaan kattilasta ilman, että niistä saadaan kaikki lämpö talteen. (Khalil 1990, 88.)

Vesiputkikattiloissa on erilaisia polttomahdollisuuksia. Laskentaohjelman voi tehdä standardin SFS-EN 12952-15 pohjalta, jos vesihöyrypiirit ovat tämän työn mukaisia. Laskentaohjelma sopii eri poltinten sijoitustavoille. Kattilan polttimet voi sijoittaa eri paikkoihin kattilassa, esimerkiksi pohjaan tai kattoon. Polttotapa vaikuttaa kattilan eri osien lämpötiloihin. (Huhtinen 1994, 120 – 121.) Laskentaohjelma sopii myös leijupetikattiloille. Leijupetikattiloissa hiekka kiertää kattilassa, mikä tasaa palamista. Leijupetikattila vaikuttaa oleellisesti laskentaohjelman lähtöarvoihin. Leijupetikattiloissa on paljon lentotuhkaa, mutta palamislämpötila on matalalla. (Huhtinen 1994, 140).



### 2.1.1 Lämpivirtauskattila

Lämpivirtauskattiloissa vesihöyrypiirin vesi tulee kattilaan, mistä lämpöenergia siirtyy veteen. Vesihöyrypiirin putki tulee kattilaan ja menee sieltä suoraan ulos höyrynä. Lämpivirtauskattiloissa ei ole lieriötä. Lämpivirtauskattiloiden hyötyteho on mahdollista määrittää lämmönsiirtimeen siirtyvän hyötytehon mukaan. Katso kaava (23). Lämpivirtauskattiloihin tulee vettä tietyssä entalpia-arvossa ja kattilasta lähtee höyryä tietyssä entalpia-arvossa. Siksi lämpivirtauskattiloiden hyötyteho voidaan laskea lämmönsiirtolaitteistoperiaatteen mukaan. Lämpivirtauskattiloita on kahden tyyppisiä: Sulzer-kattila ja Benson-kattila. Molemmissa kattiloissa syöttövesipumppu antaa lisäpaineen syöttöveden virtaukseen. (Huhtinen 1994, 111 – 112.)



Kuva 1. Sulzer- ja benson-kattila. (Huhtinen 1994, 111 – 112).

Sulzer-kattiloissa on vedenerotussäiliö, mikä varastoi kattilan läpi menevää vesimassaa. Vedenerotussäiliö tulee heti höyrystimen jälkeen. Vesi erotetaan höyrystä, milloin vedenerotussäiliöstä puolet on vettä ja höyryä. Tämän kautta lähestytään kiinteää höyrynpainetta kattilassa. Kun laskentaohjelmalla lasketaan hyötytehoa, on tärkeää tietää kuinka paljon energiaa varastoituu veteen. Vedenerotussäiliö muuttaa hyötytehoa, koska paine putkistossa muuttuu verrattuna Benson-kattiloihin. Sulzer-kattiloissa vedenerotussäiliö tasaa höyrynpaineen melkein vakioksi. Oleellisinta on kuitenkin selvittää kattilaan tulevan veden entalpia ja kattilasta saatavan vesihöyryn entalpia. (Huhtinen 1994, 115.) Sulzer-kattilat ovat yleisiä suurvoimalaitoksissa, mutta eivät teollisuudessa (Heinänen 2014).

Benson-kattilat toimivat ilman veden erotus säiliötä, mikä vaikuttaa putkiston paineeseen ja veden höyryntymiseen. Benson-kattilassa oleva höyryn paine muuttuu suhteeseen

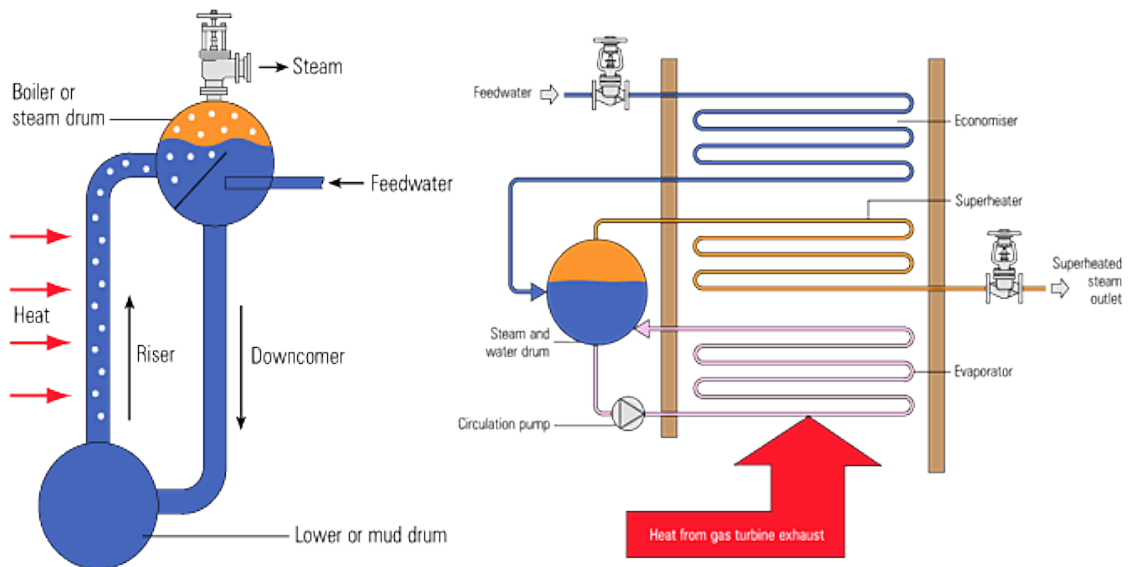
sa polttotehoon, minkä takia polttotehon suuruus määrää lähes suoraan saatavan hyötytehon. (Huhtinen 1994, 115.)

### 2.1.2 Luonnonkierto- ja pakkokierto-kattilat

Luonnonkierto- ja pakkokierto-kattiloissa on lieriö, höyrystin, tulipesä, tulistin ja syöttöveden esilämmitin. Pakkokierto-kattila eroaa luonnonkierto-kattilasta lieriöstä lähtevän kiertoveden paineen, kiertoluvun ja toiminnan varmentamisen perusteella. Luonnonkierto-kattiloiden kiertoluvut ovat suuremmat kuin pakkokierto-kattiloiden. (Huhtinen 1994, 110.) Kattilan lieriöön syötetään syöttövettä syöttövesipumpun avulla. Pakkokierto-kattiloissa vettä pumpataan pumpun avulla höyrystimestä olevaan putkistoon, mikä suurentaa paine-eroa. Luonnonkierto-kattiloissa vesi ohjautuu veden tiheyden avulla itsestään tulipesässä olevaan putkistoon. Toisin sanoen, pakkokierto-kattiloissa sisäinen kierto saadaan aikaan pumpun avulla ja luonnonkierto-kattiloissa kierron aiheuttaa lasku- ja nousuputken tiheusero. Luonnonkierto-kattila on edullista rakentaa mahdollisimman korkeaksi ja kapeaksi korkeamman kiertovoiman takia. (Khalil 1990, 90.)

Tulipesässä vesi muuttuu vedestä vesihöyryksi vähitellen kaksifaasi-olomuodon kautta. Kaksifaasi-olomuoto tarkoittaa tilaa, jossa virtaava aine sisältää yhtä aikaa vettä ja höyryä. Molemmissa lieriökattiloissa kaksifaasi-vesihöyry nousee takaisin lieriöön, koska höyryllä on vettä pienempi tiheys. Pakkokierto-kattiloissa kiertopumppu saa aikaan paine-eron, mikä lisää nostetta putkistossa. Kaksifaasi-vesi ohjataan höyrystimestä useisiin eri höyrystimen putkiin tasaisesti, että höyryn kierto pysyisi tasapainossa. Epätasapainossa oleva höyrynkierro aiheuttaa esimerkiksi ylikuumentumista. (Huhtinen 1994, 115.)

Lieriössä pinta pyritään pitämään tasaisena. Lieriössä tulee olla sopiva pinnankorkeus tulistimelle menevän höyryn mukaan. Lieriön tasapaino on tärkeää koko prosessin kannalta, koska vettä on mentävä oikeassa suhteessa höyrystimeen ja vesihöyryä on mentävä käyttötarpeen mukaan tulistimeen. (Huhtinen 1994, 105 – 111.)



Kuva 2. Luonnonkierto- ja pakkokierto-kattilan periaate. (SpiraxSarco 2014).

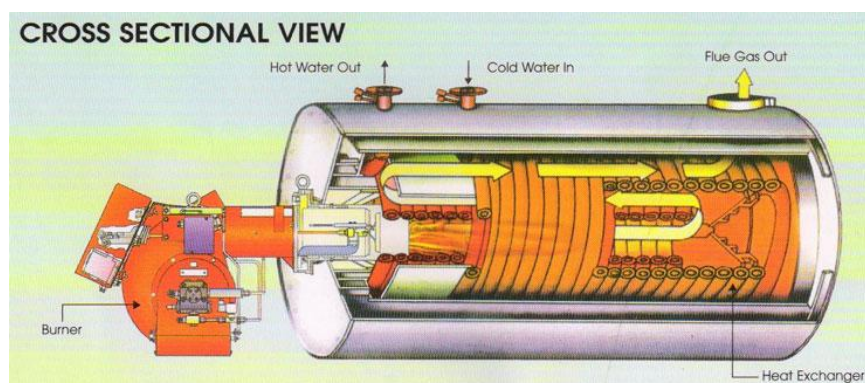
Lieriöitä voi olla useampia kuin yksi. Yhden lieriön kattilaa kutsutaan kahden painetason lämmöntalteenottokattilaksi. Kun lieriöitä on kaksi, puhutaan kahden painetason lämmöntalteenottokattiloista. Kahdella lieriöllä varustetussa kattilassa on lieriöiden välillä vesiputki. Lieriöiden välillä voi olla pumppu, joka on lisälaite. Ylempänä oleva alemman painetason lieriö syöttää höyrystymätöntä vettä ylemmän painetason lieriöön. Kahdella painetasolla saadaan kattilasta enemmän höyryä käyttöön. Lieriöt tuottavat matalapainehöyryä ja tuorehöyryä. (Huhtinen 1994, 159 – 160.) Laskentaohjelmassa ei oteta huomioon kattilan sisällä liikkuvia energiavirtoja. Ainoastaan kattilan lämpötaseeseen vaikuttavat energiavirrat tulee huomioida. Kahden painetason kattilassa on huomioitava kuitenkin molempien lieriön energiataseiden vaikutus kattilan hyötötehon määrittelyssä. Höyrykattilan hyötötehoa määriteltäessä kahdella painetasolla tulee ottaa huomioon:

- syöttövesi
- tuorehöyry ja matalapainehöyry
- ruiskutusvesi
- jäähdytysvesi
- välitulistimet
- pumput
- ilmanesilämmitin. (SFS-EN 12952-15.)

## 2.2 Suurvesikattilat

Suurvesikattilaksi luetaan tulitorvi-tuliputkikattila. Tulitorvi-tuliputkikattila mainitaan standardissa SFS-EN 12952-15. Standardin avulla myös suurvesikattilan hyötyteho voidaan määrittää, mitä voidaan käyttää laskentaohjelmassa. Suurvesikattilan hyötysuhde voidaan määrittää vesiputkikattiloiden tapaan, koska hyötysuhteen määrittäminen eroaa vain hyötytehon kohdalla. (SFS-EN 12952-15.) Suurvesikattila tuottaa savukaasua, josta lämpöä siirtyy veden lämmittämiseen. Paineistettu vesi pysyy nesteinä. Muut mallit eivät sovi laskentaohjelmaan tämän työn esimerkkien mukaan, koska määritelmässä tulee olla veden sisääntulo ja - ulostulo, johon lämpöenergia siirtyy. Jos vesi muutetaan kuumaksi ulostulo höyryksi, kattilan hyötysuhde on epätarkka. Suurvesikattila kelpaa pienemmän paineen omaaviin prosessilaitoksiin. (Holström 1982, 197.)

Tulitorvi-tuliputkikattilassa on tulitorvi, joka lämmittää tulitorven ympärillä olevaa vettä. Vesi on säiliössä tulitorven ympärillä. Vesisäiliön vesi ottaa lämpöä vastaan säteilyn kautta, mikä tasaa kuormaa prosessissa. Veden liiallista kiehumista tulee välttää. Veden ominaisuudet ja laatu ovat tärkeitä tekijöitä suurvesikattiloissa. (Holström 1982, 197.) Kattila voi olla vaakatasossa tai pystyssä. Suurvesikattilan hyötysuhteet ovat noin 90 %:n luokkaa. (Mark Associates 2014).



Kuva 3. Tulitorvi-tuliputkikattila. (Mark Associates 2014).

### 2.3 Energiatase

Energiatase kuvaa energiavirtojen kulkemista tietyistä komponentista ulos ja samaan komponenttiin sisälle. Kattilan hyötysuhdelaskennan kannalta, energiataseen merkityksellisimmät energiavirrat standardin SFS-EN 12952-15 mukaan ovat polttoaine, polttoilma, häviöt, oheislaitteet ja hyötYTEHO. Liitteessä 5 on kattilan hyötysuhteen kannalta merkityksellisimmät energiavirrat. Liite 5 ei ole standardin mukainen. (SFS-EN 12952-15.)

Jokaiselle laitoksen komponentille voidaan määrittellä oma energiatase. Komponentin energiavirtojen suuruudet määräävät komponentin merkityksen kattilan energiataseessa. Komponenttien energiavirtojen etumerkit määrittelevät komponentin merkityksen kattilan energiataseessa. Kun komponentin yhteenlaskettujen energiavirtojen summa on positiivinen, tuo komponentti energiaa kattilaan. Negatiivinen summa vie kattilasta energiaa. (Tekniikan kaavasto 2008, 110.)

### 2.4 Höyryprosessi

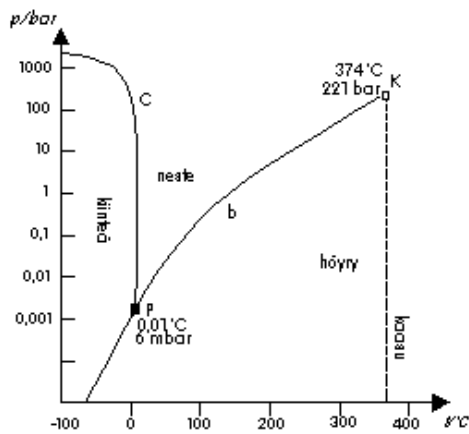
Kattilasta lämpöenergiaa siirtyy vesihöyrypiirin putkistoon, joka kulkee kattilan sisällä. Putket roikkuvat useissa kattiloissa kattilan katosta, minkä takia ne pystyvät laajenemaan kuumetessaan. Vesihöyrypiirissä lämpöenergia kulkee konvektion avulla putkessa. Konvektiossa lämpöenergiaa siirretään liikkuvan aineen mukana eteenpäin. Vesi tulee kattilan höyrystimeen ja kerää lämpöenergiaa itseensä. Lämpöenergiaa siirtyy putken veteen johtumalla, kun putkessa oleva vesi on viileämpää kuin polttoympäristö. Putket kulkevat höyrystimen läpi, joka sijaitsee lähellä poltto-osaa, kuten arinaa. Vesi ottaa suuren lämpöenergia määrän juuri höyrystimen kohdalla. (Khalil 1990, 88.) Vesiputkistoon syntyy painehäviötä korkeuseron ja putkiston ominaisuuksien takia, mutta tätä ei laskentaohjelmaa varten tarvitse määrittää. Laskentaohjelmassa huomioidaan energiataseen rajalla tapahtuvat muutokset. Painehäviö huomioidaan yhdessä muiden tekijöiden kanssa, kun määritellään entalpia-arvoja. (Tekniikan kaavasto 2008, 115.)

Kattilan sisällä on tulistimia, joista lämpöä siirretään enemmän vesiputkeen. Vesiputkessa oleva vesi muutetaan höyryksi ennen lieriötä tai kattilan osaa, josta tuorehöyry otetaan käyttöön. Kattilan yläosassa olevaa tulistinta kutsutaan höyrytulistimeksi. Tulistimissa oleva lämpö tulee voimalaitoksen prosesseista, esimerkiksi turpiinilta. Tulis-

tin tyypejä ovat säteilytulistin, verhotulistin, konvektiotulistin ja yhdistelmätulistin. Säteilytulistin käyttää säteilytehoa hyödyksi. Verhotulistin toimii säteilytulistimen tavalla, mutta se suojaa myös tulistimia savukaasujen epäpuhtauksilta. Konvektiotulistin hyödyntää lämpöä väliaineen kautta. Yhdistelmätulistimessa yhdistyvät säteily- ja konvektiotulistin. (Huhtinen 1994, 173 – 174.)

Jäähdytysjärjestelmät toimivat tulistimien tapaan, mutta ne poistavat lämpöenergiaa höyryprosessista. Jäähdytysjärjestelmän väliaine on viileämpää kuin jäähdytettävä höyry. Siksi lämpöä siirtyy höyrystä jäähdytysjärjestelmän väliaineeseen. Savukaasujen jäähdyttiminä toimivat syöttöveden esilämmittimet. Kattilan tulistimia voidaan jäähdyttää kattilan energiataseen ulkoa tulevalla jäähdytysvedellä. Jäähdytystä voidaan käyttää myös pumppujen jäähdyttämiseen. Jäähdyttimillä varmistetaan jäähdytettävän kohteen pysyminen ehjänä. (Khalil 1990, 128.) Ulospuhallus on jäähdyttävä tekijä höyryprosessissa. Vettä voidaan poistaa lieriöstä ulospuhalluksen avulla. (Huhtinen 1994, 94).

Vesi muuttuu vesihöyrypiirissä vesihöyryksi kaksifaasivirtauksen kautta. Kaksifaasivirtauksessa vesi muuttuu vedeksi, joka sisältää vesihöyryä ja kiinteää vettä. Veden faasidiagrammista pystyy näkemään, missä olomuodossa vesi on tietyssä paineessa ja lämpötilassa. Oletetaan, että putken tilavuus on vakio. (Khalil 1990, 84.) Veden faasidiagrammissa on veden olomuodot: kiinteä, neste ja kaasu. Faasidiagrammissa oleva kolmoispiste näyttää kohdan, missä kaikkien olomuotojen alueet kohtaavat. Kriittinen piste on siinä kohdassa, missä vesi muuttuu kaasuksi nesteestä, kun painetta muuttamalla vettä ei saada enää nestemäiseen muotoon. Kattilan putkissa vesimassa muuttuu paineen vaikutuksesta vedeksi, jos kriittistä pistettä ei ylitetä. Kattilan pitää tuottaa kaasumaista vesihöyryä, joka voidaan ohjata tulistimeen. Lieriökattiloissa vesihöyrystä osa lauhtuu takaisin lieriöön, mutta osa menee lieriöstä tulistimeen. (Boundless 2014.)



Kuva 5. Veden faasidiagrammi. (OPH 2014).

Höyryprosessin toimintaan kuuluu monia lisälaitteita. Lisälaitte on esimerkiksi pakko-kiertokattilassa oleva kiertopumppu. Tasemäärityksessä lisälaitteet ovat energiavirtoja kattilan energiataseen sisään. Kattilan lisälaitteet antavat lisätehoa kattilan prosessiin. (SFS-EN 12952-15.)

## 2.5 Savukaasut ja tuhkat laitoksessa

Savukaasut nousevat kattilassa ylöspäin. Savukaasut puhalletaan savukaasupuhaltimilla pois kattilasta. Savukaasuun sekoittuu lentotuhkaa, joka on orgaanista ainetta. (SFS-EN 12952-15.) Savukaasut sitovat paljon lämpöä, minkä takia savukaasut ovat merkittävin häviö hyötysuhteen määrittämisen kannalta. Savukaasujen lämpötilan tulee olla matala paremman hyötysuhteen takia, koska savukaasuissa oleva lämpö poistuu kattilasta savukaasujen mukana. Polttoaine ja palamisolosuhteet ovat merkittäviä tekijöitä savukaasujen synnissä. Polttoaine määrää, mitä kaasukomponentteja savukaasu sisältää. (Huhtinen 1994, 85.) Savukaasujen koostumusta käsitellään savukaasujen arvojen laskentaosuudessa.

Pohjatuhka materiaalit jäävät kattilan pesän pohjalle. Pohjatuhkat eli kiintoaineet kerätään kattilan pohjalta pois esimerkiksi ruuvisiirtimien avulla. Ennen ruuvisiirtimiä pohjatuhka putoaa suppilon läpi sammutusaltaaseen. (Keppo 1980, 14.)

Lentotuhka kulkee savukaasun mukana. Lentotuhka erotetaan savukaasusta lentotuhkan erottimien avulla. Lentotuhkan erottimia on erilaisia: dynaamiset erottimet, sähkösuodattimet ja pesurit. Dynaamisissa erottimissa käytetään hyväksi pyörimisenergi-

aa. Keskipakovoiman ansiosta tuhkat erotetaan savukaasusta. Sähkösuodattimilla tuhka erotetaan savukaasusta erisuuruisen varauksen avulla. Pölyn varaus on negatiivinen ja suodattimen laidoilla olevien kokoojalektrodien varaus on positiivinen. Pesureilla savukaasuista erotetaan pöly veden avulla. (Keppo 1980, 36 – 37.)

Tuhkaa voidaan käyttää myöhemmin teollisuudessa hyödyksi esimerkiksi järvien rakennusaineena (Yle 2010). Pohja- ja lentotuhka eroavat toisistaan ominaisuuksiensa perusteella. Erot riippuvat erityisesti polttoaineesta. Laskentaohjelman kannalta on tärkeää tietää tuhkien määrä ja palamattomien tuhkien määrä. Tuhkien määrän lisäksi tulee selvittää lento- ja pohjatuhkien ominaislämmöt. Ominaislämmöt eroavat toisistaan polttoaineen ominaisuuksien perusteella. (Keppo 1980, 53 – 56.)



Kuva 6. Pohjatuhkaa laitoksella. (Yle 2010).

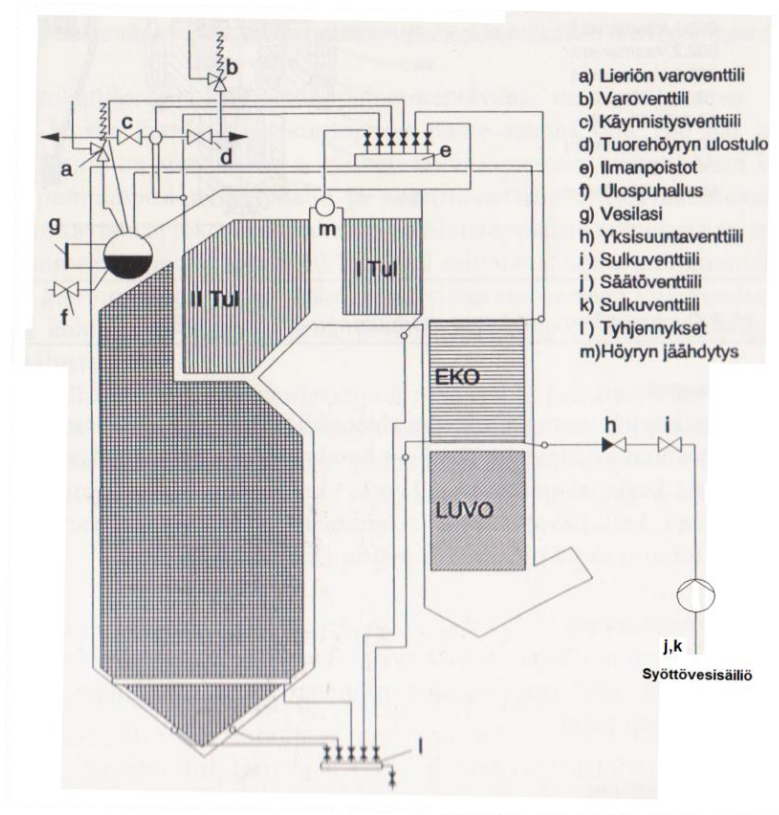
## 2.6 Syöttöveden ja ilman esilämmittimet

Syöttöveden esilämmittimen yleinen nimi on Ekonomaiser (EKO). Syöttöveden esilämmittimellä lämmitetään syöttövettä höyryprosessia varten. Syöttöveden esilämmittimet ottavat lämpöenergiaa savukaasuista. Näin saadaan savukaasuhäviöitä pienennettyä. Syöttövettä voidaan lämmittää kiehuvaaksi, että lieriöstä poistuva höyry olisi kuumempaa, mikä vaikuttaa sähköntuotantoon. (Khalil 1990, 120.)

Ilman esilämmittimien yleinen nimi on Luftvorwärmer (LUVO). Ilman esilämmitin ottaa lämpöenergiaa savukaasuista syöttöveden esilämmittimen tapaan. Osa lämpöenergia voidaan ottaa energiataseen ulkopuolelta tarvittaessa. Ilman esilämmitin sijaitsee savukaasukanavassa syöttöveden esilämmittimen perässä, koska lämpöä tarvitaan vähemmän polttoilmassa. Ilman esilämmitin vaikuttaa palamiseen. Palamista nopeute-



taan ja tehostetaan lämmittämällä palamisilmaa. Lisäksi palamisilmaa voidaan kuivata ilman esilämmittimen avulla. Kiinteät polttoaineet, joiden kosteus on suuri tarvitsevat polttoilman lämmitystä. (Khalil 1990, 121.)



Kuva 7. Kattilan lämmönsiirto. (Huhtinen 1994, 212).

## 2.7 Kattilan seinät

Kattilan seinämät estävät säteilyä poistumasta kattilan sisältä. Kaikki säteily ei poistu kattilan seinän läpi, minkä ansiosta osa säteilystä saadaan talteen. Suurin osa kattilan lämpösäteilystä on peräisin palamisesta, mutta eri kattilan rakenteet säteilevät myös.

Kattiloiden seinät eristetään kahdella tai kolmella eri eristeellä. Eristeiden välissä on alumiinifolio, mikä pysäyttää säteilyä. Suurimpien kattiloiden seinät on muurattu tiilistä. Kattilan seinämien pitää voida liikkua lämpölaajenemisen takia, minkä takia tarvitaan tilaa kattilan ympärille. Suurin ongelma säteilyhäviöiden kannalta on kattilan katto. (Paroc 2014.)

### 3 STANDARDIN MUKAISEN LASKENTAPERIAATTEEN ESITTELY

#### 3.1 SFS-EN 12952-15 standardi

Standardi SFS-EN 12952-15 perustuu vesiputkikattiloihin ja niihin liittyviin laitteisiin. Standardi sisältää kaavakokoelman vesiputkikattilan hyötysuhteen määrittämisestä ja siihen perustuvista laskentamalleista. Tässä standardissa ei ole laskentaesimerkkejä. Standardissa palamisen arvot lasketaan polttoaineen koostumuksen avulla, minkä takia polttoaineen koostumuksen määrittäminen on tärkeää. Standardiin sisältyy kaksi laskentata-  
paa, joiden avulla vesiputkikattilan hyötysuhde lasketaan. Suoran menetelmän lisäksi hyötysuhteen voi määrittää kahdella epäsuoralla menetelmällä. (SFS-EN 12952-15.)

Yleisesti standardi on määritelmä, miten joku asia tehdään. Standardeja käytetään paljon teollisuudessa ja energiatekniikassa. Hyvänä esimerkkinä voidaan pitää putkien kokojen määrittämiä. (Suomen standardisoimisliitto SFS ry 2014.) Putkien kokoja ovat esimerkiksi DN25 tai DN50 (Neste Oil 2006, 45).

#### 3.2 Kattilaan syötetty teho

##### 3.2.1 Kattilaan syötetty kokonaisteho

Vesiputkikattila ottaa energiaa polttoaineesta ja siirtää polttoprosessista energiaa kattilaveteen. Kattilaan syötetty kokonaisteho on kattilan kuorma. Kattilan hyötysuhteen määrittämisessä on tärkeää tietää, kuinka paljon energiaa kattilaan tuodaan. Kattilaan syötetty teho on määriteltävä tarkkaan oikean hyötysuhteen saamiseksi. On todella tärkeää, että polttoaineen lämpöarvon ja kemiallisen energian lisäksi määritellään polttoaineen lämpötila. (Knowenergy 2013.)

Kattilaan syötetään lämpötehoa, joka koostuu polttoaineen lämpöarvosta, polttoaineen termisestä lämpöenergiasta ja polttoilman sisältämästä lämpöenergiasta. Syötettyä lämpötehoa vähentää polttoaineen sisältämä palamattomien tuhkamateriaalien termi-  
nen lämpö. Syötetyn lämpötehon lisäksi kattilaan voidaan saada lämpötehoa neste-  
mäisten polttoaineiden hajotushöyryistä, lisälaitteiden kuten moottorien, pumppujen ja sähkölaitteiden käyttötehoista, tulistuksen säädön ruiskutusvedestä ja ilman esilämmi-  
tyksestä. (Knowenergy 2013.) Standardissa SFS-EN 12952-15 kattilaan syötetyssä

kokonaistehossa huomioidaan kattilaan syötetty kemiallinen energia ja lisälaitteisto. Standardin EN-12952-15 mukaan lisälaitteiksi määritellään:

- jauhin
- kiertokaasupuhallin
- kiertopumppu
- moottorit
- hajotushöyry
- ilman esilämmitin. (SFS-EN 12952-15.)

Kattilaan syötetty kokonaisteho saadaan kaavalla (1). (SFS-EN 12952-15).

$$\Phi_{tuotu} = m_F H_{tot} + P_{laite} \quad (1)$$

|                |   |
|----------------|---|
| $\Phi_{tuotu}$ | Kattilaan tuotu kokonaisteho [kW]                 |
| $m_F$          | Polttoainevirta [kg/s]                            |
| $H_{tot}$      | Suhteellinen kemiallinen energia poltossa [kJ/kg] |
| $P_{laite}$    | Lisälaitteiden kokonaisteho [kW]                  |

### 3.2.2 Polttoaineet ja lämpöarvo

Polttoaineet voidaan määritellä olomuodon mukaan kiinteisiin, nestemäisiin ja kaasumaisiin polttoaineisiin. Nestemäisillä polttoaineilla tarkoitetaan usein öljyjä, mutta myös jäteliemi on nestemäistä polttoainetta. Kiinteisiin polttoaineisiin kuuluu hiili, turve ja puu. Kaasumaisista polttoaineista yleisin on maakaasu, mutta myös propaania ja butaania käytetään teollisuudessa. Polttoaine reagoi hapen kanssa palamisreaktiossa, mistä syntyy lämpöä käytettäväksi. (Huhtinen 1994, 22.)

Laskentaohjelmaa varten polttoaineista määritellään polttoaineen koostumus. Koostumuksesta määritellään kuiva-aine osuus, vesi- ja tuhkapitoisuus. Kuiva-ainekoostumus määritellään alkuaineiden tarkkuudella. Kuiva-aineista määritellään ainakin hiili-, typpi-, rikki-, happi- ja vetypitoisuus. Nämä määritellyt arvot vaikuttavat oleellisesti vesiputkikattilan hyötysuhteen määrittelyyn. (Huhtinen 1994, 33.) Liit-

teessä 1 on esimerkki polttoaineen koostumustaulukosta (Ilmansuojeluyhdistys ry 2002, liite 1).



Kuva 8. Kivihiili on kiinteää polttoainetta. (Peda 2014).

Polttoaine sisältää kiinteää ainetta, tuhkaa ja vettä. Kiinteän polttoaineen osuus voidaan määrittää kaavalla (2). (SFS-EN 12952-15).

$$y_{pa,kiinteä} = 1 - y_{H_2O} - y_{tuhka} \quad (2)$$

$y_{pa,kiinteä}$  Polttoaineen kiinteiden aineiden osuus [-]

$y_{H_2O}$  Veden määrä polttoaineessa [-]

$y_{tuhka}$  Polttoaineen tuhkapitoisuus [-]

Polttoaine sisältää lämpöarvon lisäksi lämpötilasta johtuvaa lämpöä. Polttoaineen entalpia lasketaan kaavalla (3). (SFS-EN 12952-15).

$$h_F = c_{pF}(T_F - T_r) \quad (3)$$

$h_F$  Polttoaineen entalpia [kJ/kg]

$c_{pF}$  Polttoaineen ominaislämpö [kJ/kg°C]

$T_F$  Savukaasun lämpötila [°C]

$T_r$  Vertailulämpötila [°C]

Standardin SFS-EN 12952-15 mukaan polttoaineesta tulee määritellä seuraavat asiat hyötysuhteen saamiseksi, missä massavirta voidaan määrittää savukaasuvirran avulla:

- koostumus
- tehollinen lämpöarvo
- lämpötila
- ominaislämpö
- polttoaineen massavirta (savukaasuvirran kautta)
- polttoaineen säteilykerroin.

Polttoaineen lämpöarvon määrittämiseen on kaksi vaihtoehtoa, jotka ovat kalorimetrinen eli ylempi lämpöarvo ja tehollinen eli alempi lämpöarvo. Suomessa käytetään tehollista lämpöarvoa, kun määritellään kattilan hyötysuhdetta. Standardissa SFS-EN 12952-15 kattilan hyötysuhde voidaan määrittää molemmilla tavoilla, mutta tässä opinnäytetyössä kattilan hyötysuhde määritetään käyttämällä tehollista lämpöarvoa. (SFS-EN 12952-15.)

Tehollinen lämpöarvo määritellään kalorimetrin lämpöarvon avulla. Kalorimetrinen lämpöarvo on absoluuttisen kuivan näytteen lämpöarvo. Kalorimetrin lämpöarvon määrittelyssä otetaan huomioon höyrystyvän veden sisältämä lämpöenergia polttoaineen palamishetkellä. Kalorimetrinen lämpöarvo määritellään käyttämällä kaavaa (4), joka ei sisälly standardiin SFS-EN 12952-15.

$$H_{gd} = H_{gad} \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (4)$$

$H_{gd}$  Kuivan aineen kalorimetrinen lämpöarvo [MJ/kg]

$H_{gad}$  Analyysikostean ja ilmakeivan näytteen kalorimetrinen lämpöarvo [MJ/kg]

$M_{ad}$  Ilmakeivan näytteen analyysikosteus [%]

Tehollinen lämpöarvo kuvaa polttoaineen energiamäärää polttoainekiloa kohden, kun huomioidaan, että vesihöyryn lauhtumisessa vapautuvaa energiaa ei saada talteen. Te-

hollinen lämpöarvo määritellään kalorimetrisestä lämpöarvosta kaavalla (5), joka ei sisälly standardiin SFS-EN 12952-15. (Alakangas 2000.)

$$H_{nd} = H_{gd} - 0,024425M_{H,vesi} \quad (5)$$

$H_{nd}$  Kuivan aineen tehollinen lämpöarvo [MJ/kg]

$H_{gd}$  Kuivan aineen kalorimetrinen lämpöarvo [MJ/kg]

$M_{H,vesi}$  Vedyn palamisessa syntynyt kosteus kuivassa  
polttoaineessa [%]

Laskentaohjelman kaavoissa huomioidaan tehollinen lämpöarvo saapumistilassa. Saapumistilassa oleva tehollinen lämpöarvo ottaa huomioon poltettavan polttoaineen kosteuden, joka vähentää polttoaineesta saatavaa lämpöenergia määrää. Tämä on nähtävissä (Kouki 2005) polttoainekokeen tuloksista, jossa puupelletin kuiva tehollinen lämpöarvo 18,92 MJ/kg putoaa saapumistilassa olevassa tehollisen lämpöarvon määritelmässä arvoon 17,68 MJ/kg. Kokeessa puupelletin kosteus oli vain 5,81 %.

Tehollinen lämpöenergia saapumistilassa eli kostea tehollinen lämpöarvo määritellään Alakankaan (2000) tekemässä tiedotteessa kaavalla (6), joka ei sisälly standardiin SFS-EN 12952-15. Kaavassa (6) on kaksi osaa: kuivan aineen lämpöarvo – kuinka paljon kuiva polttoainemäärä sisältää energiaa polttoainekiloa kohti ja veden palamisessa syntynyt kosteus, joka vähentää poltosta saatavaa energiamäärää.

$$H_n = H_{nd} \frac{100 - y_{H_2O}}{100} - 0,024425y_{H_2O} \quad (6)$$

$H_n$  Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa [MJ/kg]

$H_{nd}$  Kuivan aineen tehollinen lämpöarvo [MJ/kg]

$y_{H_2O}$  Veden määrä polttoaineessa [%]

### 3.2.3 Kattilaan syötetty kemiallinen energia

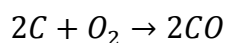
Polttoaineen lisäksi kattilaan menee sisälle polttoilmaa. Polttoaineen palamisen seurauksena polttokammioon jää tuhkamateriaalia, joka ei ole palanut polttoaineen polton yhteydessä. Tärkein tieto polttoaineista on tuodun energiavirran suuruus laskentaohjelman kannalta. Kattilaan menevä kemiallinen energia lasketaan kaavalla (7). (SFS-EN 12952-15.)

$$H_{tot} = (H_n + h_F) / \frac{100-l_u}{100} + h_A + \mu_{AS} h_{AS} \quad (7)$$

|            |  |
|------------|--|
| $H_{tot}$  | Suhteellinen kemiallinen energia poltossa [kJ/kg]  |
| $H_n$      | Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa [kJ/kg]       |
| $h_F$      | Polttoaineen entalpia [kJ/kg]                      |
| $l_u$      | Palamattomien tuhkien osuus polttoainevirrasta [-] |
| $h_A$      | Polttoilman entalpia [kJ/kg]                       |
| $\mu_{AS}$ | Hajotushöyryn ja polttoaineen massasuhde [-]       |
| $h_{AS}$   | Hajotushöyryn entalpia [kJ/kg]                     |

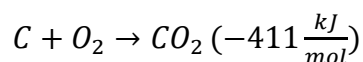
### 3.2.4 Palaminen

Vesiputkikattilassa tapahtuu palamisreaktio, missä polttoaine tuottaa lämpöenergiaa. Tätä lämpöenergiaa voidaan hyödyntää energiantuotannossa. Palamisessa polttoaine ja happi kohtaavat. Ilmassa on noin 21 % happea ja 79 % typpeä. Lisäksi tarvitaan sopivat olosuhteet, että palaminen onnistuu. Tarvittavat lisätekijät ovat tarpeeksi korkea lämpötila ja jatkuva kemiallinen ketjureaktio. Laitoksen palamista tarkasteltaessa savukaasun väri kertoo usein palamisen laadun. Kun savu on vaaleaa, on palaminen tehokasta. Tumma savu tarkoittaa heikkoa palamista, jossa muodostuu palamatonta hiiltä, jonka osittain sitoutuessa happeen syntyy häkää. Jos savua ei tule polttoaineen poltossa, voi palamisreaktio olla liian hidas. Hiilimonoksidin palamisreaktioyhtälö on. (Khalil 1990, 99.)

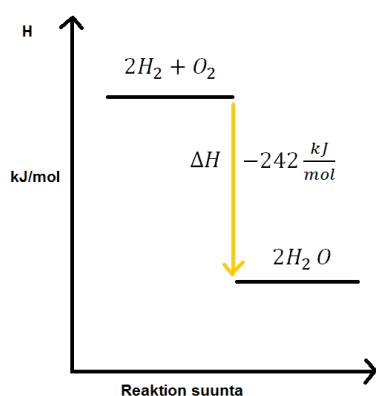
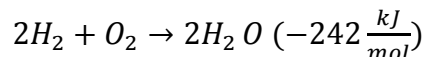


Palamista kuvataan reaktioyhtälöiden avulla. Reaktioyhtälöstä voi määrittää palamisen tietoja, kuten palamisilman määrän, mutta tämä määrittystapa ei sisälly standardiin SFS-EN 12952-15. Palamisessa huomioidaan entalpian muutos, joka ilmaistaan kilojouletta yhdessä moolissa. Entalpialla tai perusmuodostumislämmöllä tarkoitetaan aineyhdisteen sisältämää energiamäärää. Entalpia-arvojen muutos kemiallisissa reaktioissa kuvaa energia virran suuntaa. Kun entalpia-arvo on positiivinen, on kyseessä endoterminen reaktio, missä energiaa sitoutuu. Kun entalpia-arvo on negatiivinen, on kyseessä eksoterminen reaktio, missä energiaa vapautuu. (Neste Oil 2006, 53.)

Palamisreaktio hiilen palaessa voidaan esittää seuraavalla tavalla.



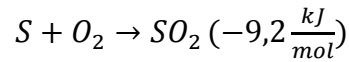
Vedyn palamisreaktiossa syntyy vettä. Vedyn palamisreaktio voidaan esittää seuraavalla tavalla.



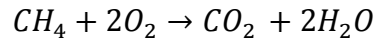
Kuva 9. Entalpian muutos vedyn palamisessa. (Neste Oil 2006, 53.)

Mikäli polttoaineessa on rikkiä, palaa se rikkidioksidiksi. Rikin palamista on vältettävä, koska se on haitallinen aine ympäristölle. Rikki voi muodostaa savukaasussa metalleja syövyttävää rikkihappoa. Palamisreaktio rikin palaessa voidaan esittää seuraavalla tavalla. (Neste Oil 2006, 53.)





Kaasumaisista polttoaineista maakaasun palaminen voidaan kuvata metaanin palamisena, vaikka todellisuudessa maakaasun palaminen ei ole niin yksinkertainen. Lopputuotteena maakaasun, propaanin ja butaanin palamisessa ovat hiilidioksidi ja vesihöyry. Maakaasun eli metaanin palamisreaktio voidaan esittää seuraavalla tavalla. (Suomen kaasuyhdistys 2014.)



Polttoaineen koostumusta voidaan hyödyntää määriteltäessä palamistapahtumaa. Alkuaineiden koostumukset on määriteltävä desimaalilukuina. Standardissa SFS-EN 12952-15 alkuaineiden koostumuksen arvon on vastattava prosenttiosuutta koko polttoaineesta, minkä takia kuiva-aineiden koostumukset pitää ilmaista koko polttoaineen koostumuksena. (SFS-EN 12952-15.)

Polttoaineen koostumuksesta voidaan määrittää stoikiometrisiä arvoja, missä huomioidaan ainemäärät ja aineiden suhteet. Kuvassa (10) on palotilaan vaikuttavat tekijät. Kaavoissa oletetaan molekyylien toimivan aina samoin ympäristöstä riippumatta, mutta ainemäärät huomioiden. Kaavat eivät vastaa todellisia olosuhteita. Kaavat vastaavat ainemäärää yhdessä kilossa polttoainetta. Polttoaineen koostumuksen kautta voidaan määrittää seuraavat stoikiometriset arvot:

- polttoilman tarve palamisreaktiossa
- kuivan savukaasun tilavuus NTP – olosuhteissa
- kuivan savukaasun ja polttoaineen suhde
- hiilidioksidin määrä polttoainekiloa kohden. (SFS-EN 12952-15.)



Kuva 10. Palotila. (Huhtinen 1994, 86).

Poltossa tarvittava teoreettinen ilmamäärä määritetään standardissa kertoimien avulla. Polttoilman teoreettinen ilmamäärä poltossa määritetään kaavalla (8). (SFS-EN 12952-15).

$$\mu_{Aod} = 11,5122y_C + 34,2974y_H + 4,3129y_S - 4,3212y_O \quad (8)$$

|             |  |
|-------------|--|
| $\mu_{Aod}$ | Polttoilman teoreettinen ilmamäärä<br>poltossa [Kg ilma/kg pa] |
| $y_C$       | Hiilen määrä koko polttoaineessa [-]                           |
| $y_H$       | Vedyn määrä koko polttoaineessa [-]                            |
| $y_S$       | Rikin määrä koko polttoaineessa [-]                            |
| $y_O$       | Hapen määrä koko polttoaineessa [-]                            |

Kuivan savukaasun tilavuus NTP - olosuhteissa määritetään kaavalla (9) (SFS-EN 12952-15).

$$V_{God} = 8,893y_C + 20,9724y_H + 3,319y_S + 0,7997y_N - 2,6424y_O \quad (9)$$

|           |   |
|-----------|---|
| $V_{God}$ | Kuivan savukaasun tilavuus NTP - olosuhteissa [m <sup>3</sup> /kg pa] |
| $y_C$     | Hiilen määrä koko polttoaineessa [-]                                  |
| $y_H$     | Vedyn määrä koko polttoaineessa [-]                                   |
| $y_S$     | Rikin määrä koko polttoaineessa [-]                                   |
| $y_N$     | Typen määrä koko polttoaineessa [-]                                   |
| $y_O$     | Hapen määrä koko polttoaineessa [-]                                   |

Kuivan savukaasun ja polttoaineen stoikiometrinen suhde määritetään kaavalla (10) (SFS-EN 12952-15).

$$\mu_{God} = 12,5122y_C + 26,3604y_H + 5,3129y_S + 1y_N - 3,3212y_O \quad (10)$$

|             |   |
|-------------|---|
| $\mu_{God}$ | Kuivan savukaasun ja polttoaineen suhde [Kg sk/kg pa] |
| $y_C$       | Hiilen määrä koko polttoaineessa [-]                  |
| $y_H$       | Vedyn määrä koko polttoaineessa [-]                   |
| $y_S$       | Rikin määrä koko polttoaineessa [-]                   |
| $y_N$       | Typen määrä koko polttoaineessa [-]                   |
| $y_O$       | Hapen määrä koko polttoaineessa [-]                   |

Hiilidioksidin stoikiometrinen määrä polttoainekiloa kohden määritetään kaavalla (11) (SFS-EN 12952-15).

$$\mu_{CO_2o} = 3,6699y_C + 0,0173y_H + 0,0022y_S - 0,0022y_O \quad (11)$$

|               |   |
|---------------|---|
| $\mu_{CO_2o}$ | Hiilidioksidin stoikiometrinen määrä [Kg CO2/kg pa] |
| $y_C$         | Hiilen määrä koko polttoaineessa [-]                |
| $y_H$         | Vedyn määrä koko polttoaineessa [-]                 |
| $y_S$         | Rikin määrä koko polttoaineessa [-]                 |
| $y_O$         | Hapen määrä koko polttoaineessa [-]                 |

Polttoaineen palaessa vedystä muodostuu vettä ja polttoaineen sisältämästä vedestä muodostuu vesihöyryä, mikä vaikuttaa muun muassa savukaasun ominaisuuksiin. Höyrystyneen veden määrä poltossa polttoainekiloa kohden määritetään kaavalla (12). (SFS-EN 12952-15.)

$$\mu_{H_2O_f} = 8,937y_H + 0,0173y_{H_2O} \quad (12)$$

|                |   |
|----------------|---|
| $\mu_{H_2O_f}$ | Höyrystyneen veden määrä poltossa [Kg H <sub>2</sub> O/kg pa] |
| $y_{H_2O}$     | Veden määrä koko polttoaineessa [-]                           |
| $y_H$          | Vedyn määrä koko polttoaineessa [-]                           |

Palaminen ei tapahdu teoreettisten arvojen perusteella. Palamisolosuhteet vaihtelevat tilanteen, paikan ja polttotavan mukaan, missä ympäristö on vuorovaikutuksessa palamisen kanssa. Standardin mukaan määritelty palamisprosessi ei kerro täysin tarkkaan, mitä palamisessa tapahtuu. Palamistapahtumaan vaikuttaa niin monet tekijät, että todellisia arvoja on erittäin vaikea saada. Palamisen tasaisuus ja mittaustiheys vaikuttavat lopputulokseen. Tarkkojen mittauservojen ansiosta palamistapahtuman määrittämisessä voidaan päästä riittävän lähelle totuutta, minkä takia hyötysuhteen arvo on riittävän lähellä oikeaa. (Khalil 1990, 261 – 263.) Standardin avulla palaminen voidaan määrittellä suurin piirtein oikein, kun palaminen on tasaista (SFS-EN 12952-15). Standardissa ei oteta huomioon muun muassa poltinten sijoittamista kattilassa (Huhtinen 1994, 121).



Kuva 11. Puiden epätasainen palaminen. (Tassu ESP 2014).

Palamisen määrittämisessä ilmakertoimen tai ilmaylijäämän määrittäminen on todella merkityksellistä. Palamisilmassa on tavallisesti noin 21 % happea. Ilmaylijäämä voidaan määrittellä kuivan savukaasun sisältämän hapen tai hiilidioksidin avulla. Liitteessä 2 olevassa palamiskolmiossa havainnollistetaan kuivan savukaasun sisältämän hapen ja hiilidioksidin maksimi-arvon yhteyttä. (Ilmansuojeluyhdistys ry 2002, liite 3). Ilmakertoimen kertoo ilmanylijäämän arvon, mitä tarvitaan täydelliseen palamiseen. Ilmakertoimen

men kaavaa kokeilemalla voidaan havaita, että hapen määrä kuivassa savukaasussa ei saa olla yli 20,938 %, koska muuten ilmakertoimen arvo voi olla negatiivinen. Jos polttoprosessissa syötetään lisähapetta yli 20,938 %, on hapen määrän osuus ilmasta muutettava ilmakertoimen kaavaan. Tälle arvolle voi tehdä oman solun laskentaohjelman. (SFS-EN 12952-15.) Ilmakerroin määritellään kaavalla (13), missä 0,20938 on hapen määrä osuutena ilmasta ilmoitettuna (Huhtinen 1994, 78).

$$\lambda_{O_2} = \frac{0,20938}{0,20938 - \frac{y_{O_2d}}{100}} \quad (13)$$

$\lambda_{O_2}$  Ilmakerroin [-]

$y_{O_2d}$  Hapen määrä kuivassa savukaasussa [-]

Ilmaylimäärä kertoo, kuinka paljon ilmaa tulee lisää palamistapahtumaan teoreettisen ilmamäärän lisäksi. Jos ilmakerroin on 1,2, silloin ilmaylimäärä on 20 % stoikiometriseen palamiseen verrattuna. Ilmaylijäämä voidaan laskea hapen tai hiilidioksidin osuuden avulla.

Hapen kautta laskettuna ilmaylijäämä saadaan laskettua kaavalla, missä 0,20938 on hapen määrä ilmassa normaaliolosuhteissa (14). (SFS-EN 12952-15.)

$$\lambda_{yli} = \frac{y_{O_2d}}{0,20938 - y_{O_2d}} \quad (14)$$

$\lambda_{yli}$  Ilmaylimäärä [-]

$y_{O_2d}$  Hapen määrä kuivassa savukaasussa [-]

Hiilidioksidin kautta laskettuna ilmaylijäämä saadaan laskettua kaavalla, missä 0,00033 on hiilidioksidin määrä ilmassa normaaliolosuhteissa (15) (SFS-EN 12952-15).

$$\lambda_{yli} = \frac{y_{CO_2dm} - y_{CO_2d}}{y_{CO_2d} - 0,00033} \quad (15)$$

$\lambda_{yli}$  Ilmaylimäärä [-]

$y_{CO_2d}$  Hiilidioksidin määrä kuivassa savukaasussa [-]

$y_{CO_2dm}$  Hiilidioksidin maksimimäärä kuivassa savukaasussa [-]

Hiilidioksidin maksimipitoisuus kuivassa savukaasussa on määritelty kuivan savukaasun happipitoisuuden mukaan. Kun savukaasun happipitoisuus on 0 %, niin silloin savukaasun hiilidioksidi on sitonut kaiken hapen itseensä. Eli CO<sub>2</sub>-molekyylejen maksimimäärä savukaasussa saadaan, kun hapen määrä on 0 %. (Ilmansuojeluyhdistys ry 2002, liite 3.)

Hiilidioksidin maksimimäärä kuivassa savukaasussa saadaan laskettua kaavalla (16) (SFS-EN 12952-15).

$$y_{CO_2dm} = \frac{\mu_{CO_2o}}{V_{God}} \quad (16)$$

$y_{CO_2dm}$  Hiilidioksidin maksimimäärä kuivassa savukaasussa [-]

$\mu_{CO_2o}$  Hiilidioksidin stoikiometrinen määrä [Kg CO<sub>2</sub>/kg pa]

$V_{God}$  Kuivan savukaasun tilavuus NTP - olosuhteissa [m<sup>3</sup>/kg pa]

Kuivan palamisilman määrä poltossa voidaan määrittää kaavalla (17) (SFS-EN 12952-15).

$$\mu_{Ad} = \mu_{Aod} + 1,293V_{God}\lambda_{yli} \quad (17)$$

$\mu_{Ad}$  Kuiva palamisilman määrä poltossa [Kg ilma/kg pa]

$\mu_{Aod}$  Polttoilman teoreettinen ilmamäärä  
poltossa [Kg ilma/kg pa]

$V_{God}$  Kuivan savukaasun tilavuus NTP - olosuhteissa [m<sup>3</sup>/kg pa]

$\lambda_{yli}$  Ilmaylijäämä [-]

Todellisessa palamisilmassa on huomioitava palamisilman kosteus. Palamisilman korkea kosteus lisää palamisilman tarvetta. Palamisilman määrä poltossa voidaan määrittää kaavalla (18). (SFS-EN 12952-15.)

$$\mu_A = \mu_{Ad}(1 + X_{H_2OAd}) \quad (18)$$

|              |   |
|--------------|---|
| $\mu_A$      | Palamisilman määrä poltossa [Kg ilma/kg pa]       |
| $\mu_{Ad}$   | Kuiva palamisilman määrä poltossa [Kg ilma/kg pa] |
| $X_{H_2OAd}$ | Palamisilman kosteus [-]                          |

### 3.3 Kattilasta saatu hyötyteho

Kattilassa poltettu polttoaine tuottaa lämpöenergiaa, joka voidaan hyödyntää. Vesiputkikattiloissa hyödyksi saatu lämpöenergia siirretään veteen ja höyryyn. Höyrykattiloiden hyötyteho voidaan määrittää lämmönsiirtolaitteille, suurvesikattilalle ja höyrykattilalle. Hyötytehon talteenoton määrittämisessä entalpien määrittäminen on hyvin keskeistä. (SFS-EN 12952-15.)

Kattilasta saatu hyötyteho voidaan määrittää ilman kattilan tyypin määrittämistä kaavalla (19) (SFS-EN 12952-15).

$$\Phi_{hyöty} = \Phi_{tuotu} - Q_{häviöt} \quad (19)$$

|                |                                   |
|----------------|-----------------------------------|
| $\Phi_{hyöty}$ | Kattilasta saatava hyötyteho [kW] |
| $\Phi_{tuotu}$ | Kattilan tuotu kokonaisteho [kW]  |
| $Q_{häviöt}$   | Kattilan tehohäviöt [kW]          |

Entalpialla tarkoitetaan aineen sisältämää energiamäärää. Entalpia ilmaistaan energiamäärän suhteen kiloon ainetta, kun kyseessä on lämmönsiirto (SFS-EN 12952-15). Yleensä entalpia määritetään valmiiden taulukkoarvojen avulla, mutta se voidaan määrittellä myös laskennallisesti. Entalpien suuruuteen vaikuttavat aineen lämpötila, paine ja tilavuus. Entalpia-arvoa voidaan hyödyntää, kun tutkitaan aineen energiasisällön

muutoksia. Liitteessä 4 on vesihöyryn h,s-piirros. Vesihöyryn h,s-piirroksesta nähdään vesihöyryn entalpia-arvo tietyssä lämpötilassa ja paineessa. Esimerkiksi, kun paine on 100 bar ja lämpötila on 590 °C, on höyryn entalpia 3600 kJ/kg. Entalpian muutos saadaan kaavasta (20). (Holström 1982, 197.)

$$h_{loppu} - h_{alku} = c_p(T_{loppu} - T_{alku}) \quad (20)$$

$h_{loppu}$  Entalpia lopussa [kJ/kg]

$h_{alku}$  Entalpia alussa [kJ/kg]

$c_p$  Ominaislämpö [kJ/kg°C]

$T_{loppu}$  Lämpötila lopussa [°C]

$T_{alku}$  Lämpötila alussa [°C]

### 3.3.1 Höyrykattila

Höyrykattiloiden hyötytehoa laskettaessa huomioidaan lieriön olemassa olo. Lieriöitä voi olla useita, joiden kaikkien koko kattilan energiataseeseen vaikuttavat tekijät tulee huomioida. Kattilasta saatavaa käyttötehoa laskettaessa on huomioitava energiatase, johon kuuluu useita komponentteja. Palaminen vaikuttaa suoraan tuorehöyryyn. Huomioitavat osatekijät ovat pääsääntöisesti:

- syöttövesi
- tuorehöyry
- ruiskutusvesi
- jäähdytysvesi
- välitulistimet
- ilmanesilämmitin. (Huhtinen 1994, 94.)

Höyrykattilan hyötytehoon vaikuttaa kaikkien komponenttien tehot. Höyrykattilasta saatu hyötyteho voidaan laskea kaavalla (21) (SFS-EN 12952-15).

$$\Phi_{hyöty} = \Phi_{ST} + \Phi_{SS} + \Phi_{RHI} + \Phi_{SRI} + \Phi_{RHII} + \Phi_{SRII} + \Phi_{BD} + \Phi_{IEL} \quad (21)$$



|                       |  |
|-----------------------|--|
| $\Phi_{\text{hyöty}}$ | Kattilasta saatava hyötyteho [kW]          |
| $\Phi_{\text{ST}}$    | Tuorehöyryn teho [kW]                      |
| $\Phi_{\text{SS}}$    | Ruiskutusveden teho [kW]                   |
| $\Phi_{\text{RHI}}$   | 1. välitulistimen teho [kW]                |
| $\Phi_{\text{SRI}}$   | 1. välitulistimen ruiskutusveden teho [kW] |
| $\Phi_{\text{RHII}}$  | 2. välitulistimen teho [kW]                |
| $\Phi_{\text{SRII}}$  | 2. välitulistimen ruiskutusveden teho [kW] |
| $\Phi_{\text{BD}}$    | Jäähdytysveden teho [kW]                   |
| $\Phi_{\text{IEL}}$   | Ilmanesilämmittimen teho [kW]              |

Höyrykattilan eri komponenttien energiataseiden ajatellaan olevan komponentin lämmönsiirtolaitteisto. Lämmönsiirtolaitteiston teho voidaan määrittellä käyttäen entalpia-arvoja tai lämpötiloja. (Huhtinen 1994, 94.) Tuorehöyryn tehoa laskettaessa tuorehöyryn entalpia on ulostulo puolella ja syöttöveden entalpia on sisääntulo puolella. Ruiskutusveden tehoa laskettaessa ruiskutusveden entalpia on sisääntulo puolella ja syöttöveden entalpia on ulostulo puolella. Jäähdytysveden tehoa laskettaessa jäähdytysveden entalpia on ulostulo puolella ja syöttöveden entalpia on sisääntulo puolella. Kun syöttövedessä on jäähdytysvettä enemmän lämpöä, on jäähdytysveden teho negatiivinen. Komponenttien energiataseet lasketaan käyttäen kaavaa (22). (SFS-EN 12952-15.)

$$\Phi_{\text{teho}} = m_{\text{aine}}(h_{\text{ulos}} - h_{\text{sisään}}) = m_{\text{aine}}c_{p,\text{aine}}(T_{\text{ulos}} - T_{\text{sisään}}) \quad (22)$$

|                      |  |
|----------------------|--|
| $\Phi_{\text{teho}}$ | Lämmönsiirtimeen tuleva hyötyteho [kW] |
| $m_{\text{aine}}$    | Aineen tulo massavirta [kg/s]          |
| $h_{\text{ulos}}$    | Aineen lähtö entalpia [kJ/kg]          |

|                     |                                  |
|---------------------|----------------------------------|
| $h_{\text{sisään}}$ | Aineen meno entalpia [kJ/kg]     |
| $c_{p,\text{aine}}$ | Aineen ominaislämpö [kJ/kg°C]    |
| $T_{\text{ulos}}$   | Aineen ulostulo lämpötila [°C]   |
| $T_{\text{sisään}}$ | Aineen sisääntulo lämpötila [°C] |

### 3.3.2 Lämmönsiirtolaitteisto

Lämmönsiirtoa tarkasteltaessa on tiedettävä lämmönsiirtimessä menevän aineen massavirta, johon lämpö siirtyy vesiputkikattilasta. Lämmönsiirtimeen tulee vettä tietyssä lämpötilassa ja paineessa. Kattilasta siirtyy lämpöenergiaa veteen, joka tulee lämmönsiirtimestä ulos eri lämpötilassa ja paineessa kuin tuli lämmönsiirtimeen. Vesi muuttuu tavallisesti kattilassa vesihöyryksi. Entalpiaeron avulla voidaan laskea, miten entalpia muuttuu lämmönsiirtimessä. Tätä menetelmää voidaan käyttää laskettaessa läpivirtauskattiloiden hyötytehoja, koska läpivirtauskattiloissa on yksi sisäänmeno ja yksi ulostulo reitti lämpöä sitovalle aineelle. (Huhtinen 1994, 111.)

Lämmönsiirtimeen siirtyvä hyötyteho voidaan laskea kaavalla (23) (SFS-EN 12952-15).

$$\Phi_{\text{hyöty}} = m_{\text{ls}}(h_{\text{ulos,ls}} - h_{\text{sisään,ls}}) \quad (23)$$

|                        |   |
|------------------------|---|
| $\Phi_{\text{hyöty}}$  | Kattilasta saatava hyötyteho [kW]                 |
| $m_{\text{ls}}$        | Lämmönsiirtimessä olevan aineen massavirta [kg/s] |
| $h_{\text{ulos,ls}}$   | Lämmönsiirtimestä tulevan aineen entalpia [kJ/kg] |
| $h_{\text{sisään,ls}}$ | Lämmönsiirtimeen menevän aineen entalpia [kJ/kg]  |

### 3.3.3 Tulitorvi-tuliputkikattila

Tulitorvi-tuliputkikattilalla voidaan tuottaa kuumaa vettä savukaasujen avulla. Testin avulla voidaan määrittää saatu hyötyteho tulitorvi-tuliputkikattilalle. Tulitorvi-tuliputkikattilan vesitestin avulla voidaan määrittää kaavalla (24). (SFS-EN 12952-15.)

$$\Phi_{\text{hyöty}} = m_{vg} * (h_{\text{ulos,vg}} - h_{\text{sisään,vg}}) * f \quad (24)$$

|                        |   |
|------------------------|---|
| $\Phi_{\text{hyöty}}$  | Kattilasta saatava hyötyteho [kW]                 |
| $m_{vg}$               | Suurvesikattilassa olevan veden massavirta [kg/s] |
| $h_{\text{ulos,vg}}$   | Suurvesikattilaan tulevan veden entalpia [kJ/kg]  |
| $h_{\text{sisään,vg}}$ | Suurvesikattilasta menevän veden entalpia [kJ/kg] |
| $f$                    | Suurvesikattilan testikerroin [-]                 |

Tulitorvi-tuliputkikattilan tehoa ei voida laskea suoraan lämmönsiirtolaitteen laskenta-kaavalla, koska veteen tulee lämpöä myös tuliputkista. Testi tehdään kattilan vedestä saatujen mittausarvojen mukaan. Veden lämpötilan muutos kertoo savukaasun tehon muutoksista. Tulitorvi-tuliputkikattilan testi osion mitattavat arvot voidaan määrittää kaavalla (25). (SFS-EN 12952-15.)

$$f = 1 + \left( \frac{V_B}{V} * \frac{1,15}{(T_{uvg} - T_{svg})} * \frac{dT_{sv}}{t_{sv}} \right) \quad (25)$$

|           |  |
|-----------|--|
| $f$       | Suurvesikattilan testikerroin [-]                          |
| $V_B$     | Suurvesikattilan vesitilavuus [m <sup>3</sup> ]            |
| $V$       | Veden tilavuusvirta testissä [m <sup>3</sup> /h]           |
| $T_{uvg}$ | Lämpötilojen keskiarvo veden tullessa ulos kattilasta [°C] |

|           |   |
|-----------|---|
| $T_{svg}$ | Lämpötilojen keskiarvo veden mennessä sisään kattilaan [°C] |
| $dT_{sv}$ | Keskiarvollinen veden lämpötilan muutos [°C]                |
| $t_{sv}$  | Testin kesto aika [h]                                       |

Tulitorvi-tuliputkikattilan keskiarvollinen veden lämpötilan muutos saadaan laskettua kaavalla (26) (SFS-EN 12952-15).

$$dT_{sv} = \frac{1}{2} * (T_{uvg2} + T_{svg2}) - (T_{uvg1} + T_{svg1}) \quad (26)$$

|            |  |
|------------|--|
| $dT_{sv}$  | Keskiarvollinen veden lämpötilan muutos [°C]                 |
| $T_{uvg1}$ | Lämpötila veden tullessa ulos kattilasta testin alussa[°C]   |
| $T_{uvg2}$ | Lämpötila veden tullessa ulos kattilasta testin lopussa[°C]  |
| $T_{svg1}$ | Lämpötila veden mennessä sisään kattilaan testin alussa[°C]  |
| $T_{svg2}$ | Lämpötila veden mennessä sisään kattilaan testin lopussa[°C] |

### 3.4 Kattilan häviöt

Kattilan häviöiden kautta määritetään kattilan hyötysuhde epäsuoralla menetelmällä. Kattilaan syötetystä energiasta kaikkea ei saada hyödynnettyä. Osa energiasta poistuu kattilasta savukaasujen, palamattomien kaasujen eli hään, lento- ja pohjatuhkan ja säteilyn kautta. Lisäksi kattilasta poistuu energiaa jäähdytyslaitteistojen kautta. Häviöt määritellään tehoina ja prosentteina tämän työn kaavoissa. Hyötysuhde voidaan määrittää häviötehojen tai häviöosuuksien kautta. Kaikki häviöt yhteenlaskettuna on kokonaishäviö. Kokonaishäviöteho saadaan, kun lasketaan yhteen kaikki häviötehot. Ko-

konaishäviö voidaan ilmoittaa prosentteina, missä häviöosuudet vähennetään luvusta yksi. Luku yksi vastaa tässä tapauksessa häviötöntä kattilaa. (SFS-EN 12952-15.)

Epäsuoralla menetelmällä laskettaessa tulee tietää kattilan kaikki häviöt. Kattilan häviöt voidaan määrittää entalpia-arvoilla tai prosenttiosuuksilla, milloin säteily- ja jäähdytyshäviöt pitää määrittää kuitenkin tehojen kautta, koska ne eivät ole riippuvaisia polttoaineesta. Kattilasta laskettavat yhteishäviöt saadaan kaavalla (27). (SFS-EN 12952-15.)

$$Q_{\text{häviöt}} = Q_{sk} + Q_{CO} + Q_{\text{tuhka}} + Q_{RK} + Q_{\text{jäähdytys}} \quad (27)$$

|                        |                                       |
|------------------------|---------------------------------------|
| $Q_{\text{häviöt}}$    | Kattilan tehohäviöt [kW]              |
| $Q_{sk}$               | Savukaasuhäviöteho [kW]               |
| $Q_{CO}$               | Palamattomien kaasujen häviöteho [kW] |
| $Q_{\text{tuhka}}$     | Tuhkan kokonaistehohäviöt [kW]        |
| $Q_{RK}$               | Säteilyhäviöteho [kW]                 |
| $Q_{\text{jäähdytys}}$ | Jäähdytyshäviöteho [kW]               |

### 3.4.1 Savukaasuhäviöt

Savukaasuhäviöt ovat savukaasun mukana kattilasta poistuvaa lämpöenergiaa. Savukaasuhäviöt tehoina lasketaan kaavalla (28) (SFS-EN 12952-15).

$$Q_{sk} = \mu_G c_{pG} (T_{sk} - T_r) m_F \quad (28)$$

|          |  |
|----------|--|
| $Q_{sk}$ | Savukaasuhäviöteho [kW]                  |
| $\mu_G$  | Polttoaineen ja savukaasun suhdeluku [-] |
| $c_{pG}$ | Savukaasun ominaislämpö [kJ/kg°C]        |
| $T_{sk}$ | Savukaasun lämpötila [°C]                |

$T_r$  Vertailulämpötila [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$m_F$  Polttoainevirta [ $\text{kg/s}$ ]

Toinen tapa määrittää savukaasuhäviöt on laskea prosenttiosuus savukaasuhäviöistä suhteessa tuotuun energiamäärään. Savukaasuhäviöiden prosenttiosuus lasketaan kaavalla (29). (SFS-EN 12952-15).

$$q_{sk} = \frac{\mu_G c_{pG}(T_{sk} - T_r)}{H_{tot} P_{laite}} \quad (29)$$

$q_{sk}$  Savukaasuhäviö [-]

$\mu_G$  Polttoaineen ja savukaasun suhdeluku [-]

$c_{pG}$  Savukaasun ominaislämpö [ $\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{sk}$  Savukaasun lämpötila [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_r$  Vertailulämpötila [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$H_{tot}$  Suhteellinen kemiallinen energia poltossa [ $\text{kJ/kg}$ ]

$P_{laite}$  Lisälaitteiden kokonaisteho [ $\text{kW}$ ]

### 3.4.2 Palamattomien kaasujen häviöt

Palamisessa kaikki kaasut eivät pala vaan palaminen jää vajavaiseksi. Häkä on pääosin hiilivetyä. Palamattomia kaasuja kutsutaan usein hiilimonoksidiksi, koska hiilimonoksidi on merkittävin komponentti. Suuri häkäpitoisuus tarkoittaa, että palaminen on epätäydellistä, minkä takia laitoksen palamistapahtuman ongelmat tulisi korjata. Häkäpitoisuuden tulisi olla mahdollisimman matala myös päästöjen kannalta. (Huhtinen 1994, 96.)

Häkä- eli palamattomien kaasujen häviöt tehon mukaan voidaan määrittää kaavalla (30). Hiilimonoksidin lämpöarvo on standardissa  $12\,633\text{ kJ/m}^3$ . (SFS-EN 12952-15).

$$Q_{CO} = V_{Gd} y_{COd} H_{CO_n} m_F \quad (30)$$

|            |  |
|------------|--|
| $Q_{CO}$   | Palamattomien kaasujen häviöteho [kW]                          |
| $V_{Gd}$   | Kuivan savukaasun tilavuus [m <sup>3</sup> /kg]                |
| $y_{COd}$  | CO-pitoisuus kuivassa savukaasussa [ppm]                       |
| $H_{CO_n}$ | Hiilimonoksidin lämpöarvo kuutiometreissä [kJ/m <sup>3</sup> ] |
| $m_F$      | Polttoainevirta [kg/s]   |

Häkähäviöiden prosenttiosuus lasketaan kaavalla (31) (SFS-EN 12952-15).

$$q_{CO} = \frac{V_{Gd} y_{COd} H_{CO_n}}{H_{tot} P_{laite}} \quad (31)$$

|             |  |
|-------------|--|
| $q_{CO}$    | Palamattomien kaasujen häviö [-]                               |
| $V_{Gd}$    | Kuivan savukaasun tilavuus [m <sup>3</sup> /kg]                |
| $y_{COd}$   | CO-pitoisuus kuivassa savukaasussa [ppm]                       |
| $H_{CO_n}$  | Hiilimonoksidin lämpöarvo kuutiometreissä [kJ/m <sup>3</sup> ] |
| $H_{tot}$   | Suhteellinen kemiallinen energia poltossa [kJ/kg]              |
| $P_{laite}$ | Lisälaitteiden kokonaisteho [kW]                               |

### 3.4.3 Tuhkahäviöt

Tuhkahäviöt koostuvat lento- ja pohjatuhkahäviöistä. Tuhkahäviöt luetellaan termisiin – ja palamattomiin kiintoaineiden tuhkahäviöihin. Termiset - ja palamattomat kiintoaineiden häviöt määritellään lento- ja pohjatuhkalle erikseen. Tuhkamateriaalin koostumus riippuu hyvin paljon polttoaineen koostumuksesta, minkä takia tuhkan ominaisuudet on määriteltävä suurimmaksi osaksi kokeellisesti. Standardin avulla voidaan laskea tuhkamateriaalin laskentakaavat valmiiksi määriteltyjen arvojen perusteella.

(SFS-EN 12952-15.) Lento- ja pohjatuhka voidaan määritellä samana tuhkana tarvittaessa. Hyötysuhde tulee olemaan tämän seurauksena epätarkempi. (Huhtinen 1994, 99).

Kaikissa polttoaineissa ei ole tuhkaa, minkä takia tuhkahäviöitä ei välttämättä ole. Tuhkaton polttoaine on usein kaasumainen, kuten maakaasu. Tuhkahäviöt jäävät todella pieniksi polttoöljyjen poltossa, koska niiden tuhka sisältö on lähes nolla. (Ilman-suojeluyhdistys ry 2002, liite 1.)

Tuhkista voidaan laskea tehohäviöt kaikille kaavassa (32) mainituille tuhkan ominaisuuksille. Pohjatuhkista aiheutuvat häviöt saadaan laskemalla pohjatuhkien termiset - ja kiintoainehäviöt yhteen. Vastaavasti laskemalla termiset – ja kiintoainehäviöt yhteen saadaan laskettua lentotuhkien tehohäviöt. Tuhkien kokonaishäviöt lasketaan kaavalla (32). (SFS-EN 12952-15.)

$$Q_{tuhka} = Q_{SLt} + Q_{FAt} + Q_{SLk} + Q_{FAk} \quad (32)$$

|             |  |
|-------------|--|
| $Q_{tuhka}$ | Tuhkan kokonaistehohäviöt [kW]             |
| $Q_{SLt}$   | Pohjatuhkan termiset tehohäviöt [kW]       |
| $Q_{FAt}$   | Lentotuhkan termiset tehohäviöt [kW]       |
| $Q_{SLk}$   | Pohjatuhkan kiintoaineiden tehohäviöt [kW] |
| $Q_{FAk}$   | Lentotuhkan kiintoaineiden tehohäviöt [kW] |

Tuhkien prosenttiosuushäviöt voidaan laskea kaavalla (33) (SFS-EN 12952-15).

$$q_{tuhka} = \frac{J_{SF}}{H_{tot}} \quad (33)$$

|             |   |
|-------------|---|
| $q_{tuhka}$ | Tuhkan häviö [-]                                  |
| $J_{SF}$    | Tuhkan mukana menetetty entalpia [kJ/kg pa]       |
| $H_{tot}$   | Suhteellinen kemiallinen energia poltossa [kJ/kg] |



Tuhkan mukana menetettävän entalpiian määrittelemisessä voidaan halutessa olla erottelematta pohja- ja lentotuhkaa. Tällöin pohja- ja lentotuhka ajatellaan samana tuhkana. (Huhtinen 1994, 99.) Tuhkan mukana menetetty entalpia voidaan määrittää kaavalla (34) (SFS-EN 12952-15).

$$J_{SF} = \frac{y_{pa,kiinteä}(1-v)}{(1-l_u)} \left( \frac{(1-R_{FA})h_{SL}}{(1-u_{SL})} + \frac{R_{FA}h_{FA}}{(1-u_{FA})} \right) \quad (34)$$

|                  |   |
|------------------|---|
| $J_{SF}$         | Tuhkan mukana menetetty entalpia [kJ/kg pa]       |
| $y_{pa,kiinteä}$ | Polttoaineen kiinteiden aineiden osuus [-]        |
| $v$              | Hehkutushäviö [-]                                 |
| $l_u$            | Palamattomien tuhkan osuus polttoainevirrasta [-] |
| $R_{FA}$         | Lentotuhkan osuus tuhkasta [-]                    |
| $h_{SL}$         | Pohjatuhkan entalpia [kJ/kg]                      |
| $h_{FA}$         | Lehtotuhkan entalpia [kJ/kg]                      |
| $u_{SL}$         | Palamaton ainemäärä pohjatuhkassa [-]             |
| $u_{FA}$         | Palamaton ainemäärä lentotuhkassa [-]             |

Pohjatuhka sisältää lämpöenergiaa. Pohjatuhkan kautta kattilasta poistuu lämpöenergiaa palamisen takia. Pohjatuhkan termiset häviöt lasketaan kaavalla (35). (SFS-EN 12952-15).

$$Q_{SLt} = m_{SL}c_{SL}(T_{SL} - T_r) = m_{SL}h_{SL} \quad (35)$$

|           |                                      |
|-----------|--------------------------------------|
| $Q_{SLt}$ | Pohjatuhkan termiset tehohäviöt [kW] |
| $m_{SL}$  | Pohjatuhkan massavirta [kg/s]        |
| $c_{SL}$  | Pohjatuhkan ominaislämpö [KJ/kg°C]   |

$T_{SL}$  Pohjatuhkan lämpötila [°C]

$T_r$  Vertailulämpötila [°C]

$h_{SL}$  Pohjatuhkan entalpia [kJ/kg]

Lentotuhka sisältää lämpöenergiaa, mikä poistuu palaessa kattilasta. Lentotuhkan termiset häviöt lasketaan kaavalla (36). (SFS-EN 12952-15).

$$Q_{FAt} = m_{FA}c_{FA}(T_{sk} - T_r) = m_{FA}h_{FA} \quad (36)$$

$Q_{FAt}$  Lentotuhkan termiset tehohäviöt [kW]

$m_{FA}$  Lehtotuhkan massavirta [kg/s]

$c_{FA}$  Lentotuhkan ominaislämpö [KJ/kg°C]

$T_{sk}$  Savukaasun lämpötila [°C]

$T_r$  Vertailulämpötila [°C]

$h_{FA}$  Lehtotuhkan entalpia [kJ/kg]

Palamattomien kiintoaineiden määrittämisessä huomioidaan palamattoman tuhkan lämpöarvo, joka on kivihiilen poltossa 33 MJ/kg eli 33 000 KJ/kg. Palamattoman tuhkan lämpöarvo voidaan määrittellä myös toisella tavalla, siksi arvo ei ole vakio. Palamattomia tuhkia syntyy esimerkiksi heikossa palamisessa. (SFS-EN 12952-15.)

Pohjatuhkista osa jää palamatta poltto-olosuhteissa, minkä takia osa pohjatuhkista jää arinan pohjalle. Pohjatuhkan kiintoaineiden häviöt lasketaan kaavalla (37). (SFS-EN 12952-15.)

$$Q_{SLk} = m_{SL}(u_{SL}H_{tuhka}) \quad (37)$$

$Q_{SLk}$  Pohjatuhkan kiintoaineiden tehohäviöt [kW]

$m_{SL}$  Pohjatuhkan massavirta [kg/s]

$u_{SL}$  Palamaton ainemäärä pohjatuhkassa [-]

$H_{tuhka}$  Palamattoman tuhkan lämpöarvo [KJ/kg]

Kaikki lentotuhkat eivät pala poltto-olosuhteissa. Lentotuhkan kiintoaineiden häviöt lasketaan kaavalla (38). (SFS-EN 12952-15).

$$Q_{FAk} = m_{FA}(u_{FA}H_{tuhka}) \quad (38)$$

$Q_{FAk}$  Lentotuhkan kiintoaineiden tehohäviöt [kW]

$m_{FA}$  Lehtotuhkan massavirta [kg/s]

$u_{FA}$  Palamaton ainemäärä lentotuhkassa [-]

$H_{tuhka}$  Palamattoman tuhkan lämpöarvo [KJ/kg]

#### 3.4.4 Säteily- ja konvektiohäviöt

Kattilasta poistuu lämpöä säteilyn- ja konvektion kautta. Kattilan korkean lämpötilan takia kattila luovuttaa lämpöä viileämpään ympäristöön eli kattila lämmittää ympäristön ilmaa. Ympäristöön siirtyvä lämpö luetaan säteilyhäviöksi. Konvektiossa kattilan sisällä oleva lämpö kulkeutuu kattilan seinämien pintaan esimerkiksi savukaasujen avulla. Kattilan seinästä lämpöenergiaa siirtyy säteilynä ilmaan. (SFS-EN 12952-15.)

Kaikki säteily ei mene kattilan ulkopuolelle vaan osa säteilystä kimpoaa kattilan seinästä takaisin kattilan sisälle. Siksi kattilan säteilyhäviöarvo pitää kertoa kattilalle ominaisella säteilyhäviökertoimella esimerkiksi 30 %. (Heinänen 2014). Säteilyhäviökerroin kertoo kuinka suuri osa säteilystä poistuu kattilan ulkopuolelle. Tämä kerroin pitää ottaa huomioon määriteltäessä säteily- ja konvektiohäviöitä kokemusperäisen kaavion avulla. (Huhtinen 1994, 101.)

Kattilan säteily- ja konvektiohäviö voidaan määrittää kokemusperäisen tiedon kautta. Standardissa SFS-EN 12952–15 kattilan säteilyhäviö on määritelty kaavan (39) avulla. Kaavassa (39) huomioidaan polttoaineelle ominainen säteilykerroin, kattilalle määritelty maksimi käyttöteho ja säteilyhäviökerroin. Kattilan säteily- ja konvektiohäviöt

määritellään kokemusperäisiin tietoihin perustuvan kaavan (39) avulla. (SFS-EN 12952-15.)

$$Q_{RK} = \frac{y_{RK}}{100} Q_{maks}^{0,7} C \quad (39)$$

|            |                                  |
|------------|----------------------------------|
| $Q_{RK}$   | Säteilyhäviöteho [MW]            |
| $y_{RK}$   | Säteilyhäviökerroin [%]          |
| $Q_{maks}$ | Maksimi kattilan käyttöteho [MW] |
| $C$        | Polttoaineen säteilykerroin [-]  |

Säteily häviöt voidaan myös määrittää mittaamalla kattilan seinämien lämpötiloja. Kattilan ympäristön ja ulkoseinän lämpötilaerot mitataan, missä ympäristön lämpötila ei välttämättä ole referenssi- eli vertailulämpötila. Säteilyn lämmönsiirtokerroin kertoo säteilyn tehokkuuden. Liian suuri säteilyteho heikentää hyötysuhdetta. Laskentaohjelman avulla huomataan, että säteilyhäviöt ovat pienet vesiputkikattiloissa. Säteilyhäviöt voidaan määrittää mittauservojen avulla kaavalla (40). (Huhtinen 1994, 101.)

$$Q_{RK} = (a_r + a_k) A_{seinä} (T_{seinä} - T_{ymp}) \quad (40)$$

|             |   |
|-------------|---|
| $Q_{RK}$    | Säteilyhäviöteho [W]  |
| $a_r$       | Säteilyn lämmönsiirtokerroin [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]       |
| $a_k$       | Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ] |
| $A_{seinä}$ | Kattilan ulkoseinän pinta-ala [ $m^2$ ]                       |
| $T_{seinä}$ | Kattilan ulkoseinän lämpötila [ $^\circ C$ ]                  |
| $T_{ymp}$   | Ympäristön lämpötila [ $^\circ C$ ]                           |

Jos polttoainevirta asetetaan arvoon 1 kg/s, silloin häviöt ovat samat kuin entalpia-arvoilla laskettaessa. Säteilyn häviöteho jaetaan polttoainevirralla, joka on muodossa 1

kg/s. Tulokseksi saadaan sama arvo kuin säteilyteho, mutta nyt säteilyhäviö on ilmoitettu muodossa 1 kJ/kg.

Säteilyhäviön prosenttiosuus saadaan laskettua, kun tiedetään säteilyteho ja kattilaan tuotu kokonaisteho. Säteilyteho tulee jakaa entalpia-arvolla, kun lasketaan entalpia-arvoilla hyötysuhdetta, koska säteilyn määrä on riippuvainen kattilasta mitatuista arvoista. Tuotu entalpia saadaan, kun polttoainevirta on 1kg/s. Polttoaineen syöttö ei vaikuta kokemuseräisesti tarkasteltavaan säteilyhäviöön. (Control specialties 2014.)

Muussa tapauksessa säteilyn osuus voidaan selvittää käyttäen apuna säteilyhäviön ja tuodun lämpöenergian suhdetta. Näin selvitetään kuinka paljon on säteilyhäviön osuus tuodusta lämpövirrasta. Säteilyhäviön prosenttiosuus voidaan laskea kaavalla (41). (SFS-EN 12952-15.)

$$q_{RK} = \frac{Q_{RK}}{m_F H_{tot} + P_{laite}} \quad (41)$$

|             |   |
|-------------|---|
| $q_{RK}$    | Säteilyhäviö [-]                                  |
| $Q_{RK}$    | Säteilyhäviöteho [MW]                             |
| $H_{tot}$   | Suhteellinen kemiallinen energia poltossa [kJ/kg] |
| $P_{laite}$ | Lisälaitteiden kokonaisteho [kW]                  |
| $m_F$       | Polttoainevirta [kg/s]                            |

### 3.4.5 Jäähdytyslaitteisto

Kattilassa on jäähdytyslaitteita, jotka vievät lämpöenergiaa kattilasta pois. Esimerkiksi ulospuhallus voidaan laskea jäähdytykseksi. Tätä lämpöenergiaa ei välttämättä voida siirtää käyttöhöyryyn, minkä takia osa jäähdytyslaitteista pienentää hyötysuhdetta. Kaikki jäähdytyslaitteet energiataseen ulkopuolelta tulee ottaa mukaan häviöihin, jos lämpö ei siirry takaisin kattilaprosessiin. (Huhtinen 1994, 93.)

Jäähdytyslaitteiston häviöt eivät ole suoraan verrannollisia polttoainevirtaan. Entalpialaskennassa tämä on huomioitava. Jäähdytysteho tulee kertoa jäähdytysaineen mas-

savirran ja polttoainevirran suhteella, että saadaan jäähtyksen entalpia. Jäähdytysen entalpia-arvo saadaan myös, kun jäähtyksen häviöteho jaetaan polttoainevirralla, joka on muodossa 1 kg/s. Vertaa säteilyhäviöihin.

Tehoarvoilla laskettaessa pitää tietää jäähtytysteho. Jäähdytyshäviön prosenttiosuus voidaan laskea kaavalla (42). (SFS-EN 12952-15.)

$$q_J = \frac{Q_J}{m_F H_{tot} + P_{laite}} \quad (42)$$

|             |   |
|-------------|---|
| $q_J$       | Jäähdytyshäviö [-]                                |
| $Q_J$       | Jäähdytyshäviöteho [MW]                           |
| $H_{tot}$   | Suhteellinen kemiallinen energia poltossa [kJ/kg] |
| $P_{laite}$ | Lisälaitteiden kokonaisteho [kW]                  |
| $m_F$       | Polttoainevirta [kg/s]                            |

### 3.5 Kattilan laskennallisia arvoja

Kattilan hyötysuhteen määrittämiseksi on selvitettävä erilaisia mittaus arvoja riippuen menettelytavasta. On tärkeää selvittää savukaasujen – ja tuhkien ominaisuudet. Vertailulämpötila on tärkeä arvo kattilan hyötysuhteen määrittämisessä. Hajotushöyryä käytetään erityisesti öljypolttoaineiden kanssa. (SFS-EN 12952-15.)

#### 3.5.1 Savukaasut

Savukaasut poistuvat laitokselta savupiipun kautta. Savukaasun virtaus mitataan savukaasukanavasta. Kun hyötysuhde määritellään savukaasuvirran avulla, on savukaasuvirta mitattu usein eri arvona kuin 1 kg/s. Savukaasuvirta määritetään usein muodossa  $Nm^3/s$ , missä savukaasun tilavuusvirta on ilmoitettu normaaliolosuhteissa. Savukaasujen tiheyden määrittäminen ei sisälly standardiin SFS-EN 12952-15. Hyötysuhteen laskemisessa ei tarvita savukaasuvirtaa, jos hyötysuhde määritellään polttoainevirran avulla. Savukaasuvirta ilmoitetaan standardissa massavirtana. (Ilmansuojeluyhdistys ry 2002, 46.)



Kuva 12. Savukaasut poistuvat savupiipusta. (Raunio 2013).

Prosessissa savukaasujen tärkeitä ominaisuuksia ovat tiheys, lämpötila, lämmönjohtavuus, ominaislämpö, viskositeetti, ominaissavukaasumäärä ja kosteus. Standardin SFS-EN 12952-15 mukaan merkityksellistä on määrittää itse savukaasun lämpötila ja massavirta. Muut arvot on määriteltävissä standardin SFS-EN 12952-15 kautta laskennallisesti. Savukaasun ominaisuudet vaihtelevat polttoaineen mukaan. Laskentaohjelmaa varten on hyvä määrittää seuraavat asiat:

- savukaasun lämpötila
- savukaasukanavan olosuhteet
- savukaasun tiheys
- savukaasun tilavuusvirta. (SFS-EN 12952-15.)

Laskentaohjelmaa varten savukaasun tilavuusvirta voidaan muuttaa savukaasun massavirraksi tiheyden avulla. Tiheyden on oltava kostean savukaasun tiheys mittauspaikalla eli savukaasukanavassa. Polttoainevirran ja savukaasuvirran välinen yhteys on määritelty kaavassa (43). (SFS-EN 12952-15.)

$$m_{sk} = \rho_{ws} V_{sk} \quad (43)$$

$m_{sk}$  Savukaasun massavirta [kg/s]

$V_{sk}$  Savukaasun tilavuusvirta [m<sup>3</sup>/s]

$\rho_{ws}$  Kostean savukaasun tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

Savukaasussa on eri kaasuja sekoittuneena yhteen. Savukaasu sisältää eri kaasukomponentteja, joita ovat esimerkiksi happi, typpi, rikkidioksidi, hiilidioksidi, vesihöyry ja häkä. Typpi määritellään komponenttiosuuksien jäännöksestä, kun muiden komponenttien osuudet on määritelty. Typen määrä voi vaihdella savukaasussa, kun se kos-

kettaa ilmaa. Ilmassa on typpeä noin 79 %. Kaasukomponentit käyttäytyvät savukaasussa eri tavoin kuten vesihöyry. Vesihöyryn käyttäytymistä savukaasussa on vaikea kuvailla laskenta ohjelmalla, koska savukaasun tila muuttuu polttoprosessissa paljon. Savukaasu on aluksi kattilassa, josta se poistuu savukaasu kanavaan. Vesihöyryn tiheys on normaaliolosuhteissa  $0,804 \text{ kg/m}^3$ . Muiden kaasukomponenttien tiheydet ovat normaaliolosuhteissa yleensä yli yhden. Katso taulukkoa (1). (Ilmansuojeluyhdistys ry 2002, 46.)

Savukaasun tiheyden laskeminen laskentaohjelmalla onnistuu muutamilla eri tavoilla. Kun tiedetään savukaasun massa ja tilavuus normaaliolosuhteissa, saadaan tiheys normaaliolosuhteissa määritettyä, kun jaetaan massa tilavuudella. Savukaasun tiheyden määrittämisessä tulee olla tarkkana, että olosuhde on oikea. Kun määritellään kuivan savukaasun tiheyttä, on käytettävä kuivan savukaasun massaa ja tilavuutta. Kuivan savukaasun tiheys normaaliolosuhteissa voidaan määrittää savukaasusta mitattujen kaasukomponenttien avulla. Savukaasun kaasukomponenttien osuudet tulee kertoa kaasukomponentin tiheydellä normaaliolosuhteissa. Nämä kaasukomponenttien osatiheydet tulee summata yhteen. Kuivan savukaasun tiheys normaaliolosuhteissa voidaan laskea kaavalla (44). (Ilmansuojeluyhdistys ry 2002, 47.)

$$\rho_{dn} = \sum r_{kaasu} \rho_{kaasu} \quad (44)$$

$\rho_{dn}$  Kuivan savukaasun tiheys normaaliolosuhteissa [ $\text{kg/m}^3$ ]

$r_{kaasu}$  Kaasukomponentin osuus kuivassa savukaasussa [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]

$\rho_{kaasu}$  Kaasukomponentin tiheys normaaliolosuhteissa [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Taulukossa (1) on eri kaasukomponenttien tiheyksiä normaaliolosuhteissa. Taulukon arvoja voi käyttää savukaasun tiheyden määrittämisessä. (Huhtinen 1994, 90).

Taulukko 1. Savukaasukomponenttien tiheyksiä normaaliolosuhteissa

| Kaasu                  | Tiheys normaaliolosuhteissa $\text{kg/m}^3$ |
|------------------------|---|
| ilma                   | 1,2931                                      |
| typpi                  | 1,2505                                      |
| ilma typpi (0, 93% Ar) | 1,2571                                      |
| happi                  | 1,429                                       |



|                |         |
|----------------|---------|
| vesihöyry      | 0,802   |
| vety           | 0,08987 |
| hiilimonoksidi | 1,2514  |
| hiilidioksidi  | 1,977   |
| rikkidioksidi  | 2,9267  |
| typpimonoksidi | 1,3402  |

Kostean savukaasun tiheys normaaliolosuhteissa voidaan laskea kaavalla (45) (Ilmansuojeluyhdistys ry 2002, 47).

$$p_{wn} = p_{dn} \frac{1+x_s}{1+\frac{x_s p_{dn}}{p_{vn}}} \quad (45)$$

$p_{wn}$  Kostean savukaasun tiheys

normaaliolosuhteissa [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$p_{dn}$  Kuivan savukaasun tiheys normaaliolosuhteissa [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$x_s$  Veden ja kuivan kaasun massasuhte [-]

$p_{vn}$  Vesihöyryn tiheys normaaliolosuhteissa [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Kostean kaasun tiheys mittauspaikalla eli savukaasukanavassa voidaan laskea. Laskennassa olosuhteita verrataan normaaliolosuhteisiin. Normaaliolosuhteet tarkoittavat olosuhteita maanpinnalla 0 °C lämpötilassa. Normaaliolosuhteet nimetään 1 atm tai NTP-tila. Normaali lämpötila on 273,16 K ja - paine on 101,325 kPa. Kostean kaasun tiheys mittauspaikassa saadaan kaavalla (46). (Ilmansuojeluyhdistys ry 2002, 47.)

$$p_{ws} = p_{wn} \left( \frac{T_n}{T_m} \frac{p_m}{p_n} \right) \quad (46)$$

$p_{ws}$  Kostean savukaasun tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$p_{wn}$  Kostean savukaasun tiheys

normaaliolosuhteissa [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

|       |  |
|-------|--|
| $T_n$ | Lämpötila normaaliolosuhteissa [K]       |
| $T_m$ | Mitattu lämpötila savukaasukanavassa [K] |
| $P_n$ | Paine normaaliolosuhteissa [kPa]         |
| $P_m$ | Mitattu paine savukaasukanavassa [kPa]   |

Kuivan savukaasun tilavuus voidaan määrittää kaavalla (47) (SFS-EN 12952-15).

$$V_{Gd} = V_{God}(\lambda_{yli} + 1) \quad (47)$$

|                 |   |
|-----------------|---|
| $V_{Gd}$        | Kuivan savukaasun tilavuus polttoainekiloa kohti [m <sup>3</sup> /kg] |
| $V_{God}$       | Kuivan savukaasun tilavuus NTP - olosuhteissa [m <sup>3</sup> /kg pa] |
| $\lambda_{yli}$ | Ilmaylimäärä [-]  |

Kostean savukaasun tiheyden määrittämisessä tarvitaan savukaasun vesisisällön määrittämistä. Savukaasun vesisisältö on tärkeä määrittää, kun halutaan määrittää savukaasun tiheys. Savukaasun vesisisältö voidaan määrittää kaavalla (48). (SFS-EN 12952-15.)

$$X_{H2O} = \mu_{H2Of} + \mu_{Ad}X_{H2OAd} + \mu_{AS} \quad (48)$$

|              |   |
|--------------|---|
| $X_{H2O}$    | Savukaasun vesisisältö [-]                        |
| $\mu_{H2Of}$ | Höyrystyneen veden määrä poltossa [Kg H2O/kg pa]  |
| $\mu_{Ad}$   | Kuiva palamisilman määrä poltossa [Kg ilma/kg pa] |
| $X_{H2OAd}$  | Palamisilman kosteus [-]                          |
| $\mu_{AS}$   | Hajotushöyryn ja polttoaineen massasuhde [-]      |

Laskentaohjelmalla voidaan määrittää veden ja kaasun massasuhde suoraan. Tulos ei ole täysin tarkka, mutta on suuntaa antava. Savukaasun ja veden massasuhde voi vaihdella mittausajasta riippuen. Veden - ja kaasun massasuhde voidaan laskea kaavalla (49). (Heinänen 2014.)

$$X_s = \frac{1}{1 - X_{H_2O}} - 1 \quad (49)$$

$x_s$  Veden ja kuivan kaasun massasuhde [-]

$X_{H_2O}$  Savukaasun vesisisältö [-]

Hapen ja veden lisäksi savukaasu sisältää hiilidioksidia. Hiilidioksidin määrä kosteassa savukaasussa voidaan määrittää kaavalla (50). (SFS-EN 12952-15).

$$X_{CO_2} = \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_G} \quad (50)$$

$X_{CO_2}$  Hiilidioksidin määrä savukaasussa [-]

$\mu_G$  Polttoaineen ja savukaasun suhdeluku [-]

$\mu_{CO_2}$  Hiilidioksidin ja polttoaineen suhde [Kg CO<sub>2</sub>/kg pa]

Hiilidioksidin ja polttoaineen suhteen määrittämisessä käytetään polttoaineenkoostumuksesta saatuja tietoja hyväksi. Palaminen muodostaa tietyn määrän hiilidioksidia. Ympäristö ei vaikuta hiilidioksidin ja polttoaineen suhteeseen. Hiilidioksidin ja polttoaineen suhde voidaan määrittää kaavalla (51). (SFS-EN 12952-15.)

$$\mu_{CO_2} = \mu_{CO_2o} + 1,293V_{God}\lambda_{yli} \quad (51)$$

$\mu_{CO_2}$  Hiilidioksidin ja polttoaineen suhde [Kg CO<sub>2</sub>/kg pa]

$\mu_{CO_2o}$  Hiilidioksidin stoikiometrinen määrä [Kg CO<sub>2</sub>/kg pa]

$V_{God}$  Kuivan savukaasun tilavuus NTP - olosuhteissa [m<sup>3</sup>/kg pa]

$\lambda_{yli}$  Ilmaylimäärä [-]

Savukaasun ominaislämpö kuvaa savukaasun energiamuutosta yhtä kelvin- tai celsiusastetta kohden, kun poltetaan yksi kilogramma polttoainetta. Savukaasun ominaislämpö saadaan laskettua käyttämällä polynomitaulukkoa. Katso taulukkoa (2). Polynomitaulukko sopii Excel-laskentaan hyvin. Polynomitaulukko tehdään erikseen Excel-tilin sivualueelle. Savukaasun ominaislämpö lasketaan kaavalla (52). (SFS-EN 12952-15.)

$$c_{pG} = c_{pAd0} + P_{1m}X_{H2O} + P_{2m}X_{CO2} \quad (52)$$

$c_{pG}$  Savukaasun ominaislämpö [kJ/kg°C]

$c_{pAd0}$  Savukaasun ominaislämpökerroin [-]

$P_{1m}$  Polynomikerroin 1 [-]

$P_{2m}$  Polynomikerroin 2 [-]

$X_{H2O}$  Savukaasun vesisisältö [-]

$X_{CO2}$  Hiilidioksidin määrä savukaasussa [-]

Taulukko 2. Savukaasun ominaislämmön polynomitaulukko

|   |              |    |           |    |           |
|---|--------------|----|-----------|----|-----------|
| A | 1,004173     | A1 | 0,8554535 | A2 | -0,100231 |
| B | 1,91921E-05  | B1 | 0,0002036 | B2 | 0,000766  |
| C | 5,88348E-07  | C1 | 4,583E-07 | C2 | -9,26E-07 |
| D | -7,01118E-10 | D1 | -2,8E-10  | D2 | 5,29E-10  |
| E | 3,30953E-13  | E1 | 5,634E-14 | E2 | -1,09E-13 |
| F | -5,67388E-17 |    |           |    |           |

Savukaasun ominaislämpökerroin saadaan laskettua kaavalla (53), missä kertoimet tulevat polynomitaulukosta (SFS-EN 12952-15).

$$c_{pAd0} = A + \frac{BT_{sk}}{2} + \frac{CT_{sk}^2}{3} + \frac{DT_{sk}^3}{4} + \frac{ET_{sk}^4}{5} + \frac{FT_{sk}^5}{6} \quad (53)$$

$c_{pAd0}$  Savukaasun ominaislämpökerroin [-]

$T_{sk}$  Savukaasun lämpötila [°C]

Polynomikerroin 1 saadaan laskettua kaavalla (54), missä kertoimet tulevat polynomi-  
taulukosta (SFS-EN 12952-15).

$$P_{1m} = A_1 + \frac{B_1 T_{sk}}{2} + \frac{C_1 T_{sk}^2}{3} + \frac{D_1 T_{sk}^3}{4} + \frac{E_1 T_{sk}^4}{5} \quad (54)$$

$P_{1m}$  Polynomikerroin 1 [-]

$T_{sk}$  Savukaasun lämpötila [°C]

Polynomikerroin 2 saadaan laskettua kaavalla (55), missä kertoimet tulevat polynomi-  
taulukosta (SFS-EN 12952-15).

$$P_{2m} = A_2 + \frac{B_2 T_{sk}}{2} + \frac{C_2 T_{sk}^2}{3} + \frac{D_2 T_{sk}^3}{4} + \frac{E_2 T_{sk}^4}{5} \quad (55)$$

$P_{2m}$  Polynomikerroin 2 [-]

$T_{sk}$  Savukaasun lämpötila [°C]

### 3.5.2 Tuhkat

Palamistapahtuman jälkeen kattilaan jää tuhkaa erityisesti kiinteitä polttoaineita käytettäessä. Tuhkat määritellään lentotuhkiin ja pohjatuhkiin. Lentotuhkat ovat palamisilmassa tai savukaasussa. Pohjatuhkat ovat kattilan pohjalla. (SFS-EN 12952-15.)

Hehkutushäviö on tuhkasta häviävän palavan materiaalin osuus. Tuhkasta häviävä palava materiaali on orgaanista ainetta eikä tuhkaa, jos puhutaan hehkutushäviöstä. Kun orgaaninen aine palaa tuhkan pinnasta, jäljelle jää aito tuhka. (Pallonen 2004, 12.)

Tuhkasta voidaan selvittää palamattomien tuhkien osuus polttoainevirrasta. Tällä luvulla pystytään selvittämään tuhkien entalpia-arvot. Palamattomien tuhkien osuus polttoainevirrasta saadaan kaavalla (56). (SFS-EN 12952-15.)

$$l_u = \frac{y_{tuhka}(1-v)}{y_{pa,kiinteä}} \frac{m_{SL}u_{SL} + m_{FA}u_{FA}}{m_{SL}(1-u_{SL}) + m_{FA}(1-u_{FA})} \quad (56)$$

|                         |  |
|-------------------------|--|
| $I_u$                   | Palamattomien tuhkien osuus polttoainevirrasta [-] |
| $y_{\text{tuhka}}$      | Tuhkan osuus polttoaineesta [-]                    |
| $y_{\text{pa,kiinteä}}$ | Polttoaineen kiinteiden aineiden osuus [-]         |
| $m_{\text{SL}}$         | Pohjatuhkan massavirta [kg/s]                      |
| $m_{\text{FA}}$         | Lehtotuhkan massavirta [kg/s]                      |
| $u_{\text{SL}}$         | Palamaton ainemäärä pohjatuhkassa [-]              |
| $u_{\text{FA}}$         | Palamaton ainemäärä lentotuhkassa [-]              |
| $v$                     | Hehkutushäviö [-]                                  |

Tuhkan massavirtojen määrittelyssä voidaan käyttää eri keinoja. Tässä työssä tuhkien massavirrat on määritelty laskemalla ne polttoainevirran kautta. Kaikkien tuhkien yhteinen massavirta voidaan laskea kertomalla polttoainevirta tuhkan osuudella polttoaineesta. Käytä esimerkiksi liitettä 1. Jakamalla tuhkavirta polttoainevirralla saadaan niiden välinen suhde. Kun tämä suhde kerrotaan palamattomien tuhkien osuudella polttoainevirrasta, saadaan palamattomien tuhkien massavirta. Tässä työssä tulee tietää lentotuhkan osuus koko tuhkan määrästä, että voidaan selvittää lentotuhkan - ja pohjatuhkan massavirtojen ero. Esimerkiksi lentotuhkan massavirta saadaan kertomalla lentotuhkan osuus tuhkan massavirralla. Lentotuhkan ja pohjatuhkan suhde tulee määrittää kokeellisesti laskentaohjelmaa varten. (Keppo 1980, 31.)

### 3.5.3 Vertailulämpötila

Vertailulämpötila eli referenssilämpötila on standardin SFS-EN 12952-15 mukaan 25 °C. Lämpötilan voi muuttaa tarvittaessa. Vertailulämpötilalle kannattaa laittaa oma solu laskentaohjelmassa, mistä sen pystyy vaihtamaan. Vertailulämpötilaa verrataan mittattavan kohteen lämpötilaan, että lämpötilaeron vaikutus normaaliolosuhteisiin verrattuna saadaan selville. Vertailulämpötilaa käytetään pääsääntöisesti, kun määritellään seuraavat asiat:

- polttoaineen entalpia
- savukaasuhäviöt
- tuhkien termiset häviöt. (SFS-EN 12952-15.)

Vertailulämpötilan muuttaminen vaikuttaa hyötysuhteeseen, minkä takia vertailulämpötila on syytä pitää 25 °C:ssa. Polttoaineiden lämpöarvot tulee määrittää vertailulämpötilan mukaan. Vertailulämpötilaa tulee muuttaa vain ääriolosuhteissa, kun ympäristö sitä vaatii. Vaativat olosuhteet voivat olla esimerkiksi arktiset olosuhteet. (SFS-EN 12952-15.)

### 3.5.4 Hajotushöyry

Hajotushöyry on höyryä, jota käytetään erityisesti öljypolttoaineiden kanssa. Hajotushöyry rikkoo öljyn pintaa poltto varten. Kun öljyn pinta on rikki, on öljyn palaminen parempaa. (Neste Oil 2006, 40.) Hajotushöyrystä tulee määrittää entalpia-arvo, jos sitä käytetään. Hajotushöyryn entalpia-arvoa käytetään syötetyn tehon määrittämisessä. Hajotushöyrystä tuleva teho saadaan kertomalla hajotushöyryvirta entalpia-arvolla. Hajotushöyryn ja polttoaineen suhde voidaan määrittää kaavalla (57). (SFS-EN 12952-15.)

$$\mu_{AS} = \frac{m_{AS}}{m_F} \quad (57)$$

|            |  |
|------------|--|
| $\mu_{AS}$ | Hajotushöyryn ja polttoaineen massasuhde [-] |
| $m_{AS}$   | Hajotushöyryvirta [kg/s]                     |
| $m_F$      | Polttoainevirta [kg/s]                       |

### 3.6 Hyötysuhteen määrittäminen

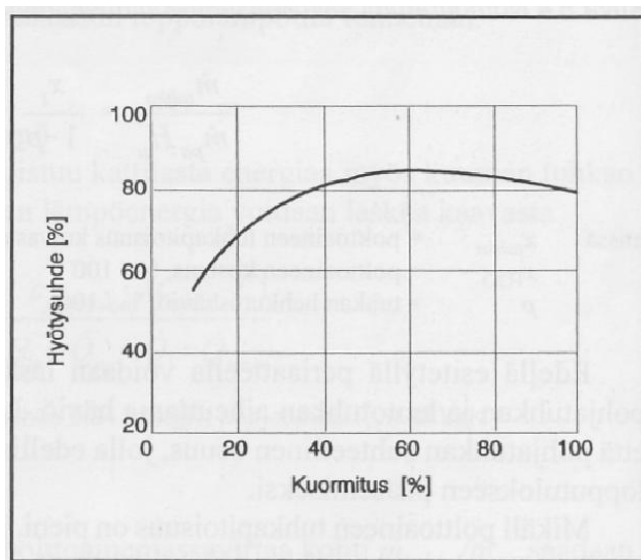
Hyötysuhteen avulla voidaan tarkastella kattilan käyttäytymistä. Hyötysuhde kertoo kuinka suuri osa poltetusta eli tuodusta energiasta saadaan hyötyenergiaksi. Suuri hyötysuhde on aina parempi, koska silloin energiaa ei mene häviöiden takia hukkaan. Hyötysuhteen tulisi olla noin 90 % tai suurempi. Hyötysuhteen ja mittausarvojen perusteella kattilaa voidaan kehittää paremmaksi. Kattilaa muuttamalla saadaan eri mittausarvot ja sitä kautta parempi hyötysuhde. (Flyktman 2004, 11.)

Kattilan hyötysuhde määritellään laskentaohjelmalla standardin SFS-EN 12952-15 mukaan. Standardi sisältää kaavat, joiden kautta hyötysuhde määritellään. Kaavat siirretään laskentaohjelmaan.

Kattilan hyötysuhde voidaan määrittää kahdella eri tavalla: epäsuoralla - tai suoralla menetelmällä. Tämän lisäksi hyötysuhde voidaan määrittää käyttämällä apuna seuraavia keinoja:

- tehoarvoja
- entalpia-arvoja
- prosenttiosuuksia. (Huhtinen 1994, 92 – 96.)

Kun hyötysuhde määritetään tehoarvojen avulla, lasketaan kattilaan tuotu teho, häviötehot ja hyötyteho. Jälkimmäistä käytetään suorassa menetelmässä. Hyötysuhde voidaan määrittää polttoaine- tai savukaasuvirran kautta, kun hyötysuhde määritellään tehoarvojen avulla. Kuvassa (13) kuvataan hyötysuhteen riippuvuutta kattilan kuormasta. (Huhtinen 1994, 101 – 102.)



Kuva 13. Kattilan hyötysuhteen riippuvuus sen tehosta. (Huhtinen 1994, 102).

Entalpia-arvojen avulla hyötysuhde määritetään, kun ei oteta huomioon polttoainevirtaa. Tämän takia hyötysuhde ei muutu polttoainevirtaa muutettaessa. Entalpiavirtojen avulla laskettaessa polttoainevirran ajatellaan olevan 1 kg/s. Toisin sanoen arvoja ver-



rataan yhteen polttoainekiloon. Esimerkiksi 200 kW häviötehoa muunnetaan muotoon J/kg, jossa kilogramma vastaa polttoainekiloa. Muunnos tehdään jakamalla polttoaineesta riippuvat tehomäärät polttoainevirran määrällä. Tuhkamateriaaleille on määritetty häviöiden entalpia erikseen. Säteily ja jäähditys eivät ole riippuvaisia polttoaineesta.

Kolmas tapa määrittää hyötysuhde on vähentää häviöiden prosentiosuudet tuodusta energiamäärästä. (SFS-EN 12952-15.)

### 3.6.1 Suora menetelmä

Suorassa menetelmässä huomioidaan kattilasta hyödyksi saatu lämpöteho. Hyötyteho saadaan laskettua, kun kattilaan tuodusta tehosta vähennetään kokonaishäviöteho. Suoralla menetelmällä hyötysuhde lasketaan kaavalla (58). (SFS-EN 12952-15.)

$$\eta_{kattila} = \frac{\Phi_{hyöty}}{\Phi_{tuotu}} \quad (58)$$

|                  |                                   |
|------------------|-----------------------------------|
| $\eta_{kattila}$ | Kattilan hyötysuhde [-]           |
| $\Phi_{hyöty}$   | Kattilasta saatava hyötyteho [kW] |
| $\Phi_{tuotu}$   | Kattilaan tuotu kokonaisteho [kW] |

### 3.6.2 Epäsuora menetelmä

Epäsuoralla menetelmällä laskettaessa otetaan huomioon kattilan häviöt. Tässä tapauksessa tehoarvot voidaan korvata entalpia-arvoilla. Jos entalpia-arvoja käytetään laskemisessa, polttoaineen määrän ajatellaan olevan yksi kilogramma. Epäsuoralla menetelmällä tehoarvojen avulla hyötysuhde lasketaan kaavalla (59). (SFS-EN 12952-15.)

$$\eta_{kattila} = 1 - \frac{Q_{häviöt}}{\Phi_{tuotu}} = \frac{\Phi_{tuotu} - Q_{häviöt}}{\Phi_{tuotu}} \quad (59)$$

|                  |                          |
|------------------|--------------------------|
| $\eta_{kattila}$ | Kattilan hyötysuhde [-]  |
| $Q_{häviöt}$     | Kattilan tehohäviöt [kW] |

$\Phi_{\text{tuotu}}$  Kattilaan tuotu kokonaisteho [kW]

Kun hyötysuhde määritellään häviöiden prosenttiosuuksien kautta, on häviöosuudet vähennettävä luvusta yksi, joka vastaa häviötöntä kattilaa. Häviöiden prosenttiosuuk-  
sien avulla laskettu hyötysuhde lasketaan kaavalla (60). (SFS-EN 12952-15.)

$$\eta_{\text{kattila}} = 1 - q_{sk} - q_{CO} - q_{tuhka} - q_{RK} - q_J \quad (60)$$

$\eta_{\text{kattila}}$  Kattilan hyötysuhde [-]

$q_{sk}$  Savukaasuhäviö [-]

$q_{CO}$  Palamattomien kaasujen häviö [-]

$q_{tuhka}$  Tuhkahäviö [-]

$q_{RK}$  Säteilähäviö [-]

$q_J$  Jäähdytyshäviö [-]

### 3.6.3 Savukaasu- tai polttoainevirta

Kattilaan tulevan polttoaineen ja kattilasta poistuvan savukaasun välillä on yhteys, minkä takia polttoainevirta voidaan korvata laskentaohjelmassa savukaasuvirralla, kun tunnetaan niiden välinen suhde. Standardissa SFS-EN 12952-15 hyötysuhteeseen vaikuttavat kaavat on määritelty polttoainevirran kautta. Polttoainevirran laskeminen savukaasuvirran avulla on kuitenkin mittausteknisesti helpompaa. Erityisesti kiinteiden polttoaineiden kattiloissa polttoainevirran määrittäminen on vaikeaa, minkä takia hyötysuhde tulee määrittää savukaasuvirran kautta. (Heinänen 2014.) Molempien virtaukset ovat todellisia virtauksia vallitsevassa olosuhteessa. Polttoainevirran ja savukaasuvirran välinen yhteys on määritelty kaavassa (61). (SFS-EN 12952-15).

$$m_F = \mu_G m_{sk} \quad (61)$$

$m_F$  Polttoainevirta [kg/s]

$m_{sk}$  Savukaasun massavirta [kg/s]

$\mu_G$  Polttoaineen ja savukaasun suhdeluku [-]

Polttoaineen ja savukaasun välinen suhdeluku on määritelty kaavassa (62) (SFS-EN 12952-15).

$$\mu_G = \mu_A + 1 - y_{tuhka}(1 - v)\mu_{AS} \quad (62)$$

$\mu_G$  Polttoaineen ja savukaasun suhdeluku [-]

$\mu_A$  Palamisilman määrä poltossa [Kg ilma/kg pa]

$y_{tuhka}$  Polttoaineen tuhkapitoisuus [-]

$v$  Hehkutushäviö [-]

$\mu_{AS}$  Hajotushöyryn ja polttoaineen massasuhde [-]

Savukaasuista kerrotaan kappaleessa 3.5.1. Polttoaineesta määritellyt arvot löytyvät Kattilaan syötettyjen tehojen kappaleen alta. Kattilaan syötetyistä tehoista kerrotaan luvussa 3.2.

## 4 LASKENTAOHJELMAN TESTAUS

### 4.1 Lähtöarvot

Laskentaohjelman lähtöarvot ovat olennainen osa vesiputkikattilan hyötysuhteen määrittämistä. Lähtöarvoiksi valitaan standardista arvoja, jotka tiedetään hyötysuhdetta määriteltäessä. Lähtöarvojen kautta määritellään laskentaohjelman tulokset. Lähtöarvot valitaan sen mukaan, kuinka tarkkoihin tuloksiin halutaan päästä. Esimerkiksi polttoainevirta, savukaasuvirta tai savukaasujen lämpötilat ovat sopivia lähtöarvoja. Vesiputkikattiloiden hyötysuhdetta määriteltäessä on savukaasusta mitatut mittausarvot tärkeitä. Tämän työn mukaan kattilasta tulee määrittää itse seuraavat asiat:

- polttoaineen - tai savukaasun massavirta
- polttoaineen tehollinen lämpöarvo
- polttoaineen lämpötila

- polttoaineen ominaislämpö
- savukaasun lämpötila
- kuivan savukaasun happipitoisuus
- kuivan savukaasun hiilimonoksidipitoisuus
- kuivan savukaasun hiilidioksidipitoisuus
- polttoilman lämpötila
- palamisilman kosteus
- polttoilman entalpia
- tuhkien massavirrat tai niiden suhdeluku
- pohjatuhkan lämpötila
- palamattoman aineen määrä pohjatuhkassa
- palamattoman aineen määrä lentotuhkassa
- hehkutushäviö
- jäähtytshäviöt
- hajotushöyryn ja polttoaineen massasuhde
- laitoksen hyötyteho. (SFS-EN 12952-15.)

Lähtöarvojen tulee olla standardin SFS-EN 12952-15 mukaisia. Lähtöarvojen pitää olla kaavan määräämässä muodossa, koska tuloksien epävarmuus lisääntyy lähtöarvojen epätarkkuuksien kautta. Polttoaineen koostumus tulee tietää mahdollisimman tarkkaan, koska laskentaohjelman laskut rakentuvat suurimmaksi osaksi niiden varaan. Laitoksen ominaisuudet energiatasetta varten tulee määrittää tarkasti. (SFS-EN 12952-15.)

## 4.2 Tulokset

Laskentaohjelman tuloksien tulee olla mahdollisimman todellisia. Standardissa SFS-EN 12952-15 ei ole esimerkki laskuja, minkä takia tulosten tarkastelu on olennainen osa laskentaohjelmaa. Tulosten tarkastelussa on oltava kriittinen, jotta tuloksia voidaan käyttää yritystoiminnassa. (SFS-EN 12952-15.)

Laskentaohjelma antaa kattilan hyötysuhteen, joka kertoo kattilan toiminnasta. Kattilan hyötysuhteen tulisi yleisesti olla 90 % tai yli. Pieni hyötysuhde tarkoittaa, että lämpöä menee hukkaan häviöiden kautta. Todellista hyötysuhdetta ei ole olemassa, mutta kattilan hyötysuhteen määrittäminen laskentaohjelmalla antaa tietoa kattilasta ja

antaa ohjeellisen hyötysuhteen. Kun kattilan hyötysuhde määritellään ilman laskentaohjelmaa, tulosten tarkastelu vie aikaa. Laskentaohjelma antaa suuntaa antavan tuloksen nopeasti. (Heinänen 2014.) Seuraavassa taulukossa (3) on tutkimustuloksia kattiloista saaduista hyötysuhteista eri polttoaineilla. Laskentaohjelmalla päästiin noin 93 %:n hyötysuhteeseen, kun käytettiin maakaasua ja kuorma oli 24 MW. Laskentaohjelman tuloksista voidaan päätellä, että standardi SFS-EN 12952-15 sopii hyvin kattiloiden hyötysuhteiden laskemiseen. Alhaisella polttoaineen lämpöarvolla ei päästä suuriin hyötysuhteisiin. Esimerkiksi puulla päästään vain 88 %:n hyötysuhteeseen. Puun lämpöarvoa pienentää erityisesti kosteus. (Flyktman 2004, 11.)

Taulukko 3. Kattilan hyötysuhteita

| Polttoaine                | Lämmön tuotannon hyötysuhde (%) |                     |                     |
|---------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|
|                           | TEHO yli 20 MW                  | TEHO 8-20 MW        | TEHO alle 8 MW      |
| Maakaasu                  | 93                              | 93                  | 92                  |
| Kivihili                  | 92                              | 92                  | 91                  |
| Öljy                      | 92                              | 92                  | 91                  |
| Turve                     | 90                              | 89                  | 88                  |
| Puu                       | 89                              | 88                  | 87                  |
| Jäte                      | 85                              |                     |                     |
| Arinapoltto, puu ja turve | 88                              | 87                  | 86                  |
| Seospoltto                | kuten pääpolttoaine             | kuten pääpolttoaine | kuten pääpolttoaine |

Laskentaohjelmalla voidaan tutkia kattilan toimintaa. Esimerkiksi savukaasun tilavuusvirran kautta määriteltyä hyötysuhdetta voi verrata polttoaineen massavirran kautta määriteltyyn hyötysuhteeseen. Kun tutkitaan kattilan hyötysuhdetta mittaamalla savukaasuvirta ja laskemalla polttoainevirta laskentaohjelmalla, saadaan kattilasta tietoa hyötykäyttöön. Jos savukaasuvirran kautta laskettu hyötysuhde on suurempi kuin polttoainevirran kautta määritelty hyötysuhde, on polttoainevirta laskettu liian pieneksi. Jos savukaasujen lämpötilat ovat todella matalia ja kattilan kuorma on suuri, voi kattilassa olla vuoto. (Heinänen 2014.)

Kattilan lämpötilalla on suuri merkitys höyryn määrään ja palamiseen. Laskentaohjelman kannalta kuorman vaikutus havaitaan polttoainevirran määränä tai savukaasun lämpötilan mittauksessa. Suuri kuorma lisää lämmön siirtymistä höyryprosessiin ja sitä kautta parantaa hyötysuhdetta. Kattilan savukaasujen lämpötila kuitenkin pienentää hyötysuhdetta. Erilaisilla polttimien sijoitustavoilla on merkitystä lämpötilamittauksiin. (SFS-EN 12952-15.)

Lähtöarvot kannattaa ottaa pitkällä aikavälillä, että pienet olosuhteiden vaihtelut eivät vääristäisi hyötysuhdetta. Tuloksien suuret poikkeamat on hyvä poistaa. (Heinänen 2014).

## 5 EXCEL-TAULUKON HYÖDYNTÄMINEN

### 5.1 Tarkoitus

Excel-taulukkolaskentaohjelmalla on tarkoitus laskea vesiputkikattilan hyötysuhde. Laskentaohjelman kaavat lasketaan Excel-taulukon soluja apuna käyttäen. Excel-taulukko on ikään kuin laskentaohjelman käyttöliittymä, johon vesiputkikattilan laskentaohjelma tehdään.

Excel-laskentaohjelma sisältää erilaisia taulukoita muun muassa polttoaineet, savukaasut ja raportti. Taulukoihin tehdään soluihin kaavat ja syötettävät tiedot, joiden mukaan halutut arvot esimerkiksi polttoaineen lämpöarvo saapumistilassa saadaan laskettua. Taulukoissa on kutakin aihepiiriä vastaavat tiedot ja arvot. Excel-laskentaohjelmalla on tarkoituksena tehdä kaavioita saatavista arvoista esimerkiksi kattilan häviöt.

### 5.2 Hyödyt

Excel-taulukkolaskentaohjelmassa on käytettävissä useita vaihtoehtoja laskutoimituksien suorittamiselle. Excel antaa mahdollisuuden erilaisille tavoille toteuttaa laskentaohjelma esimerkiksi polttoaine voidaan valita polttoainetaulukosta hakutoiminnon avulla. Taulukoita voi muokata tahtomallaan tavalla. Kirjoitettuja soluja on helppo siirtää taulukossa ja soluihin on helppo viitata toisesta taulukosta. Excel-ohjelma pysyy yhdistämään laskutoimituksia eri taulukoiden välillä ja luomaan kaavioita laskentatulosten pohjalta. Excel-laskentaohjelmalla voidaan havaita virheet tuloksista asettamalla ehtoja. (Microsoft-Excel.)

### 5.3 Ongelmakohtia

Laskentaohjelmaa tehdessä Excel-taulukkoihin kohtaa erilaisia ongelmia. Kun laskentaohjelma on monimutkainen ja se sisältää useita laskutoimituksia, on todennäköistä saada aikaan kehäviittaus. Kehäviittaus syntyy, kun esimerkiksi kaava (61) sisältää kaavan (62) tuloksen ja kaava (62) sisältää kaavan (57), jolla voidaan laskea kaavan (61) polttoainevirta. Tässä esimerkissä kehäviittaus syntyi, kun polttoainevirta laskettiin laskentaohjelman avulla. Tämän seurauksena Excel-laskentaohjelma ei voi laskea kaavoja oikein. Kehäviitattut kaavat täytyy iteroida, että ongelma poistuu. Iteroimisessa toistetaan laskennan lukuarvoja mahdollisimman tarkan vastauksen saamiseksi. Lukuarvot ovat kehäviitattujen kaavojen sisällä kuten polttoainevirta. Muita tapoja poistaa ongelma on laskea laskukaavat muilla kaavoilla, jotka eivät aiheuta kehäviittausta. Lisäksi kehäviittauksen voi sivuuttaa kirjoittamalla kaavan vastauksen itse. Laskentaohjelman käyttäjälle on hyvä huomauttaa itse kirjoitettavasta kaavan vastauksesta. (Microsoft-Excel.)

Laskentaohjelmaan on vaikea tehdä jatkuvaa hyötysuhde laskentaa. Jos seurataan laskentaohjelmaan syötettäviä arvoja ajanfunktiona, on hyötysuhde muuttuva ajanfunktiona. Standardi SFS-EN 12952–15 määrittelee savukaasun mittausarvot keskiarvoina, minkä takia savukaasumittaukset ajanfunktiona pitää itse yhdistää standardiin omalla tavalla. Ajanfunktio pitää itse määrittellä ja yhdistää laskenta ohjelmaan. Siksi Excel-taulukko yhdessä standardin kanssa ei sovi yhteen jatkuvien kattilamittauksien kanssa. (Microsoft-Excel.)

Laskentaohjelman matemaattisista ongelmista merkittävin on polttoaineesta riippumattomien tehojen yhdistäminen kaavoihin. Polttoaineesta riippumattomia tekijöitä ovat säteilyhäviö, jäädytyshäviöt ja lisälaitteiden tehot. Koska Excel-laskentaohjelmaan on vaikea lisätä ajan käsitettä, on hyötysuhteen määrittäminen epäsuoralla menetelmällä entalpioiden kautta ongelma. Tehoa määriteltäessä energiaa verrataan aikaan. Kattilan häviöitä ja tuotua tehoa verrataan yhteen polttoainekiloon, kun käytetään entalpia-arvoja. Polttoaineesta riippumattomat tekijät tulee sovittaa yhteen polttoainekiloon esimerkiksi prosentiosien kautta. Tämä keino esitetään kappaaleen 3 osissa. Säteilähäviön määrittämisessä myös kattilan maksimikäyttötehon arviointi lisää epätarkkuutta. (SFS-EN 12952-15.)

Jos savukaasun tiheys on määritelty lähes oikein, voidaan savukaasuvirtaus muuttaa polttoainevirraksi suoraan kappaleen 3 kaavojen mukaan. Savukaasun tiheyden määrittämisessä voi olla ongelmia ja tulos on epätarkka. Kiinteiden polttoaineiden kattiloissa polttoainevirtaa ei määritetä, minkä takia hyötysuhde määritellään savukaasuvirran kautta. (Heinänen 2014.) Laskentaohjelman kaavoissa polttoainevirta voidaan tarvittaessa korvata kokonaan savukaasuvirralla. Kaikki polttoainevirrat määritellään tässä tapauksessa kaavalla (61). Entalpia-arvot voidaan suhteuttaa savukaasukiloon, kun kertoo kaavat polttoaineen ja savukaasun suhteella. Katso kaava (62). Laskentaohjelmaan voidaan laittaa valintaluettelo, mistä käyttäjä määrää hyötysuhteen määrittelytavat. (SFS-EN 12952-15.)

Nolla-arvot ovat ongelma valmiissa laskentaohjelmassa. Koska nolllalla ei voi jakaa, pitää nolla korvata esimerkiksi arvolla 0,0001. Näin pieni arvo ei vaikuta hyötysuhteen arvoon. Jossain kaavoissa arvo nolla vääristää tuloksia. Esimerkiksi, kun polttoainevirta on nolla, voi hyötysuhde olla 120 %. Tämä pitää korjata ehtofunktiolla. (SFS-EN 12952-15.)

#### 5.4 Laskentaohjelman suunnittelu

Suunniteltaessa laskentaohjelmaa on hyvä selvittää seuraavat asiat: Mitä halutaan selvittää ja mitkä ovat laskennan lähtöarvot eli syötettävät arvot? Laskennallisesti selvitettävän tuloksen ympärille on helppoa rakentaa laskentaohjelmaa, kuten kattilan hyötysuhde. Syötettävät arvot eli lähtöarvot on hyvä olla tiedossa jo laskentaohjelmaa suunniteltaessa, koska niiden kautta pyritään pääsemään lopputulokseen. Laskentaohjelma antaa laskennallisesti lopputuloksen annettujen alkuarvojen perusteella. Esimerkiksi, jos tiedetään kattilan häviöteho ja kattilaan tuleva teho, voidaan sen perusteella ratkaista hyötysuhde kaavalla (59). (SFS-EN 12952-15.)

Laskentaohjelman rakentaminen kannattaa aloittaa halutusta lopputuloksesta kuten kattilan hyötysuhteen määrittämisestä. Standardin SFS-EN 12952-15 laskentaohjelman vaikutuslohkot ovat liitteessä 3. Aluksi määritellään kaava, joka määrittelee hyötysuhteen. Tämän jälkeen määritellään kaavat, jotka määrittelevät hyötysuhteen määrittelevän kaavan. Kaavat määrittelevät toisensa kerroksittain, minkä ansiosta kattilan hyötysuhdetta määriteltäessä voi halutut osa-alueet laskea todella tarkasti. Yksi osa-alue on esimerkiksi polttoilma, jonka määrittelemine voidaan standardilla SFS-EN 12952-15 määrittää jopa niin tarkasti, että putkivuoto otetaan huomioon. Mitä tar-



kemmin hyötysuhde on määritelty, sitä varmemmin tulos on oikea. Kun määritellään hyötysuhdetta laskentaohjelmalla mahdollisimman monet fysiikan lait huomioiden, on saatu hyötysuhteen tulos tarkka. Tärkeää vesiputkikattiloiden hyötysuhteen määrittämisessä on energiataserojen määrittäminen. On tärkeää päättää käytettävä laskenta suure esimerkiksi wattia tai joulea. Standardissa SFS-EN 12952-15 käyttää laskentaan tehon arvoa. (SFS-EN 12952-15.)

Seuraavassa vaiheessa nimetään taulukot, joihin kaavat sijoitetaan. Taulukot voidaan nimetä esimerkiksi polttoaineet, laitoksen tiedot ja hyötysuhde. Taulukoiden suunnittelu on tärkeää erityisesti laskentaohjelman käytettävyyden kannalta. (Microsoft-Excel.)

Kaavojen sijoittamisessa taulukoihin kannattaa aloittaa karkealla sijoittelulla. Kaavojen sijainteja taulukoissa voi jälkepäin muuttaa. Solut kannattaa värjätä niiden käyttötarkoitusten mukaan. On hyvä erotella kaavasolut ja solut, joihin syötetään arvoja.

Kuivan savukaasun hiilidioksidi- ja happipitoisuuden välillä on yhteys, minkä takia laskentaohjelmassa voi määrittää ilmajäämän kahdella eri tavalla standardin 12952-15 mukaan. Laskenta ohjelmaan voi tehdä valintaluettelon, minkä avulla käyttäjä määrittelee laskentatavan. (SFS-EN 12952-15.)

| Laskentaperiaatteet |  |
|---------------------|--|
| L                   | H <sub>2</sub> O Laskentaperiaate  |
| M                   | Mitattu  |
| L                   | Laskennallinen   |
| L                   | CO <sub>2</sub> Laskentaperiaate   |
| M1                  | Mitattu 1  |
| M2                  | Mitattu 2  |
| L                   | Laskennallinen   |
|                     | CO <sub>2</sub> Laskentaperiaate   |
|                     | M1: Mittausarvo määrittää päästöt, mutta y O <sub>2d</sub> määrittää u Ad, V Gd ja u CO <sub>2</sub> arvot                                 |
|                     | M2: Mittausarvo määrittää päästöt ja u Ad, V Gd ja u CO <sub>2</sub> arvot   |
|                     | L : CO <sub>2</sub> päästöt lasketaan y O <sub>2d</sub> arvon mukaan, ja y O <sub>2d</sub> määrittää u Ad, V Gd ja u CO <sub>2</sub> arvot |

Kuva 14. Valintaluettelo. (Microsoft-Excel).

Laskentaohjelman kaavat on hyvä käydä läpi ja varmistaa, että arvojen yksikön tunnukset ovat oikeat. Kaavojen tuloksia voi säätää ehtofunktiolla. Jotkut tehoa kuvaavat kaavat antavat tuloksen megawatteina (MW) ja toiset kilowatteina (kW). Yksikkömuunnoksien etuliitteet voidaan muuttaa kertomalla megawattit tuhannella, jotta saadaan kilowattit. Esimerkiksi 10,2 MW on 10 200 kW. Yksikön tunnuksia käsitellään

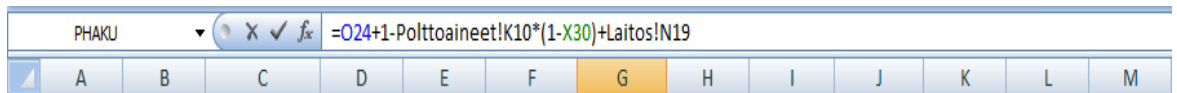
samalla tavalla kuin numeerisia arvoja kaavoissa. Esimerkiksi tehon yksikkö on toisella tavalla ilmaistuna J/s, mistä huomataan, että tehoon vaikuttaa suoraan verrannollisesti energian määrä ja kääntäen verrannollisesti aika. Varmin tapa laskea kaavat oikein on laskea arvot SI-järjestelmän mukaisten perusyksiköiden mukaan ja muuttaa arvojen etuliitteet kertomalla tuhansilla. Esimerkiksi tehon arvot lasketaan watteina (W). (Tekniikan kaavasto 2008, 155.)

Laskentaohjelman suunnittelun loppuvaiheessa laskentaohjelmalle tehdään käyttöohjeet. Käyttöohjeista selviää laskentaohjelmassa huomioitavat asiat. Laskentaohjelma toiminta kuvataan käyttöohjeissa. Erityisesti valintaluettelon vaikutukset ohjelmassa tulee käydä läpi.

## 5.5 Käyttöohjeet

Laskentaohjelman kaavat kirjoitetaan soluihin, mihin kaava tai arvo halutaan sijoittaa ruudukossa. Soluihin voi kirjoittaa laskentakaavoja, numeroita ja kirjaimia. Soluja voi muotoilla aloitusvälilehden muokkaus toiminnoilla. Esimerkiksi värin ja fontin voi muuttaa, kun halutaan korostaa solua. Ruudukolla tarkoitetaan aluetta, joka koostuu soluista. Ruudukon vaakarivillä olevat peräkkäiset solut ovat rivejä ja ruudukon pystyrivillä olevat peräkkäiset solut ovat sarakkeita. Solun sijainti ilmoitetaan riveistä ja sarakkeista koostuvalla koordinaatistolla, jossa rivit on merkattu numeroin ja sarakkeet on merkattu kirjaimin. Esimerkiksi solu voi sijaita ruudukon solussa 'F9'. Solun voi valita kaavaan kirjoittamalla solun sijainti käsin tai sen voi valita taulukosta, kun kaavarivi on aktiivinen. (Microsoft-Excel.)

Laskentaohjelman kaikkia kaavoja ja arvoja ei tarvitse sijoittaa samaan taulukkoon. Laskentaohjelmaan voi tehdä höyrykattilan eri osioille omat taulukot esimerkiksi polttoainetaulukko ja savukaasutaulukko. Kaavoihin voi lisätä arvoja vapaasti muista taulukoista. Lisääminen onnistuu asettamalla kaava aktiiviseksi ja painamalla hiirellä kaavan funktion kirjoitus ruutua. Tämän jälkeen voi siirtyä toiseen taulukkoon ja valita sieltä haluttu solu, jossa on numeroarvo. Solu otetaan tämän jälkeen mukaan kaavan laskentaan. Toiseen taulukkoon viitatus solun osoitteen voi kirjoittaa suoraan kaavaan. Kaavaan tulee merkintä toisen taulukon arvosta esimerkiksi 'Polttoaineet!F13'. Kun viitataan solun osoitteeseen, ensiksi kerrotaan taulukon nimi, seuraavaksi tulee huutomerkki ja lopuksi tulee solun sarake ja rivi. (Microsoft-Excel.)



Kuva 15. Solussa olevan kaavan funktion kirjoitusruutu. (Microsoft-Excel).

Hakutoiminnoilla voidaan suorittaa arvotaulukoista arvojen hakuja halutulla arvolla. Esimerkiksi polttoainetaulukosta voidaan hakea valitun polttoaineen tiedot laskentaa varten. Hakukomentoja ovat esimerkiksi haku, phaku ja vhaku. Haku-funktiolla haetaan solusta, sarakkeesta tai riviltä tietty arvo, joka on määritelty hakuarvo. Hakuvektori on yksi rivi tai sarake, jolta hakuarvoa etsitään. Tulosvektori on alue, josta solun lopullinen arvo löytyy. Tulosvektorin lopullinen arvo on samalla rivillä tulosvektorissa, kuin hakuarvo on hakuvektorissa. Solun arvo määräytyy tulosvektorista. Haku-funktiota on hyvä käyttää esimerkiksi polttoainetaulukossa. Phaku-funktiolla haetaan hakuarvo taulukkoalueesta, missä sarake hakusarake pitää määritellä. Hakusarakkeesta löytyy hakuarvo ja 1. saraketta vastaavasta hakualueesta löytyy solun lopullinen arvo. Solun arvo määräytyy hakualueella olevasta solusta, joka on samalla rivillä hakusarakkeen hakuarvon kanssa. Vhaku-funktiolla haetaan rivejä samalla tavalla kuin phaku-funktiossa haetaan sarakkeita. Myös vhaku-funktiossa solunarvo tulee solualueelta. (Microsoft-Excel.)

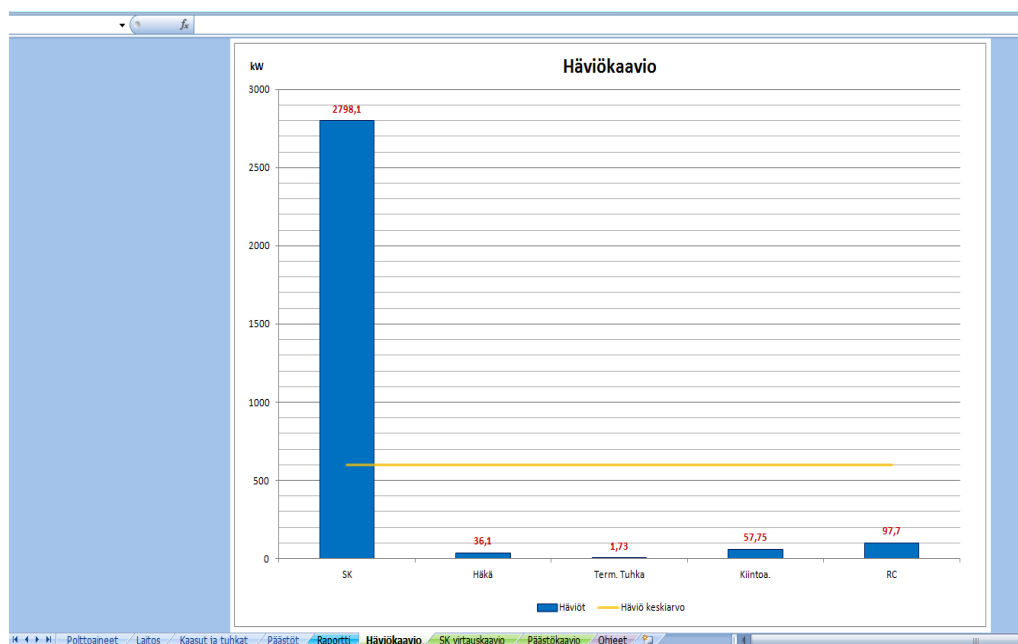
Kaavioilla voi kuvata laskentaohjelman tuloksia graafisesti. Kaaviot tehdään laskettujen arvojen tai annettujen numeroiden mukaan. Kaavio tehdään siten, että valitaan kaaviossa käytettäviä soluja, jotka antavat arvot kaaviolle. Tämän jälkeen valitaan haluttu kaaviomalli, joita on 11 pääkaaviomallia vuoden 2007 Excel-laskentaohjelmassa. Pääkaaviomallit ovat:

- pylväs
- viiva
- ympyrä
- palkki
- alue
- piste
- pörssi
- pinta
- rengas
- kupla

- säde. (Microsoft-Excel.)

Kaavioille valitaan aluksi tiedot. Aluksi painetaan kaaviota hiiren oikealla napilla ja sitten mennään kohtaan 'valitse tiedot'. Kaavioihin syötetyt tiedot valitaan jokaiselle kaaviomallille erikseen, koska kaavioiden tiedot määrittelevät kaavion arvoasteikot. Esimerkiksi pylväskaaviossa tietojen seliteosaan tulee laittaa kaavion pystyakselin arvot. Pystyakselille sijoitetaan esimerkiksi eri häviöluokkien häviötehot. Vaaka-akseliosaan sijoitetaan kaikkien eri häviötyyppien nimet. Nimet kannattaa valita soluista, joissa on kirjaimia esimerkiksi savukaasuhäviöt. Viiva-, ympyrä-, palkki- ja rengaskaaviot toimivat samoilla tavalla kuin pylväskaavio. Kaikissa seliteosaan tulee numerosuureet ja vaaka-akseliosaa seliteosan nimi esimerkiksi häkähäviöt. Yhteen kaavioon voi viitata useasta taulukosta. Eri kaaviomalleilla on useita ominaisuuksia, jotka saattavat muuttua Microsoftin Excel-laskentaohjelman eri päivityksissä. (Microsoft-Excel.)

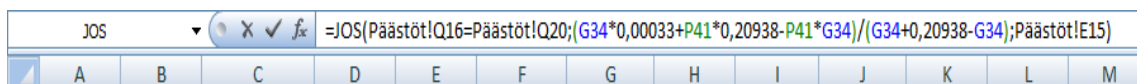
Kaavioita muokataan painamalla hiirenvasemmalla ja sitten oikealla napilla kaavion eri osia, joita halutaan muokata. Kaavion fontteja ja värejä muuttamalla voi parantaa kaavion luettavuutta. Kaavioille voi tehdä taulukkojen valintanauhalle omin kaavio-osan. Kaavio-osa tehdään painamalla taulukko-osaa hiiren oikealla ja valitaan lisää. Samalla tavalla voi lisätä myös taulukko-osien määrää. Taulukkojen valintanauhan eri osien värejä kannattaa muuttaa selkeyden lisäämiseksi. (Microsoft-Excel.)



Kuva 16. Häviökaavio kaaviosivuna. (Microsoft-Excel).

Tietojen kelpoisuuden tarkastelussa on mahdollista rajata syötettäviä arvoja ja laskujen tuloksia. Tietojen kelpoisuuden tarkastelu ruutu löytyy tiedot välilehden alta ja datatyökaluista. Solulle tai solualueelle valitaan kelpoisuusehdot, joiden mukaan määritellään solun arvon rajat. Kelpoisuusehdot voidaan määritellä seuraavin ehdoin: mikä tahansa arvo, kokonaisluku, desimaaliluku, luettelo, päivämäärä, aika, tekstin pituus tai oma ehto. Luetteloehdolla voi tehdä solusta luettelo valinta ruudun, jolla voi esimerkiksi valita käytettävä polttoaine. Luetteloehdolla pitää antaa luettelo polttoaineista, joiden joukosta valitaan käytettävä polttoaine. Kokonaisluku-, desimaaliluku-, päivämäärä-, aika- ja tekstiehdolle voidaan antaa minimi- ja maksimiarvot. (Microsoft-Excel.) Esimerkiksi hapen määrän savukaasussa voi rajoittaa 21 %:iin (SFS-EN 12952-15).

Ehtolauseilla voidaan sijoittaa solujen kaavoihin ehtoja, jotka rajoittavat ja ohjaavat laskentaohjelman toimintaa. Ehtolause on esimerkiksi Jos-funktio. Jos-funktiolla on mahdollista asettaa ehto solun kaavaan, mikä erittelee solun toimintaa. Soluun voi sijoittaa kaavan, joka lasketaan, jos asetettu ehto toteutuu. Jos-funktiossa valitaan totuus testi, missä määritellään ehtolause. Esimerkiksi soluun viitattu ehtolause voi olla  $F3=2$ . Jos-funktioon määritellään tämän jälkeen tosiarvo, joka tapahtuu solussa, jos ehtolause toteutuu. Viimeiseksi Jos-funktioon määritellään epätosiarvo, joka tapahtuu solussa, jos ehtolause ei toteudu. Esimerkiksi, jos ehtolause on  $F3=2$ , tosiarvo on 1 ja epätosiarvo on 5, niin silloin solun arvoksi tulee 1, kun  $F3=2$ . Jos  $F3$  on erisuuri kuin 2, niin silloin solun arvoksi tulee luku 5. Jos-funktion sisälle voi laittaa useampia ehtoja peräkkäin. Uudet ehdot pitää laittaa seuraavan ehdon tosiarvon tai epätosiarvon paikalle. Kun yksi ehto on toteutunut, seuraavaksi on uusi ehto, joka toteutuu tai ei toteudu. Funktiot rivillä Jos-funktiossa tulee olla sulut. Sulkujen sisällä on ensiksi ehtolause. Ehtolauseen, tosiarvon ja epätosiarvon väliin tulee puolipiste. (Microsoft-Excel.)



Kuva 17. Jos-funktio yhdellä ehtolauseella. (Microsoft-Excel).

Tai-funktiossa määritellään ehto, joka toteutuu tai ei toteudu. Tai-funktiota voidaan käyttää esimerkiksi arvorojojen määrittämisessä. Kun kattilan hyötysuhde on 50 %, niin silloin laskentaohjelma huomauttaa hyötysuhteen olevan heikko. Tai-funktio on hyödyllinen myös virhearvojen tarkastelussa. (Microsoft-Excel.)

## 6 YHTEENVETO

Laskentaohjelman tekeminen standardin SFS-EN 12952-15 mukaan on mahdollista. Kaavojen sijoittaminen Excel-taulukkoon vie aikaa, mutta Excel-taulukko-ohjelman avulla tehty laskentaohjelma mahdollistaa hyötysuhteen ratkaisemisen. Standardi SFS-EN 12952-15 mukaan tehty hyötysuhteen määrittäminen soveltuu useisiin erilaisiin kattiloihin. Useat energiantuotannossa ja teollisuudessa käytettävät kattilat voidaan määrittää laskentaohjelman avulla.

Laskentaohjelmalla saadut tulokset jäävät tässä työssä vähäisiksi, koska tiedot ovat salattuja. Tämä työ antaa mahdollisuudet testata omaa laskentaohjelmaa teollisuuskäytössä. Tuloksia tulee verrata mittauksiin, jotka on otettu ilman laskentaohjelmaa. Laskentaohjelmaan syötetyt lähtöarvot ovat myös salattuja.

Kirjallisuuslähteistä saatiin selville, että kattilan hyötysuhteiden tulee olla yli 90 %. Kun Excel-laskentaohjelmaan syötetään lähtöarvoja, laskee ohjelma hyötysuhteen niiden mukaan. Laskentaohjelman tarkkuus on suunnittelijan ja käyttäjän käsissä. Laskentaohjelmalla päästään lähelle arvoja, jotka mitattiin ilman laskentaohjelmaa. Polttoaineen koostumus ja lämpöarvo tulee määrittää tarkasti. Kattilan lämpötila ja kuorma vaikuttavat oleellisesti hyötysuhteeseen. Laskentaohjelman avulla erilaisten kattiloiden hyötysuhde voidaan määrittää polttoainevirran tai savukaasuvirran avulla. Laskentaohjelman suurin ongelma on entalpiavirtojen sovittaminen laskentaohjelmaan, koska kaikki entalpiavirrat eivät ole määritetty polttoainevirran kautta. Laskentaohjelman tuloksia voi arvioida kaavioiden avulla, koska Excel-laskentaohjelma mahdollistaa kaavioiden tekemisen.

Laskentaohjelmaa voidaan kehittää lisää. Laskentaohjelmaan voidaan lisätä esimerkiksi päästölaskenta, koska savukaasun ominaisuudet ovat tiedossa. Laskentaohjelmaan on mahdollista lisätä polttoaineen lämpöarvojen määrittäminen, kun käytetään sekaisin eri polttoaineita. Tämä on mahdollista standardin SFS-EN 12952-15 avulla. Lisäksi standardi SFS-EN 12952-15 mahdollistaa rikinpuhdistusjärjestelmän vaikutuksen määrittämisen laskentaohjelmassa. Excel-pohjaiseen laskentaohjelmaan voi suunnitella yrityksen hyötykäyttöön yrityksen haluamalla tavalla.

## LÄHTEET

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Valtion teknillinen tutkimuskeskus VTT:n tiedote. s. 27 – 29. Saatavissa:

<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf> [viitattu 20.11.2013].

Boundless 2014. Major features of a phase diagram. Saatavissa:

<https://www.boundless.com/chemistry/liquids-and-solids/phase-diagrams/major-features-of-a-phase-diagram/> [viitattu 25.5.2014].

Control specialties 2014. Knowledge in steam, air, water and vacuum specialties to the marketplace. Saatavissa: <http://www.control-specialties.com/t84-boiler-efficiency-and-radiation-losses.php> [viitattu 12.5.2014].

Flyktman, M., Helynen, S. 2004. Hyötysuhteiden määrittäminen päästökaupan alkujakoa varten. Valtion teknillinen tutkimuskeskus VTT:n tiedote. Saatavissa:

<http://salpro.salpaus.fi/ympa/opiskelu/hyotysuhde.pdf> [viitattu 12.5.2014].

Heinänen, S. Haastattelu 14.5.2014. Tampere: Insinööritoimisto-AX-LVI Oy.

Holström, P. 1982. Lauhduttimet. Teoria ja käytäntö. Jyväskylä.

Huhtinen, M., Kettunen, A., Korhonen, R. & Pakkanen, H. 1994. Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Painatuskeskus Oy.

Ilmansuojeluyhdistys ry 2002. Päästömittausten käsikirja. Osa 1. Valtion teknillinen tutkimuskeskus VTT. Saatavissa: <http://www.isy.fi/osa1.pdf> [viitattu 28.2.2014].

Keppo, M., Ylinen, P. 1980. Voimalaitostuhkat ja niiden hyväksikäyttö. Osa 1. Suomessa muodostuvat tuhkamäärät ja niiden laatu.

Khalil, E.E. 1990., Power Plant design, Energy and Engineering Sciences Series. Cairo University. Abacus Press.

Knowenergy 2013. Energiateollisuuden tietokanta. Saatavissa:

[http://www.knowenergy.net/suomi/monipolttt\\_kattilat/8\\_haviot/fr\\_text.htm#1](http://www.knowenergy.net/suomi/monipolttt_kattilat/8_haviot/fr_text.htm#1) [viitattu 20.11.2013].

Kouki, J., Vuorio, K. 2005. Polttokokeita kauran ja puupelletin sopivuudesta pienpolttinten polttoaineeksi. Kotisivukone 30.9.2005, s. 4. Saatavissa:

[http://files.kotisivukone.com/biofire.kotisivukone.com/tiedostot/tts\\_polttokokeita\\_kauran\\_ja\\_puupelletin\\_sopivuudesta.pdf](http://files.kotisivukone.com/biofire.kotisivukone.com/tiedostot/tts_polttokokeita_kauran_ja_puupelletin_sopivuudesta.pdf) [viitattu 20.11.2013].

Mark Associates 2014. Hot water generator. Saatavissa:

<http://www.markassociates.com/hotwatergenerator.html> [viitattu 23.5.2014].

Microsoft-Excel 2013. Laskentataulukko-ohjelmiston tukipalvelu. Saatavissa:

<http://office.microsoft.com/fi-fi/support/?CTT=97> [viitattu 15.12.2013].

Neste Oil 2006. Raskaan polttoöljyn käyttöopas. Savion kirjapaino Oy.

OPH 2014. Eri olomuodot. Saatavissa:

[http://www02.oph.fi/etalukio/opiskelumodulit/fysiikka/fysiikka4/2/2.eri\\_olomuodot.html](http://www02.oph.fi/etalukio/opiskelumodulit/fysiikka/fysiikka4/2/2.eri_olomuodot.html) [viitattu 23.5.2014].

Pallonen, R. 2004. Haitalliset aineet Kymijoen edustan merialueen sedimenteissä ke-sällä 2003. Kymijoen vesi ja ympäristö ry:n julkaisu no 112/2004. Saatavissa:

<http://www.kymijoenvesijaymparisto.fi/julk112.pdf> [viitattu 8.5.2014].

Paroc 2014. Voimalaitoskattilat. Saatavissa: <http://www.paroc.fi/ratkaisutuotteet/ratkaisut/prosesseiteollisuus/voimalaitoskattilat> [viitattu 23.5.2014].

Peda 2014. Uusiutumattomat energialähteet. Saatavissa:

[https://peda.net/oppimateriaalit/eoppi/ylakoulu/biologia/yhteinen\\_ymparisto/energia/ue7](https://peda.net/oppimateriaalit/eoppi/ylakoulu/biologia/yhteinen_ymparisto/energia/ue7) [viitattu 23.5.2014].

Raunio, H. 2013. Tekniikka ja talous. CO<sub>2</sub>-suitsia kiristetään

tulevaisuudessa: EU:ssa varauduttava rankkaan päästökuuriin. Saatavissa:

<http://www.tekniikkatalous.fi/energia/co2suitsia+kiristetaan+tulevaisuudessa+eussa+varauduttava+rankkaan+paastokuriin/a952572> [viitattu 23.5.2014].



SFS-EN 12952-15. 2003. Water-tube boilers and auxiliary installations. SFS-ICS group 27.040 Gas and steam turbines. Steam engines.

Spirax sarco 2014. Steam engineering tutorials. The boiler house. Saatavissa: <http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials/the-boiler-house/water-tube-boilers.asp> [viitattu 23.5.2014].

Suomen kaasuyhdistys 2014. Maakaasukäsikirja - Marraskuu 2010. Saatavissa: <http://www.maakaasu.fi/kirjat/maakaasukasikirja/palaminen> [viitattu 27.1.2014].

Suomen standardisoimisliitto SFS ry 2014. Mihin standardeja tarvitaan? Saatavissa: [http://www.sfs.fi/julkaisut\\_ja\\_palvelut/standardi\\_tutuksi/mihin\\_standardeja\\_tarvitaan](http://www.sfs.fi/julkaisut_ja_palvelut/standardi_tutuksi/mihin_standardeja_tarvitaan) [viitattu 12.5.2014].

Tassu ESP 2014. Domestic wood combustion. Tampere University. Saatavissa: <http://www.tassuesp.com/domestic-wood-combustion> [viitattu 23.5.2014].

Tekniikan kaavasto 2008. Matematiikan, fysiikan, kemian ja lujuusopin peruskaavoja sekä SI-järjestelmä. 6., painos. K. Tammertekniikka.

Yle 2010. Keljonlahden tuhkat halutaan hyötykäyttöön. Uutiset 29.10.2010. Saatavissa: [http://yle.fi/uutiset/keljonlahden\\_tuhkat\\_halutaan\\_hyotykayttoon/5659430](http://yle.fi/uutiset/keljonlahden_tuhkat_halutaan_hyotykayttoon/5659430) [viitattu 21.5.2014].

| Polttoaine            | Kuiva-aineen koostumus % |                |      |                |                |       | Polttoaine-kilon vesisisältö % | Kosteasta polttoainekilosta syntyvä savukaasumäärä (NTP) |                            |                           |                            |                           |                            |                           |                            | Teoreettinen kuivan savukaasun CO <sub>2</sub> -maksimi Ilmakerroin k = 1 % |
|-----------------------|--------------------------|----------------|------|----------------|----------------|-------|--------------------------------|--|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---|
|                       | C                        | H <sub>2</sub> | S    | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | tuhka |                                | Ilmakerroin k = 1,0                                      |                            | Ilmakerroin k = 1,2       |                            | Ilmakerroin k = 1,4       |                            | Ilmakerroin k = 1,6       |                            |   |
|                       |                          |                |      |                |                |       |                                | kuiva m <sup>3</sup> /kgP                                | kostea m <sup>3</sup> /kgP | kuiva m <sup>3</sup> /kgP | kostea m <sup>3</sup> /kgP | kuiva m <sup>3</sup> /kgP | kostea m <sup>3</sup> /kgP | kuiva m <sup>3</sup> /kgP | kostea m <sup>3</sup> /kgP |   |
| Puolalainen kivihiili | 71,5                     | 4,5            | 0,8  | 1,3            | 8,5            | 13,4  | 10,0                           | 6,4  | 7,1                        | 7,7                       | 8,4                        | 9,0                       | 9,7                        | 10,3                      | 11,1                       | 18,6  |
| Raskas polttoöljy     | 88,5                     | 10,1           | 0,8  | 0,4            | 0,2            | 0,04  | 0,2                            | 10,0   | 11,3                       | 12,1                      | 13,4                       | 14,2                      | 15,6                       | 16,3                      | 17,7                       | 16,4  |
| Kevyt Polttoöljy      | 86,0                     | 13,2           | 0,3  | 0,2            | 0,3            | 0     | 0,1                            | 10,4   | 12,1                       | 12,6                      | 14,3                       | 14,9                      | 16,6                       | 17,1                      | 18,9                       | 15,3  |
| Puuhake, mänty        | 51,8                     | 6,1            | 0,01 | 0,3            | 41,2           | 0,6   | 50,0                           | 2,4  | 3,4                        | 2,9                       | 3,9                        | 3,4                       | 4,4                        | 3,9                       | 4,9                        | 20,0  |
| Kuori: -mänty         | 54,4                     | 5,9            | 0    | 0,4            | 37,6           | 1,7   | 60,0                           | 2,0  | 3,1                        | 2,4                       | 3,5                        | 2,9                       | 3,9                        | 3,3                       | 4,3                        | 19,8  |
| -kuusi                | 50,6                     | 5,9            | 0    | 0,4            | 40,3           | 2,8   | 60,0                           | 1,9  | 2,9                        | 2,2                       | 3,3                        | 2,6                       | 3,7                        | 3,0                       | 4,1                        | 20,1  |
| Turve                 | 54,5                     | 5,6            | 0,2  | 2,0            | 32,6           | 5,1   | 48,5                           | 2,7  | 3,6                        | 3,2                       | 4,2                        | 3,8                       | 4,7                        | 4,3                       | 5,3                        | 19,5  |
| Maakaasu              | 74,6                     | 24,8           | 0    | 0,6            | 0              | 0     | 0                              | 11,8   | 14,8                       | 14,5                      | 17,5                       | 17,1                      | 20,2                       | 19,8                      | 22,9                       | 11,7  |

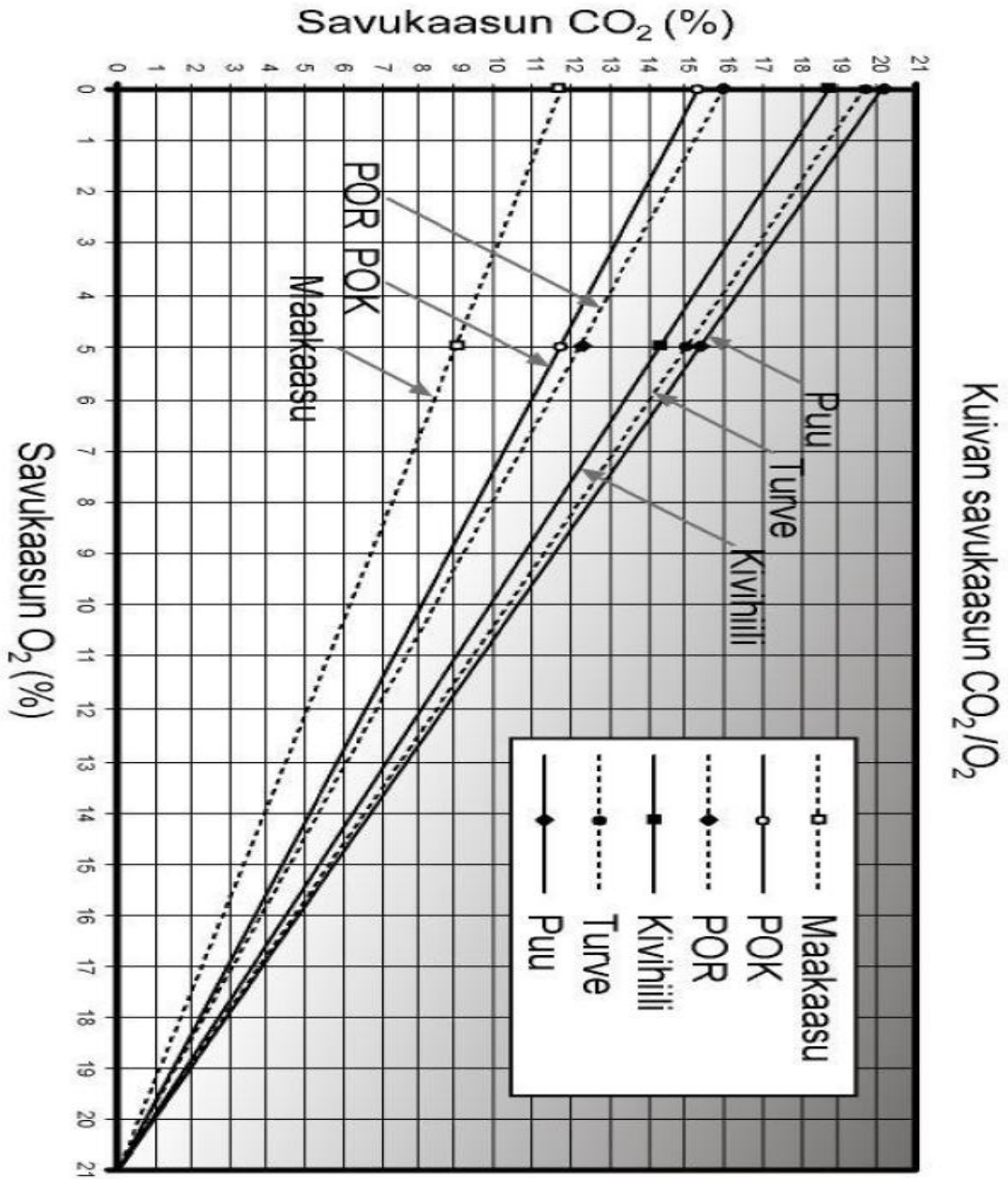
P = kilogramma kosteaa polttoainetta

Palamisilman lämpötila 20 °C

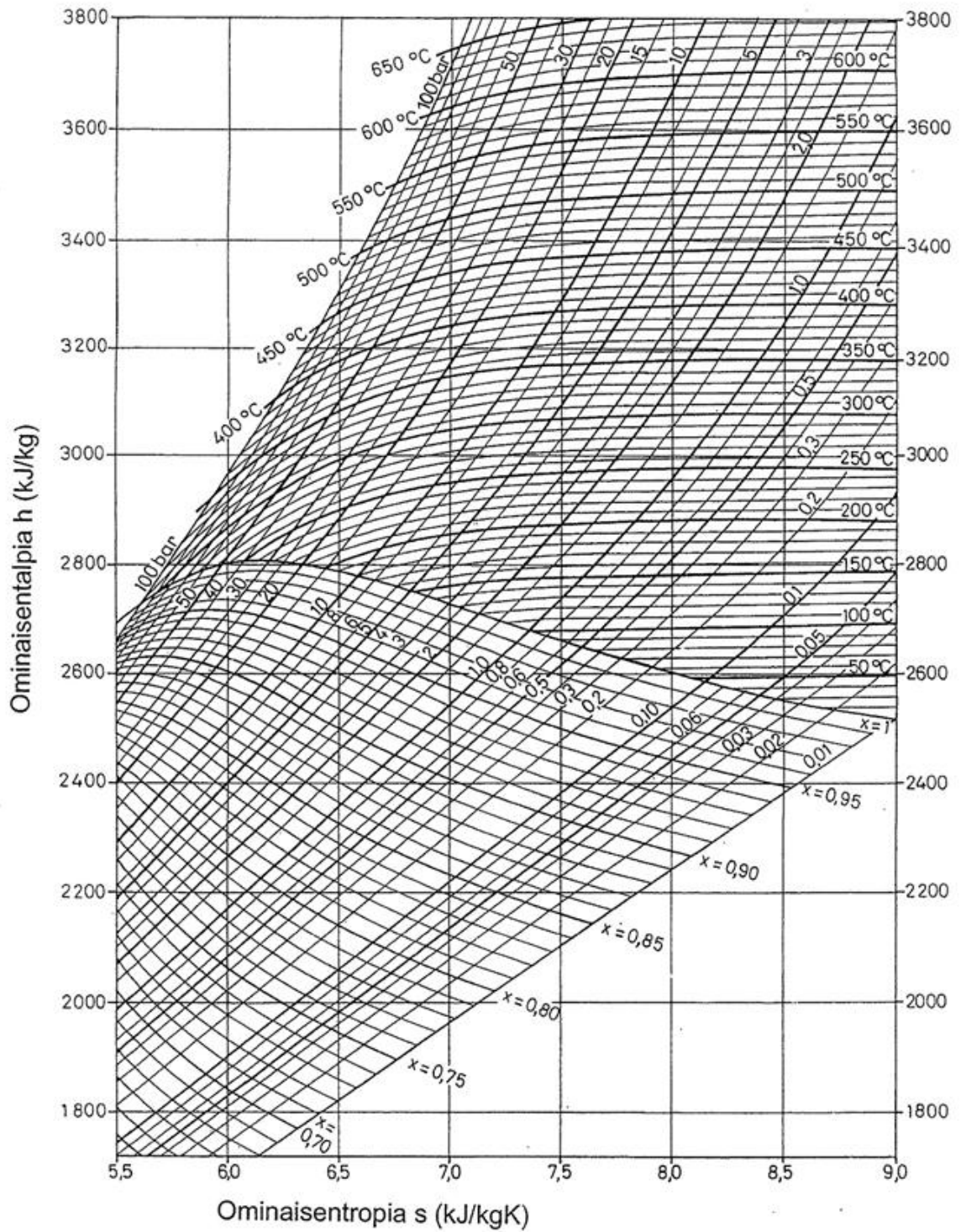
Palamisilman suhteellinen kosteus 70 %

Ilmanpaine 101,3 kPa

Ilmakerroin k = 1,0 – 1,6







Vesihöyryn h,s-piirros

