

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikan koulutusohjelma / automaatio- ja prosessitekniikka

Tomi Kautto

TULITORVIKATILOIDEN VASTAANOTTOKOKKEET STANDARDIN SFS-EN  
12953-11:2003 MUKAISESTI

Opinnäytetyö 2014

## TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikka

KAUTTO, TOMI

Tulitorvikattiloiden vastaanottokokeet standardin SFS-EN  
12953-11:2003 mukaisesti

Opinnäytetyö

37 sivua + 6 liitesivua

Työn ohjaaja

tutkimusinsinööri Mikko Nykänen

Toimeksiantaja

Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, päästömittauslabora-  
torio

Toukokuu 2014

Avainsanat

vastaanottokokeet, hyötysuhde, tulitorvikattilat, epäsuora

Opinnäytetyössä oli tavoitteena suunnitella uusi, kompakti ja selkeä laskentapohja tulitorvikattiloiden vastaanottokokeille sekä selvittää vaatimukset testien suorittamiseksi. Laskentapohjan tarkoitus oli helpottaa laboratorion työtä vastaanottokokeiden tulosten käsittelyssä. Vastaanottokokeilla testataan, että kattila vastaa valmistajan ilmoittamia arvoja hyötysuhteen osalta.

Laskentapohjan suunnittelu ja toteutus tehtiin MS Excel-ohjelmalla. Yhtälöt laskentapohjaan saatiin standardista. Tulokset laskentapohjan osalta olivat onnistuneita ja vastasivat vertailuarvoja. Teorian osuus kerättiin osin standardista sekä osin kirjallisuutta ja energia-alan internetsivuja hyödyntäen. Teoriaosuus selvittää lukijalle niin standardin tarkoitusta kuin tekniikkaa sen takana.

Työn lopputulos oli kokonaisuudessaan hyvä. Laskentapohja saatiin toteutettua sovitujen parametrien mukaisesti ja jopa laajennettua alkuperäistä tarkoitustaan monipuolisemmaksi. Aikaisempaa nopeampi tulosten käsittely helpottaa päästömittauslaboratorion raporttien tekemistä.

## ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Energy Engineering

KAUTTO, TOMI

Bachelor's Thesis

Supervisor

Shell Boilers: Acceptance tests EN 12953-11:2003

37 pages + 6 pages of appendices

Mikko Nykänen, R&D Engineer

Commissioned by

Kymenlaakso University of Applied Sciences, Emission  
Measurement Laboratory

May 2014

Keywords

acceptance tests, efficiency, shell boilers, indirect

The objective of this thesis was to design a new, compact and clear calculation template for the acceptance tests of shell boilers and find out what the requirements are for performing the tests. The purpose of the calculation template was to make it easier for laboratory to process data from measurements. Acceptance tests are used to compare values provided by the manufacturer to those that are measured to define the efficiency of the boiler.

The design and implementation of the calculation template was made with MS Excel-program. Formulas for calculation template were based on the shell boiler standard. Outcome of the calculation template was a success and conform to reference values. The theoretical part of this thesis provides the reader with information on the purpose of the standard and the technology behind it.

This thesis research can be considered to have reached its goals. Calculation template was in accordance of agreed parameters and was even more extensive than the original objective. The emission measurement laboratory benefits from the new calculation template due to faster processing time of the measurement data.

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

1	JOHDANTO	6
2	HÖYRYKATTILAT ENERGIAN TUOTANNOSSA	7
	2.1 Historia	7
	2.2 Höyrykattiloiden jaottelu	8
	2.2.1 Tulitorvi-tuliputkikattilat	8
	2.2.2 Vesiputkikattilat	9
	2.3 Polttotavat	14
	2.3.1 Pölypoltto	14
	2.3.2 Leijukerrosoltto	14
	2.3.3 Arinapoltto	17
3	VASTAANOTTOKOKEET EN 12953–11	18
	3.1 CEN-standardit	18
	3.2 EN 12953–11:n tarkoitus	19
	3.3 Testin valmistelut	19
	3.3.1 Steady-state tila	19
	3.3.2 Testin aloittaminen	20
	3.3.3 Testin aikaiset vaatimukset	20
	3.3.4 Testin kesto	20
	3.4 Instrumentaatio ja mittaustavat	20
	3.4.1 Instrumentit	20
	3.4.2 Paineen mittaus	21
	3.4.3 Lämpötilan mittaus	21
	3.5 Massa ja massavirta	21
	3.5.1 Tilavuusmittaukset	21
	3.5.2 Virtausmittaukset	22
	3.5.3 Tiheyden määrittäminen	22

3.6	Lämpöarvo	22
3.6.1	Polttoaineen lämpöarvo	22
3.6.2	Polttoaineiden näytteet	23
3.6.3	Pohja- ja lentotuhkan sisältämän hiilen lämpöarvon määrittäminen	23
3.7	Kemiallinen koostumus	23
3.7.1	Polttoaineet ja tuhkat	23
3.7.2	Savukaasut	23
3.8	Taseraja	24
3.9	Hyötysuhteen laskenta	24
3.9.1	Savukaasuhäviöt	25
3.9.2	Säteily- ja johtumishäviöt	27
3.9.3	Tuhkahäviöt	28
3.9.4	Hyötysuhde	30
4	EXCEL-LASKENTAPOHJA	32
4.1	Mittaukset	33
4.2	Kaavat	33
4.3	Tulokset	34
5	YHTEENVETO	34
	LÄHTEET	36
	LIITTEET	
	Liite 1. Taserajan esimerkki	
	Liite 2. Savukaasun ominaislämpökuvaaja	
	Liite 3. Säteilystä ja johtumishäviöiden kuvaaja	
	Liite 4. Laskentapohjan kuvat	

## 1 JOHDANTO

Höyryvoimalaitokset ovat olleet energian tuotannon käytössä jo vuodesta 1882 lähtien [1:88]. Sen jälkeen kattilatekniikka on kehittynyt huomattavasti ja alun muutaman prosentin hyötysuhteista sähköntuotannossa on päästy jo lähelle 50 %:n hyötysuhteita uusimmissa ultrakriittisissä kattilalaitoksissa [2]. Suomessa tätä uusinta tekniikkaa ei ole vielä käytössä.

Uuden höyrykattilan vastaanoton yhteydessä on aina syytä varmistaa, että kattila vastaa sille annettuja määräyksiä ja ohjearvoja. Tätä varten on laadittu standardeja, ja tässä työssä tarkastellaan standardin EN 12953 osaa 11, tulitorvikattiloiden vastaanotto-kokeet. Tässä työssä luodaan myös katsaus höyrykattiloihin sekä standardeihin yleisluontoisesti.

Työn varsinainen päämäärä on Excel-laskentapohjan kehittäminen tulitorvikattiloiden hyötysuhteen määrittämiseksi epäsuoralla menetelmällä standardin EN 12953–11 mukaisesti. Hyötysuhde määrittelee sen, kuinka paljon polttoaineen kemiallisesta energiasta poltettaessa saadaan hyötykäyttöön. Parhaat hyötysuhteet saadaan yhteistuotantolaitoksista, joissa tuotetaan sekä sähköä että kaukolämpöä. Suomi onkin maailman johtava maa sähkön ja lämmön yhteistuotannossa [3].

Työn tilaajana toimi Kymenlaakson ammattikorkeakoulun päästölaboratorio, joka voi käyttää laskentapohjaa nopeuttamaan mittausdatan käsittelyä ja raportointia asiakkailleen. Päästölaboratorio on toiminut vuodesta 1992 tehden erilaisia päästömittauksia voimalaitoksille, varustamoille ja prosessiteollisuudelle. Laboratorion muita palveluita ovat muun muassa polttoaineanalyysit, kiukaiden CE-merkkitestit sekä vastaanotto-kokeet. Laboratoriolla on myös akkreditointi, joka oikeuttaa erilaisten viranomaismittausten suorittamisen.[4.]

## 2 HÖYRYKATTILAT ENERGIAN TUOTANNOSSA

Höyrykattila on paineastia, jossa polttoaineen palamisen kemiallinen energia siirretään väliaineena toimivan veden lämmittämiseen ja höyrystämiseen. Kuuma ja paineinen höyry johdetaan edelleen putkia pitkin käyttökohteeseensa, tyypillisesti höyryturbiiniin. Höyryturbiini pyörittää generaattoria ja siten tuottaa sähköä. Höyryn käyttäminen pelkästään sähköntuottoon ei ole kuitenkaan optimaalista ja hyötysuhde jää alhaiseksi. Tällä hetkellä yleisesti käytössä olevilla uusilla ylikriittisillä kattiloilla sähköntuoton hyötysuhde jää enimmillään noin 45 %:iin (lauhdutusvoimalat). Tekninen kehitys kuitenkin jatkuu ja uusien ultrakriittisten kattiloiden kehitys parantaa tätä hyötysuhdetta entisestään tällä hetkellä lähes 50 %:iin ja tulevaisuudessa jopa yli sen samalla vähentäen päästöjä per tuotettu kWh [2]. Suurin hyötyjä tässä kehityksessä on kovana saastuttajana pidetty hiilivoima. Prosentin nousu hyötysuhteessa laskee hiilidioksidipäästöjä 2 – 3 % [5]. Vaikka sähköntuotannon osalta edellä mainitut hyötysuhteet nousevat, voidaan laitoksen kokonaishyötysuhdetta nostaa tätäkin korkeammalle. Tämän toteuttamiseksi voidaan turbiinin läpi tullutta höyryä vielä käyttää kaukolämmön tuottoon sekä prosessihöyryksi tehtailla. Näin voidaan nostaa laitoksen hyötysuhdetta jopa yli 90 %:n (vastapainevoimalat).

### 2.1 Historia

Maailman ensimmäinen höyryvoimalla toimiva voimalaitos aloitti toimintansa 12.1.1882 Lontoon Holbornin alueella. Hankkeen takana oli Thomas Alva Edison ja kattilan toimitti The Babcock & Wilcox Company. Kattilan teho oli vaatimattomat 125 hevosvoimaa (n. 93 kW). Se pyöritti 27 tonnin painoista generaattoria, jota kutsuttiin lempinimellä Jumbo. Sen voimin saatiin 1000 hehkulampulle virtaa. Tämä huomattiin nopeasti riittämättömäksi ja lisägeneraattoreita asentamalla nostettiin sähkötehoa 3000 hehkulampun tarpeisiin. Laitos toimi seuraavat kaksi vuotta ennen kuin se suljettiin sen aikaisen poliittisen säädöksen vuoksi, joka esti sähkönjakelun aluerajojen ylitse. Kovan hintakilpailun kaasuyhtiöiden kanssa katsottiin olleen myös osasyynä laitoksen sulkemiseen. [1:88–89.]

Hieman myöhemmin Edison avasi uuden laitoksen New Yorkissa. Etenkin yhdysvaltalaiset kirjoittajat saattavat mainita tämän New Yorkin laitoksen ensimmäiseksi höyryvoimalla toimivaksi laitokseksi, koska Edison suunnitteli sen avaamista aikaisemmin kuin Holbornia. Edison tiesi kuitenkin, että siihen aikaan Eurooppa oli vielä tie-

teen kehityksen kärjessä ja Holborn toimi näin ollen mainiona näyttämönä hänen työnsä. [1:90.]

## 2.2 Höyrykattiloiden jaottelu

Höyrykattilat voidaan jakaa kahteen tyyppiin toimintaperiaatteensa mukaan: suurvesikattiloihin eli lähinnä tulitorvi-tuliputkikattiloihin sekä vesiputkikattiloihin, joihin kuuluvat luonnonkiertokattilat, pakkokiertokattilat ja läpivirtauskattilat [6:111]. Myös kattiloiden käyttöönottoa koskevat standardit jakautuvat näiden kahden tyypin välille. Standardi EN 12953 koskee tulitorvi-tuliputkikattiloita ja standardi EN 12952 vesiputkikattiloita [7][8].

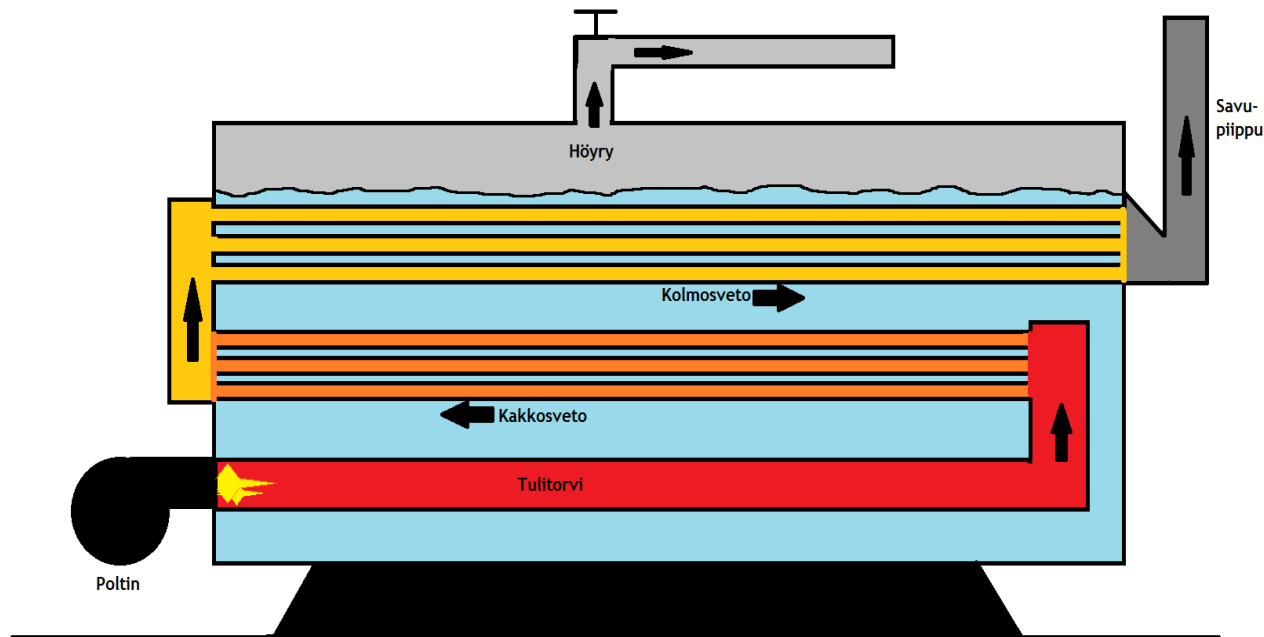
### 2.2.1 Tulitorvi-tuliputkikattilat

Suurvesikattilat eli tulitorvi-tuliputkikattilat ovat tyypillisesti pienemmän teholuokan kattiloita ja niiden käyttö rajoittuu teollisuudessa tilanteisiin, joissa prosessihöyryn tarve on niin pieni, ettei sähköntuotanto ole kannattavaa [6:111]. Muita tyypillisiä käyttöpaikkoja on kaukolämmön tuotto pienvoimaloissa. Ne ovat yksinkertaisen rakenteensa vuoksi halpoja huoltaa ja asentaa [9]. Tulitorvi-tuliputkikattilassa savukaasut kulkevat veteen upotetuissa putkissa ja lämpö vapautuu putkien pintojen kautta veteen [6:111].

Rakenteensa vuoksi tulitorvi-tuliputkikattila ei sovellu suurille tehoille ja paineille jotka mahdollistaisivat kannattavan sähköntuotannon. Kattilan rakentamisessa käytettävät halkaisijamitaltaan suuret sylinterimäiset osat rajoittavat tulitorvi-tuliputkikattilat enintään 27 baarin käyttöpaineelle, mutta tyypillisesti ne toimivat alle 17 baarin käyttöpaineella [9]. Tämä maksimi johtuu siitä, että jos halutaan parantaa lämmönjohtokykyä, täytyy putken seinämän olla ohuempi. Ohuempi seinämäpaksuus taas vähentää paineenkestoa. Näin päästään kompromissiin, jossa seinämän paksuus jää 18 ja 20 mm:n välille [9]. Tämä rajoittaa käytännöllisen paineen maksimimäärän 27 baariin [9]. Suuremmilla paineilla vesiputkikattilat ovat parempi ja halvempi vaihtoehto.

Tulitorvi-tuliputkikattilan rakenne käy ilmi seuraavasta kuvasta 1.





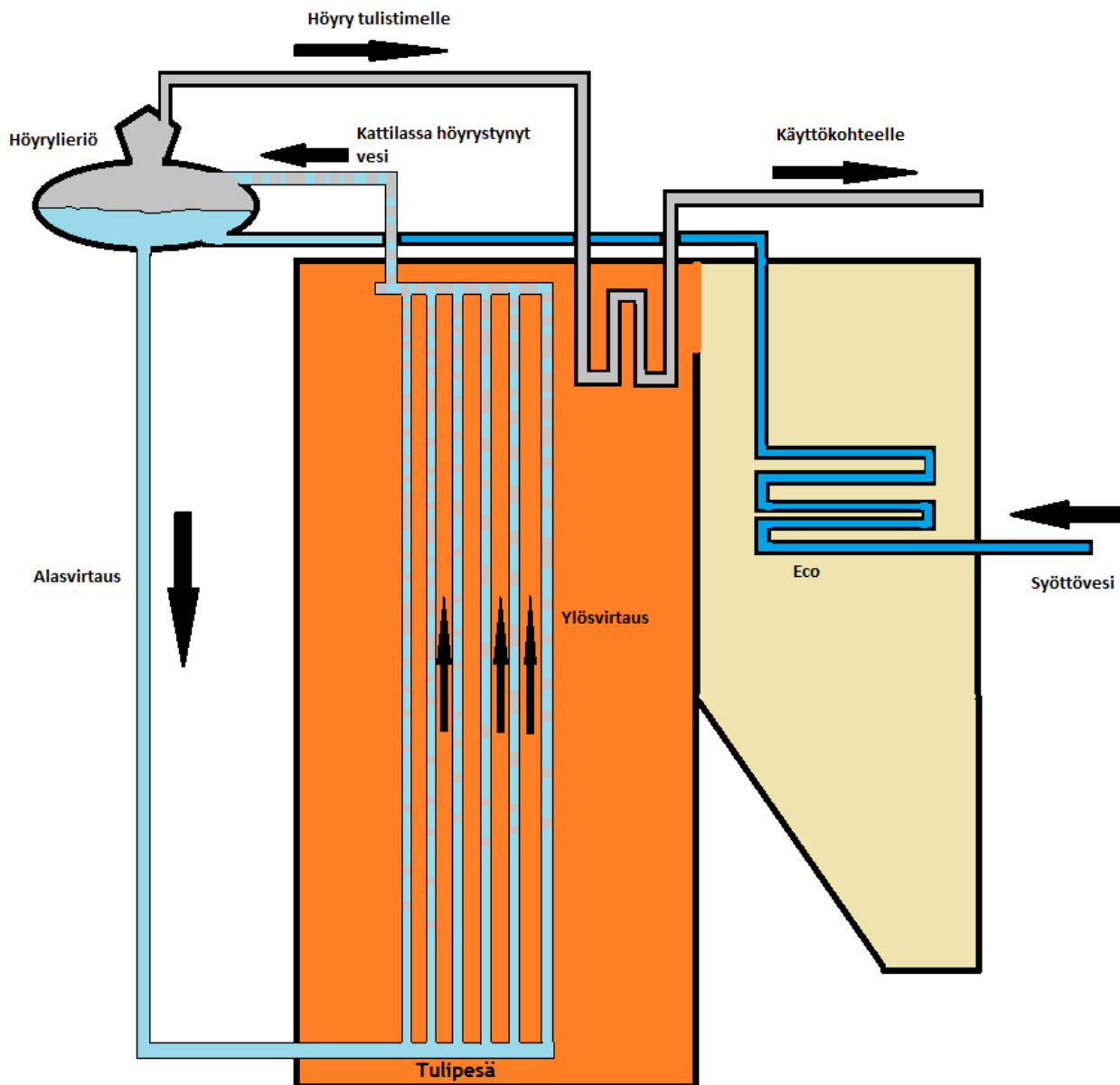
Kuva 1 Kolmivetoisen tulitorvi-tuliputkikattilan toimintaperiaate

Kuvan kolmivetoisen tulitorvi-tuliputkikattila on nykyään eniten käytössä oleva malli. Nelivetoisen vaihtoehto olisi hyötysuhteeltaan paras, mutta sen mukana tulevat ongelmat rajoittavat sen käyttöä. Näitä ongelmia ovat muun muassa liian matalat savukaasujen lämpötilat (happokastepiste) sekä suuret lämpörasitukset rakenteille nopeissa kuormanvaihteluissa, jotka voivat johtaa rasisusmurtumiin rakenteissa. [9.]

### 2.2.2 Vesiputkikattilat

Vesiputkikattiloiden rakenne on paljon monimutkaisempi kuin tulitorvi-tuliputkikattiloilla. Vesiputkikattilassa vesi kiertää nimensä mukaisesti putkissa. Tämä mahdollistaa paljon tehokkaamman toiminnan kattilassa niin suurempina lämmönsiirtopintoina kuin myös suurempien paineiden käytön [6:111].

Kuvassa 2 näkyy luonnonkiertokattilan toimintaperiaate.



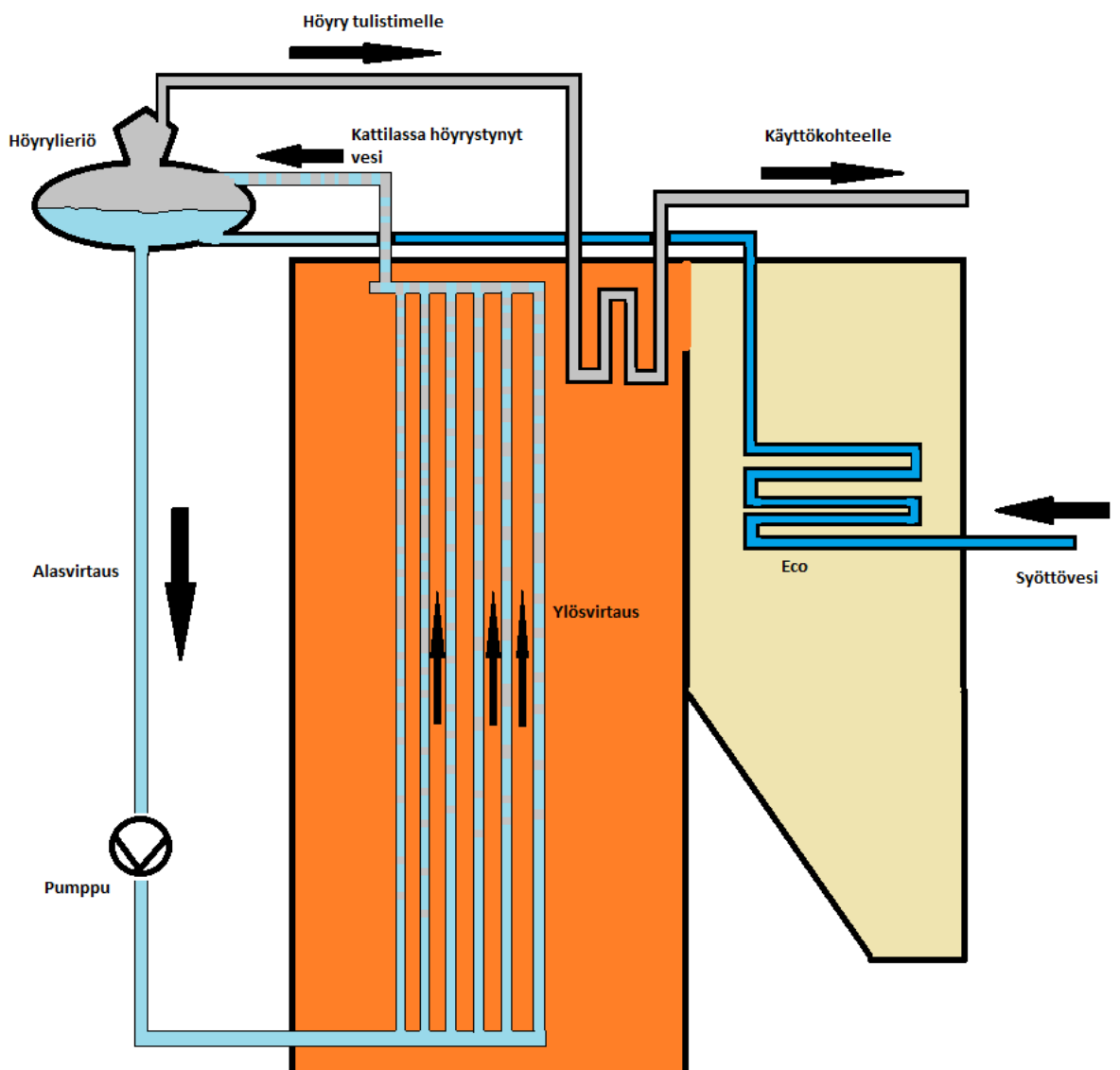
Kuva 2 Luonnonkiertokattilan toimintaperiaate

Luonnonkiertokattilassa vesi kiertää tiheuseroon perustuen. Höyrylieriöön tuodaan vettä syöttövesisäiliöstä lieriön alaosaan, josta se viileämpänä ja tiheämpänä painuu alas lieriön pohjan putkesta kattilaa kohti. Kattilassa polttoaineen palaminen lämmitteää vettä putkissa ja osa vedestä höyrystyy, ja tämä vesi-höyry-yhdiste nousee putkia pitkin ylös takaisin lieriöön pienemmän tiheydensä voimin. Lieriössä höyrystymättä jäänyt vesi erottuu höyrystä keskipakoisvoimalla ja palaa takaisin kiertoon. Höyry jatkaa matkaa lieriön yläosasta putkea pitkin tulistimelle, jossa höyryn lämpötila nousee entisestään ennen turbiinille menoa. Luonnonkiertokattilan rajoituksena on veden kriittinen piste. Kriittisessä pisteessä, 221 baaria ja 374 °C, veden ja höyryn tiheys on

sama. Tällöin luonnonkierto ei voi toimia. Tästä johtuen luonnonkiertokattilat toimivat tyypillisesti alle 170 baarin paineilla, jolloin veden ja höyryn tiheysero on vielä viisinkertainen. [6:113–114.]

Kun halutaan saavuttaa korkeampia paineita, joudutaan käyttämään pakkokiertokattiloita, joissa pumppujen avulla veden kierrättäminen onnistuu pienemmilläkin tiheyseroilla. [6:118.]

Kuvasta 3 nähdään pakkokiertokattilan toimintaperiaate.

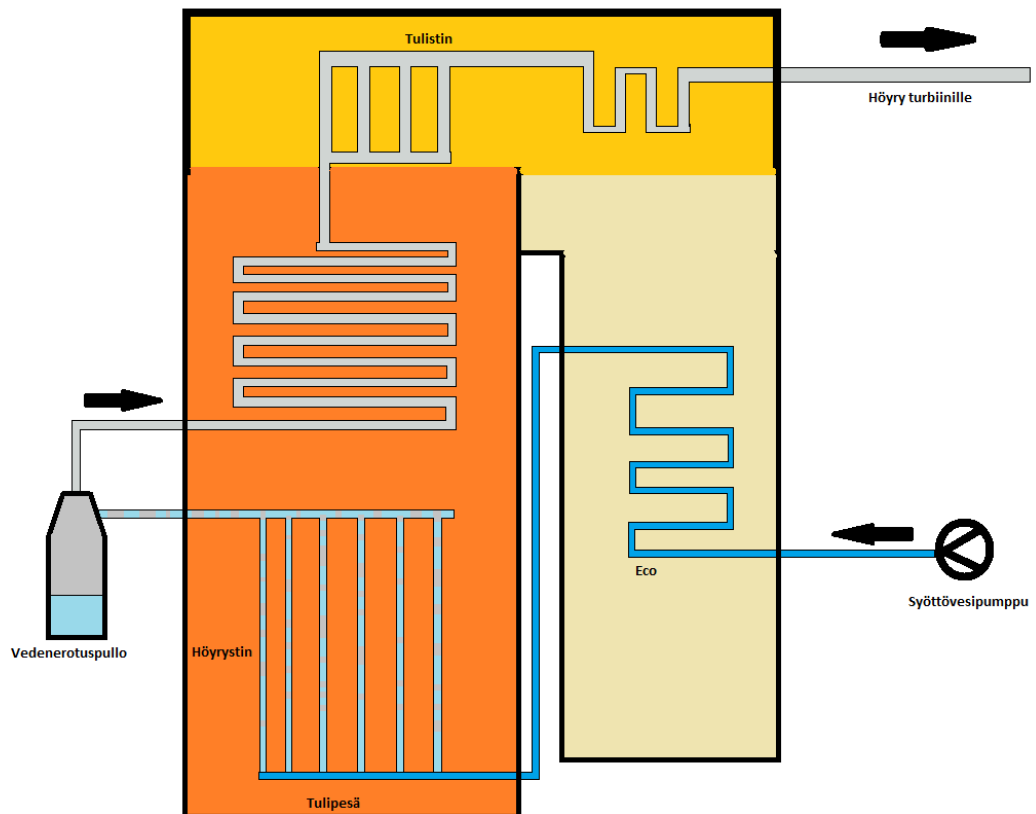


Kuva 3 Pakkokiertokattilan toimintaperiaate

Pakkokierto-kattilan rakenne on lähes sama kuin luonnonkierto-kattilalla. Erona on lähinnä kiertopumppu, jonka voimin vesi kiertää, vaikkei veden ja höyryn tiheusero ole enää riittävä luonnonkierron toteuttamiseen. Pakkokierto-kattila ei voi myöskään toimia ylikriittisillä paineilla, koska veden ja höyryn erotus lieriössä perustuu edelleen tiheuseroon. Pakkokierto-kattila mahdollistaa kuitenkin paineen noston noin 190 bariin. [6:118.]

Tätä kovemmat paineet vaativat läpivirtauskattiloiden käyttöä. Läpivirtauskattilat eroavat luonnon- ja pakkokierto-kattiloista siten, ettei niissä ole höyrylieriötä. Läpivirtauskattiloiden höyrypiirin vedelle tämä asettaa paljon kovemmat vaatimukset, koska lieriön puutteen vuoksi niissä ei myöskään ole ulospuhallusta veden epäpuhtauksien vähentämiseksi kierrossa. Nämä epäpuhtaudet, esimerkiksi suolat vedessä, voivat aiheuttaa putkien pintaan kerrostumia ja näin huonontaa piirin toimintaa. Läpivirtauskattilat jakautuvat kahteen tyyppiin: kiinteän ja liukuvan höyrystymispisteen kattiloihin. [6:120.]

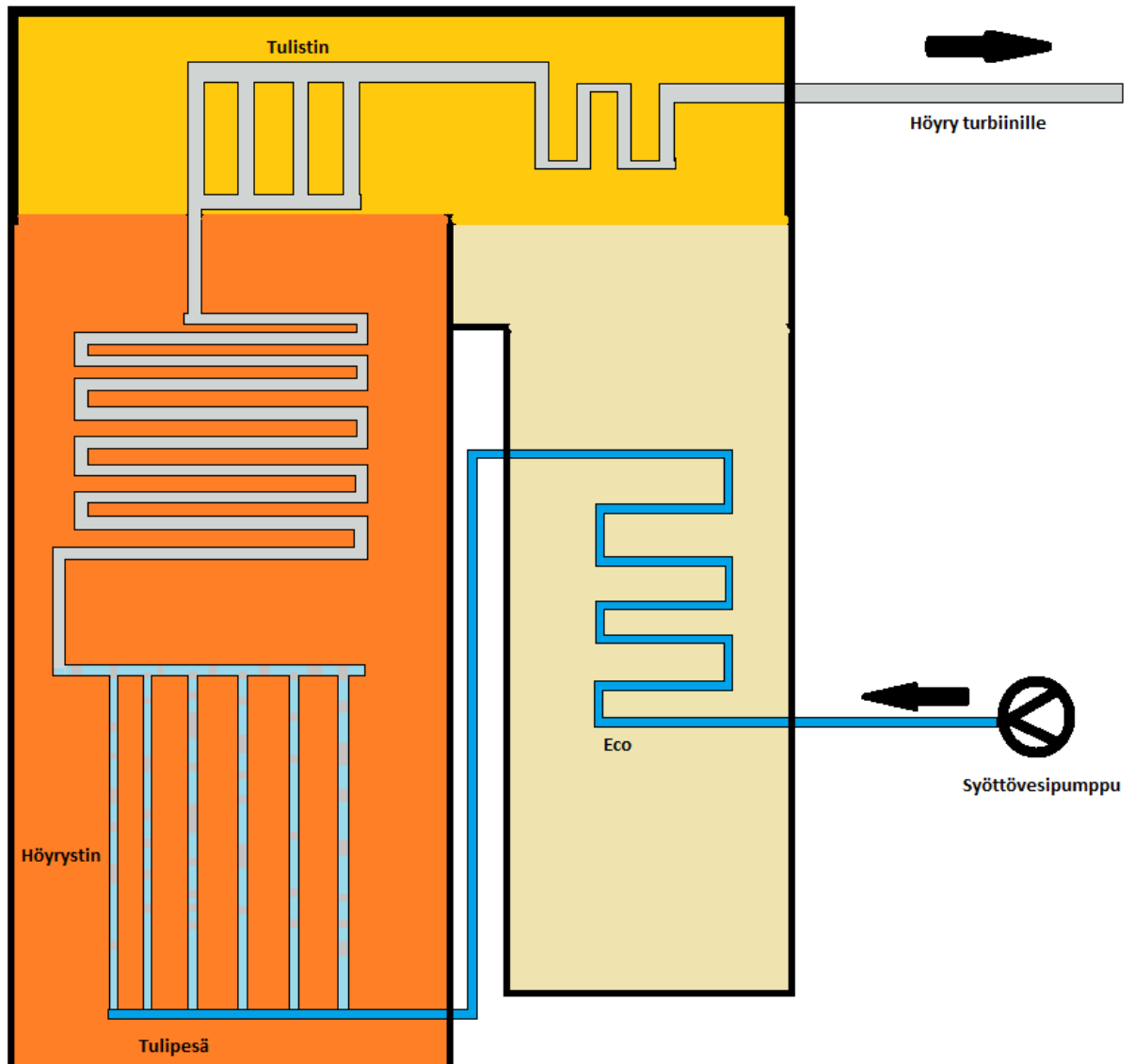
Seuraavasta kuvasta 4 nähdään kiinteän höyrystymispisteen kattilan toimintaperiaate.



Kuva 4 Kiinteän höyrystymispisteen kattilan toimintaperiaate

Kiinteän höyrystymispisteen kattilan eli Sulzer-kattilan erikoisuutena on vedenerotuspullo ennen höyryn menoa tulistimelle. Tämän tarkoituksena on poimia mahdollisia vesipisaroita höyrystä pois. Se auttaa läpivirtauskattiloiden tiukemman vedenkäsitteilyn vaatimuksissa. [6:122.]

Viimeisenä esitellään muuttuvan höyrystymispisteen kattilan toimintaperiaate kuvassa 5.



Kuva 5 Muuttuvan höyrystymispisteen kattilan toimintaperiaate

Muuttuvan höyrystymispisteen kattilan eli Benson-kattilan erona Sulzer-kattilaan on vedenerotuspullon puuttuminen. Sen myötä veden laadulle on vielä korkeammat vaa-

timukset. Benson-kattilat ovat nykyään yleisimpiä läpivirtauskattiloita [10]. Suurten painehäviöiden takia läpivirtauskattiloissa omakäytösähkön osuus voi olla 0,5 % tuotetusta sähköstä. Tästä johtuen suositaan ajotapana liukuvan paineen säätöä. Tällöin höyryn paine vaihtelee kuorman mukana. Tämä vähentää pumppaustehon tarvetta vajilla kuormilla ja nostaa hyötysuhdetta, kun omakäytösähkön kulutus pienenee.

[6:123.]

## 2.3 Polttotavat

Edellä käytiin lyhyesti läpi erilaisia kattilatyyppejä höyrypiirin toiminnan osalta. Toisen tekijä kattiloissa on polttotapa. Polttotavan avulla määritellään, minkälaista polttoainetta kattilan lämmittämiseen voidaan käyttää. Seuraavassa esitellään lyhyesti yleisimmät polttotavat kiinteiden polttoaineiden höyrykattiloissa.

### 2.3.1 Pölypoltto

Pölypoltossa polttoaine kuivataan, jauhetaan ja/tai murskataan hienojakoiseksi jauheeksi. Polttoaineen täytyy olla tarpeeksi hienojakoista, jotta sen nopea palaminen on mahdollista sen mennessä tulipesän läpi. Polttoaine syötetään tulipesään tyypillisesti paineilman avulla. Tähän käytetään kattilan primääri-ilman syöttöä. [6:141.]

Pölypolttoa käytetään yleensä suuremman kokoluokan laitoksissa, vaikka sen käytössä ei ole suoranaisia rajoituksia pienemmissäkään laitoksissa. Tämä johtuu pölypoltton vaatimasta suuresta laitteistosta, joka syö kannattavuutta pienemmillä tehoilla. Pölypoltton polttoaineina käytetään pääasiassa hiiltä ja jyrshinturvetta. Suomen suurimmat kiinteän polttoaineen voimalaitokset käyttävät pääasiassa pölypolttotekniikkaa.

[6:141.]

### 2.3.2 Leijukerrosoltto

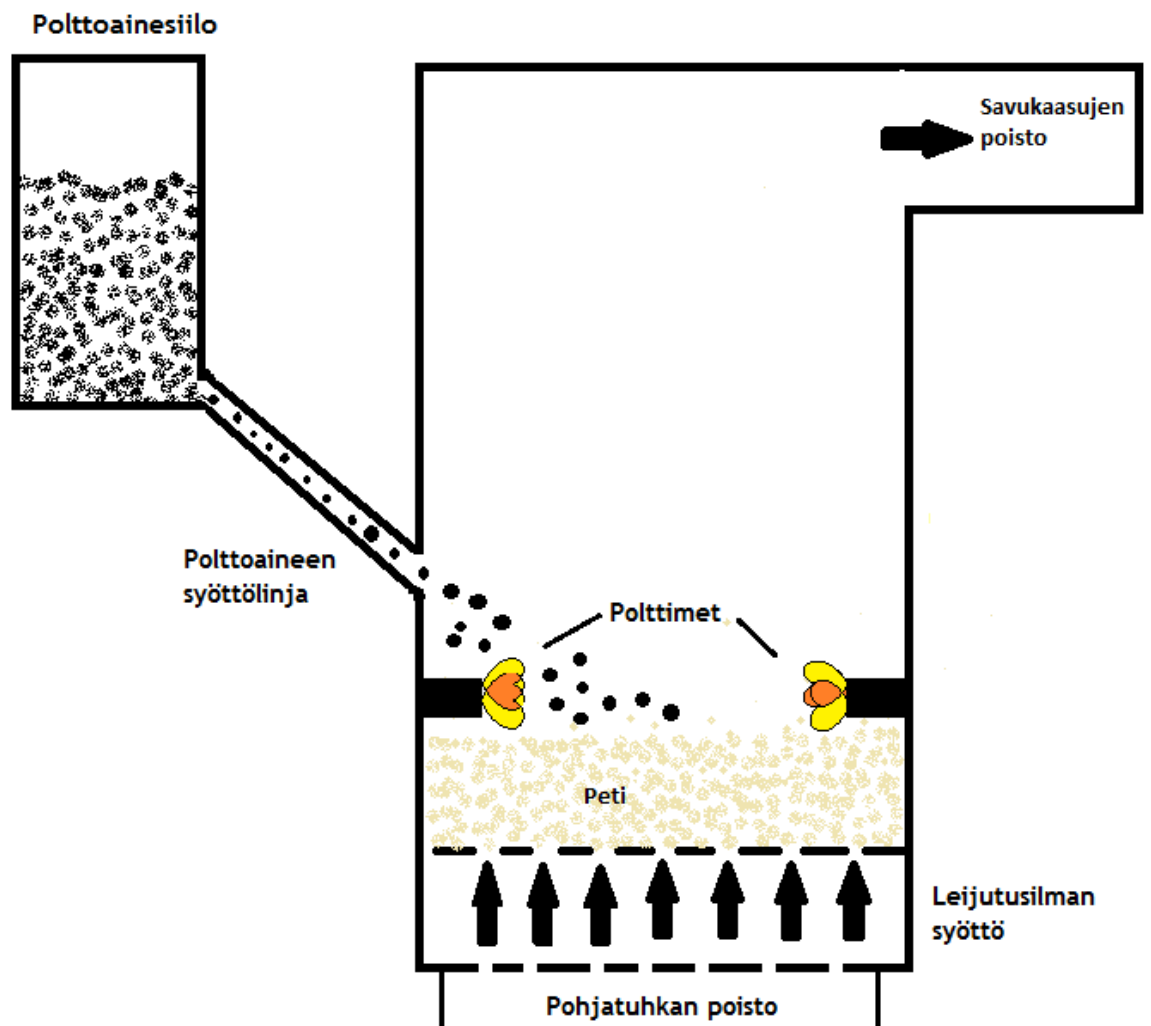
Leijukerrosoltossa kattilan alta syötetty primääri-ilma nostaa kattilassa olevan hienojakoisen hiekan leijuvaksi patjaksi, johon polttoaine sekoittuu ja syttyy palamaan. Leijukerrosoltto mahdollistaa monenlaisen, jopa erittäin huonolaatuisen (kostean) polttoaineen käytön. Tämän vuoksi se on suosittu vaihtoehto useassa laitoskokoluokassa.

Leijukerrosoltto jakaantuu kahteen eri tapaan: leijupetipolttoon ja kiertopetipolttoon.

[6:157.]

Leijupetipoltossa hiekka ( $\varnothing = 1 - 3 \text{ mm}$ ) nostetaan  $0,4 - 0,8 \text{ m:n}$  kerrokseksi. Jotta palaminen olisi mahdollisimman hyvää, hiekka lämmitetään esipolttimilla tarpeeksi korkeaan lämpötilaan ( $500 - 600 \text{ °C}$ ) ennen pääpolttoaineen syöttöä. Polttoaine syötetään petikerroksen yläpuolelta mekaanista linjaa myöten tai tyypillisemmin useamman linjan voimin, jotta se saadaan leviämään pedin koko alalle. Mekaanisen linjan etuna on pienempi tarve polttoaineen esikäsitteilylle. Mekaaninen linja sallii myös isomman kookajakauman polttoaineelle. [6:157–158.]

Leijupedissä voidaan polttaa useamman polttoaineen seoksia samanaikaisesti. Hiili polttoaineena ei tosin tavallisessa leijupedissä lyhyen viipymääjan vuoksi ole hyvä vaihtoehto, vaan aiheuttaa suuria häviöitä palamattomien aineksien määrässä tuhkan seassa. Tämä johtuu hiilen hitaasta palamisesta pedin matalassa lämpötilassa. Alla kuvassa 6 on yksinkertainen toimintaperiaatekuva leijupedistä. [6:159.]

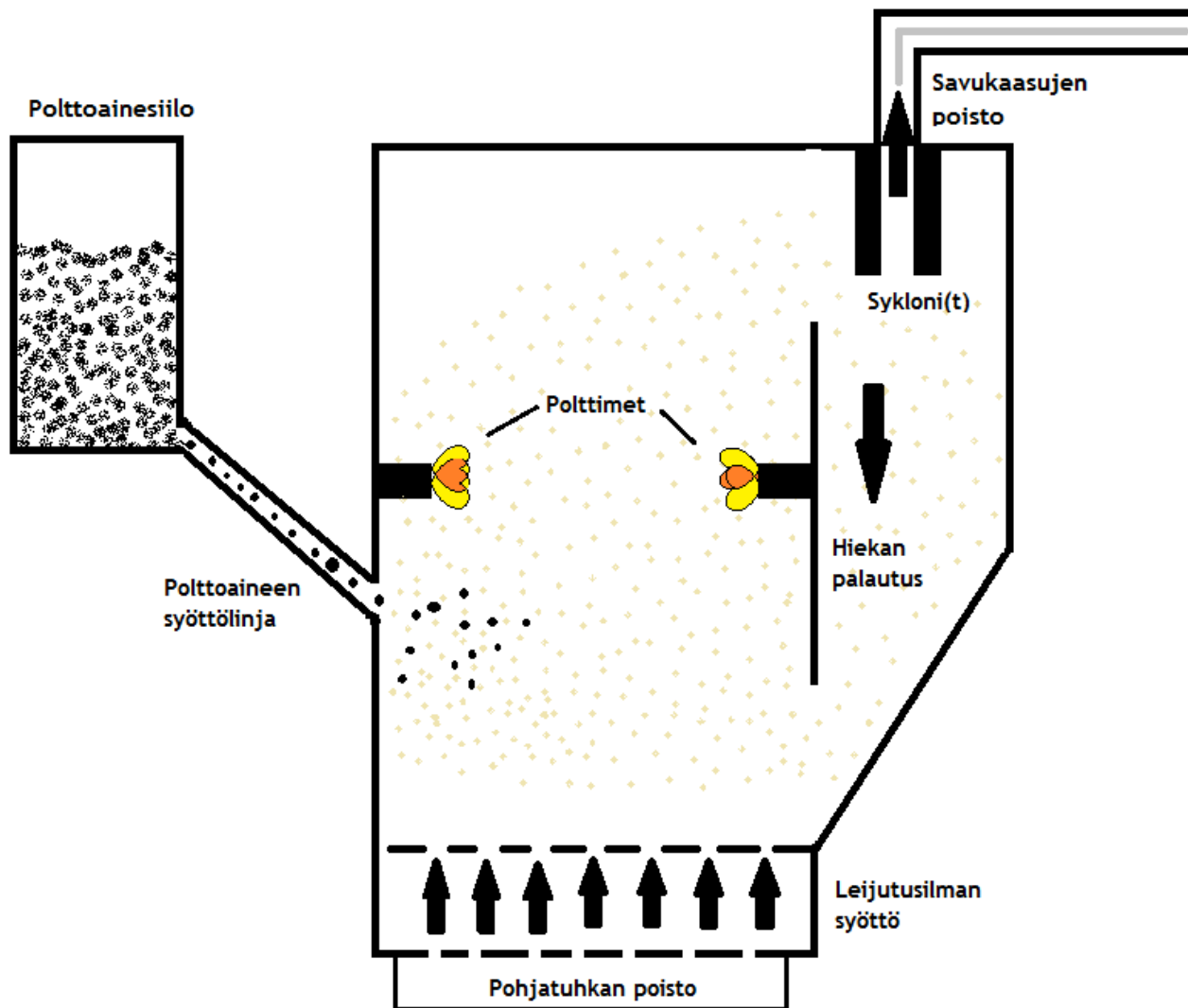


Kuva 6 Leijupedin toimintaperiaate

Toinen polttotapa on kiertopetipolttu. Siinä kattilan alta tulevaa puhallusilmavirtaa lisätään sekä käytetään vielä hienojakoisempaa hiekkaa ( $\varnothing = 0,1 - 0,5$  mm). Tämä saa hiekan nousemaan koko kattilan korkeudelle ja aina savukaasujen perässä tulipesästä pois. Tulipesän jälkeen savukaasut ja hiekka erotetaan syklonin avulla, jolloin savukaasut jatkavat eteenpäin, mutta hiekka palaa kuilua pitkin takaisin tulipesään.

[6:159.]

Kuvassa 7 esitetään kiertopedin toimintaperiaate.



Kuva 7 Kiertopedin toimintaperiaate

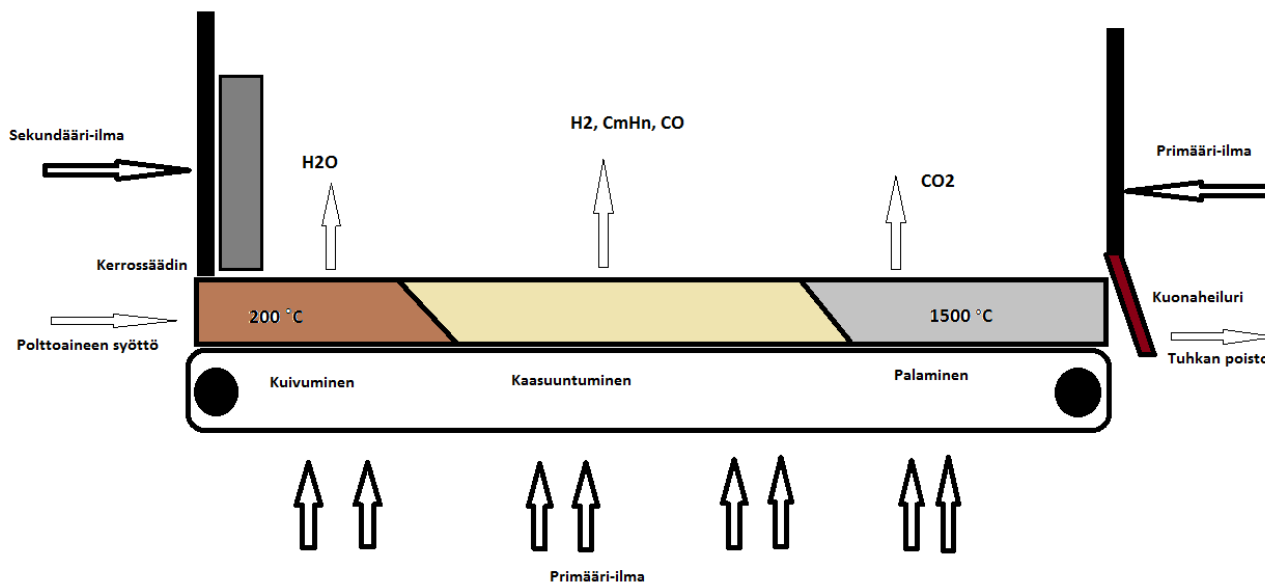
Leijukerrospolton etuina voidaan vielä mainita hyvä päästöjen hallinta. Alhaisen palolämpötilan vuoksi typenoksideja muodostuu hyvin vähän. Myös rikkipäästöjä pystytään vähentämään savukaasuissa kalkin syötöllä tulipesään. [6:162.]



### 2.3.3 Arinapoltto

Arina on kattilan pohjalle asennettu kiinteän polttoaineen polttolaite. Kiinteä polttoaine poltetaan sen päällä joko paikallaan olevana tai hitaassa liikkeessä olevana kerroksena. Tämä polttotapa on vanhin tunnettu tapa kiinteiden polttoaineiden höyrykattiloissa. Se ei sovi polttoaineille, joiden tuhkapitoisuus on hyvin korkea, koska pehmennyt tuhka voi tukkia arinan ilma-aukkoja. [6:146.]

Alla olevassa kuvassa 8 esitetään arinapolton toimintaperiaate.



Kuva 8 Arinapolton toimintaperiaate (ketjuarina)

Arinapoltto etenee kolmen vaiheen kautta. Ensimmäisessä vaiheessa polttoaineesta poistuu kosteus ja se lämpenee. Toisessa vaiheessa polttoaineen haihtuvat ainekset alkavat vapautua ja lopulta syttyvät palamaan; näitä aineksia ovat vety, erilaiset hiilivety-yhdisteet sekä hiilimonoksidi eli häkä. Viimeisessä eli kolmannessa vaiheessa myös polttoaineen loput kaasuuntumattomat kiinteät ainekset syttyvät palamaan ja saavutetaan täydellisen palamisen vaihe. Arinapoltoissa parhaiten toimivia polttoaineita ovat hiili, turve, puu sekä puujäte. [6:152–153]

### 3 VASTAANOTTOKOKEET EN 12953–11

#### 3.1 CEN-standardit

Tässä opinnäytetyössä käsiteltävän standardin on laatinut eurooppalainen CEN-järjestö. CEN, *Comité Européen de Normalisation*, on yksi kolmesta Euroopan virallisesta standardisoimisjärjestöstä ja sen piiriin kuuluvat kaikki muut alat, paitsi elektronikka, joka on CENELEC-järjestön alaisuudessa, sekä tietoliikenne, joka kuuluu ETSI-järjestön alaisuuteen.

CEN koostuu 33 eurooppalaisen maan standardoimiselimistä sekä 17 kumppanuusmaasta. Sillä on käytössä yli 50 000 ekspertin tietotaito, joka jakautuu yli 320 komiteaan. Niin Euroopan unioni kuin Euroopan vapaakauppajärjestö EFTA on tunnustanut virallisesti CENin. CENin pääasiallinen tehtävä on kehittää ja julkaista eurooppalaisia standardeja sekä ohjeistuksia vastaamaan yritysten ja organisaatioiden muuttuvia tarpeita. Näillä haetaan lisääntyneitä luotettavuutta, laatua sekä turvallisuutta tuotteisiin, palveluihin ja prosesseihin. Standardit lisäävät myös uusien tekniikoiden ja keksintöjen tietämystä jäsenten kesken, mikä edistää kehitystä useilla aloilla. Kun CEN julkaisee uuden standardin, se tulee voimaan kaikissa jäsenmaissa mahdollisimman nopeasti ja korvaa vanhan standardin kyseisessä asiassa. Wienin vuoden 1991 sopimuksen myötä CEN ja ISO, *International Organization for Standardization*, sopivat yhteistyöstä välttääkseen päällekkäisyyksiä standardeissa. [11.]

Standardit eivät ole varsinaisia lakeja, vaan enemmänkin ohjeistuksia asioiden oikein tekemiseen parhaan tuloksen saavuttamiseksi. Standardeja noudattamalla saadaan kuitenkin suuria hyötyjä. Standardien mukaan toimittaessa tehdään asioita yhtenäisesti ja näin helpotetaan yhteistyötä yritysten ja organisaatioiden välillä. Tämä lisää luotettavuutta standardisoitujen asioiden kesken ja kertoo myös asiakkaalle yrityksen noudattavan tunnettua tapaa toimia. Standardeissa otetaan huomioon lait, ja siten niitä noudattamalla myös lakiasiat ovat tyypillisesti kohdallaan. On myös olemassa epävirallisia standardeja, joita ei ole varsinaisesti dokumentoitu. Maailmanlaajuisesti suuret toimijat voivat päästä pisteeseen, jossa muut saman alan toimijat alkavat noudattaa suurien toimijoiden tapoja toimia sekä tehdä omat tapansa toimia yhteensopiviksi suurien toimijoiden kanssa. Tällaista tapahtuu pääasiassa tietotekniikan alalla.

### 3.2 EN 12953–11:n tarkoitus

Standardi EN 12953–11 käsittelee tulitorvikattiloiden vastaanottokokeita, jotka tunnetaan myös takuukokeina. Näiden tarkoitus on varmistaa, että kattila vastaa valmistajan määrityksiä lämmöntuoton osalta. Standardi siis antaa ohjeistuksen kattilan hyötysuhteen laskemiseen. Hyötysuhteen voi laskea joko suoralla tai epäsuoralla tavalla. Standardi toteaa epäsuoran tavan olevan parempi tapa tässä kattilatyypissä ja antavan paljon tarkemman tuloksen, kuin suora tapa antaisi. Kokeet tehdään tyypillisesti uuden kattilan käyttöönoton yhteydessä, mutta ne voidaan tehdä myös uudestaan, kun se katsotaan tarpeelliseksi esim. kattilaan tehtyjen modifikaatioiden jälkeen tai kun halutaan tarkistaa kattilan sen hetkinen kunto.[7.] Seuraavassa käydään läpi yksityiskohtaisemmin testin ja mittausten valmistelua sekä itse kokeiden suoritusta ja lopulta laskeaan esimerkkilaskelma erään kattilan hyötysuhteesta.

### 3.3 Testin valmistelut

Testin tilauksen yhteydessä päätetään halutut tiedot ja niiden tarkkuus. Näin voidaan valita sopiva instrumentointi mittauksia varten. Testin voi suorittaa joko kattilantoinmittaja tai yksityinen toimija. Testi suoritetaan sovitulla metodeilla, sovitussa olosuhteissa, jotka toimittaja on esittänyt ohjeistuksissaan. Näihin kuuluu muun muassa kattilan ajaminen eri kuormituksilla sekä ennakolta määrätyn polttoaineen käyttö kattilassa. Tässä standardissa ei oteta huomioon prosessin vaatimia sähkökäyttöjä, vaan ne jätetään huomioimatta. [7.]

#### 3.3.1 Steady-state-tila

Steady-state-tila saavutetaan, kun kattilan olosuhteet ovat tasaantuneet niin, että olosuhteissa tapahtuvat muutokset ovat mahdollisimman pieniä ajon jatkuessa kyseisellä teholla. Höyryn paineen sekä lämpötilan ja syöttöveden lämpötilan täytyy pysyä mahdollisimman tasaisina. Standardi määrittelee tärkeimmiksi muuttujiksi Steady-state-tilassa savukaasujen lämpötilan sekä savukaasujen hiilidioksidi- ja happipitoisuudet. Hyväksyttävät olosuhteet on saavutettu, kun savukaasujen lämpötila pysyy 10 °C:n vaihteluvälin sisällä ja savukaasujen happipitoisuus pysyy 0,5 %:n vaihteluvälin sisällä keskiarvostaan. [7.]

### 3.3.2 Testin aloittaminen

Ennen testin aloittamista on syytä varmistaa, että vedenkäsittely toimii kattilan toimitajan sekä vedenkäsittelylaitoksen toimittajan haluamalla tavalla. Kattilan polttoainepuolen pinnat on myös puhdistettava, polttoaineen ja polttoilman syöttö säädettävä sekä tulipesän veto tai paine säädettävä kattilanvalmistajan määrittelemille asetuksille. Tämä ei koske niin sanottuja ”as found” -testejä, joissa määritellään kattilan sen hetkinen kunto elinkaaren myöhemmissä vaiheissa. [7.]

### 3.3.3 Testin aikaiset vaatimukset

Testin aikana pitäydytään Steady-state-tilassa. Ulospuhalluksia vältetään ja lieriön pintaa pidetään mahdollisimman tasaisena koko testin ajan. Jos käytössä on automaattisesti säätyviä polttimia, niitä ei säädetä manuaalisesti testin aikana. [7.]

### 3.3.4 Testin kesto

Tässä standardissa vaaditaan vähintään kuusi testin aikaista mittauskertaa tietyn ajan välein, joissa jokaisessa otetaan lukemat polttoaineen syötöstä, savukaasujen lämpötilasta sekä savukaasun koostumusanalyysi. Testin tyypillinen kesto voi olla esimerkiksi 6 x 10 minuuttia eli 1 tunti. [7.]

## 3.4 Instrumentaatio ja mittaustavat

### 3.4.1 Instrumentit

Mittauksiin hyväksytään kalibroituja sopiviksi todettuja instrumentteja. Instrumentteina käytetään kannettavia mittauslaitteita, jollei pystytä näyttämään toteen, että kattilalaitteiston sensorit on sijoitettu oikein ja näiden luotettava toimivuus sekä tarkkuus on tarkistettu. [7.]

Käyttöön hyväksytään mittausinstrumentit ja/tai anturit, joiden lukemat voidaan vahvistaa ja joiden virherajat tunnetaan. Näihin kuuluvat:

- a) Laitteet, joilla on kalibrointitodistus

- b) Varmistetut laitteet, jotka on kalibroitu ennen ja jälkeen testin, sekä nousevilla että laskevilla arvoilla, mieluiten testin aikaista tilaa simuloiden ja näitä vertaamalla kohdassa a) mainittuihin laitteisiin
- c) Standardilaitteet, joilla on tunnetut virherajat
- d) Muut hyväksytyt laitteet, joiden virherajat tunnetaan ja jotka on hyväksytyt testin osapuolten kesken

Mittausinstrumentteihin ei saa tulla havaittavia muutoksia testien aikana. Testiraportissa kerrotaan käytetyt instrumentit sekä niiden virherajat. Raportista tulee ilmetä myös, onko lukemia kerätty manuaalisesti vai automaattisesti ja olivatko lukemat analogisia vai digitaalisia. Jos käytetään automaattista lukemankeräystä, tulee tehdä satunnaisia tarkistuksia, että signaalit ovat oikein tulkittuja. [7.]

### 3.4.2 Paineen mittaus

Painetta mitattaessa käytetään vain hyväksi katsottuja painemittareita ja ilmaisimia. Jos mahdollista, paine-eroja mitataan suoraan sopivilla mittareilla ja instrumenteilla. Näitä ovat esimerkiksi U-putki-manometri tai paine-eroilmaisimen vinoputki-mikromanometri. Osoitinaineena käytetään elohopeaa, vettä tai muuta tiheydeltään sopivaa nestettä. [7.]

### 3.4.3 Lämpötilan mittaus

Lämpötilan mittauksessa käytetään aiemmin 3.4.1:ssä mainittujen kohtien a) ja b) mukaisia instrumentteja. Näitä ovat esimerkiksi elohopeamittarit tai lämpöparit tai yhdessä sopivien mittauspiiriantureiden kanssa vastuslämpömittarit. [7.]

## 3.5 Massa ja massavirta

### 3.5.1 Tilavuusmittaukset

Ennen testin alkua täytyy vaakojen tarkkuus tarkistaa. Tilavuusvirrat mitataan tilavuusmittareilla, jotka on kalibroitu ennen ja jos mahdollista, testien jälkeen. Ainoastaan aidot tilavuusmittarit pumpun painepuolella hyväksytään, esimerkiksi siipityyppiset mittarit eivät kelpaa. Koko testin ajan pidetään yhdenmukainen tilavuus tai tiheys putkistossa. Tilavuus täytyy myös määrittää säiliöiden avulla, jotka on täytetty

joko varmistetuista säilöistä tai astioista ja tarkistettu mittauksilla tai kalibroitu punnitteilla vedenlisäyksillä. Jos käytetään tilavuussäiliöitä, tulee ottaa huomioon myös lämpölaajentumisen aiheuttama säiliön tilavuuden muutos. [7.]

### 3.5.2 Virtausmittaukset

Aukkojen ja suuttimien virtausmittauksissa noudatetaan standardia EN ISO 5167-1. Virtausmittauksissa, joissa käytetään nopeusantureita, esimerkiksi pitot-putkea tai anemometria, noudatetaan standardeja ISO 1217, ISO 5389 tai ISO 6801.

Koska putken sisämittoja ei voida tarkistaa enää tässä vaiheessa, on ne kirjattava muistiin ennen putkien hitsauksia. Jos kuitenkin tuloksissa esiintyy epä johdonmukaisuuksia, noudatetaan standardin ISO 5167-1 ohjeita.

Virtausantureita käytettäessä testiolosuhteiden tunnusomaiset piirteet selvitetään tai piirretään kalibrointikuvaaja.

Lentotuhkan virtaus mitataan sovitun poikkileikkauskohdan läpi. [7.]

### 3.5.3 Tiheyden määrittäminen

Jos tiheys ei ole ennestään tiedossa, se voidaan katsoa sopivasta taulukosta huomioiden muuttujat, kuten paine ja lämpötila sekä polttoaineen koostumus. Polttoaineen toimittaja voi myös antaa vaadittavan arvon. [7.]

## 3.6 Lämpöarvo

### 3.6.1 Polttoaineen lämpöarvo

Ylempi ja/tai alempi lämpöarvo kiinteille sekä nestemäisille polttoaineille määritellään standardin ISO 1928 mukaisesti. Kaasujen osalta määrittämiseen käytetään standardia ISO 6976. Polttoaineen lämpöarvot voidaan myös saada suoraan polttoaineen toimittajalta. [7.]

### 3.6.2 Polttoaineiden näytteet

Näytteen otossa ja valmistelussa noudatetaan kiinteiden polttoaineiden osalta standardin ISO 1988 ohjeita. Nestemäisten ja kaasumaisten polttoaineiden vastaava standardi on ISO 3170. Näytteiden täytyy olla kattavia, jotta niistä käy hyvin ilmi laatu, koostumus sekä luokitus testin aikana käytetystä polttoaineesta. [7.]

### 3.6.3 Pohja- ja lentotuhkan sisältämän hiilen lämpöarvon määrittäminen

Kiinteiden polttoaineiden osalta voidaan joutua määrittelemään tuhkan mukana kulkeutuvan palamattoman hiilen lämpöarvo. Tähän käytetään standardin ISO 1928 ohjeistusta.

Testisopimuksen osapuolet voivat halutessaan sopia tavasta määrittellä lämpöarvo. Muussa tapauksessa käytetään standardin referenssitaulukon mukaista arvoa 33,0 MJ/kg kivihiilelle ja 27,2 MJ/kg ruskohiilelle. [7.]

## 3.7 Kemiallinen koostumus

### 3.7.1 Polttoaineet ja tuhkat

Tarpeen vaatiessa kiinteille ja nestemäisille polttoaineille tehdään alkuaineanalyysi standardien ISO 157, 334, 589, 609 ja 625 mukaisesti. Kaasumaisten polttoaineiden osalta tehdään kaasuanalyysi.

Kiinteiden polttoaineiden osalta epäsuoraa menetelmää käytettäessä on analysoitava myös tuhkien sisältämä palamaton aines. Määrittelytapa on sopimusosapuolien päätettävissä. [7.]

### 3.7.2 Savukaasut

Savukaasujen koostumus määritellään siihen sopivalla laitteistolla, jotka toimivat kemiallisella, fysikaaliskemiallisella tai puhtaasti fysikaalisilla periaatteilla, jatkuvatoimisesti tai sykleittäin. Laitteiston tulee olla suunniteltu niin, että mitattujen arvojen hajonta 95 %:n varmuudella pysyy seuraavien arvojen sisällä:

- Hiilidioksidi  $\pm 0,2$  %
- Happi  $\pm 0,15$  %
- Hiilimonoksidipitoisuus tilavuuden osalta:  $\pm 1,0$  % mittausalueen täyden asteikon arvosta, kuitenkin vähintään  $\pm 0,01$  %

Jos käytetään automaattisesti toimivia kaasuanalysaattoreita, tarkistetaan testikaasujen avulla nollakohta sekä laitteiston herkkyyks. Nämä tarkistukset tulee tehdä ennen testiä sekä testin jälkeen. Ympäröivän ilman lämpötila pidetään tasaisena sensoreiden sijaintipaikan luona. [7.]

Käytettäessä laitteistoja, joiden toimintaperiaate on kemiallinen, tulee huomioida, että hiilidioksidi- ja rikkidioksidipitoisuuksia mitattaessa käytetään kuivan savukaasun arvoja. [7.]

Kun mittauksia tehdään putkissa, joiden halkaisija on suuri, ja saadaan poikkeavia lukemia saman poikkipinta-alan alueella saman testin aikana, täytyy miettiä, ovatko kyseiset poikkeavuudet savukaasun koostumuksessa hyväksyttäviä. Muussa tapauksessa täytyy käyttää monikulmiomittauksia keskimääräisten arvojen määrittämiseen. Monikulmiomittauksessa poikkipinta-ala jaetaan useaan alueeseen ja varmistetaan, että valitun poikkipinta-alan kohdalla ei ole poikittaisvirtauksia eikä myöskään takaisvirtauksia. Tyypillisesti näiden mitattujen arvojen keskiarvo hyväksytään savukaasun keskimääräiseksi koostumukseksi. [7.]

### 3.8 Taseraja

Normaalisti määritellään taseraja, joka määrittää laitteiston, jotka otetaan huomioon hyötysuhteen laskennassa. Yleensä tämä käsittää koko höyry-vesisysteemin. Standardin mukaisesti sähkökäyttöjä ei kuitenkaan huomioida laskuissa hyötysuhteen määrittämisessä. Sopimusosapuolet ovat kuitenkin vapaita määrittämään haluamansa taserajan. Liitteissä (liite 1) esitetään eräs tyypillinen taserajapinta jota tarjotaan esimerkkinä standardissa.

### 3.9 Hyötysuhteen laskenta

Standardi suosittelee käyttämään epäsuoraa menetelmää. Toisin kuin sisarstandardissa 12952–15 (vesiputkikattiloiden vastaanottokokeet), 12953–11 ei tarjoa epäsuoraa ta-



paa laskea savukaasuhäviöitä. Sen sijaan standardi tarjoaa vain polttoaineen syöttöön perustuvaa yhtälöä sen ratkaisemiseksi. Tämä tuottaa ongelmia kiinteiden polttoaineiden kattiloissa, koska kiinteän polttoaineen massavirtaa on erittäin hankala määrittää tarkasti. Näissä tapauksissa joudutaan käyttämään iterointia polttoaineen massavirran arvioimiseksi.

Seuraavassa esitellään standardin mukainen laskelma kuvitteellisen kattilan hyötysuhteelle epäsuoralla menetelmällä eli häviöihin perustuvalla laskennalla. Ennen jokaista yhtälöä selvitetään hieman myös sitä, mihin laskettava suure perustuu. Standardin mukaisesti häviöinä lasketaan savukaasuhäviöt, säteily- ja johtumishäviöt sekä tuhkahäviöt. Häkähäviöt jätetään huomioimatta normaaliolosuhteissa. [7.]

Ensin annetaan joitakin arvoja esimerkikattilalle, jolla tuotetaan kaukolämpöä. Kattilan nimellistehoksi on annettu 30 MW. Polttoaineena käytetään jyrshinturvetta jonka kosteus on 39,5 %, vetypitoisuus 3,6 %, tuhkapitoisuus 4,7 % ja kostean polttoaineen lämpöarvo 12,00 MJ/kg. Savukaasun lämpötilaksi on mitattu 150 °C ja polttoaineen massavirraksi on arvioitu 2,5 kg/s.

### 3.9.1 Savukaasuhäviöt

Savukaasuhäviöiden voidaan oikeutetusti sanoa olevan kattilan suurin hyötysuhteen alentaja. Ne muodostavat tyypillisesti jopa 90 % kattilan häviöistä. Savukaasun lämpötilalla on suurin merkitys savukaasuhäviöihin. Tämän vuoksi savukaasujen lämpötilaa pyritään alentamaan mahdollisimman matalaksi ennen piippuun menoa. Tässä voidaan hyödyntää savukaasujen lämpöä esimerkiksi syöttöveden tai paloilman esilämmitykseen. Liian alhainen lämpötila tuo kuitenkin omat ongelmansa happokastepiteen muodossa. Happokastepiste on lämpötila, jossa polttoaineen rikkipäästöt, rikkidioksidi ja rikkitrioksidi, voivat aiheuttaa tiivistyneen veden kanssa rikkihapon muodostumista ja siten syövyttää pintoja. Nykyään joissakin uudemmissa kattiloissa savukaasujen lämpötila on niin alhainen, että paras vaihtoehto on piipun vuoraus haponkestävällä materiaalilla. Liitteessä 2 on nähtävissä savukaasun lämpökapasiteetin kuvaaja.

Savukaasuhäviöt lasketaan standardin mukaisesti seuraavalla yhtälöllä:

$$Q_{(N)G} = \dot{m}_F [\mu_{Gd} * c_{pGd} * (t_G - t_r) + \mu_{H2O} * c_{pST} * (t_G - t_r)] \quad (1)$$

missä

$\dot{m}_F = \text{polttoaineen massavirta}$

$\mu_{Gd} = \text{kuivan savukaasun massavirran suhde polttoaineen massavirtaan}$

(lasketaan polttoaineen kemiallisen koostumuksen mukaan,

tässä esimerkkiarvona käytetään 5,95: ttä)

$c_{pGd} = \text{kuivan savukaasun lämpökapasiteetti vakiopaineessa (tässä } 1,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}})$

$t_G = \text{savukaasun lämpötila}$

$t_r = \text{referenssilämpötila (25 °C)}$

$\mu_{H_2O} = \text{savukaasun sisältämän veden massan suhde polttoaineen}$

*massavirtaan*

$c_{pST} = \text{höyryn ominaislämpökapasiteetti (tässä } 1,884 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}})$

Näistä suureista osa vaatii vielä omat yhtälönsä, jotta päästään laskemaan tulosta.

$$\mu_{H_2O} = \mu_{H_2OF} + \mu_{Ad} * x_{H_2OAd} \quad (2)$$

$$\mu_{H_2OF} = \gamma_{H_2O} + 8,937 * \gamma_H \quad (3)$$

missä

$\mu_{H_2OF} = \text{polttoaineen sisältämän ja palamisessa syntyvän veden suhde}$

*polttoaineen massavirtaan* ( $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ )

$\mu_{Ad}$  = kuivan polttoilman massavirran suhde polttoaineen

massavirtaan  $\left(\frac{kg}{kg}\right)$

$x_{H_2OAd}$  = kostean ilman sisältämän veden massa suhteessa ilman

massaan  $\left(\frac{kg}{kg}\right)$

$\gamma_{H_2O}$  = polttoaineen kosteus

$\gamma_H$  = polttoaineen vetypitoisuus

Edellisten yhtälöiden arvoihin vaikuttaa polttoaineen kemiallinen koostumus, joten ne voivat olla hieman erilaisia jokaiselle polttoaine-erälle. Ratkaistaan seuraavaksi kyseiset yhtälöt aikaisemmin annetuilla arvoilla sekä antamalla tässä puuttuvat arvot  $\mu_{Ad} = 5,70$  (ylijäähäppi savukaasuissa nostaa tätä arvoa ja vaikuttaa alentavasti hyötysuhteeseen) sekä  $x_{H_2OAd} = 0,0198$  (kostean ilman sitoman vesihöyryn maksimimäärä referenssilämpötilassa  $kg/m^3$ ).

$$\mu_{H_2OF} = 0,395 + 8,937 * 0,036 = \mathbf{0,717}$$

tästä seuraa, että

$$\mu_{H_2O} = 0,717 + 5,70 * 0,0198 = \mathbf{0,830}$$

lopuksi ratkaistaan savukaasuhäviöiden määrä

$$Q_{(N)G} = 2,5 * [5,95 * 1,0 * (150 - 25) + 0,830 * 1,884 * (150 - 25)] = \mathbf{2348 kW}$$

Näin saadaan savukaasuhäviöiksi **2348 kW**:a.

### 3.9.2 Säteily- ja johtumishäviöt

Säteily- ja johtumishäviöt ovat osa kattilan häviöitä. Ajossa olevan kattilan lämpötila nousee paljon ympäristöä korkeammaksi. Tästä seuraa, että hyvistä eristyksistä huo-

limatta, osa kattilan lämmöstä karkaa ympäristöön säteilynä ja johtumisena. Näiden häviöiden määrään vaikuttaa kattilan seinien pinta-ala sekä eristys. Kattilan seinien pinta-ala ei kuitenkaan kasva suorassa suhteessa kattilan tehoon nähden. Tästä seuraa, että suurempitehoisilla kattiloilla on suhteessa pienemmät säteily- ja johtumishäviöt kuin pienemmillä kattiloilla. [6:110.]

Standardi tarjoaa yksinkertaista yhtälöä, jolla määritellään nämä häviöt empiirisiin arvoihin perustuen. Tämä on todettu riittävän tarkaksi metodiksi laskettaessa häviöitä tyypillisissä kattiloissa. Standardi tarjoaa myös kuvaajan häviöiden määrittämiseksi kuten liitteistä (liite 3) käy ilmi. Häviöt voidaan ratkaista seuraavalla yhtälöllä:

$$Q_{RC} = C * Q_E^{0.6} \quad (4)$$

missä

$C =$  määritelty vakio (0,0072 nestemäisille ja kaasumaisille polttoaineille,

0,0144 kiinteille polttoaineille

$Q_E =$  kattilan nimellisteho (MW)

Ratkaistaan seuraavaksi esimerkkikattilan säteily- ja johtumishäviöt standardin yhtälöllä.

$$Q_{RC} = 0,0144 * 30^{0.6} MW = \mathbf{0,111 MW}$$

Näin saadaan esimerkkikattilan säteily- ja johtumishäviöiksi **111 kW**. On huomioitava, että jos polttoilma otetaan kattilahuoneesta, voidaan säteily- ja johtumishäviöiden arvoa pienentää paljon, koska polttoilmalla on korkeampi tulolämpötila.

### 3.9.3 Tuhkahäviöt

Kiinteiden polttoaineiden palaessa muodostuu kahdenlaista tuhkaa: lentotuhkaa, joka poistuu piipun kautta ympäristöön, sekä pohjatuhkaa (pohjakuonaa), joka jää kattilan tuhkalaatikkoon. Kiinteissä polttoaineissa palaminen ei yleensä ole täydellistä ja siten

tuhkan mukana poistuu vielä palamiskelpoista materiaalia. Tämä palamiskelpoinen materiaali aiheuttaa tuhkahäviöitä ja siten alentaa hyötysuhdetta.

Standardi laskee molempien tuhkien häviöt erikseen ja lopuksi yhdistää ne yhdeksi kokonaisuudeksi tuhkahäviöille. Häviöitä ratkaistaan seuraavilla yhtälöillä:

$$Q_{Ash} = \dot{m}_{Ash} * u_{Ash} * H_{(N)u} \quad (5)$$

$$Q_{FA} = \dot{m}_{FA} * u_{FA} * H_{(N)u} \quad (6)$$

$$Q_{SF} = Q_{Ash} + Q_{FA} \quad (7)$$

missä

$$Q_{Ash} = \text{pohjatuhkan häviöt}$$

$$\dot{m}_{Ash} = \text{pohjatuhkan massavirta}$$

$$u_{Ash} = \text{pohjatuhkan palamattoman aineksen osuus}$$

$$H_{(N)u} = \text{tehollinen lämpöarvo saapumistilassa}$$

$$Q_{FA} = \text{lentotuhkan häviöt}$$

$$\dot{m}_{FA} = \text{lentotuhkan massavirta}$$

$$u_{FA} = \text{lentotuhkan palamattoman aineksen osuus}$$

$$Q_{SF} = \text{kokonaihäviöt tuhkassa}$$

Tuhkahäviöiden laskemiseksi oletetaan tuhkan teoreettiseksi määräksi polttoaineen tuhkapitoisuus eli tässä tapauksessa 4,7 % 2,5 kg:sta. Näin saadaan tuhkan kokonaismassavirraksi 117,5 g/s. Tästä osa jää pohjatuhkaksi ja osa poistuu lentotuhkana. Näiden prosenttiosuudet vaihtelevat polttotapojen välillä. Leijupoltossa pohjatuhkan häviöt ovat pieniä johtuen hiekan sitomasta tuhkasta joka kiertää uudestaan palamisalu-

eelle. Arinapoltossa suurin osa häviöistä keskittyy pohjatuhkaan. Taulukosta 1 nähdään tyypilliset tuhkaosuudet näissä polttotavoissa.

Taulukko 1. Tuhkan osuudet [12:9.]

Polttotapa	Lentotuhka	Pohjatuhka
Arina	5 - 40 %	60 - 95 %
Leijupeti	80 - 100 %	0 - 20 %

Määritellään tuhkan osuuksiksi 70 % pohjatuhkalle ja 30 % lentotuhkalle. Näin saadaan pohjatuhkan massavirraksi 82,25 g/s ja lentotuhkan massavirraksi 35,25 g/s. Jotta yhtälöt voidaan ratkaista, tarvitaan vielä palamattoman aineksen osuudet tuhkaista. Määritetään lentotuhkan palamattoman aineksen osuudeksi 3,5 % ja pohjatuhkan osalta 8,5 %. Seuraavaksi ratkaistaan yhtälöt tuhkien häviöistä.

$$Q_{Ash} = 0,08225 \frac{kg}{s} * 0,085 * 12000 \text{ kJ/kg} = 83,895 \text{ kW}$$

$$Q_{FA} = 0,03525 \frac{kg}{s} * 0,035 * 12000 \text{ kJ/kg} = 14,085 \text{ kW}$$

$$Q_{SF} = 83,895 + 14,085 = 98,70 \text{ kW}$$

Tuhkahäviöiksi saadaan yhteensä **98,70 kW**.

### 3.9.4 Hyötysuhde

Hyötysuhteen laskeminen epäsuoralla menetelmällä perustuu häviöiden vähentämiseen sisään tuoduista energiavirroista. Tässä esimerkissä se käsittää polttoaineen tuottaman kemiallisen lämmön. Sen voi laskea seuraavalla yhtälöllä:

$$Q_{(N)Ztot} = \dot{m}_F * H_{(N)tot} \quad (8)$$

missä

$\dot{m}_F = \text{polttoaineen massavirta}$

$H_{(N)tot} = \text{Polttoaineen lämpöarvo referenssilämpötilassa}$

Ratkaistaan yhtälö.

$$Q_{(N)Ztot} = 2,5 \frac{kg}{s} * 12000kj/kg = 30000 kW$$

Häviöiden osuudet voidaan ratkaista seuraavilla yhtälöillä:

$$l_{(N)G} = \frac{Q_{(N)G}}{Q_{(N)Ztot}} \quad (9)$$

$$l_{(N)RC} = \frac{Q_{RC}}{Q_{(N)Ztot}} \quad (10)$$

$$l_{(N)SF} = \frac{Q_{SF}}{Q_{(N)Ztot}} \quad (11)$$

missä

$l_{(N)G} = \text{savukaasuhäviöiden osuus}$

$l_{(N)RC} = \text{säteily – ja johtumishäviöiden osuus}$

$l_{(N)SF} = \text{tuhkahäviöiden osuus}$

Ratkaistaan yhtälöt.

$$l_{(N)G} = \frac{2348 kW}{30000 kW} = 0,0783$$

$$l_{(N)RC} = \frac{111 kW}{30000 kW} = 0,0037$$

$$l_{(N)SF} = \frac{98,7 kW}{30000 kW} = 0,0033$$

Lopulta saadaan hyötysuhde seuraavalla yhtälöllä:

$$\eta_{(N)b} = 1 - l_{(N)G} - l_{(N)RC} - l_{(N)SF} \quad (12)$$

Ratkaistaan yhtälö.

$$\eta_{(N)b} = 1 - 0,0783 - 0,0037 - 0,0033 = \mathbf{0,9147}$$

Näin kattilan hyötysuhteeksi saadaan **91,47** %. Se on erittäin hyvä hyötysuhde tämän tyyppiselle kattilalle. Lopuksi voidaan laskea tuotettu hyötylämpö yhtälöllä:

$$Q_N = \eta_{(N)b} * Q_{(N)Ztot} \quad (13)$$

Ratkaistaan yhtälö.

$$Q_N = 0,9147 * 30000 \text{ kW} = \mathbf{27441 \text{ kW}}$$

Esimerkkikattilamme tuottaa siis **27,44 MW** hyötylämpöä.

#### 4 EXCEL-LASKENTAPOHJA

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli ajanmukaistaa vastaanottokokeiden laskentaa vastaamaan standardin 12953–11 mukaista tapaa. Tätä varten alettiin laatia täysin uutta Excel-laskentapohjaa, jonka tuli olla kompakti ja selkeä kokonaisuus. Alun neuvottelujen jälkeen alettiin tutkia, mikä olisi paras tapa esittää asiat täsmällisesti ja käytännöllisesti.

Ensin täytyi selvittää, mitä tietoja ja arvoja laskennassa vaadittiin. Tämän selvittämiseksi tutustuttiin standardin tarjoamiin ohjeistuksiin ja yhtälöihin. Tätä selvitystä hidasti hieman standardin englanninkielisyys sekä useat epäselvyydet, kuten kirjoitusvirheet standardissa. Lopulta saatiin listattua vaaditut suureet yhtälöitä varten ja varsinainen laskentapohjan suunnittelu voitiin aloittaa.



Ensimmäiset versiot laskentapohjasta eivät vastanneet alkuperäistä suunnitelmaa, vaan ne paisuivat ylisuuriksi ja tarpeettoman monimutkaisiksi kokonaisuuksiksi. Täytyi siis palata alkuun ja miettiä uudestaan oikeaa lähestymistapaa asiaan. Suuri läpimurto suunnittelulle tapahtui, kun saatiin käyttöön aitoa mittausdataa. Sen pohjalta oli helppompaa lähteä uudestaan liikkeelle suunnittelussa, kun oli käytössä käytännön tietoa johon tukeutua. Näin neljäs laskentapohjan versio oli ensimmäinen kokonaisuus, jonka pohjalta lopullinen työ saatiin myöhemmin valmiiksi. Liitteet (liite 4) sisältävät lopullisen laskentataulukon kuvankaappaukset.

#### 4.1 Mittaukset

Laskentapohjan alkuun päätettiin rakentaa mittauksien syöttöön sopivaa taulukkoa. Tämä oli loogisesti ajatellen järkevä aloitus. Tulosten saamiseksi olisi ensin tehtävä mittauksia ja saada arvoja, joiden pohjalta lähteä liikkeelle. Mittaussivun täytyi sisältää tärkeimmät tiedot yhtälöiden ratkaisemiseksi. Tiedot päätettiin jakaa lohkoihin luettavuuden vuoksi. Tärkeitä lohkoja laskemisen kannalta olivat:

- polttoaineen kemialliset arvot (alkuainekoostumus, kosteus, lämpöarvo)
- polttoaineen muut ominaisuudet (esim. polttoainetyyppi)
- savukaasujen ominaisuudet (lämpötila, tilavuusvirta, kosteus, koostumus)
- tuhkan ominaisuudet (lämpötila, massavirta, palamattomien osuus)
- muut ulkoiset olosuhteet (ilman lämpötila, ilmanpaine, ilman kosteus).

Lopulta kaikki tiedot saatiin koottua mielekkäisiin lohkokokonaisuuksiin. Ensin syötettiin saadut mittausarvot soluihin ja sen jälkeen voitiin suunnitella laskentasoluja, jotta saataisiin näiden arvojen pohjalta laskettua tunnuslukuja varsinaisten yhtälöiden ratkaisemiseksi myöhemmässä vaiheessa. Yksi tärkeimmistä vaiheista oli erotella kosteat ja kuivat arvot toisistaan, koska osa yhtälöistä otti huomioon kosteuden ja osa vaati kuivia arvoja.

#### 4.2 Kaavat

Mittausten taulukon valmistuttua oli seuraava looginen askel aloittaa varsinainen laskeminen. Tätä varten aloitettiin seuraavan taulukon suunnittelu, jossa laskettaisiin lopulliset tulokset standardin yhtälöiden mukaisesti. Ratkaistavia yhtälöitä olivat:

- savukaasuhäviöt
- tuhkahäviöt
- säteily- ja johtumishäviöt
- (sähkökäyttö)
- kokonaishäviöt
- polttoaineteho (tulossivua varten)
- hyötysuhde.

Nämä yhtälöiden solut poimivat vaadittavat arvot automaattisesti mittaustaulukosta. Tuloksia oli näin helppo lukea heti mittausarvojen syötön jälkeen. Lisäyksenä tilaajan pyynnöstä laadittiin myös sisarstandardin eli EN 12952–15 (vesiputkikattiloiden vastaanottokokeet) yhtälöitä vastaava tulosrivi. Näin sama laskentapohja kelpaisi molempien kattilatyyppeiden hyötysuhteiden laskentaan.

### 4.3 Tulokset

Kun tulokset olivat selvillä, tarvittiin vielä mielekäs tapa esittää ja saattaa ne tulostuskelpoiseen muotoon. Tätä varten suunniteltiin vielä yksi taulukko lisää. Siinä koottiin aikaisemmat tiedot yhteen ja jaoteltiin ne sopiviin osioihin, jotta tuloste niistä olisi raportoitiin sopivassa muodossa. Koska yhden sivun (A4) tila on rajoitettu, lisättiin tulostussivuun kaksi alavetovalikkoa, standardin valinta ja tehon valinta. Näiden avulla saman pohjan avulla voitiin tulostaa kuusi eri versiota tuloksista, kolmella eri teholla kahden eri standardin mukaisesti.

## 5 YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli suunnitella Excel-laskentapohja hyötysuhteen laskemiseksi epäsuoralla menetelmällä standardin EN 12953–11 mukaisesti ja samalla selvittää standardin vaatimuksia testin tekemisen osalta.

Tärkeimpänä sekä myös mielenkiintoisimpana osana työssä oli laskentapohjan suunnittelu. Siinä lähdettiin liikkeelle aivan alusta. Tämä antoi tekijälle suuria vapauksia suunnittelun osalta, vaikka tietyt parametrit laskentapohjalle oli etukäteen sovittu. Ajoittain haastavaksi osoittautunut suunnittelu saatiin lopulta kunnialla läpi ja lopputuloksena oli hyvä. Laskentapohjasta saatiin selkeä ja kompakti kokonaisuus, jonka käyttö on helppoa ja se vastaa uusinta alan standardia. Hyvänä lisänä laskentapohjaan saatiin

lisättyä mahdollisuus käyttää myös työn varsinaisen standardin sisarstandardia. Tämän avulla saatiin molemmat höyrykattilatyypit (tulitorvi- sekä vesiputkikattilat) katettua samalla pohjalla. Tämän hyöty päästölaboratoriolle on ilmeinen, kun tarve kahdelle eri laskentapohjalle kattilatyypistä riippuen jää pois.

Teoriaosuuden kirjoittamiseen löytyi paljon materiaalia ja suurin työ oli valtavan tietomäärän suodattaminen kompaktimpaan muotoon ilman, että jotain oleellista jäisi pois. Standardin osalta teorian kirjoittaminen oli työläämpää, koska suomennosta ei standardista ollut tarjolla. Vaikeutta lisäsivät standardin useat kirjoitusvirheet sekä muutama painovirhe. Kokonaisuutena teoriaosuus vastaa sitä, mitä standardin ymmärtäminen vaatii.

Laskentapohjan jatkokehitys voi tulla aiheelliseksi myöhemmässä vaiheessa, jos halutaan laajentaa sen tarjoamia tuloksia. Tämä ei ole kuitenkaan tarpeen standardin puolesta, vaan enemmänkin tilastollisessa mielessä.

## LÄHTEET

1. Harris, J. 1982. The electricity of Holborn. New Scientist 14.1.1982.
2. Ultra super critical boilers. Clean coal technology. Burmeister & Wain Energy A/S. Saatavissa:  
[http://www.bwe.dk/en/products/ultra\\_super\\_critical\\_boilers/ultra\\_super\\_critical\\_boilers.htm](http://www.bwe.dk/en/products/ultra_super_critical_boilers/ultra_super_critical_boilers.htm) [viitattu 12.5.2014]
3. Sähkön ja lämmön yhteistuotanto. Energiateollisuus. Saatavissa:  
<http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/kaukolampo-ja-kaukojaahdytys/sahkon-ja-lammon-yhteistuotanto> [viitattu 15.5.2014]
4. Päästömittauspalvelut. Kymenlaakson ammattikorkeakoulun energiatekniikan laboratorio. Saatavissa: <http://energylab.kyamk.fi/> [viitattu 15.5.2014]
5. Improving efficiencies. World Coal Association. <http://www.worldcoal.org/coal-the-environment/coal-use-the-environment/improving-efficiencies/> [viitattu 10.5.2014]
6. Huhtinen M., Kettunen A., Nurminen P. & Pekkanen H. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. uusittu painos. Helsinki: Oy Edita Ab.
7. Tulitorvikattilat. Osa 11: Vastaanottokokeet. Saatavissa:  
<http://sales.sfs.fi/sfs/servlets/ProductServlet?action=productInfo&productID=154910> [viitattu 2.4.2014]
8. Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot. Osa 15: Vastaanottokokeet. Saatavissa:  
<http://sales.sfs.fi/sfs/servlets/ProductServlet?action=productInfo&productID=152705> [viitattu 2.4.2014]
9. Shell Boilers. Spirax Sarco Ltd. Saatavissa:  
<http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials/the-boiler-house/shell-boilers.asp> [viitattu 5.5.2014]

10. Klein M., Kral R. & Wittchow E. Siemens Power Journal 1/96. Saatavissa:

[http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/power-plants/steam-power-plant-solutions/benson%20boiler/BENSON\\_Boilers-Experience\\_in\\_Nearly\\_1000\\_Plants.pdf](http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/power-plants/steam-power-plant-solutions/benson%20boiler/BENSON_Boilers-Experience_in_Nearly_1000_Plants.pdf) PDF-versio. [viitattu 10.5.2014]

11. European Committee for Standardization. Saatavissa:

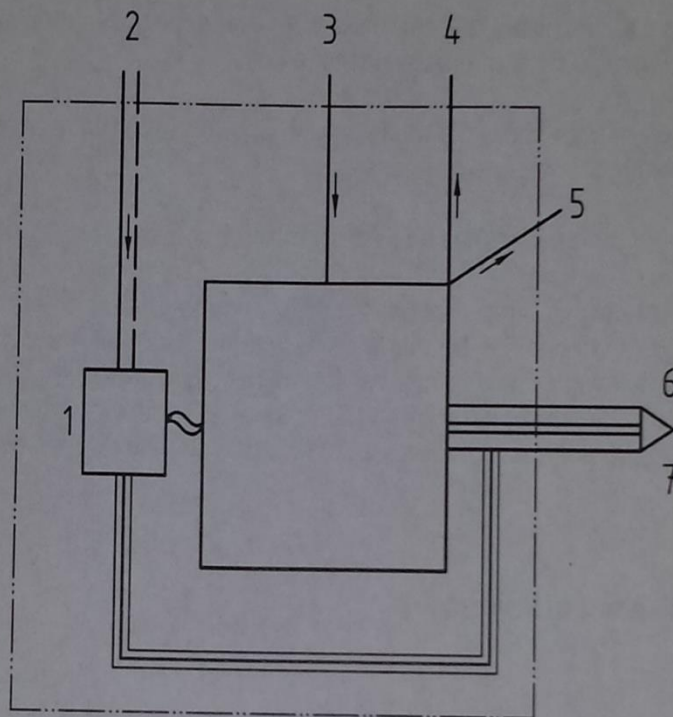
<http://www.cen.eu/Pages/default.aspx> [viitattu 16.4.2014]

12. Kiviniemi O., Sikiö J., Jyrävä H. et al. Tuhkarakentamisen käsikirja. Verkkojulkaisu. Saatavissa:

[http://www.infrary.fi/files/3985\\_Tuhkarakentamisen\\_kasikirja.pdf](http://www.infrary.fi/files/3985_Tuhkarakentamisen_kasikirja.pdf)

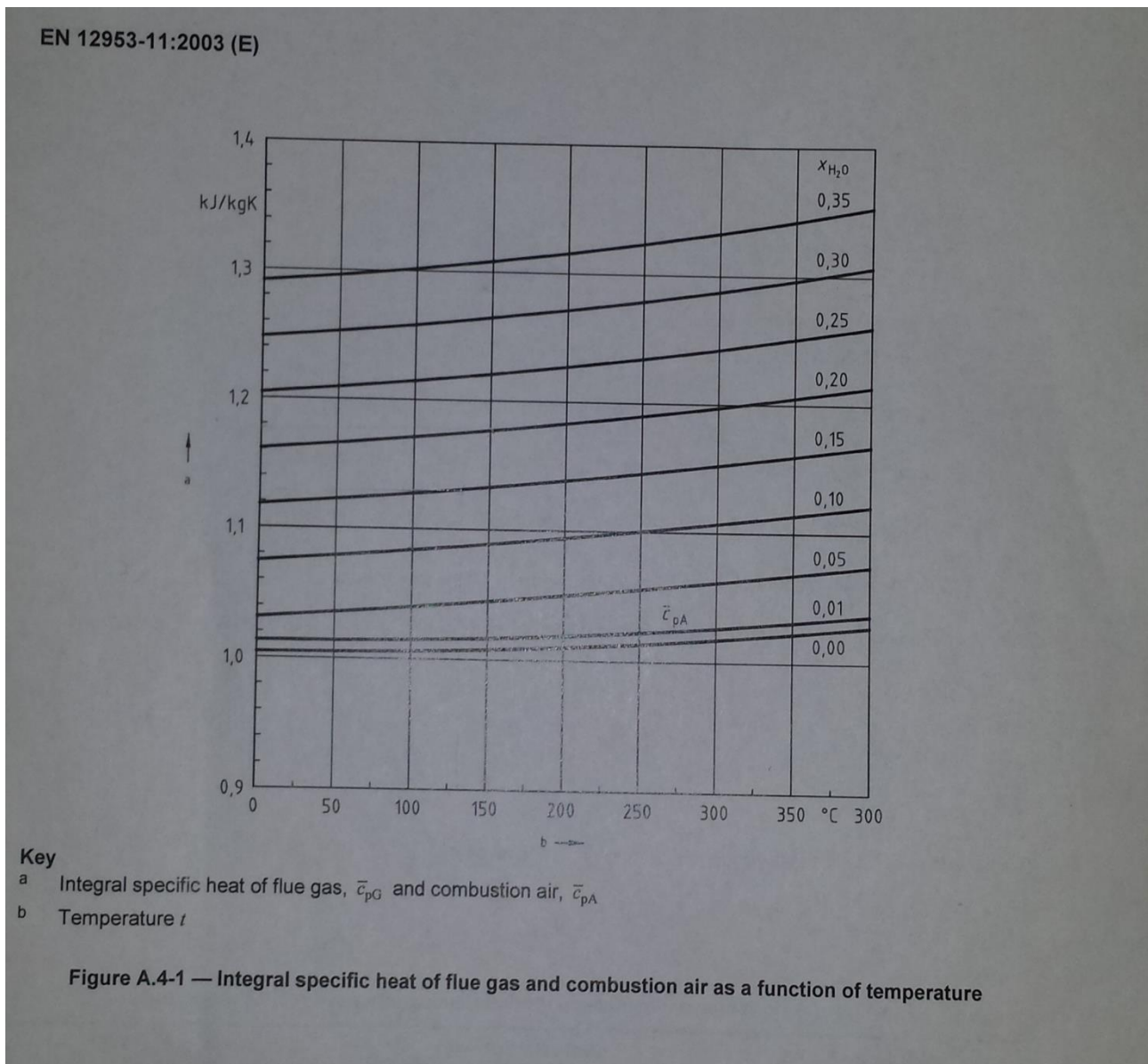
[viitattu 23.4.2014]

EN 12953-11:2003 (E)

**Key**

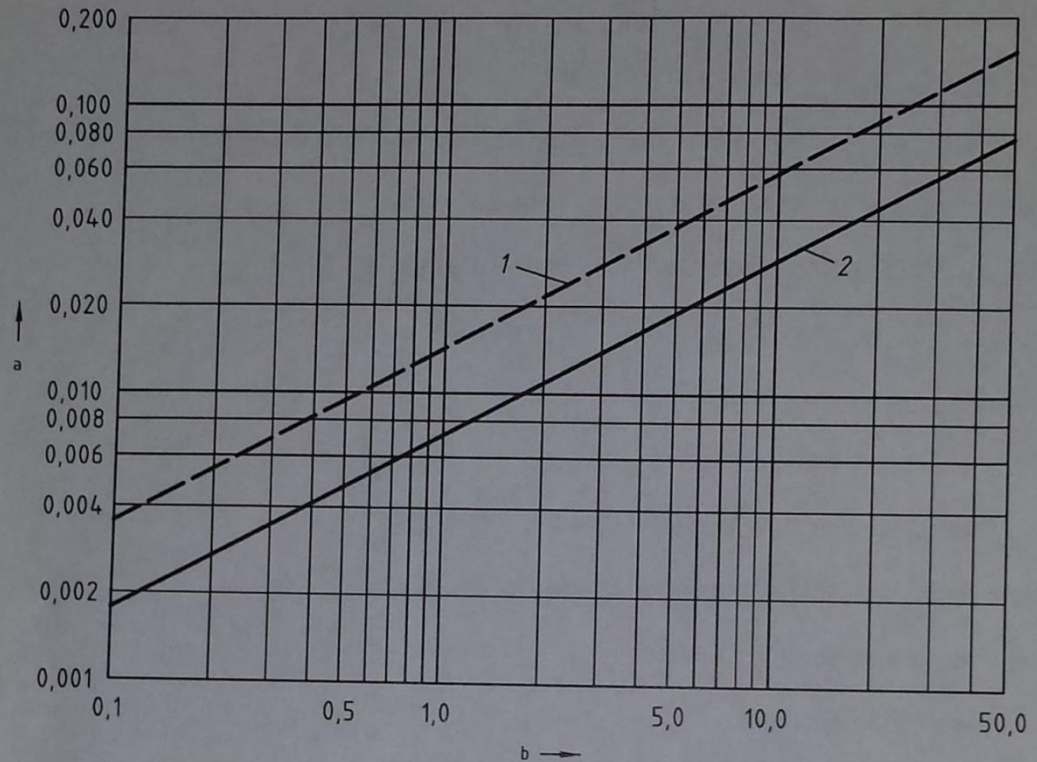
- 1 fuel ( $m_F, H_{(N/G)}, h_F$ )
- 2 combustion air ( $J_A$ )
- 3 hot water outflow  $Q_2$
- 4 hot water inflow  $Q_2$
- 5 loss due to radiation and convection  $Q_{RC}$
- 6 loss due to flue gas ( $Q_{(HN/G)G}$ )
- 7 loss due to enthalpy and unburned combustibles in ash and flue dust ( $Q_{SF}$ )

Kuva 9 Esimerkki taserajasta [7]



Kuva 10 Savukaasun ominaislämpöarvon kuvaaja [7]

EN 12953-11:2003 (E)

**Key**

- 1 Solid fuel boilers
- 2 Fuel oil and natural gas boilers

a  $\dot{Q}_{RC}$ b  $\dot{Q}_E$ **Figure 8.5-1 — Radiation and convection heat loss**

The diagram in Figure 8.5-1 is based on the following equation:

$$\dot{Q}_{RC} = C \dot{Q}_E^{0,6}$$

where

- $C$  is 0,0072 for fuel oil and natural gas boilers and 0,0144 for solid fuel boilers;
- $\dot{Q}_E$  is the rated useful heat output, in MW.

Kuva 11 Säteily- ja johtumishäviöiden kuvaaja [7]



Mittaukset				123	=	laskentatolu						
				123	=	tähdessä syötettävä						
				123	=	eitähdessä syötettävä						
<b>Kattilakuoma</b>												
<b>Polttoaineen analyysi</b>	100	50	15									
<b>Kosteus</b>	45.70	48.80	45.70	Paino-%	100	50	15	%	1.42	1.50	2.31	$\lambda = \frac{21}{21 - O_2}$
<b>Kivaa-aine</b>	54.30	51.20	54.30	Paino-%								
<b>Tuhtipitoisuus (wet/dry)</b>	0.81	1.50	0.56	1.10	0.49	0.90	Paino-%					
<b>Häihtävät aineet (wet/dry)</b>	45.20	83.24	43.70	85.35	47.10	86.74	Paino-%					
<b>Hilti (kuivattuna) (wet/dry)</b>	8.90	16.39	9.90	18.55	9.40	17.31	Paino-%					
<b>Hilti yhteensä (wet/dry)</b>	27.90	51.38	27.60	53.91	29.00	53.41	Paino-%					
<b>Typpi (wet/dry)</b>	0.10	0.18	0.20	0.39	0.10	0.18	Paino-%					
<b>Veiy (wet/dry)</b>	3.23	5.95	3.13	6.11	3.29	6.05	Paino-%					
<b>Happi (wet/dry)</b>	22.80	41.99	22.20	43.36	24.10	44.38	Paino-%					
<b>Rikki (wet/dry)</b>	0.007	0.013	0.005	0.010	0.014	0.025	Paino-%					
<b>Kloori (wet/dry)</b>	0.011	0.020	0.008	0.016	0.022	0.041	Paino-%					
<b>Muu aines (wet/dry)</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	Paino-%					
<b>P:n lämpötila</b>	0	0	0	0	0	0	°C					
<b>Tehollinen lämpöarvo (dry)</b>	19.08	18.91	19.05	19.05	19.05	19.05	MJ/kgpa					
<b>Massavirta</b>	2.139	1.239	0.352	0.352	0.352	0.352	kg/s					
<b>Polttoainetyypit</b>												
<b>Polttoainetyyppi</b>	Puu	Puu	Puu									
<b>Polttoainen laatu (dry PA)</b>	4.71	4.71	4.71									
<b>Polttoainen laatu (wet PA)</b>	2.55	2.41	2.55									
<b>Polttoainen t</b>	25.00	25.00	25.00	°C								
<b>Polttoainen syöttö</b>	8.10	4.20	0.80	m <sup>3</sup> /s								
<b>Polttoainen syöttö</b>	9.44	4.90	0.93	kg/s								
<b>gCd</b>	4.916	5.104	8.101	kg/kgpa								
<b>pH2O</b>	0.8993	0.8652	0.9077									
<b>pH2OF</b>	0.7457	0.7676	0.7511									
<b>Kattilan tulo (nimellinen)</b>												
<b>Kattilan tulo (nimellinen)</b>	18000.00	18000.00	18000.00	KW								
<b>Hyötylämpöteho</b>	18400	9590	2800	KW								
<b>Savukaasut</b>												
<b>Tilavuusvirta (dry)</b>	10.40	6.00	2.30	m <sup>3</sup> /s								
<b>Tilavuusvirta (wet)</b>	13.00	7.59	2.71	m <sup>3</sup> /s								
<b>Lämpötila</b>	150.00	137.00	130.00	°C								
<b>Kosteus</b>	20.00	21.00	15.00	%								
<b>O<sub>2</sub>-pitoisuus</b>	6.20	7.00	11.90	%								
<b>CO<sub>2</sub></b>	14.20	13.20	8.90	%								
<b>Huikaset</b>	157.00	6.00	11.00	mg/m <sup>3</sup> (ppm)								
<b>N<sub>2</sub></b>	79.60	79.80	79.20	%								
<b>Thierys (wet) NTP</b>	1.40	1.40	1.40	kg/m <sup>3</sup>								
<b>Thierys (dry) NTP</b>	1.40	1.40	1.40	kg/m <sup>3</sup>								
<b>% wet</b>	50.00	50.00	50.00	%								

<b>Olosuhteet</b>						
<b>Ulkolämpötila</b>	20.00	20.00	20.00	°C		
<b>Ilmalämpötila</b>	101.30	101.30	101.30	KPa		
<b>Ilman kosteus</b>	60.00	60.00	60.00	%		
<b>Veden määrä ilmassa</b>	10.353312	10.353312	10.353312	g/m <sup>3</sup>		
<b>Kattilahuoneen lämpötila</b>	25.00	25.00	26.00	°C		

<b>Tuhtikat</b>						
<b>Tuhtien %-ratio</b>	40	60				
<b>Lentohuoneen määrä</b>	0.013194761	0.005451327	0.001263378	kg/s		
<b>Pohjatuhtien määrä</b>	0.019791592	0.008176991	0.000899566	kg/s		
<b>Palamaton aines (lentoi)</b>	3.483	4.386	4.013	%		
<b>Palamaton aines (pohja)</b>	33.72	4.58	16.3	%		
<b>Häivöt (lento)</b>	4.208131751	2.029855161	0.468940216	M/s		
<b>Häivöt (pohja)</b>	61.69121561	3.179458494	2.857166294	M/s		
<b>lu-avo</b>	0.019514688	0.010071144	0.009593933	°C		
<b>Lentohuoneen lämpötila</b>	150	137	130	°C		
<b>Pohjatuhtien lämpötila</b>	150	137	130	°C		

<b>Taseen sähkökäytöt</b>						
<b>Mitatut tehot yhteensä (ka)</b>	100	50	15	%		

<b>Skin koostumus</b>											
<b>dry</b>	28.88	g/mol	kg	28.88	g/mol	kg	28.88	g/mol	kg	0.399	%
<b>O<sub>2</sub></b>	16.35	mol	0.843	17.16	mol	0.549	11.18	mol	0.389		
<b>CO<sub>2</sub></b>	60.35	mol	2.655	32.36	mol	1.404	8.35	mol	0.389		
<b>N<sub>2</sub></b>	205.77	mol	8.774	182.30	mol	5.107	77.66	mol	2.216		

Kuva 12 Laskentapohjan mittaustaulukko

Kaavat	EN12953-11			EN12952-15			$Q_{(N)Z} = P_{tot}$
<b>Savukaasuhäviöt</b>	1780,426	931,478	361,147	1726,395	897,789	315,252	KW
$Q_{(N)G} = \dot{m}_F [c_{p,GA}(t_G - t_F) + H_{H_2O} c_{p,ST}(t_G - t_F)]$				$Q_{(N)G} = \dot{m}_G [(1 - x_{H_2O}) c_{p,GA}(t_G - t_F) + x_{H_2O} c_{p,ST}(t_G - t_F)]$			
<b>Tuhkähäviöt</b>	65,939	5,209	3,326	69,403	6,491	3,605	KW
$Q_{Ash} = \dot{m}_{Ash} u_{Ash} H_{(N)u}$ $Q_{FA} = \dot{m}_{FA} u_{FA} H_{(N)u}$ $Q_{SF} = Q_{Ash} + Q_{FA}$				$Q_{SL} = \dot{m}_{SL} [c_{p,SL}(t_G - t_F) + u_{SL} H_{un}]$ $Q_{FA} = \dot{m}_{FA} [c_{p,FA}(t_G - t_F) + u_{FA} H_{un}]$ $Q_{SF} = Q_{SL} + Q_{FA}$			
<b>Säteily- ja johtumishäviöt</b>	81,569	81,569	81,569	241,926	152,306	64,762	KW
$Q_{RC} = C Q_E$				$Q_{RC} = C Q_{N,0.7}$			
<b>(Sähköhäviöt)</b>				0	0	0	KW
<b>HÄVIÖT YHTEENSÄ:</b>	1927,934	1018,256	446,042	2037,724	1056,586	383,620	KW
	+	+	+	+	+	+	
<b>Saatu hyötymäärä:</b>	18400	9500	2800	18400	9500	2800	KW
	=	=	=	=	=	=	
<b>Polttoaineteho:</b>	20327,934	10518,256	3246,042	20437,724	10556,586	3183,620	KW

Kuva 13 Laskentapohjan kaava- ja tulostaulukko

**Kattilan hyötysuhde**  
**EN 12953-11**  
**mukaan**

**Kattilateho:** 100 %

**Hyötysuhde:** 90,564 %

**Häviöt:**

Savukaasut:	8,759	%
Lentotuhka:	0,021	%
Pohjatuhka:	0,303	%
Säteily ja johtuminen	0,353	%
<b>Yhteensä:</b>	<b>9,436</b>	<b>%</b>

**Energiat:**

**Sisään**

Polttoaineen palamislämpö	28156,79	<b>kW</b>
<b>Yhteensä:</b>	<b>28156,79</b>	

**Ulos**

Hyötylämpö	25500,00	<b>kW</b>
Savukaasuhäviö	2466,12	<b>kW</b>
Lentotuhkahäviö	5,88	<b>kW</b>
Pohjatuhkahäviö	85,45	<b>kW</b>
Säteily ja johtumishäviö	99,34	<b>kW</b>
<b>Yhteensä:</b>	<b>28156,79</b>	<b>kW</b>

**Massavirrat:**

**Sisään**

Paloilma	20,3199	<b>kg/s</b>
Polttoaine	3,0460	<b>kg/s</b>
<b>Yhteensä:</b>	<b>23,3659</b>	<b>kg/s</b>

**Ulos**

Savukaasu	23,3200	<b>kg/s</b>
Hiukkaset	0,0002	<b>kg/s</b>
Lentotuhka	0,0183	<b>kg/s</b>
Pohjatuhka	0,0274	<b>kg/s</b>
<b>Yhteensä:</b>	<b>23,3659</b>	<b>kg/s</b>

Kuva 14 Laskentapohjan tulostustaulukko