

Kai Kärenlampi

HÖYRYKATTILOIDEN LÄMPÖTEKNINEN SUUNNITTELU

HÖYRYKATTILOIDEN LÄMPÖTEKNINEN SUUNNITTELU

Kai Kärenlampi
Opinnäytetyö
Kevät 2017
Energiatekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikka

Tekijä: Kai Kärenlampi

Opinnäytetyön nimi: Höyrykattilan lämpötekniinen suunnittelu

Työn ohjaajat: Jukka Ylikunnari ja Juho Teppo

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2017

Sivumäärä: 74 + 3 liitettä

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda insinöörin käyttöön soveltuva höyrykattilan mitoitussovellus, joka toteutetaan Excel-pohjaisella taulukkolaskennalla. Sovelluksen käyttäjä voi alustavasti mitoittaa höyrykattilan pääkomponentit. Mitoituksen tuloksena ovat kattilan päämitat, lämpöpinta-alat ja massa-arvio. Työn toimeksiantajana toimi Planora Oy.

Höyrykattilan mitoitukseen sovellettiin lämpö- ja virtausteknistä laskentaa. Työn sisältö rajattiin höyrykattilan pääkomponenttien mukaan. Laskennassa keskityttiin pääsääntöisesti yleisimpien höyrykattiloiden toimintaan ja yksityiskohtaiset tekijät rajattiin pois. Mitoitussovelluksen toiminta rakennettiin työssä esitetyille laskentamenetelmille. Sovelluksen valmistuttua laskennan toimivuutta testattiin jo mitoitettulla höyrykattilalla. Tulosten todettiin olevan luotettavia ja lähtötietojen tarkkuuksien rajoissa. Työn toteutuksen aikana sovellusta käytettiin höyrykattilan alustavaan mitoitukseen ja painelaitemassan arviointiin. Laskennan periaatteita kehitettiin käytöstä saadulla kokemuksella.

Mitoitussovelluksella voidaan tehdä höyrykattilan päämitoitus tai tarkastella jo olemassa olevan kattilan toimintaa. Sovelluksella voidaan yksinkertaisella tavalla mitoittaa kattilan alustavat lämpöpinta-alat ja arvioida painelaitteen massan. Suunnittelun edetessä sovelluksella voidaan suorittaa lämmönsiirtimien lopullinen lämpötekniinen mitoitus.

Höyrykattilan mitoitus on hyvin yksityiskohtaista. Kattila mitoitetaan aina tilaajan tarvitsemalle höyryn tarpeelle. Rakenteet suunnitellaan vastaamaan käytössä olevaa tilaa ja lämpötekniistä suunnittelua. Tämä opinnäytetyö antaa kuvan höyrykattilan kokonaisvaltaisesta mitoituksesta. Työssä esitetyjä menetelmiä voidaan soveltaa useisiin erilaisiin lämpötekniisiin ratkaisuihin.

Asiasanat: höyrykattila, lämmönsiirto, luonnonkierto, mitoitus, termodynamiikka

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
SISÄLLYS	4
MERKKIEN SELITYKSET	6
1 JOHDANTO	10
2 HÖYRYKATTILAN SUUNNITTELU	11
2.1 Höyrykattilan toimintaperiaate	11
2.2 Kattiloiden luokittelu	12
2.3 Lämmönsiirtimet	12
2.3.1 Lämmönsiirtokertoimet	15
2.3.2 Kiehuminen	15
2.4 Suunnittelun vaiheet	17
3 POLTTOAINE JA SAVUKAASUT	19
3.1 Palamisilmantarve	20
3.2 Savukaasun koostumus ja ominaisuudet	21
3.3 Savukaasun lämpötila kattilan osissa	24
4 HÖYRYKATTILAN ENERGIATASE	25
5 TULIPESÄ	27
5.1 Koon määrittäminen	28
5.2 Kuormitus	28
5.3 Lämpösäteily ulostulossa	31
6 VESIHÖYRYPIIRI	32
6.1 Kiertolaskenta	32
6.1.1 Yksifaasipainehäviöt	34
6.1.2 Kaksifaasipainehäviöt	35
6.1.3 Kriittinen lämpövuoto	36
6.2 Höyrylieriö	38
7 LÄMMÖNSIIRTIMIEN MITOITUS	42
7.1 Mitoitusparametrit ja laskennan eteneminen	42
7.2 Logaritminen keskilämpötilaero	43
7.3 Sisäpuolinen konvektiolämmönsiirtokerroin	45
7.4 Ulkopuolinen konvektiolämmönsiirtokerroin	46

7.4.1 Sileät putket	47
7.4.2 Rivoitetut putket	49
7.5 Säteilämmönsiirtokerroin	52
7.6 Kokonaislämmönläpäisykerroin	53
7.7 Painehäviöt	55
7.7.1 Putken sisäpuolinen painehäviö	55
7.7.2 Savukaasun painehäviö	55
8 RAKENTEET JA MATERIAALIT	59
8.1 Seinärakenne	59
8.2 Lämpölaajeneminen	60
8.3 Virtauksen jako	61
8.4 Teräksen seostus	62
8.5 Viruminen	63
8.6 Minimi seinämäpaksuus	64
8.7 Hitsattavuus	64
8.8 Käytettävät materiaalit	65
9 MITOITUSSOVELLUS	67
10 POHDINTA	72
LÄHTEET	73
Liite 1 Hiilidioksidin emissiivisyys	
Liite 2 Vesihöyryn emissiivisyys	
Liite 3 Ekonomaiserin mitoitusesimerkki	

MERKKIEN SELITYKSET

Merkintä	Suure	Mittayksikkö
<i>a</i>	putkijaon suhde ulkohalkaisijaan	-
<i>A</i>	pinta-ala	m ²
<i>b</i>	putkijaon suhde ulkohalkaisijaan	-
<i>B</i>	hiukkastiheys	kg/m ³
<i>C</i>	Stefanin–Boltzmannin vakio	-
<i>CE</i>	hiiliekvivalentti	-
<i>Cp</i>	ominaislämpökapasiteetti	J/kg K
<i>CR</i>	kiertoluku	-
<i>d</i>	putken halkaisija	m
<i>e</i>	absoluuttinen karheus	mm
<i>f</i>	kitkakerroin	-
<i>g</i>	maan vetovoiman kiihtyvyys	m/s ²
<i>G</i>	massavuo	kg/m ² s
<i>H</i>	korkeus	m
<i>h</i>	ominaisentalpia	J/kg
<i>Hu</i>	tehollinen lämpöarvo	MJ/kg
<i>K</i>	liekin vaimennuskerroin	-
<i>k</i>	lämmönläpäisykerroin	W/(K m ²)
<i>L</i>	pituus	m

m	massa-osuus	-
\dot{m}	massavirta	kg/s
M	moolimassa	kg/mol
n	ainemäärä	mol
n	putkirivien määrä	-
Nu	Nusseltin luku	-
p	paine	Pa
Pr	Prandtlin luku	-
q	lämpövuoto	W/m ²
r	säde	m
Re	Reynoldsin luku	-
t	jako	m
T	lämpötila	°C, K
V	tilavuus	m ³
\dot{V}	tilavuusvirta	m ³ /s
v	virtausnopeus	m/s
x	höyryn massa-osuus	-
Kreikkalaiset		
α	lämmönsiirtymiskerroin	W/m ² K
β	liekin täyttökerroin	-
ε	emissiivisyys	-

η	dynaaminen viskositeetti	Pa · s
λ	lämmönjohtavuus	W/(K m)
ρ	tiheys	kg/m ³
ϕ	lämpövirta	W
δ	seinämä paksuus	m
μ	purkauskerroin	-
μ	tuhkan konsentraatio savukaasussa	g/Nm ³
ν	kinemaattinen viskositeetti	m ² /s
ξ	vastuskerroin	-
σ	laskentalujuus	Pa
φ	likaantumiskerroin	-
ψ	välitilaosuus	-

Alaindeksit

<i>A</i>	kiihtyvyys
<i>a</i>	ulkopuolinen
<i>b</i>	kiehuminen
<i>dc</i>	laskuputki
<i>e</i>	ulostulo
<i>f</i>	liekki
<i>fur</i>	tulipesä

<i>G</i>	hydrostaattinen
<i>g</i>	kaasu
<i>i</i>	ilma, sisäpuolinen, sisääntulo
<i>k</i>	konvektiivinen
<i>l</i>	neste
<i>lh</i>	lämpöhäviö
<i>n</i>	komponentti
<i>o</i>	alkutila
<i>p</i>	pintaan kohdistettu
<i>pa</i>	polttoaine
<i>r</i>	nousuputki, säteily
<i>R</i>	ripa
<i>sk</i>	savukaasu
<i>sv</i>	syöttövesi
<i>th</i>	tuorehöyry
<i>w</i>	seinämä

1 JOHDANTO

Höyrykattiloita käytetään energiantuotannossa tuottamaan vesihöyryä. Tuotetun höyryn yleisin käyttötapa on sähköntuotannossa oleva höyryturbiini tai erilaiset teollisuuden prosessit. Höyrykattilat jaetaan rakenteen mukaan suurvesitilakattiloihin ja vesiputkikattiloihin. Tässä opinnäytetyössä käsitellään vesiputkikattiloiden lämpötekniistä suunnittelua. Kattilan suunnittelu on laaja kokonaisuus. Suunnittelussa on yhdistettävä luonnontieteiden eri osa-alueet, käytännön kokemus ja käytettävissä oleva teknologia, jotta kattilasta saadaan taloudellisesti kannattava.

Opinnäytetyön tavoitteena on luoda insinöörin käyttöön soveltuva höyrykattilan mitoitussovellus. Työssä selvitetään höyrykattilan mitoittamiseen liittyvät parametrit ja esitetään lämpö- ja virtaustekniset laskelmat. Mitoittamisessa keskitytään pääsääntöisesti yleisimpien höyrykattiloiden toimintaan ja yksityiskohtaiset tekijät rajataan pois. Laskelmien avulla luodaan Excel-pohjainen taulukkolaskentasovellus. Sovellus toimii kattilasuunnittelun alustavassa mitoituksessa ja on tukena suunnittelun edetessä. Käyttäjän tulisi saada sovelluksesta kattilan alustavat lämpöpinta-alat, päämitat, massa-arvio sekä savukaasun ominaisuudet eri kohdissa kattilaa.

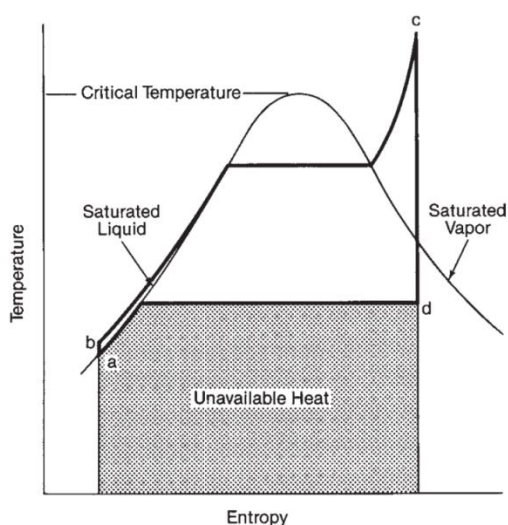
Työn tilaajana toimii Planora Oy, joka on ollut toiminnassa vuodesta 1987. Planora Oy tarjoaa yhdyskuntasektorin suunnittelu- ja projektinhallintapalveluja. Palveluihin kuuluu lämpölaitosten, verkostojen, turvetuotannon ja teollisuuden kokonaisvaltainen suunnittelu. Yrityksen päätoimipiste sijaitsee Oulussa. (Planora, linkit Yritys -> Tiedot.)

2 HÖYRYKATTILAN SUUNNITTELU

2.1 Höyrykattilan toimintaperiaate

Höyrykattilassa tuotetaan kylläistä tai tulistettua vesihöyryä. Yleisin käyttötapa tuotetulle höyrylle on sähköntuotannon höyryturbiini sekä teollisuuden prosessit. Kattilaan syötetty vesi höyrystyy paineen määräämässä höyrystymislämpötilassa kylläiseksi höyryksi. Höyry on tulistettua, kun sen lämpötila on yli höyrystymislämpötilan. Höyrystymiseen ja tulistukseen tarvittava energia saadaan polttoaineen palamisesta. Polttoaine reagoi kattilaan syötetyn palamisilman hapen kanssa. Palamisprosessin kautta polttoaineeseen sitoutunut kemiallinen energia siirtyy tulipesän seinäputkissa kiertävään veteen sekä muodostuviin savukaasuihin. Savukaasujen sisältämä lämpöenergia pyritään siirtämään mahdollisimman hyvin vesi-höyrypiiriin. (Huhtinen – Kettunen – Nurminen – Pakkanen 2000, 7.)

Kun väliaineena käytetään vettä, on havainnollisin tapa esittää höyrykattilan tai voimalaitoksen prosessi veden lämpötila-entropiakuvaajassa (kuva 1). Höyrykattilan osuus prosessista on pisteiden a ja c välillä. Kuvassa pisteiden c ja d välillä on höyryturbiini, jossa höyry paisutetaan lauhduttimen paineeseen. Lauhdutin luovuttaa lämpöä pisteiden d ja a välillä, jolloin höyry lauhtuu nesteeksi.



KUVA 1. Tyypillinen voimalaitoksen prosessi veden lämpötila-entropiakuvaajassa (Kitto – Stultz 2005, 2–14)

Höyrykattila voi toimia ali- tai ylikriittisenä. Alikriittisen kattilan prosessi lämpötila-entropiakuvaajassa pysyy alle kriittisen pisteen ja höyrystyminen tapahtuu kaksifaasialueella. Ylikriittisessä prosessissa veden paine nostetaan yli kriittisen pisteen, jolloin ei tapahdu normaalia höyrystymistä. Nestemäinen vesi muuttuu suoraan kylläiseksi höyryksi, ilman kaksifaasitilaa.

2.2 Kattiloiden luokittelu

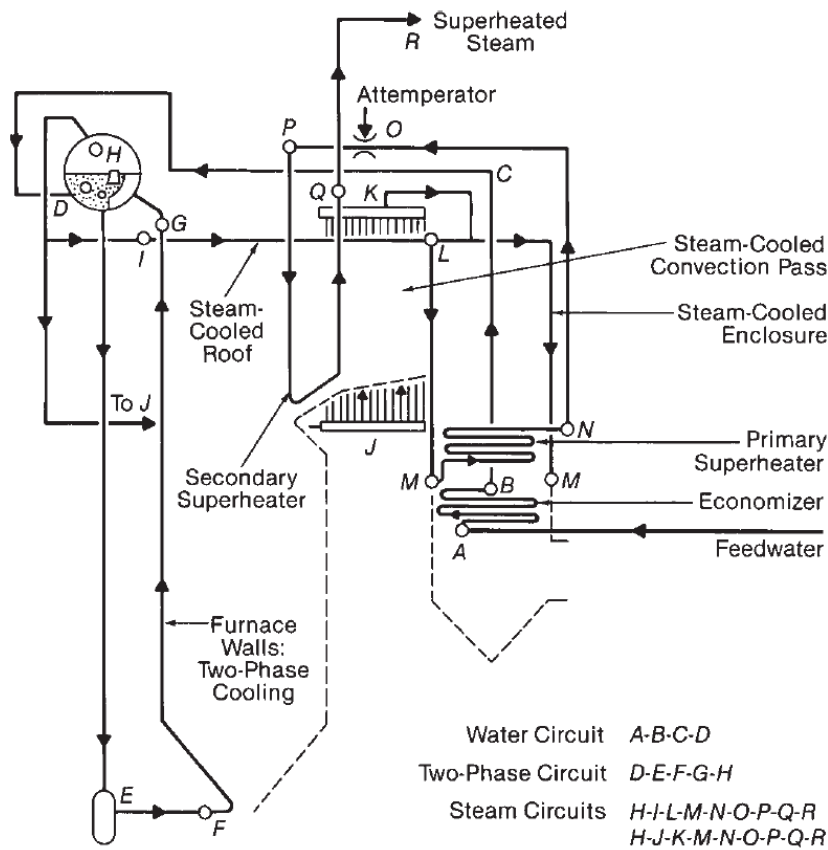
Höyrykattilat voidaan jakaa useaan luokkaan perustuen käyttökohteeseen, vedenkiertoon ja polttoaineeseen. Käyttökohteita ovat voimalaitokset, teollisuus ja laivakäyttö. Voimalaitosten kattilat ovat yleensä suuria kiinteiden polttoaineiden kattiloita. Teollisuudessa käytetään pakettikattiloita yleensä öljy- ja kaasupoltolla.

Vesihöyrypiirin kierto voidaan toteuttaa luonnonkierrolla, pakkokierrolla tai läpivirtauksella. Luonnonkiertoisen kattilan toiminta perustuu nesteen ja höyryn väliseen tiheyseroon. Pakko- ja läpivirtauskattiloilla kierto toteutetaan pumpun muodostamalla paineella. Kattiloiden käyttöpaine vaihtelee 1 ja 240 bar:n välillä, mutta luonnonkiertoista kattilaa ei voida rakentaa yli 170 bar:n paineelle (Huhtinen ym. 2000, 111–114). Suurella paineella kylläisen veden tiheyden suhde kylläisen höyryn tiheyteen pienenee, jolloin kierto ei toteudu.

Polttoaineet jaetaan kiinteisiin-, nestemäisiin- sekä kaasupolttoaineisiin. Kiinteän polttoaineen polttotekniikat jaetaan yleisesti arina-, leijukerros- sekä pölypolttoon. Nestemäiset ja kaasupolttoaineet poltetaan niille sovelletuilla polttimilla.

2.3 Lämmönsiirtimet

Lämmönsiirrossa mukana olevat komponentit suunnitellaan jäädyttämään palamisprosessista muodostuvia kuumia savukaasuja (kuva 2). Tulipesästä lähtevä savukaasu on noin 800–1300 °C, ja se jäädytetään loppulämpötilaan 150–200 °C. (Huhtinen ym. 2000, 185.)



KUVA 2. Vesiputkikattilan pääkomponenttien sijoittelu (Kitto – Stultz 2005, 1–9)

Tulistimilla tulistetaan höyrylieriöstä tuleva kylläinen höyry haluttuun lämpötilaan. Tulistuksen loppulämpötila on yleensä 450–550 °C. Korkea tulistustemperatura saavutetaan sijoittamalla tulistinputket tulipesän ulostuloon tai osittain tulipesään. Tulistimet jaetaan säteily- ja konvektiotulistimiin pääasiallisen lämmönsiirtomuodon perusteella.

Höyry tulisi jakaa tasaisesti tulistinputkiin ja virtausnopeuden täytyy olla riittävän suuri jäähdyttämään putkimateriaalia. Suuret virtausnopeudet aiheuttavat myös painehäviöitä (taulukko 1). Jos kattilan täytyy toimia laajalla kuormitusalueella, tarvitaan suurempi painehäviö täydellä kuormalla. Tällöin matalilla kuormilla on myös riittävä virtausnopeus. (Huhtinen ym. 2000, 185; Ganapathy 2001, 1.)

TAULUKKO 1. Keskimääräiset virtausnopeudet eri osissa (Kitto – Stultz 2005, 3–9)

Komponentti/osa	Aine	Virtausnopeus (m/s)
Ilman esilämmitin	Ilma	5 – 25
	Savukaasu	5 – 25
Tulistin	Höyry	10 – 40
Höyrystin	Neste/höyry	0,4 – 3,6
Ekonomaiser	Neste	0,8 – 1,5
Kattilan kanavat	Savukaasu	5 – 30

Mikäli savukaasun lämpötila tulistimille on korkea ja tulipesästä saapuu suoraa lämpösäteilyä, voidaan ylikuumentumista suojella verholla (eng: boiler screen, slag screen). Screenissä kierrätetään yleensä höyrystyvää vettä, joka jäähdyttää putkimateriaalia paremmin kuin tulistimien sisällä virtaava höyry. Screeni voi olla erillinen kiertopiiri, tai se toteutetaan tulipesän seinäputkilla, jossa putkien loppuosa toimii screeninä. Tällä aiheutetaan myös virtausvastusta, jotta savukaasun virtaus olisi tasaisempaa tuleville lämmönsiirtimille. (Ganapathy 2015, 61.)

Ekonomaiserissa eli syöttöveden esilämmittimessä lämmitetään syöttövesisäiliöltä höyrylieriöön tulevaa vettä. Ekonomaiserin voi olla höyrystävä tai höyrystämätön. Höyrystämättömässä veden lämpötila jätetään yleensä noin 20 °C alle höyrystymislämpötilan. (Huhtinen ym. 2000, 194–195.) Syöttöveden lämmitykseen tarvittava lämpöenergia saadaan savukaasuista tai turbiinilta otettavasta väliottohöyrystä.

Savukaasuja ei voida jäähdyttää ekonomaiserilla alle syöttöveden höyrystymislämpötilan. Ilman esilämmittimellä voidaan siirtää ekonomaiserilta tulevan savukaasun lämpöenergia palamisilmaan. Palamisilma lämmitetään kattilahuoneen lämpötilasta noin 100–400 °C:seen, jolloin savukaasun loppulämpötila saadaan alhaiseksi. Palamisilman esilämmityksellä tehostetaan palamista. Esilämmityk-

sen lämpötilan määrää tulipesän lämpötila ja polttotekniikka. (Huhtinen ym. 2000, 196.)

2.3.1 Lämmönsiirtokerroimet

Lämmönsiirtokerroin kuvaa, kuinka paljon tehoa siirtyy pinta-alaa kohden, kun väliaineen ja pinnan välillä on tietty lämpötilaero. Nesteellä on yleisesti suuri lämmönsiirtokerroin, kaasuilla vastaavasti pienempi (taulukko 2).

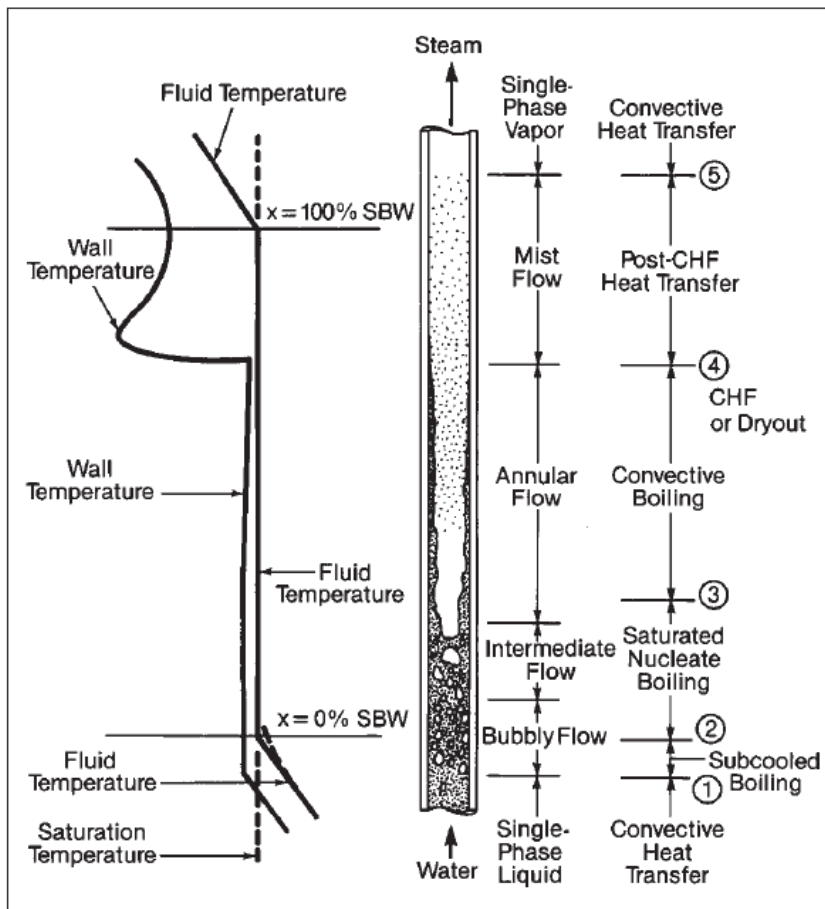
TAULUKKO 2. Suuntaa-antavia lämmönsiirtokerroimia eri lämmönsiirtotavoille (Wagner 1988, 161)

Lämmönsiirtotapa	α [W/m ² K]
Kaasut, vapaa konvektio	1 – 60
Kaasut, pakkokonvektio	10 – 250
Vesihöyry, tulistettu	25 – 100
Vesi, vapaa konvektio	300 – 600
Vesi, kuplakiehunta	2 500 – 50 000

2.3.2 Kiehuminen

Kattiloissa, joissa vettä höyrystetään useasti höyrystimen lävitse, kiehumisen tyyppinä on kuplakiehunta, 2–3 kuvassa 3. Kuplakiehumisessa höyrykuplat pysyvät vesivirtauksessa, jolloin vesi jäähdyyttää putkimateriaalia riittävästi. Läpivirtauskattiloissa kiertävä vesi höyrystyy yhdellä kierrolla. Virtaava vesi käy läpi kaikki kiehumisen eri vaiheet.

Kuplakiehunta häiriintyy, kun lämpövuoto putken sisällä kasvaa yli kriittisen lämpövuon (CHF, DNB). Höyrykuplia kylmempi vesi ei enää siirrä kuplia ja ne muodostavat kerroksen tulistettua höyryä putken sisäpinnalle. Höyryllä on huomattavasti pienempi lämmönsiirtokerroin, jolloin putken lämpötila nousee. (Ganapathy 2015, 69–70.)



KUVA 3. Yksinkertaistettu kiehuminen pystysuorassa putkessa (Kitto – Stultz 2005, 5–3)

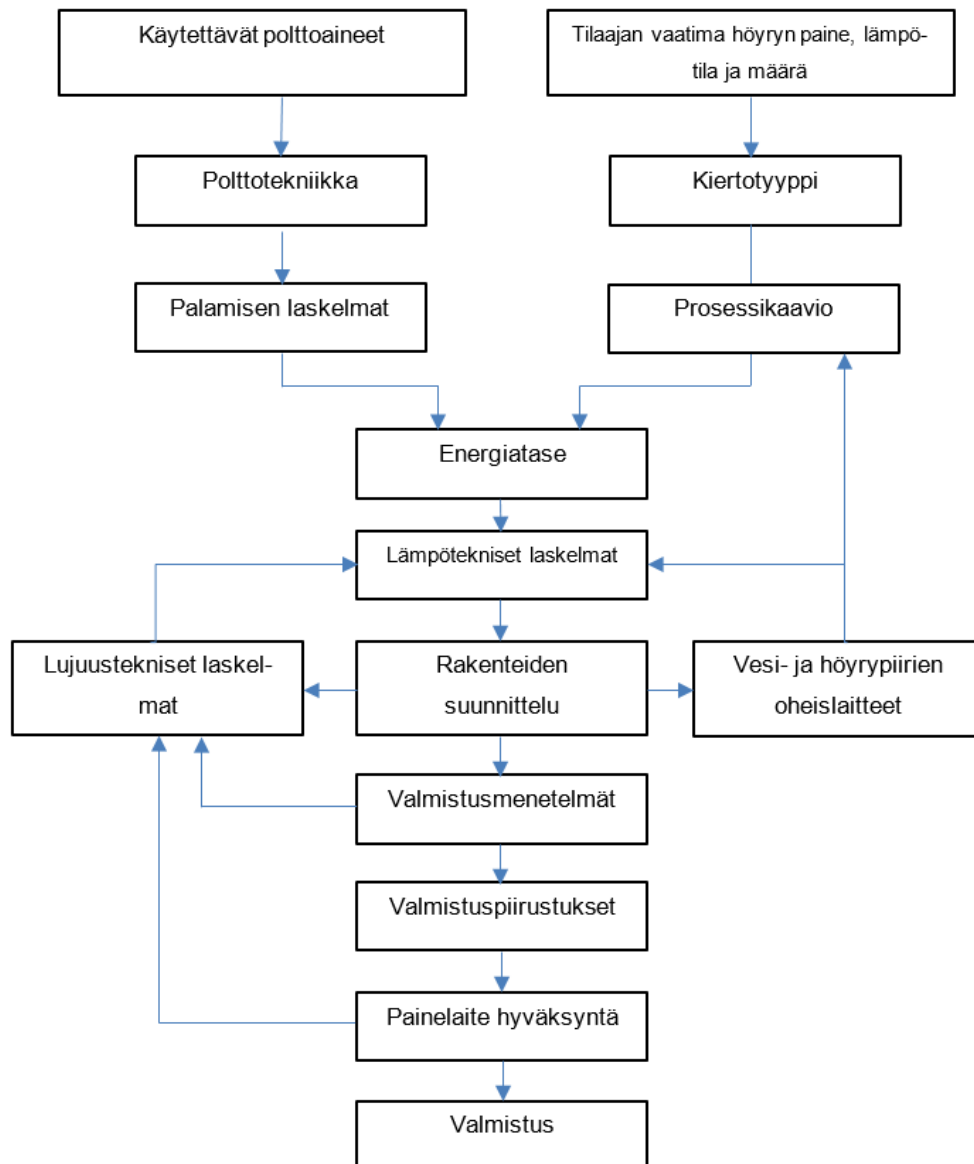
Kriittisen lämpövuon tilanteet koskevat enemmän suurella paineella toimivia pakettikattiloita. Teollisuuden kattiloiden tulipesät ovat suurempia ja toimivat pienemmällä paineella, jolloin lämpövuon putken sisällä ei normaalisti kasva liian suureksi. Suurella paineella toimivien kattiloiden kriittisimmät paikat voidaan toteuttaa sisäpuolelta spiraalisesti rihlatuilla putkilla. Pyörteinen virtaus pitää putken sisäpinnan märkänä ja ennen kaikkea edesauttaa höyryn ja nesteen sekoitusta. Rihlatut putket ovat kalliita, mutta pystyvät käsittelemään noin 50 % suuremman lämpövuon kuin normaalit sileät putket. Läpivirtauskattiloissa höyrystintputken loppuosa on sijoitettava paikkaan, jossa lämpövuon ei ole liian suuri. Höyrystimien suunnittelussa on huomioitava, ettei koskaan olla lähellä kriittisen lämpövuon tilannetta. (Ganapathy 2015, 69–70.)

2.4 Suunnittelun vaiheet

Kattila suunnitellaan tuottamaan tilaajan tarvitsema höyryn massavirta sille määritellyssä paineessa ja lämpötilassa. Tilaaja voi myös ilmoittaa käytettävissä olevat polttoaineet sekä muut mahdolliset spesifikaatiot kattilan toiminnalle. Suunnittelun kriteereinä ovat taloudellisuus, turvallinen käyttö sekä vaikutukset ympäristöön.

Suunnittelu aloitetaan valitsemalla kattilan tyyppi ja polttotapa. Näiden perusteella piirretään prosessikaavio, jossa esitetään pääasialliset virtaukset. Prosessikaavio toimii lähtökohtana koko kattilan toiminnalle. Kaaviossa esitetään alustavasti kattilan massa- ja energiatase, jonka perusteella aloitetaan komponenttien lämpötekniinen mitoitus. Suunnittelun edetessä kaavioon lisätään prosessiin ja instrumentointiin liittyvät oheislaitteet.

Lämpöteknisestä mitoituksesta saadaan tarvittavat putkimäärät lämmönsiirtoon. Laskelmien perusteella kattila voidaan mallintaa 3D-ohjelmistolla sekä valmistaa työpiirustukset. Rakenteiden suunnittelussa on huomioitava oman tai tilaajan konepajan valmistusmenetelmät. Rakenteet tulee olla valmistettavissa käytettävissä olevalla konepajalla. Kattilan rakenteen ja alustavien työpiirustusten perusteella suoritetaan lujuustekniset laskelmat. Komponenttien materiaalit, seinämäpaksuus ja rakenne voivat muuttua, jolloin vaikutusta lämpötekniiseen mitoitukseen on tarkasteltava. Höyrykattilan suunnittelun vaiheet voidaan suurpiirteittäin jakaa kuvan 4 mukaan.



KUVA 4. Suunnittelun vaiheet

3 POLTTOAINE JA SAVUKAASUT

Höyrykattilan kannalta polttoaineen tärkein ominaisuus on lämpöarvo. Lämpöarvo ilmaisee polttoaineesta palamisreaktion kautta vapautuvan energian. Kaasumaisten polttoaineiden lämpöarvo ilmoitetaan MJ/nm³ ja kiinteiden sekä nestemäisten MJ/kg. Polttoaineille ilmoitetaan kalorimetrinen ja tehollinen lämpöarvo. Kalorimetrinen lämpöarvo määritetään pommikalorimetrillä laboratorioolosuhteissa. Kalorimetrinen lämpöarvo on niin sanottu ylempi lämpöarvo, koska polttoaineessa olevan veden höyrystyminen sisältyy energiasisältöön. Käytännössä polttoaineesta höyrystetty vesi kulkeutuu savukaasujen mukana pois kattilalaitoksesta. Alempi eli tehollinen lämpöarvo kuvaa paremmin käytännönolosuhteita. Kiinteiden ja nestemäisten polttoaineiden tehollinen lämpöarvo voidaan määrittää kaavalla 1. (Huhtinen ym. 2000, 43–44.)

KAAVA 1

$$H_u = 34,8 \cdot m_C + 93,8 \cdot m_{H_2} + 10,5 \cdot m_{SO_2} + 6,3 \cdot m_{N_2} - 10,8 \cdot m_{O_2} - h_{lg} \cdot m_{H_2O}$$

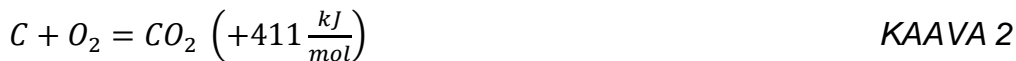
Lämpöarvon, palamisilmantarpeen ja savukaasujen muodostumisen laskentaan on tiedettävä polttoaineen kuiva-ainekoostumus ja kosteus. Mikäli mitoitusvaiheessa käytettävän polttoaineen tarkkaa koostumusta ei tunneta, voidaan käyttää polttoaineiden keskimääräisiä koostumuksia (taulukko 3).

TAULUKKO 3. Polttoaineiden keskimääräisiä kuiva-ainekoostumuksia (%)
(Huhtinen ym. 2000, 38).

Polttoaine	C	H	S	O	N	Tuhka	Kosteus %
Raskas polttoöljy	87,8	10,4	0,9	0,5	0,4	0,04	0,3
Jyrsinturve	55,0	5,5	0,2	32,6	1,7	5,0	50
Kivihilli	73,2	4,7	1,0	9,1	1,0	11,0	9
Puu	50,4	6,2	-	42,5	0,5	0,4	55

3.1 Palamisilmantarve

Polttoaineen palamisessa palavia komponentteja ovat hiili (C), vety (H₂) ja rikki (S). Palamisilmantarpeen ja savukaasujen muodostumisen määrittäminen aloitetaan komponenttien reaktiokaavoista. Kaavat 2–5 ovat nettoreaktiokaavoja, joissa esitetään lähtö- ja loppuaineet sekä vapautuva lämpöenergia. Käytännössä reaktiot ovat useita vaiheita sisältäviä reaktioketjuja. Palamisilman ja savukaasujen laskentaan kaavat ovat riittävät. (Huhtinen ym. 2000, 83–84)



Usein polttoaineet sisältävät useita erilaisia yhdisteitä. Kaavassa 5 on esimerkin vuoksi esitetty butaanin tasapainotettu reaktioyhtälö. Butaani voi olla osa polttoaineikaasun sisällöstä.



Tasapainotettujen reaktioyhtälöiden perusteella lasketaan komponenttien tarvitsema happimäärä kiloa polttoainetta kohden. Teoreettinen hapen tarve saadaan laskemalla happimäärät yhteen ja vähentämällä siitä polttoaineen sisältämän hapen kaavalla 6 (Huhtinen ym. 2000, 85).

$$\frac{n_{O_2(teor)}}{m_{pa}} = n_c + 0,5 \cdot n_{H_2} + n_s - n_{O_2} \quad \text{KAAVA 6}$$

Palamiseen tarvittava happi saadaan ympäristön ilmasta. Ilma sisältää typpeä noin 79 % ja happea 21 %. Teoreettinen kuiva palamisilmantarve lasketaan kaavalla 7 (Huhtinen ym. 2000, 85).

$$\frac{n_i(teor)}{m_{pa}} = \frac{n_{O_2(teor)}}{m_{pa}} \cdot \frac{1}{0,21} \quad \text{KAAVA 7}$$

Ympäristössä olevassa ilmassa on aina kosteutta. Palamisilman kosteus lisää ilmamäärää ja savukaasun vesihöyrypitoisuutta. Vesihöyryn määrä palamisilmassa voidaan laskea kaavalla 8 (Ganapathy 2015, 1).

$$m_{H_2O} = \frac{0.622P_{H_2O}}{(1.033 - P_{H_2O})}$$

KAAVA 8

jossa P_{H_2O} on vesihöyryn osapaine ilmassa.

Osapaine lasketaan kaavalla 9 (Ganapathy 2015, 1).

$$P_{H_2O} = \text{suhteellinen kosteus } \% \cdot P_g$$

KAAVA 9

jossa P_g on kylläisen höyryn absoluuttinen paine palamisilman lämpötilassa.

Käytännössä polttoaineen täydellistä palamista ei saavuteta teoreettisella ilmamäärällä. Palotapahtumaan on lisättävä yli-ilmaa, jonka määrää kuvataan ilmakertoimella (λ) (kaava 10) (Huhtinen ym. 2000, 86).

$$\frac{n_{i(tod)}}{m_{pa}} = \frac{n_{i(teor)}}{m_{pa}} \cdot \lambda$$

KAAVA 10

Ilmakerroin vaihtelee eri polttoaineilla ja polttotavoilla (taulukko 4). Liian suuri ilmakerroin lisää kattilan savukaasuhäviöitä. Liian pienellä ilmakertoimella palaminen on epätäydellistä ja hiilimonoksidin muodostuminen kasvaa. Tietyllä ilmakertoimella saavutetaan kokonaishäviöiden minimi, mihin tulisi pyrkiä (Huhtinen ym. 2000, 91). Laskennassa tarkastellaan savukaasun happipitoisuutta, jonka mitattu suositusarvo 2–30 MW:n kattiloille on alle 6 % (Suositus kotimaisista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilalaitosten teknisiksi ratkaisuiksi. 2012, 34).

TAULUKKO 4. Tyypillisiä ilmakertoimia (Huhtinen ym. 2000, 86)

Polttoaine	Ilmakerroin (λ)
Hiili	1,15 – 1,35
Kaasu	1,02 – 1,10
Raskasöljy	1,03 – 1,10
Turve	1,15 – 1,35
Puujäte	1,15 – 1,50
Jätelipeä	1,10 – 1,25

3.2 Savukaasun koostumus ja ominaisuudet

Teoreettinen ($\lambda = 1$) savukaasumäärä määritetään myös palamisreaktioiden ja polttoaineen koostumuksen perusteella. Komponentin palaessa syntyy palamis-

tuotetta yhtä monta moolia kuin polttoaineessa on palavaa komponenttia. Palamistuotteiden lisäksi savukaasussa on ilman mukana tullut typpi. Tyyppiä tulee 3,76-kertainen määrä palamisen tarvitsemaan happeen nähden. Savukaasumäärä saadaan kiloiksi kertomalla moolimäärät niiden molekyylipainoilla ja tilavuusyksikköön kertomalla niiden moolitilavuudella. Teoreettinen savukaasumäärä saadaan kaavalla 11. (Huhtinen ym. 2000, 86.)

$$\frac{n_{sk(teor)}}{m_{pa}} = n_c + n_{H_2} + n_s + 3,76 \cdot \frac{n_{O_2(teor)}}{m_{pa}} + n_n + n_{H_2O} \quad \text{KAAVA 11}$$

Todellinen savukaasumäärä saadaan laskettua kaavalla 12 (Huhtinen ym. 2000, 87).

$$\frac{n_{sk(tod)}}{m_{pa}} = \frac{n_{sk(teor)}}{m_{pa}} + (\lambda - 1) \cdot \frac{n_i(teor)}{m_{pa}} \quad \text{KAAVA 12}$$

Palamistuotteiden tilavuus- ja massaosuus savukaasussa määritetään kaavoilla 13 ja 14.

$$\frac{V_{sk}}{V_{pa}} = \frac{V_{CO_2}}{V_{pa}} + \frac{V_{H_2O}}{V_{pa}} + \frac{V_{N_2}}{V_{pa}} + \frac{V_{O_2}}{V_{pa}} + \frac{V_{SO_2}}{V_{pa}} \quad \text{KAAVA 13}$$

$$\frac{m_{sk}}{m_{pa}} = \frac{m_{CO_2}}{m_{pa}} + \frac{m_{H_2O}}{m_{pa}} + \frac{m_{N_2}}{m_{pa}} + \frac{m_{O_2}}{m_{pa}} + \frac{m_{SO_2}}{m_{pa}} \quad \text{KAAVA 14}$$

Savukaasujen ominaisuuksia tarvitaan lämmönsiirron laskentaan. Savukaasu sisältää useita eri komponentteja, joiden ominaisuudet ovat erilaiset. On määritettävä kaasuseoksen ominaislämpökapasiteetti, ominaisentalpia, lämmönjohdavuus, viskositeetti ja tiheys.

Ominaislämpökapasiteetti saadaan laskettua osakaasujen massaosuuksien mukaan painotettuna keskiarvona kaavalla 15 (Huhtinen ym. 2000, 97.)

$$c_{p_{sk}} = \sum m_n \cdot c_{p_n} \quad \text{KAAVA 15}$$

Savukaasun lämmönjohtavuus paranee lämpötilan noustessa. Kaasuseoksen lämmönjohtavuus lasketaan komponenttien lämmönjohtavuuksien ja massaosuuksien mukaan kaavalla 16 (Huhtinen ym. 2000, 97).

$$\lambda = 0,5 \cdot \left(\sum m_n \cdot \lambda_n + \frac{1}{\sum \frac{x_n}{\lambda_n}} \right) \quad \text{KAAVA 16}$$

Kaasun viskositeetti nousee lämpötilan noustessa, dynaaminen viskositeetti saadaan kaavalla 17 (Huhtinen ym. 2000, 98).

$$\eta = \frac{\frac{\sum \eta_n \cdot m_n}{\sqrt{M_n}}}{\frac{\sum m_n}{\sqrt{M_n}}} \quad \text{KAAVA 17}$$

Savukaasun tiheys normaalitilassa lasketaan kaavalla 18 (Huhtinen ym. 2000, 99).

$$\rho = \sum m_n \cdot \rho_n \quad \text{KAAVA 18}$$

Savukaasun tiheys laskee lämpötilan noustessa, tiheys tietyssä lämpötilassa saadaan kaavalla 19 (Huhtinen ym. 2000, 99).

$$\rho_x = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_1} \quad \text{KAAVA 19}$$

jossa alaindeksi 0 osoittaa NTP-tilaa.

Ominaisentalpia voidaan laskea kaasukomponenttien keskiarvona, jota painotetaan komponentin massaosuudella (kaava 20). Kaasukomponenttien ominaisentalpiat luetaan lämpötilan mukaan ideaalikaasuille saatavilla olevasta taulukosta. Ominaisentalpian laskeminen on helpointa tehdä taulukkolaskentaohjelmalla.

$$h_{sk} = \sum \frac{m_n}{m_{sk}} \cdot \frac{h_n}{M_n} \quad \text{KAAVA 20}$$

Polttoaineen lämpöarvo on yleensä ilmoitettu 25 °C:n lämpötilassa. Savukaasun ominaisentalpian referenssipiste asetettava samaksi, kun muodostetaan energiatasetta. Savukaasun ominaisentalpiasta vähennetään ominaisentalpia referenssipisteessä (kaava 21).

$$h_{sk} = \sum \frac{m_n}{m_{sk}} \cdot \frac{(h_n - h_{n,0})}{M_n}$$

KAAVA 21

3.3 Savukaasun lämpötila kattilan osissa

Lämmönsiirtimien mitoittamiseen tarvitaan savukaasun lämpötilat ennen ja jälkeen lämmönsiirtimien. Savukaasun loppulämpötila ilman esilämmittimen tai ekonomaiserin jälkeen on yleensä noin 150–200 °C. Loppulämpötila, jonka yläpuolella savukaasun täytyy pysyä, tiedetään määrittämällä happo- ja vesikastepisteet.

Savukaasussa olevan veden kastepiste katsotaan osapaineen mukaan höyrytaulukoista. Kun veden ainemäärän osuus savukaasussa on esimerkiksi 0,3, on osapaine 0,3 bar kokonaispaineen ollessa 1 bar. Kyseisessä paineessa oleva vesihöyry lauhtuu 70 °C:n lämpötilassa. (Huhtinen ym. 2000, 99.)

Mikäli polttoaineessa on rikkiä, muuttuu se palamisreaktiossa rikkidioksidiksi (SO₂). Rikkidioksidista noin 1–5 % muuttuu rikkitrioksidiksi (SO₃). Rikkitrioksidi vesihöyryn kanssa voi muodostaa rikkihappoa. Rikkihappo tiivistyy, kun savukaasu koskettaa happokastepistettä alhaisemmassa lämpötilassa olevaa putkea. Happokastepiste riippuu ilmaylimäärästä, polttoaineen rikkipitoisuudesta, rikkidioksidin muutoksen määrästä rikkitrioksidiksi sekä vesihöyryn osapaineesta. (Ganapathy 2003, 278.) Happokastepiste (°C) voidaan arvioida kaavalla 22, johon kaasujen paineet on muutettava normaalin ilmakehän paineeseen (Ganapathy 2015, 39).

$$T_{dp} = 255 + 27.6 \log p_{H_2O} + 18.7 \log p_{SO_3}$$

KAAVA 22

Savukaasun lämpötila lämmönsiirtimien sisään- ja ulostuloissa lasketaan ominaisentalpian avulla. Lasketaan savukaasun ominaisentalpia loppulämpötilassa luvun 3.2 mukaisesti. Käyttämällä kaavaa 23 voidaan laskea ominaisentalpia ennen lämmönsiirintä. Savukaasun koostumuksen ja lasketun ominaisentalpian mukaan luetaan savukaasun lämpötila ideaalikaasutaulukosta.

$$h_{sk,i} = \frac{\phi_n}{\dot{m}_{sk}} + h_{sk,e}$$

KAAVA 23

4 HÖYRYKATTILAN ENERGIATASE

Mitoitustilanteessa höyrykattila on vakaassa tilassa oleva termodynaaminen systeemi, jolloin massatase määritetään kaavalla 24.

$$\sum_i \dot{m}_i = \sum_e \dot{m}_e \quad \text{KAAVA 24}$$

Höyrykattilaan tulevia energiovirtoja ovat polttoaine-, palamisilma- ja syöttövesivirta. Poistuvia energiovirtoja ovat tuorehöyry- ja savukaasuvirta sekä kattilan lämpöhäviöt. Energiatase voidaan kirjoittaa kaavalla 25.

KAAVA 25

$$\dot{m}_{pa} \cdot H_u + \dot{m}_i \cdot h_i + \dot{m}_{sv} \cdot h_{sv} = \dot{m}_{th} \cdot h_{th} + \dot{m}_{sk} \cdot h_{sk,loppu} + \Phi_{lh}$$

Lämmönsiirtimien tarvitsema lämpövirta saadaan kaavalla 26, kun käytetään kyseessä olevaa massavirtaa ja ominaisentalpian muutosta.

$$\Phi = \dot{m} \cdot \Delta h \quad \text{KAAVA 26}$$

Kattilan terminen teho on vesi-höyrypiiriin siirretty kokonaislämpövirta, joka lasketaan kaavaa 26 soveltaen.

$$\Phi_{term} = \dot{m} \cdot (h_{th} - h_{sv})$$

Kattilan häviöitä ovat polttoaineen palamattomat kaasut ja palamaton aines tuhassa, poistuvan tuhkan ja savukaasun terminen lämpö sekä kattilan johtumis- ja säteilyhäviöt. Lämpöteknisessä mitoituksessa huomioidaan lämpöhäviöt kattilan pinnalta ja poistuvan savukaasun lämpövirta.

Johtumisen- ja säteilynhäviöt, eli lämpöhäviöt kattilan pinnalta, ovat noin 0,2–1,2 % kattilan täyden kuorman tehosta. Eristetyllä kattilalla, jonka seinämän lämpötila on alle 55 °C, lämpöhäviöt ovat noin 200–300 W/m². Yleensä palamisilma otetaan kattilahuoneen yläosasta, jolloin kattilan häviöillä lämmitetty ilma saadaan osittain takaisin. Lämpöhäviö kattilan pinnalta voidaan tarkemmin laskea kaavalla 27. (Huhtinen ym. 2000, 101–110.)

$$\Phi_{lh} = (\alpha_k + \alpha_r) \cdot A \cdot (T_w - T_{ymp}) \quad \text{KAAVA 27}$$

Palamatta jääneet kaasut ovat lähinnä hiilimonoksidia tai erilaisia hiilivetyjä. Kattilan hyötysuhde heikkenee muutaman prosentin, jos savukaasun hiilimonoksidipitoisuus on 0,5 % (5000 ppm). Palamattoman hiilimonoksidin määrä kattiloissa on yleensä kuitenkin hyvin pieni (50 ppm). Tällöin niistä aiheutuvat häviöt ovat vain prosentin osia. (Huhtinen ym. 2000, 105.)

Palamatonta polttoainetta poistuu kattilasta lentotuhkan ja tulipesän pohjatuhkan kautta. Huonolaatuisilla polttoaineilla palamattomien häviöt voivat olla useita prosentteja. Neste- ja kaasupolttoaineille hyvin säädetyillä polttolaitteilla häviöt voi olla alle yhden prosentin. (Huhtinen ym. 2000, 106–107.)

Kattilan hyötysuhde on hyödyksi saadun lämpövirran suhde tuotuun lämpövirtaan. Hyötysuhdetta määritettäessä kattilalle asetetaan taseraja, jonka ylitse meneviä energiavirtoja tarkastellaan. Laskenta on näin ollen tapauskohtaista ja siihen vaikuttavat käytössä olevat laitteet ja taserajan asettaminen. Yksinkertaistettuna hyötysuhde on hyödyksi saatava teho jaettuna polttoaineteholla (kaavat 28–29). (Huhtinen ym. 2000, 101.)

$$n = \frac{\Phi_{hyöty}}{\Phi_{tuotu}} \quad \text{KAAVA 28}$$

$$\phi_{pa} = \dot{m}_{pa} \cdot H_u \quad \text{KAAVA 29}$$

Mitoituksen alkuvaiheessa palamisilman ja savukaasun määrät ovat laskettuna kiloa polttoainetta kohden. Kun tiedetään terminen teho, savukaasun loppulämpötila sekä arvioidaan kattilan lämpöhäviö, voidaan energiataseesta laskea polttoaineen massavirta. Polttoaineen massavirran perusteella voidaan laskea palamisilman ja savukaasun massavirrat kaavoilla 30 ja 31.

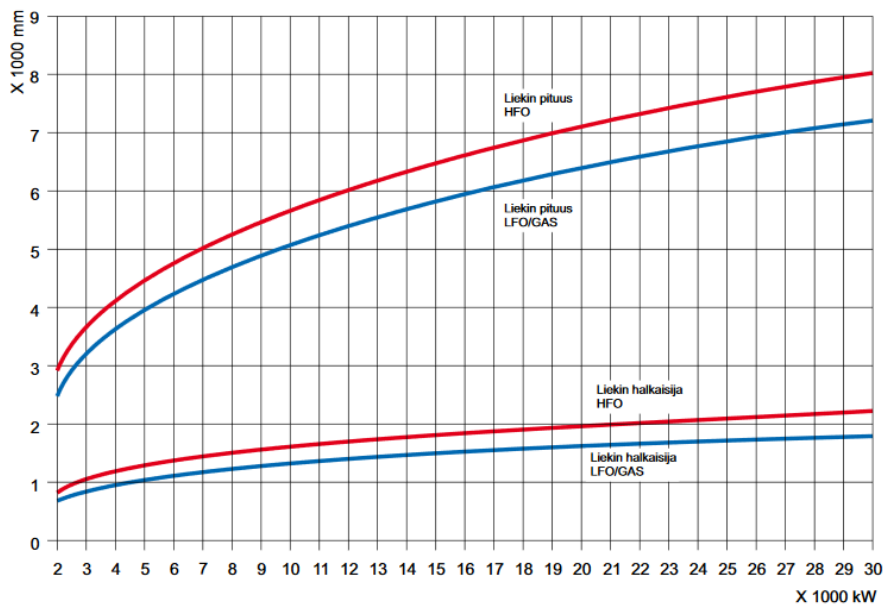
$$\dot{m}_i = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{pa}} \cdot \dot{m}_{pa} \quad \text{KAAVA 30}$$

$$\dot{m}_{sk} = \frac{\dot{m}_{sk}}{\dot{m}_{pa}} \cdot \dot{m}_{pa} \quad \text{KAAVA 31}$$

5 TULIPESÄ

Tulipesän mitoitus on yksi tärkeimpiä kattilan osa-alueita, ja sen toiminta vaikuttaa kaikkiin muihin komponentteihin sen jälkeen. Lämmönsiirtomuotona tulipesässä huomioidaan vain säteilylämmönsiirto. Jos tulipesä on alimitoitettu, tulistimille saapuvan savukaasun lämpötila on korkea ja niille kohdistuu suuri määrä suoraa lämpösäteilyä. Tämä voi johtaa suuriin putkilämpötiloihin ja tuhkan sulamiseen. Liian suuressa tulipesässä savukaasun poistumislämpötila jää alhaiseksi ja kattilan loppuosien kuten tulistimien ja ekonomaiserin pinta-alat kasvavat suureksi. Liian suuret pinta-alat eli materiaalmäärät kasvattavat kustannuksia. (Ganapathy 2015, 53.)

Tulipesän mitoituksessa on otettava huomioon polttoaineen polttotekniikka. Polttimilla toteutettavan tulipesän mitoitus kulkee usein rinnan polttimen valmistajan tietojen perusteella (kuva 5). Öljy- ja kaasukattiloiden tulipesän koon määrää näin ollen lähinnä liekin tilantarve. Kiinteiden polttoaineiden arina- ja leijutuspolttotekniikan suunnittelu tulipesään lukeutuu yleensä kattilan suunnittelijalle. Arina- ja leijutustekniikoilla on huomioitava muun muassa vaikutukset savukaasun maksiminopeudesta ja muurauksen määrästä.



KUVA 5. Esimerkki polttimen liekin mitoista (Oilon, linkit Teollisuudelle -> Teollisuuspolttimet -> Oilon polttimet 5-sarja)

5.1 Koon määrittäminen

Tulipesän kokoa voidaan alustavasti määrittää rasitusluvuilla. Rasitusluvut ovat yksinkertaisesti tuotu lämpöteho jaettuna tulipesän tilavuudella tai pinta-alalla. Tilavuusrasitus on tärkeämpi hankalasti poltettavilla ja huonolla lämpöarvolla olevilla polttoaineilla. Pienellä tilavuusrasituksella eli suurella tulipesällä savukaasun viipymä tulipesässä on pidempi, jolloin palamistapahtuma on täydellisempi. Pinta-alarasitus tulipesän teholliselle jäähdytyspinta-alalle kuvaa paremmin lämpövuota höyrystinputkien sisällä. Höyryn paine vaikuttaa myös tulipesän kokoon ja sijoitteluun. Kun höyryn paine on pieni, veden höyrystymislämpö on suurempi. Tällöin tulipesän ja höyrystimen pinta-alaa tarvitaan enemmän kuin suuremmilla paineilla. (Ganapathy 2015, 46–47.)

Tulipesän alustava koko voidaan määrittää käyttämällä kokemusperäistä pinta-ala- tai tilavuusrasitusta. Arvioidaan korkeuden ja leveyden suhde sekä syvyyden ja leveyden suhde. Mittojen suhteilla saadaan alustavasti määriteltyä kattilan kokoa.

Pinta-alarasitus lasketaan kaavalla 32, jossa b_1 ja b_2 ovat tulipesän leveys ja syvyys (Teir – Jokivuori 2002, 7).

$$q_a = \frac{\phi_{pa}}{b_1 \cdot b_2} \quad \text{KAAVA 32}$$

Tilavuusrasitus saadaan laskettua kaavalla 33 (Teir – Jokivuori 2002, 7).

$$q_v = \frac{\phi_{pa}}{b_1 \cdot b_2 \cdot h} \quad \text{KAAVA 33}$$

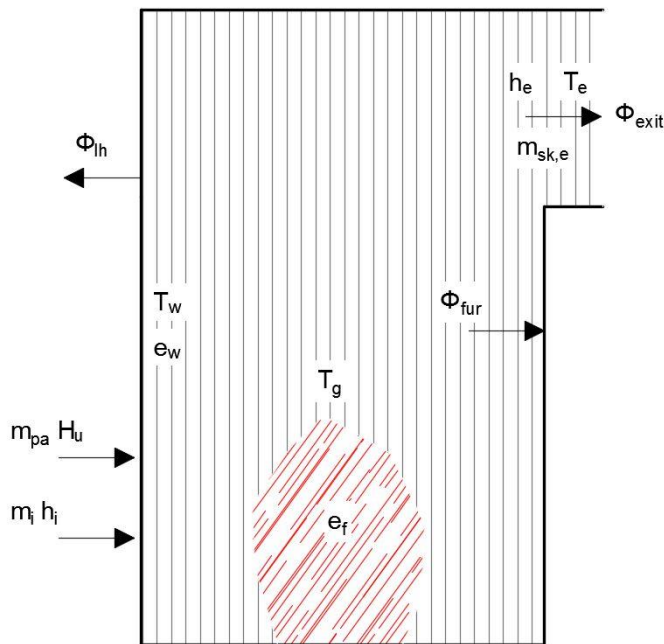
5.2 Kuormitus

Savukaasun lämpötilat jaetaan tässä tapauksessa tulipesässä olevaan ja sieltä poistuvaan savukaasuun (kuva 6). Lämpötilojen määrittäminen tulipesässä ei ole tarkkaa tiedettä, eikä sen laskemiselle ole yhtenäistä menetelmää. Tulipesässä olevan savukaasun lämpötila voidaan määrittää usealla tavalla. Jotkut käyttävät tulipesästä poistuvan savukaasun lämpötilaa, osa adiabaattista palamislämpötilaa. Tulipesästä poistuvan savukaasun lämpötilaan voidaan myös lisätä 160–175 °C, jolla arvioidaan tulipesässä olevan savukaasun lämpötilaa. On kuitenkin

huomattava, että poistuvan savukaasun lämpötila riippuu tulipesän tyypistä, ilmakehän lämpötilasta, savukaasun takaisinvirtauksesta, polttotapahtuman sijainnista ja kattilan kuormasta. Yksinkertaistettu menetelmä arvioimaan tulipesän vastaanottamaa lämpöenergiaa on määritetty kaavalla 34. (Ganapathy 2015, 53.)

$$\Phi_{fur} = A_p \varepsilon_w \varepsilon_f C (T_g^4 - T_w^4) = m_{pa} H_u - m_{sk,e} h_{sk,e} - \phi_{lh} \quad \text{KAAVA 34}$$

jossa T_g on savukaasun lämpötila tulipesässä.



KUVA 6. Tulipesän laskentamalli

Poistuvan savukaasun lämpötila iteroidaan kaavan 34 avulla. Arvataan poistuvan kaasun lämpötila ja iteroidaan, kunnes yhtälö on tasapainossa. Muuttamalla tulipesän kokoa eli tehollista lämmönsiirto pinta-alaa muuttuu edelleen savukaasun poistolämpötila. Tulipesästä poistuvan savukaasun lämpötila voidaan myös laskea lähtemällä liikkeelle kattilasta savupiippuun poistuvan savukaasun lämpötilan ja ominaisentalpian avulla kaavoilla 20 ja 23.

Tulipesän seinien emissiivisyys riippuu höyrystinputkien ulkopinnan puhtaudesta ja vaihtelee 0,6–0,9. Nuohoukset muuttavat seinän emissiivisyyttä, jonka vai-

kutus on arvioitava. Liekin emissiivisyys määritetään kaavalla 35 (Ganapathy 2015, 53).

$$\varepsilon_f = \beta(1 - e^{-KPL}) \quad \text{KAAVA 35}$$

jossa P on kaasun paine.

Karakteristinen mitta tilalle, joka on ympäröity lämpöä vastaanottavalla pinnalla, lasketaan kaavalla 36 (Ganapathy 2015, 408).

$$L = \frac{3.4abc}{2(ab+bc+ca)} = \frac{1.7}{\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c}\right)} \quad \text{KAAVA 36}$$

jossa a , b ja c ovat laskettavan tilan mitat.

Himmeälle liekille vaimennuskerroin K määritetään kaavalla 37 (Ganapathy 2015, 53).

$$K = (0,8 + 1,6 \cdot P_{H_2O}) \cdot (1 - 0,00038 \cdot T_g) \cdot \frac{(P_{CO_2} + P_{H_2O})}{[(P_{CO_2} + P_{H_2O}) \cdot L]^{0,5}} \quad \text{KAAVA 37}$$

Vaimennuskerroin puolikirkkaalle liekille lasketaan kaavalla 38, johon on tiedettävä tuhkapartikkelin keskimääräinen koko (d_m) ja konsentraatio (μ) savukaasussa (Ganapathy 2015, 54).

KAAVA 38

$$K = (0,8 + 1,6 \cdot P_{H_2O}) \cdot (1 - 0,00038 \cdot T_g) \cdot \frac{(P_{CO_2} + P_{H_2O})}{[(P_{CO_2} + P_{H_2O}) \cdot L]^{0,5}} + \frac{7\mu}{(d_m^2 \cdot T_g^2)^{0,33}}$$

Liekin täyttökerroin (β) on himmeille liekeille 1,0, kirkkaille nestemäisten polttoaineiden liekeille 0,75 ja kirkkaille ja puolikirkkaille kiinteiden polttoaineiden liekeille 0,65. Tulipesän osat, joita liekki ei täytä, saavat vain savukaasun lähettämää lämpösäteilyä. Usein liekit ovat sekoitus kirkkaita ja himmeitä osia. Emissiivisyys voidaan silloin määrittää yhdistämällä ne kaavalla 39. (Ganapathy 2015, 54.)

$$\varepsilon_f = m \cdot \varepsilon_1 + (1 + m)\varepsilon_n \quad \text{KAAVA 39}$$

jossa ε_1 ja ε_n ovat kirkkaan ja himmeän liekin osuudet. Kerroin m on maakaasulle 0,1, polttoöljyille 0,55 ja kiinteille polttoaineille 1. (Ganapathy 2015, 54.)

5.3 Lämpösäteily ulostulossa

Tulipesän ulostulossa oleva screeni tai tulistin vastaanottaa suoraa lämpösäteilyä tulipesästä. Ulostuloon tulevan lämpösäteilyn määrää voidaan arvioida tulipesän keskimääräisellä lämpövuolla ja ulostulon pinta-alalla. Kaavasta 40 saadaan säteilyn aiheuttama lämpöteho. Lämpötehoa tulisi korjata ulostulon todellisella emissiivisyydellä ja lämpövuon jakautumisella suhteessa liekin pituuteen. Korjauskertoimelle f on olemassa kuvaajia ja taulukoita, joiden perusteella voidaan yleisesti käyttää kertoimena 0,5–0,6. (Ganapathy 2015, 65.)

$$\Phi_{exit} = q_f \cdot A_{exit} \cdot f \quad \text{KAAVA 40}$$

Kaavalla 41 voidaan arvioida lämpösäteilyn osuus ulostulon ensimmäiseen putkiriviin (Ganapathy 2015, 61).

$$a_1 = 3.14 \left(\frac{d_a}{2S_t} \right) - \frac{d_a}{S_t} \left[\sin^{-1} \left(\frac{d_a}{S_t} \right) + \left[\left(\frac{S_t}{d_a} \right)^2 - 1 \right]^{0.5} - \frac{S_t}{d_a} \right] \quad \text{KAAVA 41}$$

jossa S_t on putkijako.

Toisen rivin osuus lasketaan kaavan 42 mukaan. Laskenta jatkuu samalla tavalla haluttuun putkiriviin saakka (Ganapathy 2015, 61).

$$a_2 = (1 - a_1)a_1 \quad \text{KAAVA 42}$$

Tyypillisesti ensimmäiset putkirivit yhdestä viiteen absorboivat säteilyn lähes täysin. Ensimmäinen putkirivi vastaanottaa suurimman säteilyn. Jos säteilyteho on suuri, tulisi käyttää suurempaa putkijakoa. Tällöin lämpösäteily jakautuu paremmin kaikkiin putkiriveihin, eikä ensimmäisillä riveillä ole suurinta lämpövuota. (Ganapathy 2015, 65.)

6 VESIHÖYRYPIIRI

Luonnon- ja pakkokiertoisissa kattiloissa höyrystimeen tulevaa vettä ei voida täysin höyrystää yhdellä kierrolla. Kiertoluvulla (CR) kuvataan höyrystimeen tulevan virtauksen ja kehitetyn höyryn suhdetta. Kiertoluvulla 10 oleva höyrykat-tila, jonka höyryntuotto on 15 t/h, tarkoittaa, että 150 t/h vesihöyryseosta virtaa höyrystimen läpi. Höyrypitoisuus nousuputken ulostulossa on näin ollen 10 %. Kattilalle määrätty kiertoluku on keskimääräinen arvo. Kiertoluku riippuu kierron vastaanottamasta lämpöenergiasta ja vaihtelee eri piireissä. Piireissä voi olla erikokoiset putket ja virtausvastukset, mikä määrää painehäviön ja kiertoluvun. Symmetriset tulipesän putket ja tasainen kuormitus olisikin kierron vuoksi par- hain ratkaisu. Matalapaineisilla kattiloilla, alle 40 bar g, kiertoluku voi olla 15–40, sitä suuremmilla paineilla 5–15. (Ganapathy 2015, 70–75.) Kiertoluvun yhteys höyrypitoisuuteen nähdään kaavassa 43 (Ganapathy 2003, 213).

$$CR = \frac{1}{x}$$

KAAVA 43

6.1 Kiertolaskenta

Luonnonkiertoisen kattilan kiertolaskenta on iteratiivinen prosessi. Kiertoluku on ensin arvattava perustuen kattilan rakenteeseen ja kokemusperäiseen tietoon. Lasketaan saatavilla oleva kiertovoima ja kierron painehäviöt. Mikäli ne täs- määvät, on kiertoluku arvioitu oikein. Muutoin on kiertoluku arvattava uudelleen ja suorittaa kiertolaskenta uudelleen. Kun kiertolaskenta on suoritettu, tiedetään massavirta, kiertoluku, virtausnopeudet sekä ulostulon höyrypitoisuus jokaises- sa piirissä. Tarkistetaan pienimmällä kiertoluvulla ja suurimmalla lämpökuormal- la olevan piirin potentiaali kriittiselle lämpövuoilmiölle. Jos potentiaali on ole- massa, kiertolaskentaa tarkastetaan uudelleen ja mahdollisesti kasvatetaan kiertolukua. (Ganapathy 2015, 77–78.)

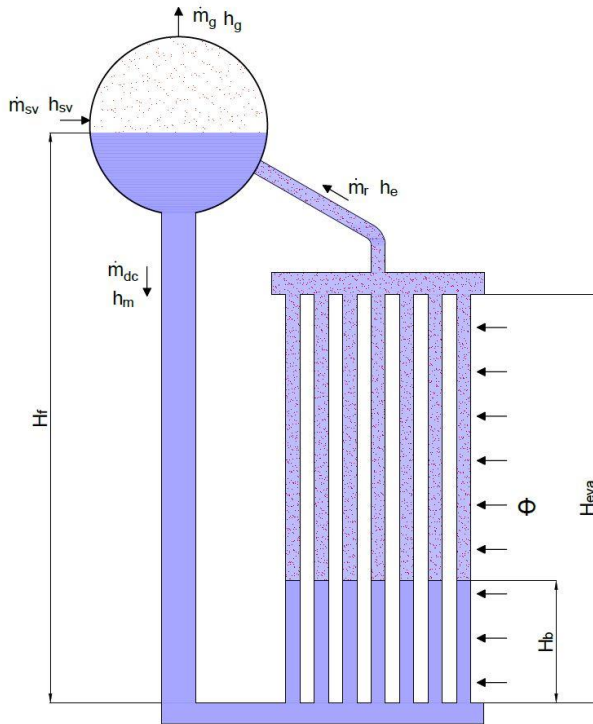
Tulipesässä ei välttämättä tuoteta koko kattilan höyrykapasiteettia, vaan se jae- taan myös erilliselle höyrystimelle ja membraaniseinille. Tuotetun höyryn määrä voidaan jakaa prosentuaalisesti eri kiertopiireille.

Lasketaan laskuputkeen saapuvan veden ominaisentalpia höyrylieriöön muodostetusta energiataaseesta kaavalla 44 (Ganapathy 2015, 78).

$$h_{sv} + CR \cdot h_e = h_g + CR \cdot h_m$$

KAAVA 44

jossa h_e ja h_m ovat ominaisentalpiat höyrystimen ulostulossa ja laskuputkessa (kuva 7).



KUVA 7. Luonnonkierron laskentamalli

Laskuputkeen virtaava vesi alijäähtyy hydrostaattisen paineen vaikutuksesta, jolloin sen lämpötila on alle höyrystymislämpötilan. Vesi on lämmitettävä höyrystymislämpötilaan. Korkeus, jossa höyrystyminen alkaa, voidaan laskea kaavalla 45 (Ganapathy 2015, 78).

$$H_b = L \cdot CR \cdot m_g \frac{h_l - h_m}{\phi_{fur}}$$

KAAVA 45

Lasketaan saatavilla oleva kiertovoima kaavalla 46 (Huhtinen ym. 2000, 114).

$$\Delta p_{st} = g \cdot (H_F - H_b) \cdot (\rho_{dc} - \rho_r)$$

KAAVA 46

jossa H_F on hydrostaattinen etäisyys lieriön vesipinnasta höyrystinputkien alapäähän.

Verrataan kiertovoimaa piirin painehäviöihin kaavalla 47.

$$\Delta p_{st} = \Delta p_{häviö} \quad \text{KAAVA 47}$$

6.1.1 Yksifaasipainehäviöt

Höyrystimen yksifaasipainehäviöt muodostuvat kitka-, kerta- ja hydrostaattisesta painehäviöstä. Vesi virtaa nesteinä laskuputken kautta kokoojakammioon, josta edelleen höyrystinputkessa höyrystymiskorkeuteen saakka. Suositeltu virtausnopeus laskuputkessa on 1–3 m/s ja höyrystinputkessa 0,4–3,6 m/s (Ganapathy 2015, 85; Kitto – Stultz 2005, 3–9). Painehäviöt käsitellään erikseen putkikomponenteille.

Dynaaminen painehäviö voidaan laskea kaavalla 48 (Ylikunnari 2013, 26).

$$\Delta p_{dyn} = \left(f \cdot \frac{l}{d} + \sum \xi \right) \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad \text{KAAVA 48}$$

Kitkakerroin turbulentille putkivirtaukselle lasketaan kaavalla 49 (Ylikunnari 2013, 21).

$$f = 0,25 \left[\log \left(\frac{e}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2} \quad \text{KAAVA 49}$$

Kokoojakammion painehäviö muodostuu virtauksen jakaantumisesta kammioon ja siitä höyrystinputkiin. Lasketaan painehäviö kertavastuksena kaavalla 50 (Ylikunnari 2013, 22).

$$\Delta p_{\xi} = \xi \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad \text{KAAVA 50}$$

Mikäli kokoojakammiossa on kuristusaukko, voidaan kaavaa 50 käyttää myös sen painehäviön laskentaan. Purkauskertoimen ja kertavastuskertoimen välillä on yhteys kaavan 51 mukaan (Ylikunnari 2013, 25).

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\xi}} \quad \text{KAAVA 51}$$

90 asteen kulmalla olevalle aukolle purkauskertoimena voidaan käyttää 0,6. Virtausnopeus kuristusaukosta määritetään jatkuvuusyhtälön perusteella (kaava 52).

$$A_1 v_1 \rho_1 = A_2 v_2 \rho_2 \quad \text{KAAVA 52}$$

Höyrystymiskorkeuteen saakka vaikuttava hydrostaattinen painehäviö lasketaan kaavalla 53.

$$\Delta p_g = \rho g H_b \quad \text{KAAVA 53}$$

6.1.2 Kaksifaasipainehäviöt

Höyrystinputkessa virtaavan vesi-höyryseoksen painehäviö muodostuu kitka- ja kertahäviöstä, hydrostaattisesta häviöstä sekä kiihtyvyyshäviöstä. Höyrylieriön sisäiset painehäviöt, jotka muodostuvat pääasiassa sykloneista, voidaan arvioida olevan 3,5 kPa (Ganapathy 2015, 80). Laskenta jaetaan höyrystimessä olevaan höyrystinputkeen, kokoojakammioon sekä kokoojakammioista lähtevään nousuputkeen.

Martinellin ja Nelsonin menetelmässä kaksifaasivirtauksen dynaaminen painehäviö otetaan huomioon kaksifaasitekijällä kaavoilla 54 ja 55 (Huhtinen ym. 2000, 115–116).

$$\Delta p_R = R \cdot \left(f \cdot \frac{l}{d} + \sum \xi \right) \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad \text{KAAVA 54}$$

$$R = \frac{\rho_g(1-x) + \rho_l x}{\rho_g} \quad \text{KAAVA 55}$$

Hydrostaattisen ja kiihtyvyyden painehäviön laskentaan voidaan yksinkertaisuuden vuoksi käyttää homogeenista mallia, kun alkutilanteessa höyrypitoisuus on nolla (kaavat 56–57) (VDI-GVC 2010, 1122).

$$\Delta p_G = \frac{\rho_l \cdot \rho_g \cdot g \cdot L \cdot \sin(\varphi)}{x_{out} \cdot (\rho_l - \rho_g)} \cdot \ln \left(\frac{x_{out} \cdot (\rho_l - \rho_g)}{\rho_g} + 1 \right) \quad \text{KAAVA 56}$$

jossa kulma φ on pystysuoralle höyrystimelle 90°.

$$\Delta p_A = G^2 \cdot x_{out} (\rho_g^{-1} - \rho_l^{-1}) \quad \text{KAAVA 57}$$

Massavuo G lasketaan kaavalla 58 (Hakkarainen 2013, 16).

$$\dot{m} = GA = G \frac{\pi d_i^2}{4} \quad \text{KAAVA 58}$$

6.1.3 Kriittinen lämpövuoto

On olemassa useita korrelaatioita kriittiselle lämpövuolle. Kasterin korrelaatio antaa sallitun höyrypitoisuuden annetulla massavuolla, lämpövuolla, paineella ja putken sisähalkaisijalla. Höyrystimen höyrypitoisuus ei siis saisi nousta yli sallitun höyrypitoisuuden (kaavat 59–61). Macbethin korrelaatiolla voidaan laskea kriittinen lämpövuoto, jossa kuplakiehunta häiriintyy (kaava 62). (Ganapathy 2015, 82–83.)

Kun $0,49 < P < 2,94$ MPa.

$$x_c = 25,6(1000q)^{-0,125} G_i^{-0,33} (1000d_i)^{-0,07} e^{0,1715P} \quad \text{KAAVA 59}$$

Kun $2,94 < P < 9,8$ MPa.

$$x_c = 46(1000q)^{-0,125} G_i^{-0,33} (1000d_i)^{-0,07} e^{0,0255P} \quad \text{KAAVA 60}$$

Kun $9,8 < P < 19,6$ MPa.

$$x_c = 76,6(1000q)^{-0,125} G_i^{-0,33} (1000d_i)^{-0,07} e^{0,0795P} \quad \text{KAAVA 61}$$

$$q_c = 0.5025 h_{lg} d_i^{-0.1} (G_i)^{0.51} (1 - x) \quad \text{KAAVA 62}$$

Suurin lämpövuoto tulipesässä on polttimen tai polttolaitteen edessä. Lämpövuoto pienenee suhteessa kattilan korkeuteen tai pituuteen. Suurimman lämpövuon suhde keskimääräiseen lämpövuohon voi olla esimerkiksi 20–30 %. Keskimääräinen lämpövuoto kohdistetulle tulipesän pinta-alalle voidaan laskea kaavalla 63. (Ganapathy 2003, 347.)

$$q_p = \frac{\Phi_{fur}}{A_p} \quad \text{KAAVA 63}$$

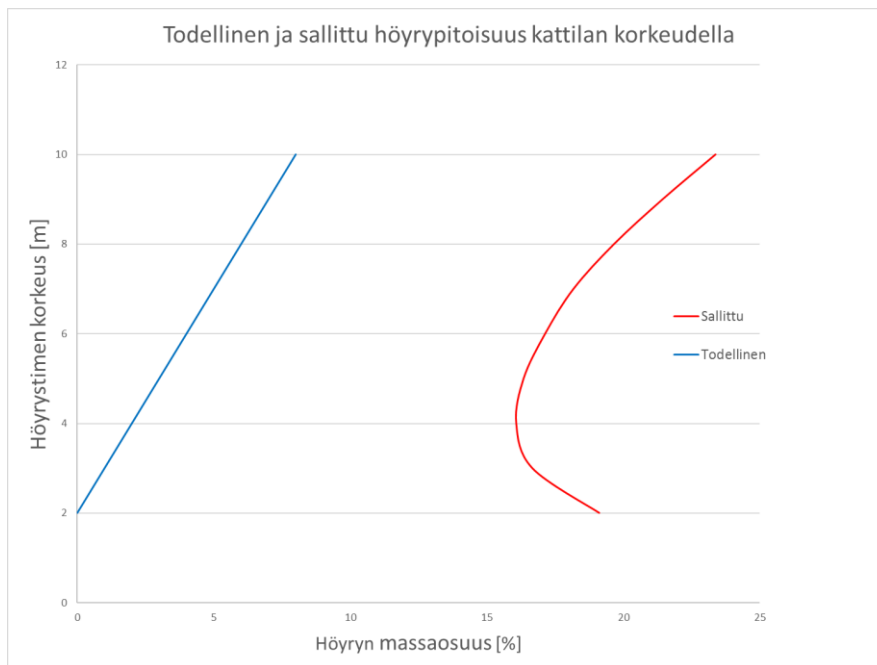
Lämpövuoto putken sisällä lasketaan kaavalla 64 (Ganapathy 2015, 65).

$$q_i = \frac{q_p S_t d}{\left(\frac{\pi d}{2} + 2h\right) d_i}$$

KAAVA 64

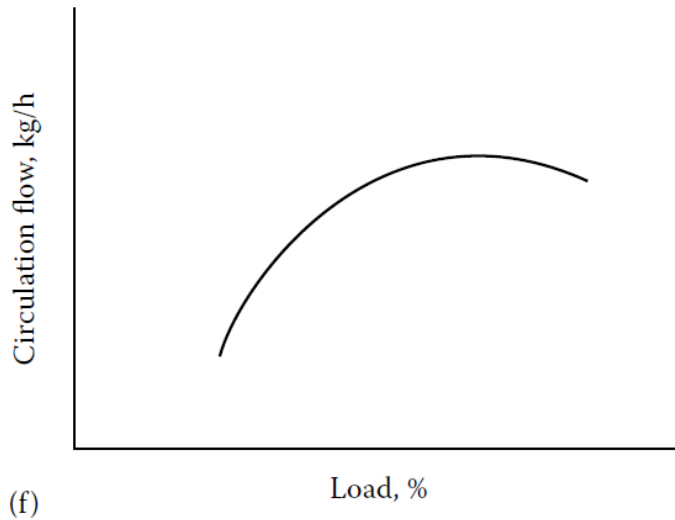
jossa h on membraaniseinän putkien välissä olevan evän leveys.

Todellisen ja sallitun höyrypitoisuuden jakauma on esimerkin vuoksi esitetty kuvassa 8. Tässä tapauksessa luonnonkiertoinen höyrystin olisi 10 metriä korkea, jossa poltin olisi 4 metrin korkeudella. Polttimen kohdalla on suurin lämpövuoto, jolloin sallitun höyrypitoisuuden käyrä taittuu vasemmalle. Kiertolaskennan perusteella laskettu todellinen höyrypitoisuus nousisi lineaarisesti höyrystymiskorkeudesta höyrystimen ulostuloon.



KUVA 8. Todellinen ja sallittu höyrypitoisuus kattilan korkeudella

Kuvan 8 perusteella voisi ajatella, että kattilaa voidaan ylikuormittaa sallittuun höyrypitoisuuteen saakka. Kun kattilan kuorma kasvaa, kasvaa myös lämpövuoto höyrystimen osissa (kuva 9). Höyrystinputkissa kehittyä enemmän höyryä, jonka tiheyden muutos kasvattaa massavirtaa höyrystimen läpi. Kattilan kuormituksen kasvaessa yli mitoitettun tehon painehäviöt alkavat määräämään kiertoa. Massavirta ja kiertoluku pienenevät, jolloin höyrypitoisuus kasvaa. Kattilan ylikuormitusta ei näin ollen suositella, ellei kriittisen lämpövuon tilannetta tarkastella. (Ganapathy 2015, 81.)



KUVA 9. Kierron massavirta kuormituksen funktiona (Ganapathy 2015, 73)

6.2 Höyrylieriö

Höyrylieriön päätehtävät ovat syöttää vettä höyrystimeen, erottaa nestepisarat höyrystimeltä tulevasta vesihöyryseoksesta sekä ulospuhaltaa epäpuhtaudet vesikierrosta. Höyrylieriön paine on kattilasta lähtevän tuorehöyryn paineen ja tulistimien painehäviön summa. Höyrylieriön massatase voidaan kirjoittaa kaavan 65 mukaisesti (Ganapathy 2015, 71). Ulospuhalluksen mukana poistuvaa veden määrää ei huomioida tässä tapauksessa.

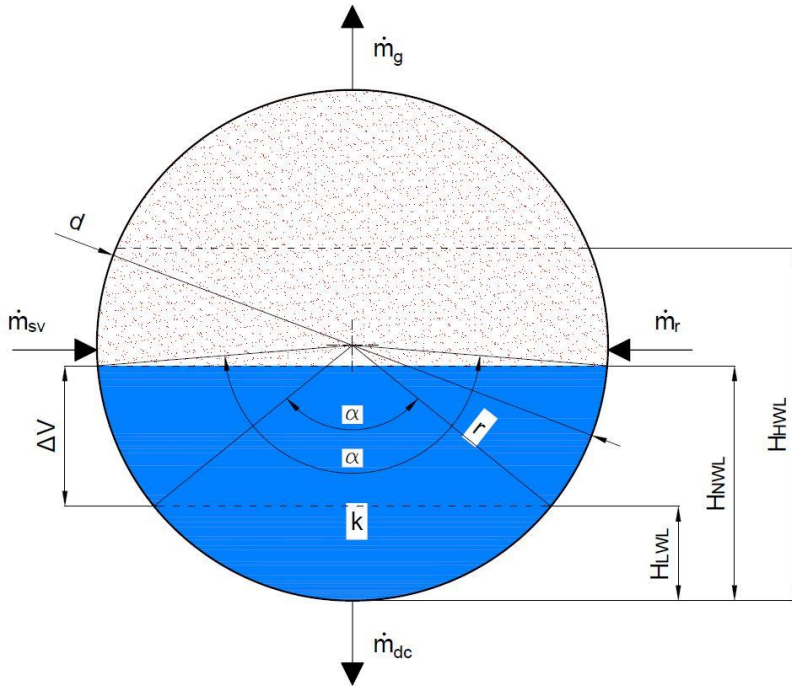
$$\dot{m}_{sv} + \dot{m}_r = \dot{m}_g + \dot{m}_{dc} \quad \text{KAAVA 65}$$

Kaavasta 66 voidaan kirjoittaa kiertoluvun mukaan kaava 65 (Ganapathy 2015, 71)

$$\dot{m}_r = \dot{m}_{dc} = CR \cdot \dot{m}_g \quad \text{KAAVA 66}$$

Höyrylieriön koko arvioidaan tilanteessa, kun höyrylieriöön ei syötetä syöttövetä. Lasketaan lieriön varoaika, jonka kuluttua kaikki vesi on höyrystetty normaalin vesipinnan (NWL) ja alaraja vesipinnan (LWL) väliltä. Kattilan tilaaja voi määrittää halutun varoajan, jonka kuluttua lieriöön on syötettävä lisää vettä. Aika voi olla esimerkiksi 3–12 minuuttia, mihin on huomioitava höyrystimien ja lieriöiden määrä (Ganapathy 2015, 85).

Kokemusperäisesti arvioidaan lieriön sisähalkaisija ja pituus. Valmistusteknisis-
tä syistä lieriön halkaisijaa ei tulisi valita alle yhden metrin. Lieriön sisäosien
kuten ohjauslevyjen ja sykloneiden asennus muuttuu haastavaksi. Määritetään
valitulle halkaisijalle vesipinnan rajat (kuva 10).



KUVA 10. Esimerkki höyrylieriön neste- ja kaasuosuuksista

Vesitilavuus koostuu sylinterin pitkittäisestä osasta ja sylinterin päädyistä. Las-
ketaan tilavuus alarajassa ja normaalissa vesipinnassa ja käytetään niiden ero-
tusta varoajan laskennassa.

Vesitilavuus sylinteri osassa lasketaan kaavalla 67 (Mäkelä – Soininen – Tuo-
mola – Öistämö 2012, 19).

$$V_s = \left(\frac{r^2}{2} \left(\frac{\alpha}{180^\circ} \pi - \sin \alpha \right) \right) \cdot L \quad \text{KAAVA 67}$$

Kulma α voidaan laskea kaavojen 68 ja 69 avulla (Mäkelä ym. 2012, 19).

$$k = \sqrt{8h \cdot \left(r - \frac{h}{2} \right)} \quad \text{KAAVA 68}$$

$$\alpha = 4 \arctan \frac{2h}{k}$$

KAAVA 69

Päätyjen vesitilavuus lasketaan kaavalla 70 (Ganapathy 2015, 339).

$$V_e = 0.261H^2(3r - H)$$

KAAVA 70

Vesitilavuus rajojen välissä lasketaan kaavalla 71.

$$\Delta V = V_{NWL} - V_{LWL}$$

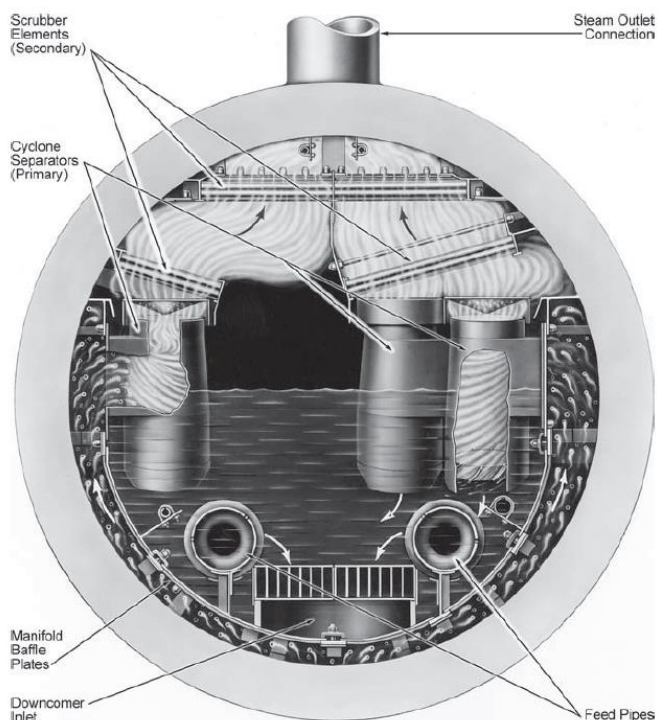
KAAVA 71

Aika minuuteissa, jonka kuluttua alaraja saavutetaan lasketaan kaavalla 72.

$$t = \frac{\Delta V}{\left(\frac{\dot{m}_{sv}}{\rho_{sv}} \cdot 60s\right)}$$

KAAVA 72

Lieriöstä lähtevän höyryn on oltava kylläistä, jottei tulistimille saavu haitallisia suoloja sisältävää vettä. Höyry erotellaan vedestä painovoimaisesti (kuva 11).



KUVA 11. Periaate höyryn ja veden erottelusta (Kitto – Stultz 2005, 5–14)

Erotuksen ensimmäinen vaihe on yleensä sykloni, johon vesihöyryseos virtaa nousuputkista. Ennen syklonia vesipisarot erottuvat höyrystä sen virratessa lie-

riössä olevan veden läpi. Syklonin jälkeen höyry virtaa lieriön vaakasuunnassa vapaassa kaasutilavuudessa. Erottelu on sitä parempi, mitä hitaammin höyry virtaa, eli viipymäaika on suuri. Höyryn nopeudet jaetaan horisontaaliseen ja vertikaaliseen nopeuteen. Näitä nopeuksia ei tulisi ylittää, jotta vesipisarat eivät kulkeudu höyryn mukana ulos lieriöstä. Viimeinen vesipisaroiden erottelu tapahtuu pisaranerottimessa (scrubber), joka on rakenteeltaan aaltoileva levykennosto.

Horisontaalinen höyryn maksimi virtausnopeus lasketaan kaavalla 73 (Ganapathy 2015, 333).

$$v_h = 0.2 \left[\frac{(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g} \right]^{0,5} \quad \text{KAAVA 73}$$

Vertikaalinen höyryn maksimi virtausnopeus lasketaan kaavalla 74 (Ganapathy 2015, 334).

$$v_v = 0.0762 \left[\frac{(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g} \right]^{0,5} \quad \text{KAAVA 74}$$

Lieriön kaasuosan horisontaalinen poikkipinta-ala lasketaan kaavalla 75.

$$A_g = A_{NWL} - \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad \text{KAAVA 75}$$

Vertikaalinen pinta-ala lasketaan kaavalla 76 (Ganapathy 2015, 334).

$$A_v = d_i \cdot L \quad \text{KAAVA 76}$$

Virtausnopeudet horisontaalisessa ja vertikaalisessa virtauksessa lasketaan kaavalla 77 käyttäen tapauksen mukaista pinta-alaa (Mäkelä ym. 2012, 99). Virtausnopeuden laskentaan on huomitoitava kuinka paljon höyryä kehitetään eri osissa kattilaa. Nousuputkesta tulevan höyryn massavirran mukaan lasketaan virtausnopeus nousuputken kohdalla.

$$v = \frac{\dot{m}_g}{\rho_g \cdot A} \quad \text{KAAVA 77}$$

7 LÄMMÖNSIIRTIMIEN MITOITUS

Höyrykattilan tulistimet, ekonomaiseri sekä ilman esilämmitin ovat lähes poikkeuksetta rekuperatiivisia lämmönsiirtimiä, jossa aineet virtaavat toisiaan vastaan. Lämmönsiirtimet toteutetaan rinnakkaisilla putkilla, joihin virtaava aine saapuu ja poistuu kokoojakammioiden kautta. Lämmönsiirtimen mitoittamiseen tarvitaan siirrettävä lämpövirta, kokonaislämmönläpäisykerroin, lämmönsiirtopinta-ala ja logaritminen keskilämpötilaero (kaava 78) (Kitto – Stultz 2005, 4–21).

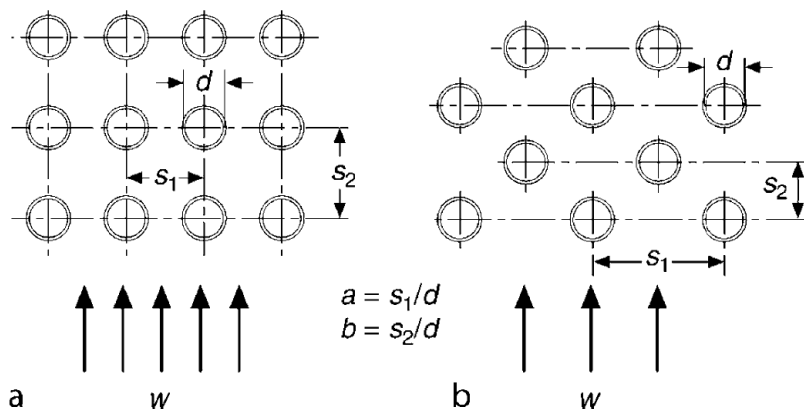
$$\Phi = k \cdot A \cdot \Delta T_{LMTD}$$

KAAVA 78

7.1 Mitoitusparametrit ja laskennan eteneminen

Yksinkertaistettuna lämmönsiirtimien mitoitusparametreina ovat virtausnopeudet, lämpötila-ero sekä putkijako ja -koko. Virtausnopeuden kasvaessa kasvaa lämmönsiirtokerroin, mutta myös painehäviöt. Putkikoot ja -määrät tulisi valita siten, että sisäpuolinen virtaus jäädyttää putkimateriaalia riittävästi, mutta painehäviö ei kasva liian suureksi. Aineiden välillä täytyy olla vähintään 5–25 °C:n lämpötilaero, jotteivat lämmönsiirtopinnat kasva liian suuriksi.

Lämmönsiirrin toteutetaan yleensä linjassa tai limittäin olevalla putkijaolla (kuva 12). Limittäin olevalla putkijaolla lämmönsiirto on tehokkaampaa, mutta savukaasun painehäviö on suurempi.



KUVA 12. Putkijako, kuvassa vasen linjassa, oikea limittäin (VDI-GVC 2010, 45)

Lämmönsiirtimen mitoitus aloitetaan valitsemalla putkipakettien määrä. Putkipakettien määrällä tarkoitetaan, kuinka moneen pakettiin tuleva virtaus jaetaan. Putkipakettiin tuleva virtaus jaetaan kokoojakammioista edelleen lämmönsiirto-putkiin. Putkityyppi ja materiaali valitaan käyttökohteen perusteella. Putkikoko ja -määrä valitaan laskennallisen virtausnopeuden perusteella. Alustavasti valitaan myös putkigeometria, jolla putkipakettia sovitetaan savukaasukanavaan.

Lasketaan sisäpuolinen ja ulkopuolinen konvektiolämmönsiirtokerroin sekä säteilylämmönsiirtokerroin. Lämmönsiirtokertoimista lasketaan kokonaislämmönläpäisykerroin, jonka avulla saadaan tarvittava lämmönsiirtopinta-ala. Lämmönsiirtopinta-ala muutetaan putkipituudeksi putken vaippapinta-alan avulla. Putkigeometria, lämmönsiirtopinta-ala ja savukaasukanavan koko määräävät, kuinka monta riviä tarvitaan lämmönsiirto-putkia. Painehäviöt lasketaan putken sisäpuoliselle virtaukselle ja ulkopuoliselle savukaasuvirtaukselle.

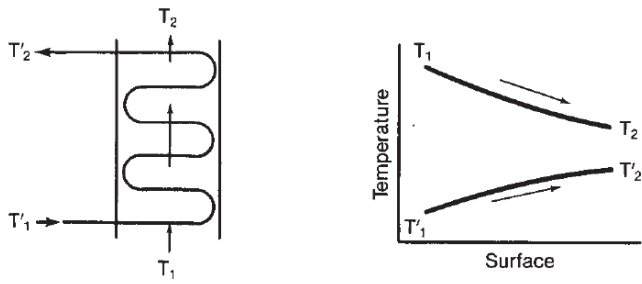
Parametreja kuten putken sisäpuolista virtausnopeutta tai putkigeometriaa muutetaan, jotta lämmönsiirtimen lämmönsiirtopinta-ala, painehäviö ja putken lämpötila saadaan halutuksi. Lämmönsiirtimen mitoittaminen on iteratiivista laskentaa.

7.2 Logaritminen keskilämpötilaero

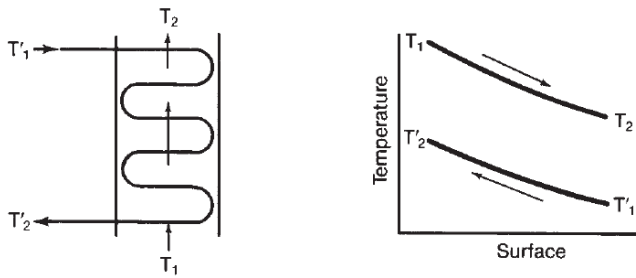
Lämmönsiirtoaineiden lämpötila muuttuu niiden virratessa lämmityspinnan yli (kuvat 13–15). Tätä lämpötilaeroa kuvataan logaritmisella keskilämpötilaerolla (kaava 79). Ristivirtalämmönsiirtimen logaritmista lämpötilaeroa korjataan korjauskertoimella F . Kuvassa 16 on kuvaaja ristivirtalämmönsiirtimen korjauskertoimen määrittämiseksi. Korjauskerroin on kuitenkin aina tarkasteltava tapauskohtaisesti eri lämmönsiirtimien konstruktiolle. Myötä- ja vastavirtaukselle korjauskerroin on 1,0. (Kitto – Stultz 2005, 4–21)

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_1 - T_2') - (T_2 - T_1')}{\ln\left(\frac{T_1 - T_2'}{T_2 - T_1'}\right)} \cdot F$$

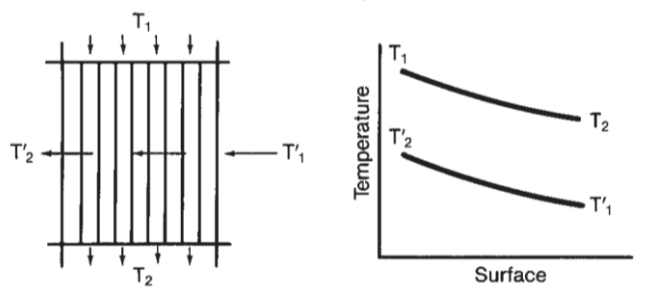
KAAVA 79



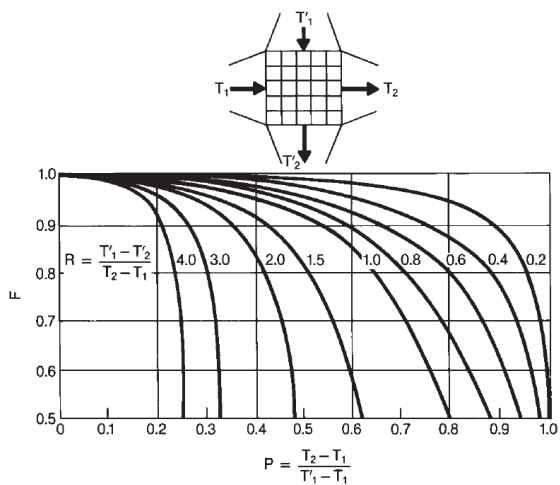
KUVA 13. Myötävirtaus (Kitto – Stultz 2005, 4–21)



KUVA 14. Vastavirtaus (Kitto – Stultz 2005, 4–21)



KUVA 15. Ristivirtaus (Kitto – Stultz 2005, 4–21)



KUVA 16. Korjauskertoimen määrittäminen ristivirtalämmönsiirtimelle (Kitto – Stultz 2005, 4–21)

7.3 Sisäpuolinen konvektiolämmönsiirtokerroin

Putkinipussa olevien putkien sisäpuolinen virtaus halutaan olevan aina turbulenti. Määritetään kaavalla 80 turbulentin putkivirtauksen dimensioton Nusseltin luku, joka pätee, kun $10^4 < Re_d < 10^6$ ja $0,6 < Pr < 50$ (Wagner 1988, 62).

$$Nu_{d,turb} = \frac{\xi}{8} \cdot Re_d \cdot Pr \cdot \frac{1}{\left(1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)\right)} \quad \text{KAAVA 80}$$

Lasketaan putkivirtauksen Reynoldsin luku kaavalla 81 (Wagner 1988, 61).

$$Re_d = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad \text{KAAVA 81}$$

Prandltin luku saadaan aineominaisuuksien taulukosta tai laskemalla kaavalla 82 (Wagner 1988, 61).

$$Pr = \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda} \quad \text{KAAVA 82}$$

Sileän putken lämmönsiirtoa voidaan parhaiten kuvata vastuskertoimella (kaava 83) (Wagner 1988, 62).

$$\xi = \frac{1}{(1,82 \cdot \log Re_d - 1,64)^2} \quad \text{KAAVA 83}$$

Kun aineominaisuudet otetaan tulo- ja lähtölämpötilan keskiarvolla, täytyy ominaisuuksien lämpötilariippuvuuden vaikutus ottaa huomioon lämpövirran suunnan kertoimella. Vertailusuurena on virtaavan aineen keskilämpötila ja putkiseinämän lämpötila.

Lämpövirran suunnan kerroin putkessa virtaavalle kaasulle saadaan kaavalla 84 (Wagner 1988, 65).

$$f_3 = \left(\frac{T}{T_w}\right)^{0,45} \quad \text{KAAVA 84}$$

Lämpövirran suunnan kerroin putkessa virtaavalle nesteelle lasketaan kaavalla 85 (Wagner 1988, 64).

$$f_2 = \left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0,11} \quad \text{KAAVA 85}$$

Putkivirtauksen Nusseltin luku lasketaan kaavalla 86 (Wagner 1988, 65).

$$Nu = Nu_{d,turb} \cdot f_3 \cdot f_2 \quad \text{KAAVA 86}$$

Sisäpuolinen konvektiolämmönsiirtokerroin voidaan laskea kaavalla 87 (Wagner 1988, 11).

$$\alpha_i = Nu \cdot \frac{\lambda}{d} \quad \text{KAAVA 87}$$

Mikäli osa höyrystimestä toteutetaan savukaasukanavassa olevalla putkinipulla, täytyy arvioida kiehumisen lämmönsiirtokerroin. Jonsin ja Lottesin mukaan veden ja putkimateriaalin lämpötilaero lasketaan kaavalla 88 (Ganapathy 2015, 68).

$$\Delta T = 0.792 e^{\left(-\frac{P}{62}\right)} q_i^{0,25} \quad \text{KAAVA 88}$$

Kiehumisen lämmönsiirtokerroin lasketaan tällöin kaavalla 89 (Ganapathy 2015, 68).

$$\alpha_b = \frac{q}{\Delta T} \quad \text{KAAVA 89}$$

7.4 Ulkopuolinen konvektiolämmönsiirtokerroin

Höyrykattilassa putkinipun ulkopuolinen konvektiolämmönsiirtokerroin muodostuu putkipaketissa olevien putkien ylitse virtaavasta savukaasusta. Virtauskuvio on ensimmäisessä putkirivissä kuten yksittäisellä putkella. Putkien syrjäytysvaikutusten vuoksi keskinopeus putkien välitiloissa on suurempi kuin vapaassa virtauksessa. Seuraava putkirivi on ensimmäisen rivin jälkipyörteessä. Pyörteet häiritsevät putken tulopuolen laminaarista rajakerrosta, jolloin lämmönsiirto pa-

ranee. Lämmönsiirtokerroin paranee viidenteen riviin saakka, jonka jälkeen se on vakio. (Wagner 1988, 76.) Määritetään lämmönsiirtokerroin sileille ja rivoiteuille putkille.

7.4.1 Sileät putket

Nipussa olevien putkien välissä virtaavan savukaasun keskinopeus lasketaan kaavalla 90 (Wagner 1988, 76).

$$v_{\psi} = \frac{v_0}{\psi} \qquad \text{KAAVA 90}$$

Välitilaosuus määritellään putkinipun vapaan tilavuuden suhteeksi koko tilavuuteen. Putkinipussa välitilaosuus lasketaan kaavoilla 91 ja 92 (Wagner 1988, 76).

Välitilaosuus kun $b \geq 1$

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{4 \cdot a} \qquad \text{KAAVA 91}$$

Välitilaosuus kun $b < 1$

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{4 \cdot a \cdot b} \qquad \text{KAAVA 92}$$

jossa a ja b ovat kuvan 12 mukaisesti, putkijaon suhde ulkohalkaisijaan.

Virtausmatkan karakteristinen pituus sylinterille, eli putkelle, lasketaan kaavalla 93 (Wagner 1988, 73).

$$L' = D \cdot \frac{\pi}{2} \qquad \text{KAAVA 93}$$

Reynoldsin luku lasketaan kaavalla 94 (Wagner 1988, 78).

$$Re_{L'} = \frac{v_{\psi} \cdot L'}{\nu} \qquad \text{KAAVA 94}$$

Dimensioton laminaarisen alueen Nusseltin luku lasketaan kaavalla 95, joka pätee kun $1 < ReL' < 10^3$ ja $0,6 < Pr < 1000$ (Wagner 1988, 75). Savukaasun Prandtlin luku lasketaan kaavalla 82 (Wagner 1988, 11).

$$Nu_{L',lam} = 0,664 \cdot \sqrt{Re_{L'}} \cdot \sqrt[3]{Pr}$$

KAAVA 95

Dimensioton turbulenttisen alueen Nusseltin luku lasketaan kaavalla 96, joka pätee kun $10^5 < Re_{L'} < 10^7$ ja $0,6 < Pr < 1000$ (Wagner 1988, 75).

$$Nu_{L',turb} = \frac{0,037 \cdot Re_{L'}^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 \cdot Re_{L'}^{-0,1} \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)}$$

KAAVA 96

Lämpövirran suunnan kerroin kaasuille lasketaan kaavalla 97 (Wagner 1988, 75).

$$f_9 = \left(\frac{T}{T_w} \right)^{0,12}$$

KAAVA 97

Reynoldsin luku ja virtauksen kulku putken ylitse on erilainen eri kohdissa, mikä riippuu karakteristisesta mitasta ja virtausnopeudesta. Laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen geometrisella keskiarvolla saadaan koko Reynoldsin alue otettua huomioon. Saadaan koko alueen kattava kaava 98. (Wagner 1988, 75.)

$$Nu_{L'} = \left(\tilde{Nu}_{L'} + \sqrt{Nu_{L',lam}^2 + Nu_{L',turb}^2} \right) \cdot f_9$$

KAAVA 98

jossa $\tilde{Nu}_{L'}$, on virtauksessa poikittain olevalle sylinterille 0,3.

Nusseltin luku putkinipussa lasketaan kaavalla 99 (Wagner 1988, 78).

$$Nu_{nippu} = f_A \cdot Nu_{L'}$$

KAAVA 99

jossa f_A on putkigeometrian mukaan määritetty putkijärjestyskerroin.

Putkijärjestyskerroin linjassa oleville putkille määritetään kaavalla 100 (Wagner 1988, 78).

$$f_{A,fl} = 1 + \frac{0,7}{\psi^{1,5}} \cdot \frac{\left(\frac{b}{a} - 0,3 \right)}{\left(\frac{b}{a} + 0,7 \right)^2}$$

KAAVA 100

Putkijärjestyskerroin limittäin oleville putkille lasketaan kaavalla 101 (Wagner 1988, 78).

$$f_{A,vers} = 1 + \frac{2}{3 \cdot b} \quad \text{KAAVA 101}$$

Putkijärjestyskerroin lasketaan kaavalla 102, jos rivejä vähemmän kuin 10 (Wagner 1988, 78).

$$f_A = \frac{1+(n-1) \cdot f_{A,x}}{n} \quad \text{KAAVA 102}$$

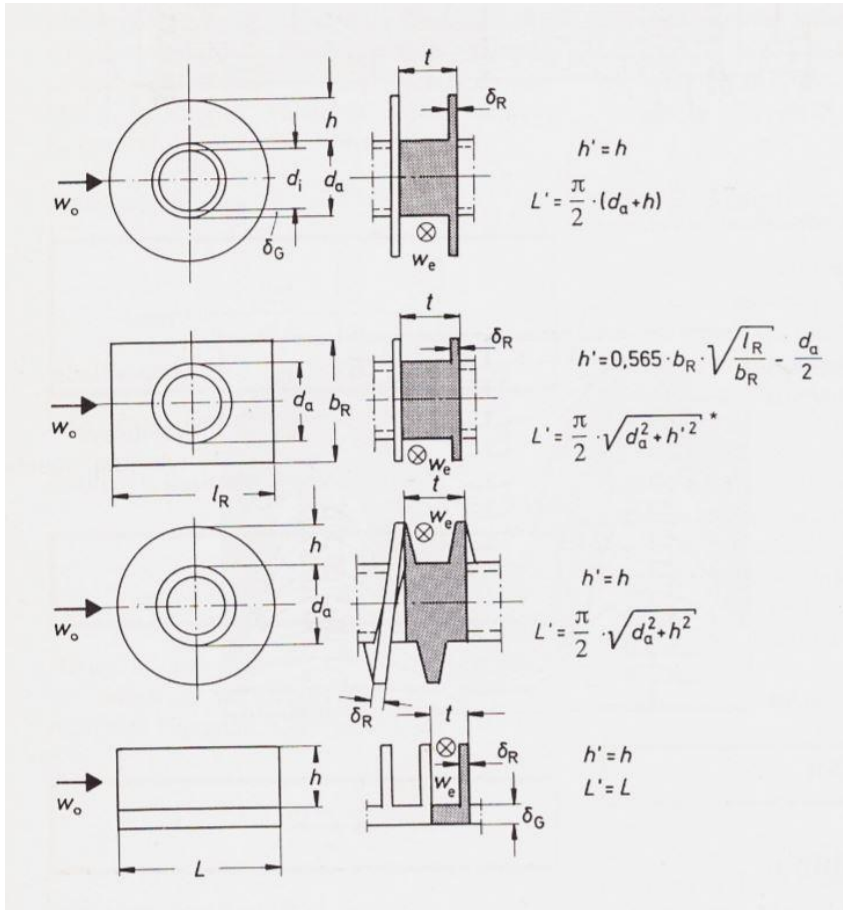
jossa $f_{A,x}$ on limittäisille riveille $f_{A,vers}$ ja linjassa oleville $f_{A,fl}$.

Ulkopuolinen konvektiolämmönsiirtokerroin putkinipussa voidaan ratkaista kaavasta 103 (Wagner 1988, 78).

$$Nu_{nippu} = \alpha \cdot \frac{L'}{\lambda} \quad \text{KAAVA 103}$$

7.4.2 Rivoitetut putket

Rivoitetut putket lisäävät lämmönsiirtoa ja niitä käytetään alemman lämmönsiirtymiskertoimen puolella eli savukaasupuolella. Kattilan loppuosissa, kuten ekonomaiserissa ja ilman esilämmittimessä, on savukaasun lämpötila varsin matala. Lämmönsiirtoa tehostetaan putkien rivoituksella. Määritetään kuvan 17 mukaan kappaleen ylitse virtaavan savukaasun virtausmatka ja tehollinen rivan korkeus valitulla ripatyypillä. Paksuilla rivoilla lämmönsiirto otetaan huomioon lisäämällä teholliseen rivan korkeuteen puolet rivan paksuudesta.



KUVA 17. Ripaputkien virtausmatka ja tehollinen rivan korkeus (Wagner 1988, 80)

Karakteristisen nopeuden määrittämiseksi lasketaan virtausnopeus ahtaimmassa poikkileikkauksessa putkigeometrian mukaan (kaava 104) (Wagner 1988, 92).

$$v_e = v_0 \cdot \frac{a}{a-1} \cdot \frac{1}{1 - \frac{2 \cdot h' \cdot \delta_R}{a-1 \cdot d_a \cdot t}} \quad \text{KAAVA 104}$$

Karakteristinen virtausnopeus lasketaan kaavalla 105 (Wagner 1988, 92).

$$v_m = \frac{v_0 + v_e}{2} \quad \text{KAAVA 105}$$

Reynoldsin luku lasketaan kaavalla 106 käyttäen karakteristista nopeutta ja riivoitetun putken virtausmatkaa (Wagner 1988, 78).

$$Re_{L'} = \frac{v_m \cdot L'}{\nu} \quad \text{KAAVA 106}$$

Nusseltin luku putkinipussa lasketaan luvun 7.4.1 mukaisesti. Nyt on määritettävä näennäinen lämmönsiirtymiskerroin (α'_R) kaavalla 107 (Wagner 1988, 82).

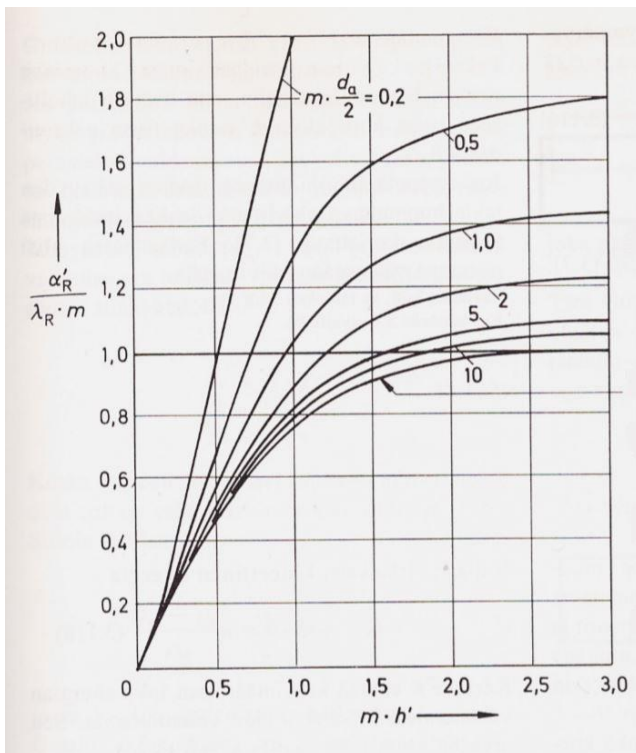
$$\frac{\alpha'_R}{\lambda_R \cdot m} = f\left(m \cdot \frac{d_a}{2}; m \cdot h'\right) \quad \text{KAAVA 107}$$

m lasketaan kaavalla 108 (Wagner 1988, 81).

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha}{\delta_R \cdot \lambda_R}} \quad \text{KAAVA 108}$$

$\frac{\alpha'_R}{\lambda_R \cdot m}$ voidaan lukea kuvasta 18 tai määrittää keskimääräisesti kaavalla 109 (Wagner 1988, 81).

$$\frac{\alpha'_R}{\lambda_R \cdot m} = \tanh(m \cdot h') \cdot \left(1 + \frac{\tanh(m \cdot h')}{(2 \cdot m \cdot \frac{d_a}{2})} - 0,072 \cdot \frac{\tanh(m \cdot h')}{(1,48 \cdot m \cdot \frac{d_a}{2})}\right) \quad \text{KAAVA 109}$$



KUVA 18. Käyrästä ripaputken näennäiseen lämmönsiirtokertoimeen rivan tyvessä (Wagner 1988, 81)

Jolloin näennäinen lämmönsiirtokerroin rivan tyvessä on kaavan 109 mukaisesti.

$$\alpha'_R = \lambda_R \cdot m \cdot \left(\tanh(m \cdot h') \cdot \left(1 + \frac{\tanh(m \cdot h')}{(2 \cdot m \cdot \frac{d_a}{2})} - 0,072 \cdot \frac{\tanh(m \cdot h')}{(1,48 \cdot m \cdot \frac{d_a}{2})} \right) \right)$$

Rivoitetun putken keskimääräinen tehollinen lämmönsiirtymiskerroin lasketaan kaavalla 110 (Wagner 1988, 81).

$$\bar{\alpha} = \alpha'_R \cdot \frac{\delta_R}{t} + \alpha_{nippu} \cdot \left(1 - \frac{\delta_R}{t} \right) \quad \text{KAAVA 110}$$

7.5 Säteilylämmönsiirtokerroin

Säteilylämmönsiirtokerroin muodostuu savukaasujen säteilystä, joista tärkeimpiä komponentteja ovat hiilidioksidi (CO_2) ja vesihöyry (H_2O). Typpi (N_2), vety (H_2) ja happi (O_2) ovat käytännössä läpinäkyviä säteilylle eivätkä ne emittoi sitä. Kaikki kaasut absorboivat tulevaa säteilyä merkittävästi vain paksuina kerroksina. (Wagner 1988, 130.)

Säteilevän kaasumassan ekvivalentti kerrospaksuus lasketaan kaavalla 111 (Wagner 1988, 131).

$$s_{gl} = f \cdot \frac{4 \cdot V_g}{A_g} \quad \text{KAAVA 111}$$

jossa geometria- ja painekertoimena f voidaan käyttää 0,9.

Kaasumassan tilavuus lasketaan kaavalla 112 (Wagner 1988, 141).

$$V_g = \frac{d^2 \cdot \pi \cdot L}{4} \quad \text{KAAVA 112}$$

Kaasumassan pinta-ala lasketaan kaavalla 113 (Wagner 1988, 142).

$$A_g = d \cdot \pi \cdot L + 2 \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \quad \text{KAAVA 113}$$

Hiilidioksidin ja veden emissiivisyys voidaan lukea liitteistä 1 ja 2, kun kerrotaan ekvivalentti kerrospaksuus komponentin osapaineella. Osapaineena käytetään savukaasussa olevan komponentin tilavuusprosenttia. Savukaasun kokonaissemissiivisyys voidaan likimäärin laskea kaavan 114 mukaisesti (Wagner 1988, 133).

$$\varepsilon_g = 0,95 \cdot (\varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{CO_2})$$

KAAVA 114

Pöly voi lisätä huomattavasti kuumien savukaasujen lähettämää säteilyä. Mikäli savukaasussa on pölyä, lisätään sen vaikutus savukaasujen säteilyyn. Emissiokerroin (e_{st}) riippuu pölyn irtotiheydestä, ominaispoikkipinnasta, hiukkasten koosta ja hiukkastiheydestä kaavan 115 perusteella (Wagner 1988, 136).

$$e_{st} = a \cdot A \cdot B$$

KAAVA 115

Mikäli pölyn ominaisuuksia ei tiedetä mitoitusvaiheessa, voidaan käyttää keskimääräisiä arvoja. Emissiokerroin voidaan laskea kaavalla 115 käyttäen keskimääräisenä ominaisemissiopinta-alana $19 \text{ m}^2/\text{kg}$ (Wagner 1988, 136.)

$$e_{st} = 19 \text{ m}^2/\text{kg} \cdot B$$

Pölyn emissiivisyys lasketaan kaavalla 116 (Wagner 1988, 136).

$$\varepsilon_{st} = 1 - e^{-e_{st} \cdot s_{gl}}$$

KAAVA 116

Savukaasun ja pölyn kokonaisemissiivisyys lasketaan kaavalla 117 (Wagner 1988, 136).

$$\varepsilon_{g+st} = \varepsilon_g + \varepsilon_{st} - \varepsilon_g \cdot \varepsilon_{st}$$

KAAVA 117

Säteilyn lämmönsiirtokerroin lasketaan kaavalla 118, kun näkyvyyskerroin savukaasuista putkipakettiin on yksi ($\varphi_{12} = 1$) (Wagner 1988, 139).

$$\alpha_r = f_{Str} \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varphi_{12} \cdot C_s$$

KAAVA 118

Lämpötilakerroin f_{Str} lasketaan kaavalla 119 (Wagner 1988, 139).

$$f_{Str} = \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_1 - T_2}$$

KAAVA 119

7.6 Kokonaislämmönläpäisykerroin

Sileille putkille lämmönläpäisykerroin lasketaan ulkopintaan nähden kaavalla 120 (Wagner 1988, 151).

$$k_a = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} \frac{A_a}{A_i} + \frac{s}{\lambda} \frac{A_a}{A_m} + \frac{1}{\alpha_a}}$$

KAAVA 120

Kun konvektiolämmönsiirrossa on mukana säteilylämmönsiirtoa, saadaan ne summattua kaavalla 121 (Huhtinen ym. 2000, 207).

$$\alpha_a = \alpha_k + \alpha_r$$

KAAVA 121

Sylinteriseinälle keskimääräinen pinta-ala A_m lasketaan kaavalla 122 (Wagner 1988, 151).

$$A_m = \frac{A_a - A_i}{\ln \frac{A_a}{A_i}}$$

KAAVA 122

Likaantumisen vaikutus lämmönsiirtoon huomioidaan likaantumiskertoimella (kaava 123) (Wagner 1988, 152).

$$k = \varphi \cdot k_0$$

KAAVA 123

Likaantumiskerroin φ lasketaan kaavalla 124 (Wagner 1988, 152).

$$\varphi = \frac{1}{1 + k_0 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i}}$$

KAAVA 124

Rivoitetuille putkille lämmönläpäisykerroin lasketaan kaavalla 125, jota tarvittaessa myös korjataan likaantumiskertoimella (Wagner 1988, 176).

$$k_a = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{d_a}{2 \cdot \lambda_R} \cdot \ln \frac{d_a + d_i}{d_i} + \frac{d_a}{d_i} \cdot \frac{1}{\alpha_i}}$$

KAAVA 125

Tarvittava kokonaisputkipituus saadaan laskettua vaippapinta-alan mukaan kaavalla 126.

$$L = \frac{A}{D \cdot \pi}$$

KAAVA 126

Kokonaisputkipituus jaetaan valitulla putkimäärällä, josta saadaan yhden lämmönsiirtoputken pituus (kaava 127).

$$L_{putki} = \frac{L}{n}$$

KAAVA 127

Putken keskimääräinen lämpötila voidaan arvioida kaavalla 128, kun lämmön- siirtokertoimet ovat määritettyinä (Ganapathy 2003, 282).

$$T_w = T_g - (T_g - T_i) \frac{\alpha_i}{\alpha_i + \alpha_a} \quad \text{KAAVA 128}$$

7.7 Painehäviöt

7.7.1 Putken sisäpuolinen painehäviö

Höyrykattilan tulistimissa, höyrystämättömässä ekonomaiserissa ja ilman esi- lämmittimessä virtaus on yksifaasinen ja sisäpuolinen painehäviö koostuu kitka- ja kertavastuksesta. Yksifaasivirtauksen painehäviö lasketaan luvussa 6.1.1 esitetyllä tavalla.

Rinnan kytkennässä jokaisen putken painehäviö muodostuu samansuuruiseksi, jolloin kitka- ja kertavastukset lasketaan yhdelle putkelle. Huomioidaan myös sarjaan kytkettyjen kokoojakammioiden määrä, jolloin kokonaispainehäviö las- ketaan kaavalla 129.

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_{dyn} + \Delta p_k + \Delta p_{kk} \cdot n_{kk} \quad \text{KAAVA 129}$$

7.7.2 Savukaasun painehäviö

Savukaasun suurimmat painehäviöt muodostuvat sen virratessa putkinipun lä- vitse. Savukaasun painehäviö putkinipun lävitse määritetään kaavalla 130 (VDI- GVC 2010, 1076). Kaavaan 130 on laskettava putkigeometrian mukaan mää- räytyvä vastuskerroin. Oletetaan savukaasun kitkahäviöt mitättömiksi vapaassa savukanavassa.

$$\Delta p_{tot} = \xi \cdot n_{MR} \cdot \frac{\rho \cdot v_e^2}{2} \quad \text{KAAVA 130}$$

jossa n_{MR} on putkirivien määrä.

Putkigeometria linjassa

Linjassa olevalle putkinipulle vastuskerroin ξ lasketaan kaavalla 131 (VDI-GVC 2010, 1077).

$$\xi = \xi_{lam} \cdot f_{zn,1} + (\xi_{turb} \cdot f_{z,t} + f_{n,t}) \cdot F_f \quad \text{KAAVA 131}$$

Kerroin F_f lasketaan kaavalla 132 (VDI-GVC 2010, 1077).

$$F_f = 1 - \exp\left(-\frac{Re+1000}{2000}\right) \quad \text{KAAVA 132}$$

Laminaarisen virtauksen korjauskerroin $f_{a,l,f}$ lasketaan kaavalla 133 (VDI-GVC 2010, 1077).

$$f_{a,l,f} = \frac{280 \cdot \pi [(b^{0,5} - 0,6)^2 + 0,75]}{(4 \cdot a \cdot b - \pi) \cdot a^{1,6}} \quad \text{KAAVA 133}$$

Laminaarinen vastuskerroin ξ_{lam} lasketaan kaavalla 134 (VDI-GVC 2010, 1077).

$$\xi_{lam} = \frac{f_{a,l,f}}{Re} \quad \text{KAAVA 134}$$

Turbulentin virtauksen kerroin $f_{a,t,f}$ lasketaan kaavalla 135 (VDI-GVC 2010, 1077).

KAAVA 135

$$f_{a,t,f} = \left[0,22 + 1,2 \frac{\left(1 - \frac{0,94}{b}\right)^{0,6}}{(a - 0,85)^{1,3}} \right] \cdot 10^{0,47 \cdot \left(\left(\frac{b}{a}\right) - 1,5\right)} + [0,03(a - 1)(b - 1)]$$

Turbulenttinen vastuskerroin ξ_{turb} lasketaan kaavalla 136 (VDI-GVC 2010, 1077).

$$\xi_{turb} = \frac{f_{a,t,f}}{Re^{0,1} \left(\frac{b}{a}\right)} \quad \text{KAAVA 136}$$

Putkigeometria limittäin

Limittäisellä geometrialla olevalle putkinipulle vastuskerroin ξ lasketaan kaavalla 137 (VDI-GVC 2010, 1077).

$$\xi = \xi_{lam} \cdot f_{zn,1} + (\xi_{turb} \cdot f_{z,t} + f_{n,t}) \cdot F_v \quad \text{KAAVA 137}$$

Kerroin F_v lasketaan kaavalla 138 (VDI-GVC 2010, 1077).

$$F_v = 1 - \exp\left(-\frac{Re+200}{1000}\right) \quad \text{KAAVA 138}$$

Laminaarinen vastuskerroin on nyt kaavan 139 mukaisesti (VDI-GVC 2010, 1077).

$$\frac{\xi_{lam}=f_{a,l,v}}{Re} \quad \text{KAAVA 139}$$

Kun $b \geq 0,5 \cdot \sqrt{2 \cdot a + 1}$ on $f_{a,l,v}$, kaavan 140 mukaisesti (VDI-GVC 2010, 1077).

$$f_{a,l,v} = \frac{280 \cdot \pi [(b^{0,5} - 0,6)^2 + 0,75]}{(4 \cdot a \cdot b - \pi) \cdot a^{1,6}} \quad \text{KAAVA 140}$$

Kun $b < 0,5 \cdot \sqrt{2 \cdot a + 1}$ on $f_{a,l,v}$, kaavan 141 mukaisesti (VDI-GVC 2010, 1077).

$$f_{a,l,v} = \frac{280 \cdot \pi [(b^{0,5} - 0,6)^2 + 0,75]}{(4 \cdot a \cdot b - \pi) \cdot c^{1,6}} \quad \text{KAAVA 141}$$

Diagonaalinen jako c lasketaan kaavalla 142 (VDI-GVC 2010, 1077).

$$c = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + b^2} \quad \text{KAAVA 142}$$

Turbulenttinen kerroin $f_{a,t,v}$ lasketaan kaavalla 143 (VDI-GVC 2010, 1077).

$$f_{a,t,v} = 2,5 + \left(\frac{1,2}{(a-0,85)^{1,08}}\right) + 0,4 \left(\frac{b}{a} - 1\right)^3 - 0,01 \left(\frac{a}{b} - 1\right)^3 \quad \text{KAAVA 143}$$

Turbulenttinen vastuskerroin ξ_{turb} lasketaan kaavalla 144 (VDI-GVC 2010, 1077).

$$\xi_{turb} = \frac{f_{a,t,v}}{Re^{0,25}} \quad \text{KAAVA 144}$$

Painehäviön korjauskertoimet

Jos putkirivejä on vähemmän kuin 10, on laminaarinen vastuskerroin kerrottava korjauskertoimella $f_{z,1}$. Korjauskerroin lasketaan kaavalla 145 (VDI-GVC 2010, 1079).

$$f_{zn,1} = \left(\frac{\eta_w}{\eta}\right)^{\frac{0,57 \cdot \left(\frac{n_r}{10}\right)^{0,25}}{\left[\left(\frac{4ab}{\pi} - 1\right)Re\right]^{0,25}}} \quad \text{KAAVA 145}$$

Lämmönsiirtimen läpi savukaasun lämpötila muuttuu, jolloin käytetään lämpötilan korjauskerrointa $f_{z,t}$ (kaava 146) (VDI-GVC 2010, 1079).

$$f_{z,t} = \left(\frac{\eta_w}{\eta}\right)^{0,14} \quad \text{KAAVA 146}$$

Korjauskerroin $f_{n,t}$ lasketaan kaavalla 147, kun rivien määrä on $5 \leq n_R < 10$ (VDI-GVC 2010, 1081).

$$f_{n,t} = \xi_0 \left(\frac{1}{n_R} - \frac{1}{10}\right) \quad \text{KAAVA 147}$$

Korjauskerroin $f_{n,t} = 0$ kun rivien määrä $n_R \geq 10$ (VDI-GVC 2010, 1081).

Limittäin tai linjassa olevalla putkinipulla, jossa pienin virtausaukko on kohtisuorassa päävirtaukseen nähden, vastuskerroin ξ_0 lasketaan kaavalla 148 (VDI-GVC 2010, 1081).

$$\xi_0 = \frac{1}{a^2} \quad \text{KAAVA 148}$$

Limittäin olevalla putkigeometrialla, jossa pienin virtausaukko ei ole kohtisuorassa päävirtaukseen nähden, vastuskerroin ξ_0 lasketaan kaavalla 149 (VDI-GVC 2010, 1082).

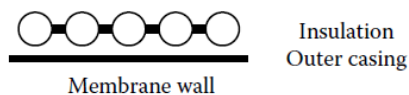
$$\xi_0 = \left[\frac{2(c-1)}{a(a-1)}\right]^2 \quad \text{KAAVA 149}$$

8 RAKENTEET JA MATERIAALIT

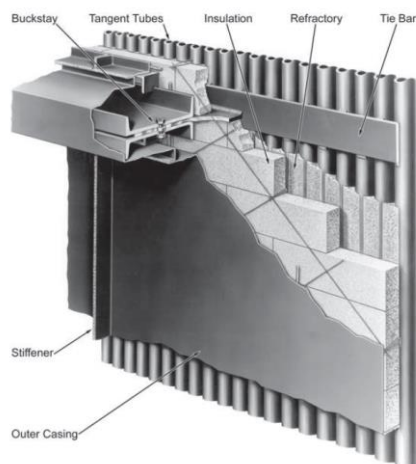
Höyrykattilat ovat paineenalaisia rakenteita ja toimivat pitkän ajan korkeissa lämpötiloissa. Rakenteilta ja materiaaleilta vaaditaan kuumankestävyyden lisäksi korroosion- ja eroosionkestävyyttä.

8.1 Seinärakenne

Vesiputkikattiloiden kaasutiivis rakenne toteutetaan yleensä membraani seinällä. Putket hitsataan yhteen niiden välissä olevilla evillä, yleensä lattateräksillä (kuvat 19–20). Polttolaitteiden ympärillä käytetään muurauksia, millä suojellaan putkimateriaalia ylikuumentumiselta. Pelkällä muurauksella on hankala ylläpitää vuotamatonta rakennetta. Kiinteitä polttoaineita käyttävissä kattiloissa tulipesä pidetään alipaineessa, jotta palamistuotteet eivät pääse kattilahuoneeseen. Alipaine saavutetaan kattilan jälkeisellä savukaasupuhaltimella. Öljy- ja kaasukattilat ovat aina paineistettuja tulipesiä. (Huhtinen ym. 2000, 184; Ganapathy 2015, 41.)



KUVA 19. Membraaniseinä (Ganapathy 2015, 42).



KUVA 20. Kattilan seinärakenne (Kitto – Stultz 2005, 23–3)

8.2 Lämpölaajeneminen

Lämpölaajenemisen aiheuttama pituuden ja tilavuuden muutos sekä laajenemisen suunta on huomioitava rakenteiden suunnittelussa. Pituuden ja tilavuuden muutos voidaan laskea kaavoilla 150–151. Pituuden lämpötilakerroin (α) on normaalille teräkselle $12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$. Metrin pituinen kappale siis laajenee pituutta 1,2 millimetriä per 100 °C. (Mäkelä ym. 2012, 106.)

$$\Delta l = \alpha L_1 \Delta T$$

KAAVA 150

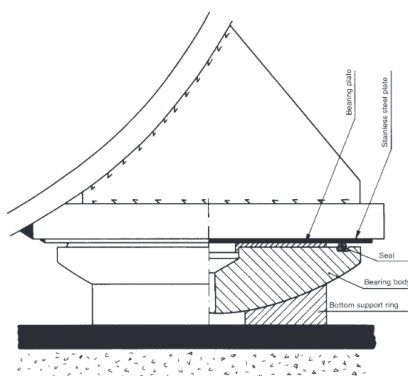
$$\Delta V = \gamma V_1 \Delta T$$

KAAVA 151

jossa tilavuuden lämpötilakerroin γ on kiinteille aineille 3α .

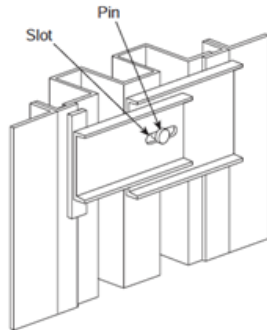
Kattiloiden tuenta voidaan jakaa alta tuettuihin ja ylhäältä ripustettuihin kattiloihin. Suuret höyrykattilat ovat ylhäältä ripustettuja kattiloita, joissa lämpölaajeneminen tapahtuu alaspäin. (Huhtinen ym. 2000, 187.)

Alta tuetun kattilan lämpölaajeneminen tapahtuu pääasiassa leveyden ja pituuden suunnassa. Kattila seisoo esimerkiksi teräspalkeista rakennetun kehikon päällä. Kokoojakammioiden ja laskuputkien alle hitsataan tukijalat. Jalkojen alle asennetaan tukilaakerit, joiden varassa kattilan annetaan liikkua lämpölaajenemisen johdosta (kuva 21). Yksi tai useampi jalka asennetaan kiinteästi, jolloin laajentumisen suuntaan ja lämpöjännitykseen voidaan vaikuttaa.



KUVA 21. Tukilaakeri (Kontima Ab 2011, 3)

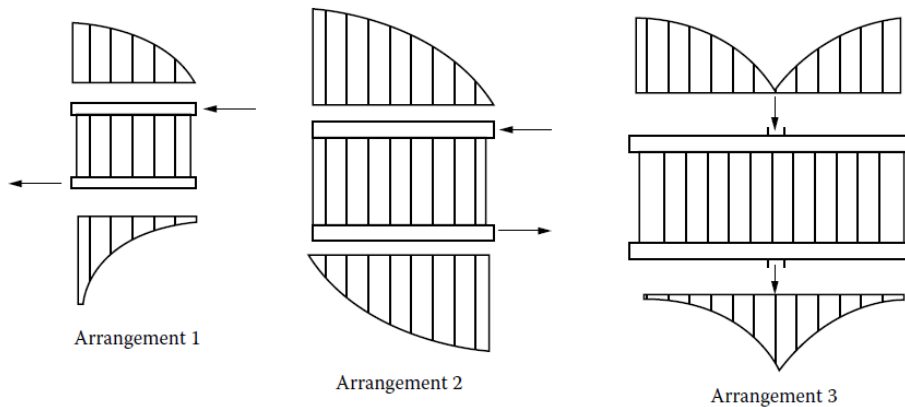
Kattilan savukanavissa, kuten ekonomaiserin ja palamisilman esilämmittimen välissä käytetään lämpölaajenemista vastaanottavaa rakennetta. Yleisin rakenne on U-mallinen levyrakenne (kuva 22).



KUVA 22. U-mallinen palje (Kitto – Stultz 2005, 25–5)

8.3 Virtauksen jako

Lämmönsiirtimissä pyritään tasaiseen virtauksen jakoon, jotta putket saavat jäähtytystä sisäpuolisesta virtauksesta. Virtaus jaetaan kokoojakammioilla lämmönsiirtimien putkiin. Kuvassa 23 esitetään erilaisia virtauksen saapumisia kokoojakammioihin. Epätasaisen virtauksen vuoksi putkipatterin uloimmat putket saattavat saada vähiten jäähtytystä sisällä virtaavasta aineesta. Tällöin putkien lämpötila saattaa nousta. Virtauksen jakoa voidaan parantaa työstämällä kokoojakammioiden aukkoihin lämmönsiirtoputken sisähalkaisijaa pienempi kuristusaukko. Aukko tasaa virtausta luomalla paikallisen painehäviön. Virtausnopeuden kasvaessa aukon lävitse, tehostuu myös lämmönsiirto.



Kuva 23. Virtauksen jako kokoojakammioissa (Ganapathy 2015, 133)

8.4 Teräksen seostus

Teräkseksi kutsutaan ainetta, jonka hiilipitoisuus on alle 1,7 %. Teräs on sitä kovempaa ja lujempaa, mitä enemmän hiiltä se sisältää. Valurauta sisältää yli 2 % hiiltä ja on vetolujuudeltaan, iskusitkeydeltään ja hitsattavuudeltaan huonompaa kuin teräs. Austeniittinen ruostumaton teräs sisältää hiiltä tyypillisesti noin 0,03 % ja hitsattava rakenneteräs noin 0,14 %. (Koivisto – Laitinen – Niinimäki – Tiainen – Tiilikka – Tuomikoski 2010, 152–155)

Mangaania lisätään kaikkiin teräksiin valmistusvaiheessa. Se lisää kovuutta ja siten runsashiilisen teräksen kulumiskestävyyttä ja vähähiilisen teräksen lujuutta. Mangaanilla saadaan myös lisättyä teräksen karkaisusyvyyttä. Teräksen taipumus päästö- ja sinihaurauteen kuitenkin kasvaa voimakkaasti. (Koivisto ym. 2010, 132)

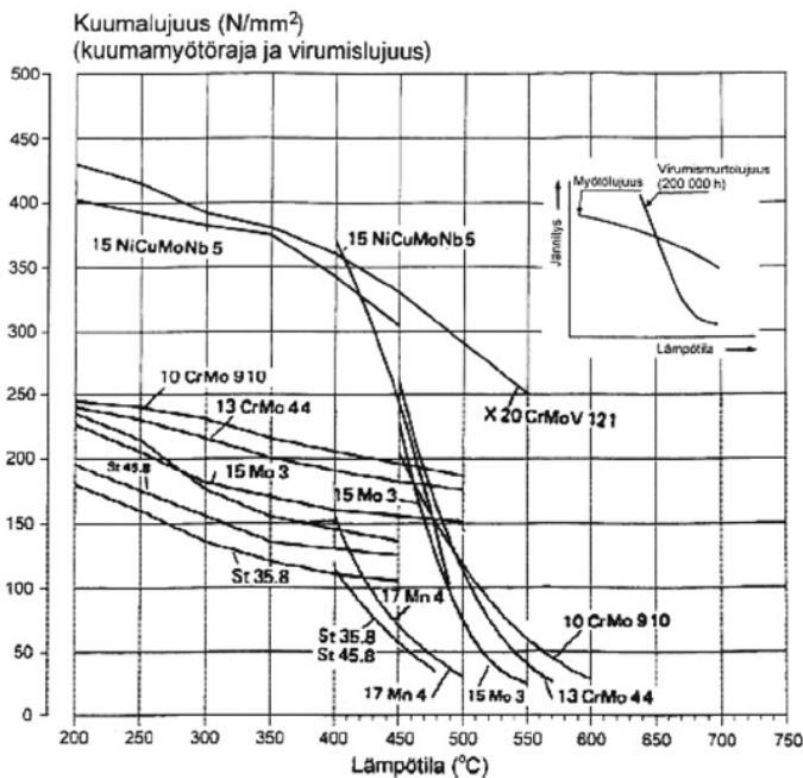
Kromiseostusta käytetään 5 %:iin asti parantamaan karkenevuutta. Tämä parantaa terästen kulumiskestävyyttä. Yli 10,5 %:in seostuksella kromi muodostaa teräksen pintaan suojaavan oksidikerroksen, jolloin terästä kutsutaan ruostumattomaksi. Korkeissa lämpötiloissa kromi poistaa grafitoitumisriskin ja lisää hilseilyn kestävyyttä. Tulenkestävässä valuteräksessä on noin 25 % kromia. (Koivisto ym. 2010, 132.)

Molybdeenillä vähennetään päästöaurautta, ja se on yleinen seosaine yhdessä kromin, mangaanin ja nikkelin kanssa. 0,5 % molybdeeni seostus kromin

kanssa parantaa kuumalujien terästen myötölujuutta ja virumislujuutta. Esimerkiksi painelaiteteräksessä 16Mo3 on hiiltä 0,12–0,20 % ja molybdeeniä 0,40–0,90 %. Ruostumattomia teräksiä, jotka sisältävät kromi- ja nikkelseostuksen kanssa noin 2,5 % molybdeeniä, kutsutaan haponkestäviksi. Muita yleisimpiä terästen seosaineita ovat vanadiini, titaani, niobi, boori ja alumiini. (Koivisto ym. 2010, 132–134.)

8.5 Viruminen

Metallien ominaisuudet huononevat lämpötilan noustessa. Yleisimpien rakenne-teräksien myötölujuus 400 °C:ssa on noin 50 % huonelämpötilan myötölujuudesta. Pidemmällä aikavälillä teräksessä tapahtuu venymistä eli virumista. Viruminen aiheuttaa palautumatonta muodonmuutosta materiaalissa. Suunnittelussa tärkeimpänä tietona on virumisraja. Parhaiten voidaan käyttää hyväksi käyrästöjä, joista nähdään virumismurtolujuus tietyn ajan kuluttua. Kuvasta 24 nähdään erilaisten kuumalujien terästen kuumamyötöraja ja virumismurtolujuus (200 000 h). (Kauppi 2013, 21–23.)



KUVA 24. Kuumamyötörajat ja virumismurtolujuudet (Kauppi 2013, 23)

8.6 Minimi seinämäpaksuus

Paineenalaisen osan minimi seinämäpaksuus (mm) voidaan laskea kaavalla 152. Laskentaluujutena matalissa lämpötiloissa käytetään myötölujuutta ja korkeissa lämpötiloissa virumislujuutta. Laskentalujuus voidaan lukea esimerkiksi kuvasta 24. Korroosio- eli ohenemisvaraa lisätään 1–2 millimetriä. (Huhtinen ym. 2000, 208.)

$$s = \frac{p \cdot D_o}{2 \cdot \frac{\sigma}{n} - p} \cdot \frac{1}{v} + c_1$$

KAAVA 152

jossa

$n = \text{varmuuskerroin}$

$v = \text{lujuuskerroin}$

$c_1 = \text{ohenemisvara [mm]}$

Putken tai kammion lopullinen seinämäpaksuus määräytyy lujuuslaskelmien perusteella. Esimerkiksi kokoojakammion seinämäpaksuus määräytyy siihen työstettävien aukkojen mukaan. Aukon kohdalla tarvittavaa materiaalipaksuutta käytetään koko kammion seinämäpaksuutena.

8.7 Hitsattavuus

Hitsattavuutta voidaan arvostella teräksen taipumuksella kuumahalkeamiin, kylmähalkeamiin ja vanhenemiseen. Kuumahalkeama syntyy keskelle hitsiä hitsin jäähtyessä. Perusainetta sulaa lisäaineen joukkoon, jolloin perusaineen koostumus vaikuttaa kuumahalkeamataipumukseen. (Koivisto – Laitinen – Niinimäki – Tiainen – Tiilikka – Tuomikoski 2010, 129.)

Kylmähalkeamia syntyy perusaineeseen, hitsin muutosvyöhykkeeseen. Hiili pahentaa taipumusta kylmähalkeamiin. Seostamattoman teräksen hitsattavuus katsotaan olevan hyvä, jos $C \leq 0,18 \%$. (Koivisto ym. 2010, 130.)

Seosaineet vaikuttavat myös hitsauksen aiheuttamiin halkeamiin. Vaikutusta voidaan arvioida hiiliekvivalentin avulla (kaava 153). Hitsattavuus katsotaan hyväksi, kun $CE \leq 0,41 \%$. (Koivisto ym. 2010, 130.)

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad \text{KAAVA 153}$$

TAULUKKO 5. Hiiliekvivalentin CE -arvoja (Kauppi 2013, 35)

Teräs	C%	Mn%	Cr%	Mo%	V%	Ni%	Cu%	CE
P355GH	0.10	1.10						0.28
	0.22	1.70	0.30	0.08	0.02	0.30	0.3	0.62
16Mo3	0.12	0.40	0.30	0.25	0.00	0.00	0.3	0.32
	0.20	0.90	0.30	0.35	0.00	0.00	0.3	0.50
10CrMo9-10	0.08	0.40	2.00	0.90				0.73
	0.14	0.80	2.50	1.10			0.3	1.01

Hyvin hitsattavia teräksiä ovat esimerkiksi P235GH, P355GH ja 16Mo3 (taulukko 5). Rajoitetusti hitsattavia ovat enemmän seostetut teräkset, joihin kaava 153 ei enää sovellu. Useat seostetut teräkset ovat helposti karkenevia, jolloin tarvitaan esikuumennus ennen hitsausta ja lämpökäsittely hitsauksen jälkeen. Esikuumennus hidastaa hitsin jäähtymisnopeutta. Jälkilämpökäsittelyllä normalisoidaan eli poistetaan hitsausjännityksiä ja pehmennetään mikrorakennetta. (Kauppi 2013, 35.)

Vanheneminen lisää lohkomurtumataipumusta rakenteessa, jossa sitä ei esiinny heti hitsauksen jälkeen. Typpi lisää eniten teräksen vanhenemistaipumusta. Hitsattavien rakenneterästen standardeissa kerrotaan hitsattavuutta huonontavien aineiden maksimipitoisuudet. (Koivisto ym. 2010, 130.)

8.8 Käytettävät materiaalit

Terästuotteita on markkinoilla suuri määrä, ja niille on asetettu kansallisia ja kansainvälisiä standardeja. Yhdysvalloissa käytetään AISI-, SAE- ja ASME-standardeja. Euroopassa käytetään EN-standardeja, joihin suomalaiset SFS-standardit on yhdenmukaistettu. Paineastiateräksille on omat standardit, jotka määrittelevät höyrykattiloissa käytettävät materiaalit. Vesiputkikattiloihin sovelletaan standardin EN 12952 mukaisia suunnitteluvaatimuksia. Käytettävien mate-

riaalien lujuuden lisäksi niiden on oltava helposti hitsattavia, edullisia ja hyvin muokattavissa. (Kauppi 2013, 33.)

Normaalisti tulipesän höyrystinputken lämpötila ei nouse yli höyrystymislämpötilan. Paineen mukaan höyrystymislämpötilat ovat 120–370 °C, jolloin putkimateriaalina voidaan käyttää P235GH. Samaa materiaalia voidaan käyttää ekonomaisemmin. Höyrylieriön lämpötila on myös lähellä kylläisen veden lämpötilaa. Höyrylieriössä materiaalina käytetään yleisesti P355GH, mikä on hyvin muokattavissa.

Tulistinputkien lämpötila asettuu lähelle putkessa virtaavan höyryn lämpötilaa. Putkien lämpötilat ovat noin 350–550 °C, jolloin normaalia hiiliterästä ei voida käyttää. Yleisesti käytettävä tulistinputken materiaali on 16Mo3.

Palamisilman esilämmittimessä voidaan käyttää hiiliterästä, mikäli ei ole vaaraa happokastepisteen alittumiselle. Mikäli vaaraa on, voidaan käyttää haponkestäviä, valurautaisia tai lasisia putkia. Valurautaisilla putkilla oleva esilämmitin tulee rakentaa siten, että putket ovat helposti vaihdettavissa. Lasilaatuna käytetään silikoboraattia, jonka lämpölaajenemiskerroin on kolmas osa normaalin lasin arvosta. Lasiputket eivät likaannu yhtä nopeasti kuin teräksiset, jolloin nuohoustarve vähenee. Lasiputkien tukirakenteet vuorataan polytetrafluorieteenillä eli teflonilla, jotta ne kestävät hyvin korroosiota. (Huhtinen ym. 2000, 197–199.)

9 MITOITUSSOVELLUS

Työssä esitetyistä laskentamenetelmistä luotiin Excel-pohjainen taulukkolaskentasovellus. Laskurin osiot jaettiin alla olevan luettelon mukaisesti.

- Ohje
- Putkitaulukot
- Polttoaine ja savukaasu
- Energiatase
- Tulipesä ja savukanava
- Tulipesän vesihöyrypiiri
- Screen
- Höyrystin
- Membraanit
- Tulistimet
- Ekonomaiser
- Luvo
- Yhteenveto

Luettelon lisäksi sovelluksessa on ilman ja savukaasun ominaisentalpioidenlaskuri. Ominaisentalpialaskureista saadaan lineaarisesti interpoloitua halutut arvot. Kaikissa osioissa käyttäjälle on näkyvissä vain mitoitukseen liittyvät päätekijät. Laskenta ja välitulokset ovat piilotettuina sekä lukittuina käyttäjän muokkaamiselta. Välilehtien osiot ovat rajattuina eri väreillä ja soluihin on lisätty kommentteja, jotka tarkentavat kyseessä olevaa laskentaa. Kommenteilla esitetään myös haluttuja mitoituksen raja-arvoja ja tuloksia.

Laskurin välilehtien mukaan edetessä ensimmäisenä syötetään putkitaulukoihin höyrykattilan mitoituspaine ja putkien laskentalujuus. Putkitaulukoissa näkyy alustavasti laskettu minimiseinämäpaksuus, jonka rinnalle käyttäjä voi määrittää halutun seinämäpaksuuden. Käyttäjä voi myös muuttaa putkien ulkohalkaisijoita, jotta ne vastaavat käytettävissä olevia putkia. Sovelluksen eri välilehdet hakevat automaattisesti putkitaulukoista käyttäjän valitseman putkikoon arvot. Putkitaulukot ovat erikseen sileille ja rivoitetuille putkille sekä kokoojakammioille.

Polttoaine ja savukaasu osiosta saadaan palamisen massavirrat kiloa polttoainetta kohden, polttoaineen lämpöarvo ja savukaasun ominaisuudet. Laskenta toimii käyttäjän syöttämän polttoaineen koostumuksen ja ilmakertoimen perusteella (kuva 25). Savukaasun koostumus on yhteydessä savukaasun ominaisentalpian, ominaislämpökapasiteetin, dynaamisen viskositeetin, lämmönjohdavuuden ja tiheyden laskentaan (kuva 26).

Polttoaine	Hake	Kaasupolttoaineen tiheys [kg/m ³]				0,00
Polttoaineen faasi	Kiinteä/neste					
Polttoainemäärä	1,00 kg	Kosteus				55,00 %
Alkuaine	Määrä kuiva-aine [p-%]	m _{kuiva} [kg/kgpa]	m _{kuiva} [kg/kgpa]	Moolimassa M [kg/kmol]	Ainemäärä n [kmol/kgpa]	Teoreettinen hapen tarve (O ₂) [kmol/kgpa]
C	50,00	0,500	0,225	12,0	0,01873	0,018733
C6H12	0,00	0,000	0,000	84,2	0,00000	0,000000
C5H12	0,00	0,000	0,000	72,1	0,00000	0,000000
C4H10	0,00	0,000	0,000	58,1	0,00000	0,000000
C3H8	0,00	0,000	0,000	44,1	0,00000	0,000000
C2H6	0,00	0,000	0,000	30,1	0,00000	0,000000
CH4	0,00	0,000	0,000	16,0	0,00000	0,000000
H2S	0,00	0,000	0,000	34,1	0,00000	0,000000
He	0,00	0,000	0,000	4,0	0,00000	0,000000
H2	6,00	0,060	0,027	2,0	0,01339	0,006696
O2	43,40	0,434	0,195	32,0	0,00611	
N2	0,50	0,005	0,002	28,0	0,00006	
S	0,05	0,001	0,000	32,1	0,00001	0,000007
H2O		0,000	0,550	18,0	0,03053	
Tuhka	0,00	0,000	0,000			
Yhteensä	100,0	1,000	1,000	466,8	0,0688	0,0193

Polttoaineen lämpöarvo			
Laskennallinen lämpöarvo	H _L	8,21 MJ/kg	Ilmoitettu 0,00 MJ/kg
Laskennassa käytetään	H _L	8,21 MJ/kg	

Palamisilman tarve			
Teoreettinen hapen tarve (O₂)	0,0193 kmol/kgpa		
	0,619 kg/kgpa		
	0,433 m ³ /kgpa		
Teoreettinen palamisilman tarve	0,0925 kmol/kgpa		
	2,679 kg/kgpa		
	2,072 m ³ /kgpa		
Todellinen palamisilman tarve	0,1156 kmol/kgpa		
	3,3743 kg/kgpa		
	2,5898 m ³ /kgpa		
		Palamisilman kosteus	
		Palamisilman suhteellinen kosteus 50 %	
		Palamisilman lämpötila 25,00 °C	
		Kylläisen höyryn paine 0,03 bar a	
		Vesihöyryn osapaine ilmassa 0,0158 bar a	
		Ilmakerroin (λ)	
		1,25	
		Ilmakerroin OK	

KUVA 25. Polttoaineosuus palamisen laskennasta

Palamisen reaktiotuote	Teoreettinen SK määrä [kmol/kg pa]	Ilmagylimäärä [kmol/kgpa]	Todellinen määrä SK:ssa [kg/kg pa]	Todellinen määrä SK:ssa [m ³ /kg pa]	Ainemäärä-% Osuus kuivista savukaasuista	Ainemäärä-% Osuus kosteista savukaasuista	til-% kostea SK	massa-% kostea SK
CO ₂	0,019		0,824	0,417	17,1 %	11,7 %	11,6 %	19,0 %
H ₂ O	0,045		0,817	1,019	-	28,4 %	28,4 %	18,8 %
O ₂	0,005	0,005	0,195	0,109	-	3,0 %	3,0 %	3,8 %
N ₂	0,073	0,018	2,550	2,039	82,9 %	56,9 %	56,9 %	57,7 %
SO ₂	0,000		0,000	0,000	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,01 %
Yhteensä	0,137	0,023	4,348	3,584	100,0 %	100 %	100,0 %	100,0 %

Teoreettinen (kosteus) savukaasumäärä
0,1369 kmol/kgpa
3,681 kg/kgpa
3,066 m ³ /kgpa

Todellinen (kosteus) savukaasun ilmakertoimella
1,25
0,1600 kmol/kgpa
4,348 kg/kgpa
3,58 m ³ /kgpa

Kosteus savukaasun tiheys: RTP
1,214 kg/m ³

Todellinen Keira savukaasun määrä
0,0915 kmol/kgpa
3,330 kg/kgpa
2,57 m ³ /kgpa

Happokastepiste (°C)
T _w 5%: 134
T _w 10%: 121

Vesikastepiste (°C)
Osapaine bar a: 0,284
T _w (°C): 69,0

CO arvio (ppm)
100

Savukaasun pölymäärä (kg/m ³)
0,00

KUVA 26. Savukaasujen koostumus

Energiataseesta saadaan komponenttien lämpöteho, palamisen massavirrat ja kattilan hyötysuhde. Käyttäjä syöttää kattilasta halutun höyryn massavirran ja ominaisuudet. On myös määritettävä erilaisia parametreja, kuten ekonomaiserilla tehtävä syöttöveden lämpötilan nosto ja tulistuksen prosentuaalinen jako. Lieriön paine arvioidaan tulistimien painehäviön perusteella, mikä määrää höyrystymislämpötilan. Lieriön paine voidaan tarkentaa tulistimien mitoituksen jälkeen. Sovellus laskee parametrien perusteella paineen ja lämpötilan kaikissa komponenteissa. Käyttäjän on syötettävä veden ominaisentalpia ilmoitetuissa pisteissä, joista sovellus laskee tarvittavan lämpötehon.

Tulipesän koko arvioidaan pinta-alarasituksen perusteella, jota muutetaan savukaasun lähtölämpötilan mukaan. Laskennasta saadaan tulipesän koko, kuormitus ja savukaasun lämpötilat. Lähtölämpötilan ja energiataseesta saatu- jen lämpötehojen perusteella lasketaan savukaasun ominaisuudet komponenttien välissä (kuva 27). Tulipesän mitoitus on merkittävin tekijä sovelluksessa, joka vaikuttaa lähes kaikkiin muihin laskentoihin sen jälkeen.

Savukaasun ominaisuudet komponenttien välissä						
Lämpötila [°C]	Ominaisentalpia [kJ/kg] (0 °C)	Tiheys [kg/m ³]	Savukanavan korkeus	Savukanavan leveys	Virtausnopeus m/s	Tilavuusvirta m ³ /s
Savukaasu tulipesästä						
900	1452	0,28	2,0	4,0	17,12	95,62
Screen						
866	1421	0,29	2,0	4,0	16,62	92,85
Tulistin 2						
765	1277	0,32	2,0	4,0	15,14	84,59
Tulistin 1						
642	1108	0,36	2,0	4,0	13,35	74,58
Höyrystin						
565	1004	0,40	2,0	4,0	12,23	68,29
Ekonomaiser						
288	648	0,59	2,0	4,0	8,19	45,72
Luvo						
178	515	0,73	2,0	4,0	6,59	36,79

KUVA 27. Savukaasun ominaisuudet kattilan läpi

Vesihöyrypiirin osioissa suoritetaan kiertolaskenta eri komponenteille ja mitoite- taan höyrylieriö. Kuvassa 28 on tulipesässä olevien höyrystinputkien painehä- viölaskenta. Painehäviöt lasketaan laskuputkille, kokoojakammioille ja nousu- putkille erikseen. Kiertolaskennasta saadaan kiertoluku, massavirrat, virtausno-

peudet, painehäviöt ja kaikkien putkikomponenttien koot. Kuvassa 29 on kierto-
laskennan pääperiaate.

TULIPESÄN KEITTOPUTKISTO				
Kattilan tyyppi		pysty		
Keittoputkien jako	t	80,0	mm	
Keittoputkien määrä	n	420	kpl	
Keittoputken koko	DN	DN50		
Sisähalkaisija	d	51,3	mm	
Seinämäpaksuus	s	4,5	mm	
Ulkohalkaisija	D	60,3	mm	
Massavirta keittoputkessa	m	0,69	kg/s	
Veden virtausnopeus	v	0,42	m/s	
Vesihöyryseoksen virtausnopeus	v	1,59	m/s	
Kertavastukset keittoputkessa				
	kpl	vastuskerroin (ξ)	summa	
Käyrä	0,0	0,0	0	
	0,0	0,0	0	
	0,0	0,0	0	
Yksifaasipainehäviö				
Kitka	Δp_{kitka}	20,0	Pa	
Hydrostaattinen	$\Delta p_{painovoimainen}$	7364,3	Pa	
Kaksifaasipainehäviöt				
Dynaaminen painehäviö	$\Delta p_{dynaaminen}$	5052,7	Pa	
Hydrostaattinen	$\Delta p_{hydrostaattinen}$	60020,5	Pa	
Kiihtyvyyttä	Δp_k	391,6	Pa	

KUVA 28. Höyrystinputkien valinta ja painehäviölaskenta

Luonnonkierron toteutuminen				
Arvataan kiertoluku	CR	12,8		
Syöttöveden massavirta tulipesän seiniin	m	174,80	kg/s	
Lieriön tulevan seoksen höyrypitoisuus	x	7,82 %		
Tulipesästä saatava höyrymäärä	m	13,67	kg/s	
Etäisyys lieriön vesipinnasta höyrystimen alimpaan kokoajakammioon	L	22,0	m	
Höyrystimen korkeus	L_h	18,0	m	
Nousuputken pituus	L_{nousu}	4,0	m	
Höyrystymiskorkeus	L_h	1,02	m	
Ajava voima	Δp_{av}	119,40	kPa	
Kierron kokonaispainehäviö	Δp_{koko}	119,30	kPa	
Luonnonkierto toimii				

KUVA 29. Luonnonkierron toiminta

Tulistimet, ekonomaiser ja palamisilman esilämmitin mitoitetaan energiataseesta ja tulipesän mitoituksesta saaduilla tuloksilla. Käyttäjän tehtävä on syöttää virtaavien aineiden ominaisuudet ja valita parametrit putkipakettiin. Tärkeimpinä tuloksina saadaan tarvittava kokonaisputkipituus lämmönsiirtoon, virtaavien ai-

neiden painehäviöt ja putken keskimääräinen lämpötila. Ekonomaiserin ja palamisilman esilämmittimen mitoitukset toimivat samalla periaatteella, mutta käytäjällä on mahdollisuus valita rivoitetut putket lämmönsiirtoon (liite 3).

Yhteenvedossa on koottuna päätekijät sovelluksen tuloksista kuten kattilan teho, hyötysuhde, komponenttien lämpötehot, lämmönsiirtopinta-alat ja paineasiamassa (kuva 30).

Hyötyteho	46,2	MW
Polttoaineteho	51,0	MW
Kattilan hyötysuhde	90,4 %	

Polttoaine	Hake	
Polttoaineen kosteus	55,0	%
Laskennallinen lämpöarvo	8,2	MJ/kg
Polttoaineen kulutus	22,4	tn/h
Palamisilmamäärä	74,9	tn/h
	57949,3	nm ³ /h
Savukaasu määrä	97,3	tn/h
	80147,7	nm ³ /h
Ilmakerroin	1,25	
Savukaasun painehäviö	2971	Pa

Nimike	Lämmönsiirtotehot ja pinta-alat		Paineastia massa [kg]
	kW	m ²	
Tulipesä	23062	476	55763
Evaporator	2812	194	7290
Screen	844	5	433
Membraanit	1406	64	5370
Tulistin 1	4578	198	7151
Tulistin 2	3873	64	2887
Ekonomaiser	9614	1282	25526
Luvo	3599	622	20239
Höyrylieriö	-	-	13396
Yhteensä Σ	49788	2907	138054

KUVA 30. Yhteenvedo mitoituksista

10 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda Excel-pohjainen sovellus, jolla voidaan alustavasti mitoittaa höyrykattilan pääkomponentit. Työn tulokseksi valmistui sovellus, jolla voidaan tehdä höyrykattilan päämitoitus tai tarkastella jo olemassa olevan kattilan toimintaa. Sovelluksen laskelmien perusteella höyrykattilan pääsuunnittelu voidaan aloittaa. Sovelluksen eri osiot eivät välttämättä vaadi tarkkoja laskelmia toisiltaan, jolloin voidaan tarkastella myös yhden lämmönsiirtimen toimintaa halutuissa arvoissa. Voidaan myös vertailla erilaisia polttoaineita ja niistä muodostuvien savukaasujen määrää, koostumusta ja kastepisteitä keskenään.

Työn tavoite oli saada höyrykattilan alustavia mittoja ja lämpöpinta-aloja. Työ laajeni etenkin lämmönsiirtimien tapauksessa siten, että esitetyillä laskemilla voidaan lämmönsiirrin mitoittaa lämpöteknisesti kokonaan. Vesihöyrypiirin laskelmia voidaan myös käyttää todelliseen mitoitukseen. Tapauskohtaiset tekijät on kuitenkin huomioitava tarkemmin kuin sovelluksessa on esitetty.

Vesihöyrypiirin tarkemmassa mitoituksessa voisi verrata erilaisia kaksifaasipainehäviöiden korrelaatioita keskenään. Homogeenista mallia käytettiin yksinkertaisuuden vuoksi kiihtyvyyden ja hydrostaattisen painehäviön laskentaan. Toisaalta kaksifaasipainehäviön laskenta ei ole koskaan absoluuttisen tarkkaa, jolloin kiertolaskennalle homogeeninen malli on riittävä.

Tulipesän mitoitukseen olisi huomioitava tarkemmin polttotekniikka ja palamisen parantamiseen liittyvät tekijät. Tulipesän ja polttotekniikan suunnittelu on yksityiskohtainen kokonaisuus. Työssä esitetyllä tulipesän mitoituksella saadaan arvioitua tulipesän koko. Suunniteltua polttotekniikkaa tulisi tarkastella lämpöteknisessä mitoituksessa myös käytännön ja rakenteiden puolesta.

Työssä esitetyt menetelmät antavat kuvan höyrykattilan suunnittelusta. Kokonaisvaltaisessa suunnittelussa on lisäksi huomioitava kattilan ajotavat, polttoaineen käsittely ja oheislaitteiden höyryn kulutus. Esitettyjen laskelmien tuloksilla voidaan myös mitoittaa syöttövesisäiliö, syöttövesipumput, savukaasu- ja palamisilmapuhaltimet, savupiippu ja polttoaineen käsittelylaitteet.

LÄHTEET

Ganapathy, V 2001. Superheaters: design and performance. Hydrocarbon processing. Saatavissa: http://v_ganapathy.tripod.com/superhtr.pdf. Hakupäivä 31.1.2017.

Ganapathy, V 2003. Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators, Design, Applications, and Calculations. Abilene, Texas, U.S.A: ABCO Industries.

Ganapathy, V 2015. Steam Generators and Waste Heat Boilers For Process and Plant Engineers. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group.

Hakkarainen, Timo 2013. Vesihöyrypiirin kiertolaskenta kuplapetikattilassa. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Huhtinen, Markku – Kettunen, Arto – Nurminen, Pasi – Pakkanen, Heikki 2000. Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Oy Edita Ab.

Kauppi, Timo 2013. Korkeiden lämpötilojen teräkset. Kirjallisuustutkimus. Kemi: Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu.

Kitto, John B – Stultz, Steven C 2005. Steam, its generation and use, 41st edition. Barberton, Ohio, U.S.A: The Babcock & Wilcox Company.

Koivisto, Kaarlo – Laitinen, Esko – Niinimäki, Matti – Tiainen, Tuomo – Tiilikka, Pentti – Tuomikoski, Juho 2010. Konetekniikan materiaalioppi. Helsinki: Edita Prima Oy.

Sliding -support-bearings. 2011. Kontima. Saatavissa: http://www.kontima.se/images/kat/grupp08/sliding_Layout3.pdf. Hakupäivä 14.3.2017.

Mäkelä, Mikko – Soininen, Lauri – Tuomola, Seppo – Öistämö, Juhani 2012. Tekniikan kaavasto. 10., painos. Hämeenlinna: Kariston Kirjapaino Oy

Oilon 2017. Saatavissa: <http://www.oilon.com/teollisuudelle/teollisuuspolttimet/>.
Hakupäivä 19.3.2017.

Planora. Saatavissa: <http://planora.fi/>. Hakupäivä 15.2.2017.

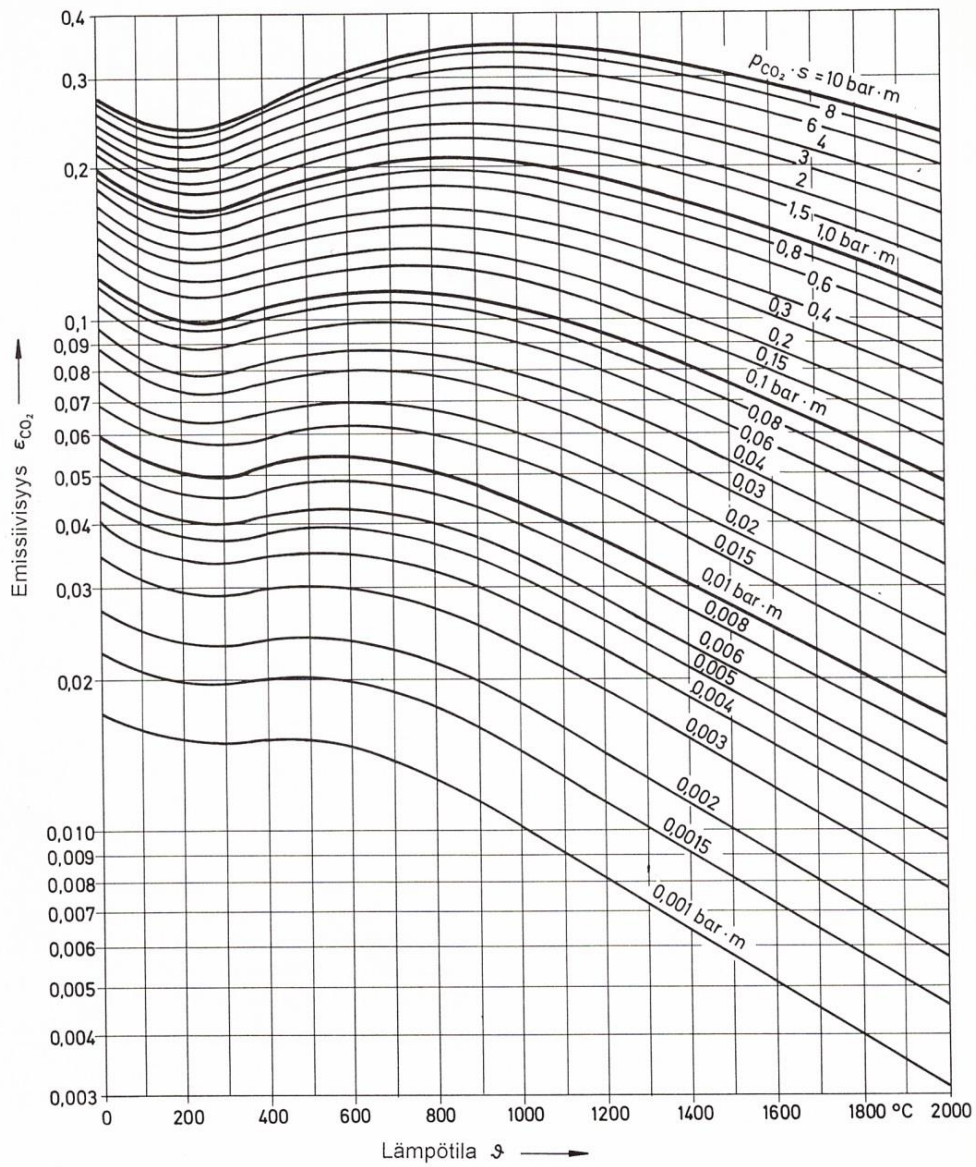
Suositus kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilalaitosten teknisiksi ratkaisuksi – VTT 2012. Energiateollisuus. Saatavissa: http://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/suositus_kotimais-ta_polttoainetta_kayttavien_0_5_30_mw_kattilalaitosten_teknisiksi_ratkaisuksi_vtt_2012.html. Hakupäivä 31.1.2017.

Teir, Sebastian – Jokivuori, Anne 2002. Thermal Design of Heat Exchangers. Helsinki: Helsinki University of Technology of Department of Mechanical Engineering.

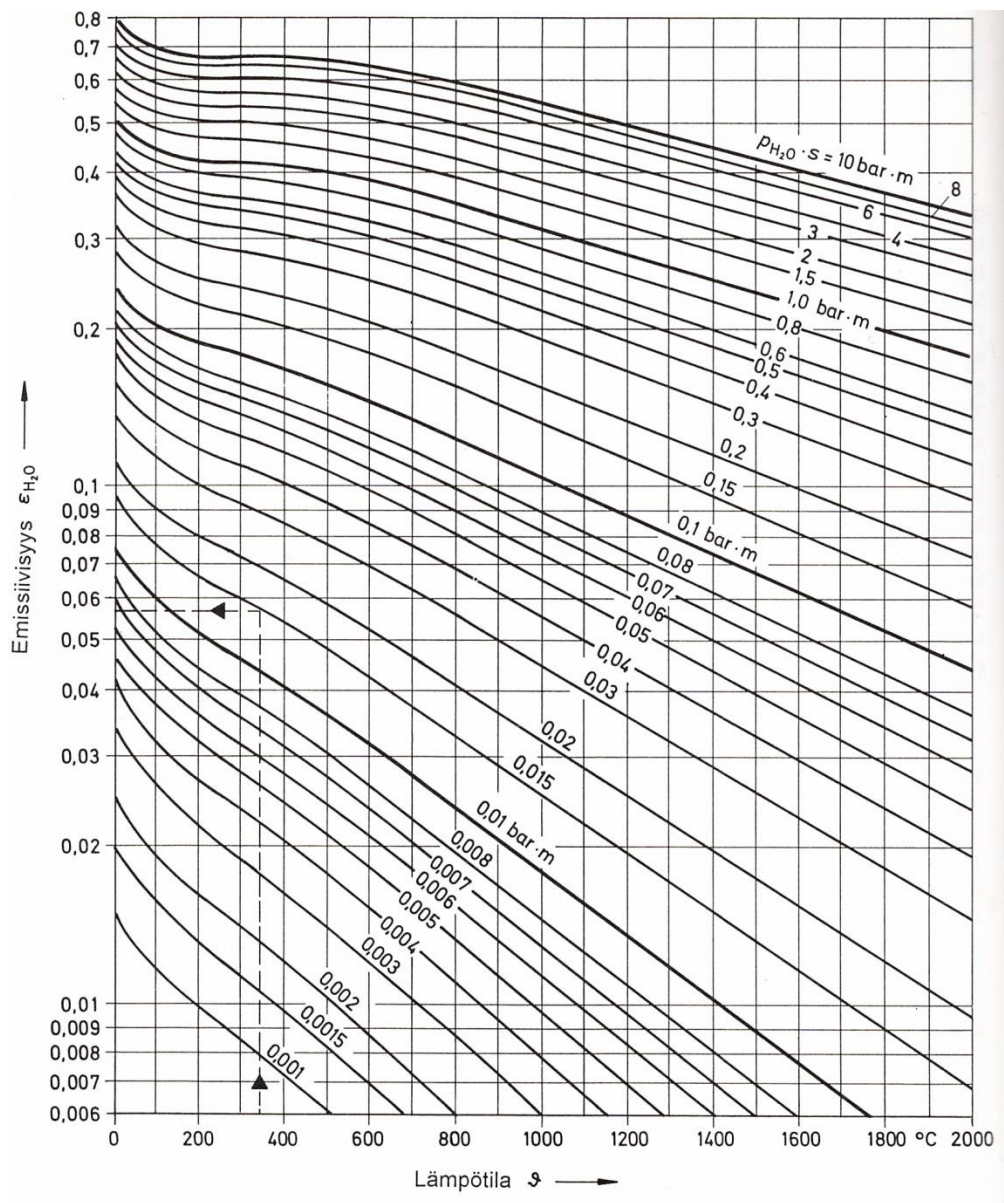
VDI-GVC 2010. VDI Heat Atlas, second edition. Dusseldorf, Germany: VDI-GVC

Wagner, Walter 1988. Lämmönsiirto. Suom. Osmo Ranta. Helsinki: Painatuskeskus Oy.

Ylikunnari, Jukka 2013. T630203 Virtaustekniikka 3 op. Opintojakson luentomateriaali. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.



Kuva 6.17 Hiilidioksidin emissiivisyys ϵ_{CO_2} , kun kokonaispaine on 1 bar



Kuva 6.15 Vesihöyryn emissiivisyys ϵ_{H_2O} kun kokonaispaine on 1 bar

LÄMMÖNSIIRTIMEN MITOITUS		Kommenttirivi
Lämmönsiirtimen nimitys: Ekonomaiser Laskennan soveltuvuus: Sileät putket Rivoitetut putket Linjassa tai limitittäin		
Logaritminen lämpötilaero ΔT_{lm} 253,4 F 1,00		Siirrettävä lämpövirta Φ_{kko} 9613,8 kW
Virtaavien aineiden lämpötilat (°C)		
Neste		T_2 T_1 T_{li}
Savukaasu		T_1 T_2 T_{li}
Neste		232 100 166
Savukaasu		565 288 426
Nesteen aineominaisuudet		
Keskimääräinen paine	P	42,4 bar g
Tiheys 1	ρ_1	960,000 kg/m ³
Tiheys 2	ρ_2	825,000 kg/m ³
Tiheys keskiarvo	ρ_{li}	892,50 kg/m ³
Kinemaattinen viskositeetti	ν	0,000 m ² /s
Lämmönjohtavuus	λ	0,663 W/K m
Prandtl	Pr	1,048 -
Tilavuusvirta	V_{li}	0,0187 m ³ /s
Lämmönsiirtoputki		
Lämmönjohtavuus	λ	50,0 W/mK
Arvio lämpötilaerosta $T_{putki} - T_{li}$	ΔT	10 °C
Arvio putken lämpötilasta	T_{putki}	175,94 °C
Putken sisäpinnan karheus	e	0,002 mm
Putken emissiivisyys	e_w	0,6
Kerrostumat putkessa		
Sisäpuolinen kerrostuma	s_{sis}	0,000 mm
Lämmönjohtavuus	λ_{sis}	2,900 W/mK
Ulkopuolinen kerrostuma	s_{ulk}	1,000 mm
Lämmönjohtavuus	λ_{ulk}	0,500 W/mK
Savukaasu kanavan koko		
Kanavan leveys	a	4,00 m
Kanavan korkeus	b	2,00 m
Virtausnopeus	v_{li}	12,23 m/s
Kanavan pinta-ala	A_{li}	8,00 m ²
Hydraulinen halkaisija	D_h	2,67 m
Kinemaattinen viskositeetti	ν	0,00006 m ² /s
Tilavuusvirta	V_{li}	68,29 m ³ /s

LÄHTÖARVOT

LASKENTATULOKSET	Lämpötekniset laskentatulokset			
	Sisäpuolinen konvektiolämmönsiirtokerroin	$\alpha_{i,k}$	8568,9	W/(m ² K)
	Kokopuolinen konvektiolämmönsiirtokerroin	$\alpha_{o,k}$	44,0	W/(m ² K)
	Säteilylämmönsiirtokerroin	α_r	5,9	W/(m ² K)
	Kokonaislämmönsiirtokerroin	$\alpha_{i,t}$	102,1	W/(m ² K)
	Keskimääräinen putken lämpötila	T_{putki}	167,4	°C
	Yhden putkipaketin määrät			
	Lämmönsiirtopinta-ala	A	371,4	m ²
	Tarvittava putkipituus	L'	2788,5	m
	Yhden putken pituus	L/putki	139,4	m
	Ripaa/putki	r/p	4648	kpl
	Ripoja yhteensä	r _t	92950	kpl
	Painehäviöiden laskentatulokset			
	Sisäpuolinen painehäviö kaikkien putkipakettien läpi			
	Kitka ja kertavastushäviö	Δp_{k+kv}	39,5	kPa
Kokoojakammion häviö	Δp_{k+km}	5,2	kPa	
Kuristusaukon häviö	Δp_{k+ka}	0,0	kPa	
	$\Delta p_{i,t}$	49,9	kPa	
		0,50	bar	
Ulkopuolinen painehäviö kaikkien putkipakettien läpi				
Savukaasun painehäviö	$\Delta p_{k+ka,sm}$	1194,4	Pa	
Virtausnopeus putkinipussa	v_p	20,53	m/s	