



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ROOPE MANNONEN
MODULAARISEN JÄTTEENPOLTTOlaitoksen konsepti-
suunnittelu

Diplomityö

Tarkastaja: professori Risto Raiko
Tarkastaja ja aihe hyväksytty Luon-
nontieteiden tiedekunnan kokouk-
sessa 9. maaliskuuta 2016

TIIVISTELMÄ

ROOPE MANNONEN: Modulaarisen jätteenpolttolaitoksen konseptisuunnittelu
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 86 sivua
Toukokuu 2016
Ympäristö- ja energiatekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Voimalaitos- ja polttotekniikka
Tarkastaja: professori Risto Raiko

Avainsanat: jätteenpoltto, modulaarinen, arina, lämmönsiirto

Työn tavoitteena oli arvioida pienen kokoluokan jätteenpolttolaitoksen modulaarista toteutusta. Modulaarisella toteutuksella tarkoitetaan, että laitos koostuu osista, jotka optimitilanteessa vain liitetään toisiinsa kiinni rakennuskohteessa. Näin kuljettaminen helpottuisi ja rakentamiseen käytettävä aika minimoitaisiin. Tehtävänä oli tuottaa lämpötekni-
nen laskenta modulaariselle jätteenpolttolaitokselle ja arvioida tämän jälkeen jätteenpolttolaitoksen taloudellista kannattavuutta.

Tutkimuksen alkuosassa perehdyttiin jätteenpolton yleisiin kysymyksiin, kuten jätteen lämpöarvoon ja perinteisten jätteenpolttolaitosten toimintaan. Työssä selvitettiin jätteenpolttolaitoksen toimintaa perustuen toimiviin laitoksiin ja alan kirjallisuuteen. Jätteenpolton päästörajoitukset ovat selvästi tiukemmat kuin perinteisten fossiilisten polttoaineiden päästörajoitukset. Tästä syystä jätteenpolton päästörajoituksia tarkasteltiin EU-lainsäädäntöön perustuen.

Jätteenpolttolaitokselle suoritettiin lämpötekni-
nen laskenta kriittisimmät ja toteutuksen kannalta merkittävimmät lämmönsiirron osa-alueet huomioiden. Laskennassa mitoitettiin jätteenpolttolaitoksen lämmönsiirtokomponentit ja niiden apulaiset energiataseisiin ja alan kirjallisuuteen perustuen. Lämmöntalteenottokattilalle ja systeemin painehäviölle suoritettiin virtaustekniikkaan ja lämmönsiirtoon perustuva laskenta.

Laskennan ja kirjallisuuslähteiden perusteella päädyttiin toteuttamaan jätteenpolttolaitos yhdistetyllä sähkön- ja lämmöntuotannolla. Prosessin lämpöteholla tuotetaan puhdasta vettä tislausprosessilla ja veden puhdistuksen jälkeen jäävä lämpö myydään. Työn tuloksena esitettiin ehdotelma laitoksen modulaarisesta toteutuksesta. Jätteenpolttolaitosprojektille suoritettiin takaisinmaksuaikaan perustuva kannattavuuslaskelma, jonka perusteella kyseistä jätteenpolttolaitosta ei ole taloudellisesti kannattavaa toteuttaa.

ABSTRACT

ROOPE MANNONEN: Concept Design for Modular Waste to Energy Power Plant
Tampere University of Technology
Master of Science Thesis, 86 pages
May 2016
Master's Degree Programme in Environmental and Energy Technology
Major: Power Plant and Combustion Technology
Examiner: Professor Risto Raiko

Keywords: waste to energy, modular, grate, heat exchange

The objective of this Master's thesis was to evaluate the feasibility of a modular waste to energy power plant. Modular implementation means that the structure of the power plant consists of functional modules which are attached to each other on site. This modular structure makes transporting easier and the time for construction on power plant site would be minimized. The task was to produce a thermal -technical calculation of the modular waste to energy power plant and to evaluate the economic viability of the whole project.

At the outset of this study, the work was about answering the basic questions of incineration. Heating value of municipal solid waste and function of a traditional waste to energy power plant were investigated. The thesis studied the waste incinerator activities based on operating waste to energy power plants and related literature. The emission standards of waste to energy power plants are much stricter than traditional fossil fuel emission standards. For that reason, the power plant's emission limits were considered based on EU legislation.

The calculation and dimensioning process of the power plant was based on the most critical heat transfer areas of the waste to energy power plant. Calculations produced dimensioning for heat transfer components and their auxiliary equipment. The pressure drop of the system and the waste heat recovery boiler's dimensions were calculated based on fluid dynamics and heat transfer theories.

Based on calculations and literature, the waste to energy power plant was decided to construct as a combined heat and power plant. The thermal power of the power plant is used to produce clean water by distillation process and the remaining heat power is sold. A suggestion for the implementation of the modular waste to energy power plant was presented as a result of this study. Also a profitability calculation based on the payback time of the power plant was produced. The calculation presented expected results: the power plant is not economically feasible.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on laadittu Prohoc Oy:lle Vaasassa. Työn aihe syntyi tarpeesta ratkaista ongelma modulaarisen jätteenpolttolaitoksen toteutettavuudesta. Aiheen rajauksen jälkeen sain suunnitella ja toteuttaa tutkimusta melko vapaasti. Tutkimuksesta teki mielenkiintoisen juuri tutkimuksen vapaasta toteutuksesta aiheutuva vastuu. Viikoittain pidettävät palaverit työni ohjaajan, Tapio Gyllingin kanssa, motivoivat tekemään tutkimusta parhaalla mahdollisella tavalla.

Haluan kiittää työni ohjaajaa ja esimiestäni Tapio Gyllingiä mahdollisuudesta tehdä tutkimusta ja laadukkaasta työn ohjauksesta. Kiitän myös koko Prohoc Oy:n henkilöstöä mukavasta työympäristöstä ja työilmapiiristä. Lisäksi osoitan kiitokseni professori Risto Raikolle, joka auttoi työn teknisesti haastavissa osioissa jatkamaan työtäni loppuun asti.

Haluan osoittaa myös lämpimät kiitokseni avopuolisolleni, joka jaksoi kannustaa minua loputtomalta tuntuvan diplomityöurakan aikana jatkuvasti.

Vaasassa, 7.4.2016

Roope Mannonen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	JÄTTEENPOLTTO	2
2.1	Poltettavat kiinteät jätteet	2
2.1.1	Sekajäte	2
2.1.2	Jätepolttoaineet.....	5
2.2	Kiinteän jätteen poltto	6
2.2.1	Sekajätteen poltto	6
2.2.2	Jätepolttoaineiden poltto	7
2.2.3	Rinnakkaispoltto	8
3.	JÄTTEENPOLTTOlaitoksen TOIMINTA	9
3.1	Jätteen vastaanotto ja varastointi	9
3.2	Jätteesyöttö polttoon.....	11
3.3	Polttosysteemi	11
3.4	Lämmönsiirto	13
3.5	Tuhkankäsittely	15
3.6	Savukaasujen puhdistus.....	16
3.7	Turbiini ja lauhdutin.....	19
3.7.1	Lauhdevoima.....	19
3.7.2	Yhdistetty lämmön ja sähkön tuotanto.....	19
3.7.3	Yhdistetty prosessihöyryn ja sähkön tuotanto	20
4.	POLTTOtekniikan TARKASTELU	21
4.1	Arinapolton tulipesägeometria	22
4.1.1	Myötävirtaperiaate	22
4.1.2	Vastavirtaperiaate.....	23
4.1.3	Keskivirtausperiaate.....	23
4.2	Arinatyypit	23
4.2.1	Mekaaninen myötäsyöttöarina	24
4.2.2	Mekaaninen vastasyöttöarina.....	25
4.2.3	Valssiarina.....	25
5.	JÄTTEENPOLTTON EU-LAINSÄÄDÄNTÖ.....	27
5.1	Toimintaa koskevat vaatimukset	27
5.2	Ilmaan joutuvien päästöjen raja-arvot	28
5.3	Savukaasujen puhdistuksesta syntyvät jätevesipäästöt	30
5.4	Muut huomioitavat asiat.....	30
6.	TULIPESÄN ENERGIAVIRRAT	32
6.1	Yhdyskuntajäte.....	32
6.1.1	Jätteen alkuainekoostumus.....	32
6.1.2	Jätteen energiavirta	33
6.2	Palamisilma	34
6.2.1	Kuiva ilma.....	34

6.2.2	Ilman kosteus	35
6.2.3	Ilman lämpövirta	35
6.3	Savukaasu	37
6.3.1	Savukaasuanalyysi	37
6.3.2	Savukaasujen lämpövirta	38
7.	SÄTEILYKANAVAN LÄMMÖNSIIRTO	40
7.1	Kaasun säteily	40
7.2	Konvektiivinen lämmönsiirto	45
7.3	Säteilykanavan kokonaislämmönsiirto	46
8.	LÄMMÖNTALTEENOTTOKATTILAN LÄMMÖNSIIRTO	48
8.1	Tulistimen energiatase	48
8.2	Höyrystimen energiatase	49
8.3	Ekonomaiserin energiatase	50
8.4	Ilman esilämmittimen energiatase	50
9.	TURBIINI JA LÄMMÖNTUOTANTO	52
9.1	Turbiinin teho	52
9.2	Laitoksen lämpöteho	53
9.3	Syöttöveden arvot	54
10.	KONVEKTIO-OSAN LÄMMÖNSIIRTIMIEN MITOITUS	56
10.1	Tulistimen mitoitus	56
10.1.1	Ulkopuolinen virtaus tulistinputkipakettiin	57
10.1.2	Tulistimen sisäpuolen lämmönsiirto	59
10.1.3	Tulistimen kokonaislämmönsiirto ja mitoitus	61
10.2	Höyrystimen mitoitus	63
10.2.1	Ulkopuolinen virtaus höyrystinputkipakettiin	64
10.2.2	Höyrystimen sisäpuolen lämmönsiirto	65
10.2.3	Höyrystimen kokonaislämmönsiirto ja mitoitus	66
10.3	Ekonomaiserin mitoitus	67
10.3.1	Ulkopuolinen virtaus ekonomaiseriputkipakettiin	68
10.3.2	Ekonomaiserin sisäpuolen lämmönsiirto	68
10.3.3	Ekonomaiserin kokonaislämmönsiirto ja mitoitus	69
10.4	Ilman esilämmittimen mitoitus	71
10.4.1	Ulkopuolinen virtaus ilman esilämmittimellä	72
10.4.2	Ilman esilämmittimen sisäpuolen lämmönsiirto	72
10.4.3	Ilman esilämmittimen kokonaislämmönsiirto	73
11.	PAINEHÄVIÖT JA SAVUKAASUPUHALTIMEN MITOITUS	76
11.1	Vapaiden kanavien painehäviöt	76
11.2	Lämmönsiirtimien painehäviöt	77
11.3	Savukaasunpuhdistuslaitteiden painehäviöt	79
11.4	Savukaasupuhaltimen mitoitus	79
12.	PUHTAAN VEDEN TUOTANTO LÄMMÖLLÄ	80
13.	VOIMALAITOKSEN MODULAARINEN TOTEUTUS	82

14. VOIMALAITOKSEN TALOUS	83
14.1 Investointikustannus.....	83
14.2 Vuosittaiset tuotot	83
14.3 Vuosittaiset kulut.....	83
14.4 Takaisinmaksuaika ja kannattavuus	84
15. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	85
LÄHTEET.....	87

LYHENTEET JA MERKINNÄT

APC-jätteet	engl. <i>Air pollution control residues</i> , savukaasunpuhdistusjätteet
HHV	engl. <i>Higher heating value</i> , ylempi lämpöarvo
LHV	engl. <i>Lower heating value</i> , alempi/ tehollinen lämpöarvo
LUVO	saks. <i>Luftvorwärmer</i> , ilman esilämmitin
REF	engl. <i>Recovered fuel</i> , energiajakeesta valmistettu kierrätyspolttoaine
RDF	engl. <i>Resource derived fuel</i> , sekajätteestä valmistettu kierrätyspolttoaine
α	absorptiosuhde [-]
ε	emissiviteetti [-]
$\Delta\varepsilon$	emissiviteetin korjauskerroin [-]
η_{mg}	sähkömekaaninen hyötysuhde [-]
η_s	isentrooppinen hyötysuhde [-]
λ	ilmakerroin [-]
ν	kinemaattinen viskositeetti [m ² /s]
ξ	kitkakerroin [-]
ρ	tiheys [kg/m ³]
σ	Stefan-Boltzmanin vakio [5,67*10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴]
ϕ	lämpövirta, energiavirta, lämpöteho [W, kW]
φ	suhteellinen kosteus [-]
χ	korjauskerroin painehäviölle putkipaketissa [-]
ζ	kertavastus [-]
A	pinta-ala [m ²]
A_c	poikkileikkauksen pinta-ala [m ²]
A_s	säteilypinnan pinta-ala [m ²]
C_1	virtausvakio [-]
D_h	putken hydraulinen halkaisija [m]
d_h	virtauskanavan hydraulinen halkaisija [m]
D_i	putken sisähalkaisija [m]
D_u	putken ulkohalkaisija [m]
E_s	laskettu päästöpitoisuus standardoituna [mg/m ³]
E_M	mitattu päästöpitoisuus [mg/m ³]
F	ristivirtauksen korjauskerroin [-]
f	kitkakerroin [-]
H	korkeus [m]
H_k	kaasun entalpian polynomisovitteen kerroin [-]
H_{mt}	molaarinen tuntuva entalpia [kJ/mol]
h	entalpia [kJ/kg]
h_c	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [W/m ² K]
h_t	tuntuva entalpia [kJ/kg]
Δh	entalpian muutos [kJ/kg]
k	virtausaineen lämmönjohtavuus [W/mK]
k_s	putkimateriaalin lämmönjohtavuus [W/mK]
L	pituus [m]
M	moolimassa [g/mol]

m	virtausvakio [-]
\dot{m}	massavirta [kg/s]
N_L	putkirivien määrä [-]
N_T	vierekkäisten putkien määrä [-]
N_{LP}	lämmönsiirripakettien määrä [-]
N_{TL}	peräkkäisten sisääntulojen määrä ilman esilämmittimellä [-]
n	ainemäärä [mol]
\dot{n}	moolivirta [mol/s]
Nu	Nusseltin luku [-]
O_M	mitattu happipitoisuus [vol %]
O_S	standardin mukainen happipitoisuus [vol %]
P	1. massaosuus prosentteina [%] 2. ristivirtauksen lämpötilakerroin [-] 3. sähköteho [W] 4. virtauskanavan kehän pituus [m]
p	paine [Pa, bar]
Δp	paineen muutos [Pa, bar]
Pr	Prandtl'in luku [-]
q_i	kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo [kJ/kg]
q_{iw}	kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo [kJ/kg]
q_s	kalorimetrinen lämpöarvo [kJ/kg]
R	ristivirtauksen lämpötilakerroin [-]
Re	Reynoldsin luku [-]
S_L	putkiväli virtaussuunnassa [m]
S_T	putkiväli kohtisuorassa virtaukseen nähden [m]
s_{eq}	säteilevän kerroksen paksuus [m]
T	lämpötila [K, °C]
T_R	dimensioton lämpötila [-]
ΔT	lämpötilan muutos [K, °C]
ΔT_{lm}	logaritminen keskilämpötilaero [K, °C]
t	aika [s]
U_L	Lämmönläpäisykerroin yksikköpituutta kohti [W/mK]
V	1. tilavuus [m ³] 2. keskinopeus [m/s]
v	1. nopeus [m/s] 2. ominaistilavuus [m ³ /kg]
W	1. kosteuspitoisuus prosentteina [%] 2. leveys [m]
x	1. massaosuus [-] 2. mooliosuus [-]

1. JOHDANTO

Tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia pienen, lämpöteholtaan alle 10 MW jätteenpolttolaitoksen toteutettavuutta. Työn tavoitteena on tuottaa lämpöteknisen tarkastelun pohjalta modulaarisen toteutuksen konseptisuunnitelma jätteenpolttolaitokselle. Suunnitelmalle asettavat haasteensa modulaarisen toteutettavuuden rajoitteet lämmönsiirrolle ja taloudellisen kannattavuuden haasteet. Työn alussa tarkastellaan jätteenpoltttoa yleisesti perinteiseen jätteenpoltoon perustuen ja arvioidaan poltettavan jätteen lämpösisältöä. Jätteenpolttolaitoksen toiminta esitetään luvussa 3 kirjallisuuteen ja rakennettuihin jätteenpolttolaitoksiin tukeutuen. Jätteenpolton polttotekniikkaa tutkitaan tarkemmin luvussa 4 ja tarkastelun perusteella valitaan kokonaisvaltaisesti paras polttosysteemi. Jätteenpolton päästömääräykset ovat tiukemmat kuin perinteisten fossiilisten polttoaineiden poltossa. Jätteenpolton päästörajoituksia tarkastellaan Euroopan Unionin jätteenpolttodirektiivin näkökulmasta.

Jätteenpolttolaitoksen lämpötekninen tarkastelu toteutetaan Microsoft Excel-taulukkolaskentaohjelmalla. Lämpöteknisen laskennan tärkeimmät teoreettiset faktat on selvitetty alan kirjallisuudesta ja jätteenpolttolaitoksen lämpötekniikka tärkeimpine teorioineen ja tuloksineen esitetään luvuissa 6-10. Laskenta alkaa tulipesän energiavirroista energiataaseiden ja savukaasuanalyysin perusteella ja päättyy tuotetun sähkö- ja lämpötehon määrään sekä lämmönsiirtimien mitoitukseen. Työssä edetään tulipesästä säteilykanavan lämmönsiirtoon, mikä esitetään säteilyyn ja konvektiiviseen lämmönsiirtoon perustuen energiatasemuodossa. Energiataseisiin perustuva tarkastelu prosessissa suoritetaan myös lämmöntalteenottokattilalle ja turbiinille.

Energiataseiden pohjalta suoritetaan prosessin eri osille varsinainen fyysinen mitoitus. Mitoituksen perustana pidetään modulaarisen toteutuksen asettamia raja-arvoja. Lämmöntalteenottokattila mitoitetaan kirjallisuuslähteisiin perustuvalla putkipakettien lämmönsiirron yhtälöillä. Voimalaitoksen savukaasukanavan painehäviö arvioidaan savukaasunpuhdistuslaitteet mukaan huomioiden. Jätteenpolttolaitos toteutetaan sähkö- ja lämmön yhteistuotantolaitoksena ja yksi lämmön hyötykäyttökohteista on puhtaan veden tuotanto ja itse lämpö myydään.

Yksi diplomityön tavoitteista on arvioida jätteenpolttolaitoksen modulaarista toteutettavuutta. Luvussa 13 esitetään ehdotelma jätteenpolttolaitoksen rakenteesta, joka toteutetaan moduuleita yhdistämällä. Lopussa jätteenpolttolaitosprojektia arvioidaan taloudellisesta näkökulmasta takaisinmaksuaikaan perustuvalla kannattavuuslaskelmalla.

2. JÄTTEENPOLTTO

Jätteenpoltolle on monia motivoivia syitä. Useimmat näistä syistä ovat ympäristön suojeluun perustuvia. Jätteitä polttamalla vähennetään kaatopaikkajätteen määrää merkittävästi. Kaatopaikkajätteet pilaavat maaperää ja niistä syntyy hajuhaittoja. Kaatopaikat myös peittävät suuria pinta-aloja, joita voitaisiin muuten hyötykäyttää. Toisaalta kaatopaikalla olevista jätteistä ja niiden sinne toimittamisesta syntyvien ilmastonmuutosta kiihdyttävien kaasujen, kuten metaani (CH_4) ja hiilidioksidi (CO_2), määrät ovat suuremmat kuin jätteenpolton kasvihuonekaasujen määrät [1]. Lisäksi jätteenpoltolla saadaan hävitettyä terveydelle ja ympäristölle välittömästi vaarallisia aineita, kuten biologisesti aktiivista materiaalia, sairaalajätettä ja muuta pysyvästi pilaantunutta materiaalia [2].

Toinen merkittävä syy jätteenpoltolle on kierrätykseen kelpaamattoman jätteen energiahyödyntäminen. Jätettä polttamalla tuotetaan muuten hukkaan heitettävästä materiaalista energiaa. Asumisessa syntyvästä yhdyskuntajätteestä suuri osa on orgaanista alkuperää. Kun tätä jätettä hyödynnetään energiantuotannossa, se luokitellaan uusiutuvaksi energiaksi ja vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ilmakehään [3][4]. Jätteenpoltolla voidaan vähentää ja korvata fossiilisten polttoaineiden käyttöä polttoaineena voimalaitoksissa.

Tämän kappaleen tarkoituksena on luoda käsitys poltettavasta jätteestä ja esitellä jätteenpolttoprosesseja yksinkertaistettuna. Ensin perehdytään siihen, mitä jätettä poltetaan energiantuotannossa ja mitä erityyppisiä jätteenpolttolaitoksia näiden jätteiden polttamiseen on olemassa.

2.1 Poltettavat kiinteät jätteet

Tässä työssä tarkastellaan jätteitä energiantuotannon kannalta. Ongelmajätteitä ja nestemäisiä jätteitä ei tarkastella. Tarkastelun kohteena on kiinteä yhdyskuntajäte sekajätteenä tai jalostettuna eriluokkaisiksi jätepolttoaineiksi.

2.1.1 Sekajäte

Sekajäte on lajittelematonta yhdyskuntajätettä tai syntypaikkalajiteltua yhdyskuntajätettä. Myös samankaltaista teollisuuden ja kaupan alalta peräisin olevaa jätettä voidaan pitää sekajätteenä. Yleisesti sekajätteenä voidaan pitää sitä jätettä, joka päättyy sekajäteastiaan jätteenlajittelussa [16]. Sekajätteen laatu vaihtelee paljon alueittain ja eri maissa voi olla eriävät sekajätteen koostumukset riippuen paljon esimerkiksi elintasosta. Mainittakoon, että kehittyvissä maissa sekajäte sisältää enemmän ruokaperäistä jätettä kuin kehittyneissä maissa. Kehittyneiden maiden sekajäte puolestaan sisältää enemmän paperia kuin

kehittyvien maiden sekajäte [5][9]. Sekajäte polttoaineena on heikkolaatuista verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin. Jätteen palamiseen liittyvät ominaisuudet, kuten kosteus, lämpöarvo ja palamattomien aineiden osuus vaihtelevat jätteen koostumuksen mukaan. Lähteiden [9][12][13][14] mukaan länsimaissa sekajätteiden lämpöarvo vaihtelee välillä 9-17 MJ/kg ja kehittyvissä maissa se voi jäädä selvästi tämän arvon allekin ollen 5-14 MJ/kg [2][15][27]. Taulukkoon 1 on koottu sekajätteiden kuiva-aineen koostumuksia eri puolilla maailmaa.

Taulukko 1. Sekajätteen koostumus maailmalla [29]

Komponentti	Länsimaat	Itä-Aasia ja Tyynenmeren alue	Afrikka	Maailma keskimäärin
Orgaaninen aines [p%]	27	62	57	46
Paperijäte [p%]	32	10	9	17
Muovijäte [p%]	11	13	13	10
Lasi [p%]	7	3	4	5
Metalli [p%]	6	2	4	4
Muut [p%]	17	10	13	18
Yhteensä	100	100	100	100

Alkuainepitoisuuksien tarkkaan määrittämiseen ei päästä kuin ottamalla näytteitä jätteistä alueittain. Tästä johtuen sekajätteen lämpöarvoa arvioidaan fyysisen koostumuksen perusteella lähteitä käyttäen. Alla esitettävät kaavat (1-3) ovat jätteen fyysiseen koostumukseen perustuvia lämpöarvon kaavoja kirjallisuudesta [9][28][30].

$$LHV = \left(369 * P_{pl} + 169,5 * (P_{fo} + P_{pa}) \right) * \left(\frac{100-W}{W} \right) - 24,4 * W \quad (1)$$

Kaavassa LHV tarkoittaa alemmaa, eli tehollista lämpöarvoa [kJ/kg]. P_{pl} on muovin, P_{fo} ruoan ja siihen verrattavien aineiden ja P_{pa} paperipitoisen jätteen painoprosentti kosteassa jätteessä. W on jätteen kosteuspitoisuus painoprosentteina. Kaava 2 esittää jätteen lämpöarvon laskennan samalla periaatteella kuin kaava 1, mutta jaottelee jätteen useampaan osaan.

$$LHV = \left(161,2 * P_{pa} + 385,3 * P_{pl} + 206 * P_{te} + 160,4 * P_{wo} + 157,1 * P_{fo} + 268,1 * P_{mi} \right) * \left(\frac{100-W}{W} \right) - 24,4 * W \quad (2)$$

Kaavassa P_{te} tarkoittaa tekstiilien, P_{wo} puuaineksen ja P_{mi} muiden, luokittelemattomien aineiden painoprosenttia jätteessä [28]. Jätteen lämpöarvon laskennalle esitetään myös seuraavaa kaavaa:

$$LHV = \sum x_j HHV_j - 2445 * W \quad (3)$$

jossa x_j on jätekomponentin massaosuus jätteen aineksesta ja HHV_j jätekomponentin ylempi lämpöarvo yksikössä kJ/kg. Taulukkoon 2 on koottu jätteen eri komponenttien kuiva-aineen lämpöarvoja, joilla yhtälö 3 voidaan laskea, kun tiedetään jätteen koostumus.

Taulukko 2. Jätekomponenttien ylempiä lämpöarvoja lähteitä [9] ja [2] mukailten

Komponentti	Alakategoria	Ylempi tehollinen lämpöarvo HHV saapumistilassa [MJ/kg]
Ruoka ja siihen verrattavat		14-20
Muovit	Polyetyyleeni	45
	PVC	15-25
	Polystyreeni	40
	Polypropyleeni	45
Tekstiilit		17-19
Kumi ja nahka		20-25
Paperijäte		16-19
Puujäte		12-19
Metallit		0
Lasi		0
Hienoaines		15

Jotta sekajätettä pystytään taloudellisesti hyödyntämään energiana, on sen keskimääräisen tehollisen lämpöarvon oltava vähintään luokkaa 6 MJ/kg [9]. Sekajätteen kosteuspiitoisuuden arvot vaihtelevat Suomessa välillä 25-40% [12], kun taas kehittyvissä maissa kosteuspiitoisuus voi olla jopa yli 50% [9][15]. Palamattoman aineksen osuus länsimaiden sekajätteissä on luokkaa 5-20 %, kun taas kehittyvissä maissa se voi olla 5-30 % jätteen massasta [9]. Taulukossa 3 esitetään jätteen koostumus lämpöarvon laskennan kannalta. Kuiva-ainepitoisuuksien suhteet noudattavat taulukon 2 arvoja ja jätteiden kosteuspiitoisuuksia arvioidaan lähteitä [9][12][13][14][15][17] ja [18] käyttämällä. Taulukon 3 painoprosentteina ilmoitetuin arvoin selvitetään kaavoja 1-3 käyttämällä jätteen suunta-annattavat lämpöarvot eri puolilla maailmaa.

Taulukko 3. Jätteiden ominaisuudet lämpöarvon laskennan kannalta

Komponentti	Länsimaat	Itä-Aasia ja Tyynenmeren alue	Afrikka	Maailma keskimäärin
Orgaaninen aines [p%]	16,2	31	28,5	25,3
Paperijäte [p%]	19,2	5	4,5	9,35
Muovijäte [p%]	6,6	6,5	6,5	5,5
Lasi [p%]	4,2	1,5	2	2,75
Metalli [p%]	3,6	1	2	2,2
Muut [p%]	10,2	5	6,5	9,9
Kosteus [p%]	40	50	50	45

Laskenta tuottaa odotettuja tuloksia lämpöarvoille. Länsimaissa jätteen lämpöarvo on keskimäärin suurempi kuin Afrikassa ja Aasiassa. Lämpöarvolle saadaan taulukon 4 mukaiset vaihteluvälit alueittain. Vaihtelevuuden lämpöarvoissa aiheuttaa kaavojen suurpiirteisyys ja määritetyn jätteen koostumuksen arvioiminen vain kirjallisuuslähteitä käyttäen. Tulokset ovat kuitenkin hyvin linjassa kirjallisuudessa esitettyjen yleisten jätteiden tehollisten lämpöarvojen kanssa. Esimerkiksi länsimaiden sekajätteille on arvioitu kirjallisuudessa usein arvoksi noin 10 MJ/kg ja kehittyvien maiden jätteiden teholliseksi lämpöarvoksi pari yksikköä pienempi lämpöarvo [9][13][14][27].

Taulukko 4. Lajittelemattoman sekajätteen lasketut teholliset lämpöarvot

	Länsimaat	Itä-Aasia ja Tyynenmeren alue	Afrikka	Maailma keskimäärin
Tehollinen lämpöarvo [MJ/kg]	10-15	7,2-9,2	6,7-9	8,5-11,1

2.1.2 Jätepolttoaineet

Joskus tavoitteena on jalostaa yhdyskuntajätteestä polttoainetta. Tällöin puhutaan RDF:stä (Refuse Derived Fuel) tai REF:stä (Recovered Fuel). Vielä tarkemmin eroteltuna RDF tarkoittaa yhdyskuntien sekajätteestä mekaanisesti valmistettua jätepolttoainetta ja REF yhdyskuntien syntypaikkalajitellusta energiajätteestä valmistettua jätepolttoainetta [16].

RDF:n valmistus voi koostua monista eri vaiheista riippuen kuinka prosessoitua polttoainetta on tarkoitus valmistaa. Yleisesti RDF:n valmistuksessa pienennetään jätteen palakokoa murskaamalla jäte pienemmäksi. Rautapitoiset metallit poistetaan magneetilla. Tuuliseulonnalla pystytään erottamaan kevyitä ja raskaita jakeita toisistaan. Hyötykäytettävää ja kierrätettävää materiaalia poistetaan prosessin eri vaiheissa riippuen jalostusasteesta. Palamattomia ainesosia pyritään myös poistamaan, sillä kyseisellä menetelmällä saadaan jätepolttoaineen energiasisältöä painoyksikköä kohti kasvatettua. Murskattu jätepolttoaine voidaan vielä jatkojalostaa pelleteiksi, jotka voidaan syöttää rinnakkaispolttoaineena polttoon [5][6].

REF:n valmistus on pitkälti samanlainen prosessi kuin RDF:n valmistus. REF-polttoainetta voidaan valmistaa samalla tuotantolaitoksella kuin RDF-polttoainetta. Suurin ero polttoaineiden välillä on, että REF ei ole sekajätteestä valmistettua polttoainetta kuten RDF. REF on valmistettu energiajätteestä, jossa pääkomponentteina ovat muovi ja puukuidut ja täten se on palamisteknisesti parempilaatuista polttoainetta kuin RDF [16].

2.2 Kiinteän jätteen poltto

Jätteen energiahyödyntämisen kannalta jätteenpolttolaitokset on järkevä jakaa kolmeen eri tyyppiin. Voimalaitokset jaotellaan tässä polttoainevirtojen perusteella. On olemassa yhdyskuntajätettä polttavia jätteenpolttolaitoksia, joissa jäte on käsittelemätöntä tai syntypaikkakäsiteltyä yhdyskuntajätettä. Toinen jätteenpolttolaitostyyppi on jätepolttoainetta polttava jätteenpolttolaitos. Lisäksi on olemassa yhteispolttolaitoksia, joissa jätteenpolttoainetta poltetaan muun polttoaineen ohella [2][3].

2.2.1 Sekajätteen poltto

Sekajätettä poltetaan useimmiten massapolttona. Tämä tarkoittaa, että jätettä ei juuri esikäsitellä ennen polttoprosessia, vaan se syötetään palotilaan sellaisenaan. Jäte tulee polttoon esimerkiksi täytenä muovipussina, joka kotitaloudesta on roska-astiaan viety. Prosessi on suunniteltu kestämään jätteen lämpöarvon, kosteuden ja tuhkapitoisuuden vaihtelua. Vain hyvin suuret kappaleet rikotaan ja jätteestä poistetaan suuret metalliesineet [3].

Massapolttosysteemit käsitteenä sisältää kaksi selvästi toisistaan eriävää polttotekniikan suuntausta: eurooppalaistyyppisen systeemin ja modulaarisen systeemin. Nämä suuntauokset eroavat toisistaan paitsi teknisen toteutuksen puolesta, myös jätteenpolttokapasiteetiltaan.

Eurooppalaisen menetelmän massapoltto on perinteisesti korkean jätekapasiteetin prosessi. Jätteenpolttolaitosten päivittäiskapasiteetit vaihtelevat usein 100-840 tonnin välillä. Tällä jätteenpolttomenetelmällä pääomakustannukset jätetonnin kohti nousevat usein suuriksi pienen kokoluokan jätteenpolttolla ilman minkäänlaista esikäsitelyä, joten pienen kokoluokan jätteenpolttolaitoksen taloudellista kannattavuutta on arvioitava tarkkaan [5].

Eurooppalaisen menetelmän massapoltto perustuu arinapolttoon. Jäte syötetään sellaisenaan arinalle ja palaa vaiheittain säädellyn palamisilman ansiosta. Palamisilmaa syötetään sekä arinan alapuolelta, että yläpuolelta. Liikkuessaan eteenpäin arinalla, polttoaine ensin kuivuu arinan alapuolelta tulevan polttoilman ja tulipesän säteilylämmönsiirron ansiosta. Kuivuttuaan jäte pyrolysoituu ja palaa. Pyrolyysi ja palaminen kuluttavat kiinteän aineen suurelta osin pois. Prosessissa syntyy vetyä, hiilidioksidia ja palamattomia hiilivetyjä, jotka poltetaan pois sekundääri-ilmalla arinan yläpuolella tulipesässä[2][5]. Arinatyyppisiä on monia erilaisia ja arina valitaan kullekin jätteenpolttolaitokselle tapauskohtaisesti, jotta prosessi olisi kokonaisuudessaan paras mahdollinen [9]. Polttotekniikoihin ja erilaisiin arinoihin paneudutaan myöhemmin tässä tutkimuksessa.

Kuten eurooppalaisessa menetelmässä, myös modulaarisessa massapoltossa jäte poltetaan käsittelemättömänä tai vain hieman käsiteltynä. Tyypilliset modulaariset jätteenpolttolaitokset polttavat päivittäin 10-100 tonnia jätettä ja niiden käyttökustannukset jätetonia kohti ovat pienemmät kuin perinteisessä eurooppalaisessa massapoltossa. Modulaarinen jätteenpolttotekniikka sopii pienen kapasiteetin jätteenpolttoon. Kokonaishyötysuhde jää modulaarisessa jätteenpolttoratkaisussa usein kuitenkin selvästi alhaisemmaksi kuin eurooppalaisessa massapolttoratkaisussa [5].

Modulaarista jätteenpolttolaitosta voi kutsua kontrolloidun ilman polttolaitokseksi. Modulaarisen jätteenpolttolaitoksen polttoprosessi on kaksivaiheinen. Yleensä polttoprosessi koostuu kahdesta eri polttokammioista: primääripolttokammioista ja sekundääripolttokammioista. Polttoprosesseja on kaksi erilaista: ali-ilmainen ja yli-ilmainen polttoprosessi.

Ali-ilmaisessa poltossa primäärikammioon syötetty jäte ei saa tarpeeksi ilmaa palaakseen. Jäte kulkee kiinteiden tasojen päällä hydraulisten työntimien avulla. Tästä johdettua primäärikammiossa muodostuu pyrolyysikaasuja. Syötetyn ilman määrä primääripolttokammiossa vaihtelee 30 % ja 80 % välillä stoikiometrisesta ilmanmäärästä. Varsinainen palaminen tapahtuu sekundäärikammiossa, jossa riittävä määrä palamisilmaa syötetään, jotta prolyysissa syntyneet kaasut palaisivat [10][11].

Yli-ilmaisessa poltossa primäärikammiossa on ilmaa yli stoikiometrisen määrän. Polttosysteeminä on tyypillisesti pieni arina ja prosessiin syötetään ilmaa 140 % - 300 % stoikiometrisesta ilmamäärästä. Lähes täydellinen palaminen tapahtuu jo primäärikammiossa. Täydellinen loppuunpalaminen varmistetaan sekundäärikammiossa, jossa epätäydellisestä palamisesta jääneet kaasut ja palamattomat yhdisteet poltetaan. Ilmaa syötetään sekundäärikammioon tarpeen mukaan [5].

2.2.2 Jätepolttoaineiden poltto

Jätepolttoainetta pelkästään polttavat polttolaitokset ovat polttolaitoksia, joissa jäte on prosessoitu takaamaan paras mahdollinen palaminen. Tämä toteutetaan tekemällä jättestä mahdollisimman homogeenistä. Jätteen esikäsittely mahdollistaa paremman loppuunpalamisen, tasaisemman palamisprosessin ja tarkemman palamisen kontrolloinnin kuin käsittelemätöntä yhdyskuntajätettä polttavalla jätteenpolttolaitoksella [6][2][2].

Jätepolttoaineen palaminen on usein puolisuusensiopalamista. Jaoteltu jätepolttoaine syötetään mekaanisesti tai pneumaattisesti palotilaan ja se sekoittuu hyvin palamisilman kanssa. Polttoaineen kuivuminen ja palaminen tapahtuvat suurelta osin ilmassa ja loppuunpalaminen tapahtuu, kun aines tippuu arinalle painovoiman vaikutuksesta [2]. Tästä mainittakoon esimerkkinä Spreader-Stoker-tekniikka, jossa polttoaine pyritään levittämään erityisellä heittimellä tasaisesti palotilaan ja liikkuvalla arinalle [8]. Jätepolttoainetta voidaan polttaa myös sen polttoon suunnitellussa leijukattiloissa tai pienissä vakioiduissa arinapolttolaitoksissa [7].

Tyypillisesti jätepolttoaineen poltossa saadaan aikaan parempi energian hyötykäytön hyötysuhde ja pienempi yli-ilman tarve kuin perinteisellä yhdyskuntajätteen massapoltoilla. Täten jätepolttoaineen polttolaitoksilla saavutetaan suuressa mittakaavassa alemmat pääomakustannukset kuin massapoltoissa. Jätepolttoaineen polttolaitokset vaativat suuret ja kalliit polttoaineenkäsittelylaitteet, jotta polttoaineesta tulee riittävän hienojakoista polttoprosesseille. Kirjallisuudessa on mainittu, että etenkin pitkälle jalostetun jätepolttoaineen poltto pelkkäänään ei ole juuri polttoaineenkäsittelyprosessien ja kalliin tekniikan takia taloudellisesti kannattavaa alle n. 400 tonnia päivässä polttaville jätevoimaloille [5]. Tästä syystä varsinainen jätepolttoainelaitos ei sovellu hyvin pienen mittakaavan tarkasteluun.

2.2.3 Rinnakkaispoltto

Rinnakkaispoltto tarkoittaa jätepolttoaineiden polttamista samanaikaisesti tavanomaisen polttoaineen kanssa voimakattilassa, lämpökattilassa tai prosessiuunissa. Rinnakkaispoltto mahdollistaa taloudellisen edun muihin jätteenpoltteknikoihin nähden, koska jätettä poltetaan silloin sivupolttoaineena ja voimalaitos on rakennettu muulle polttoaineelle mahdollistaen hyvän hyötysuhteen ja alhaiset kustannukset. Jätteenpoltolla on kuitenkin tiukemmat päästörajoitukset kuin tavanomaisilla polttoaineilla. Tämä aiheuttaa rinnakkaispolttolaitokselle lisäkustannuksia tavanomaista polttoainetta polttavaan voimalaitokseen nähden, koska rinnakkaispolttolaitokseen on tehtävä savukaasujenpuhdistusjärjestelmä, joka takaa jätteenpolton päästörajoitusten täyttämisen.

Rinnakkaispolttoon soveltuu periaatteessa mikä tahansa polttoprosessi. Jätepolttoaineiden liikaavuudesta johtuen prosessin tulisi kuitenkin kestää runsastakin likaantumista, mikä rajoittaa polttoprosessien valikoimaa. Hyvälaatuisia jätteitä ja jätepolttoaineita voidaan polttaa puulle, turpeelle tai kivihieille suunnitelluissa leijukattiloissa. Useimmiten rinnakkaispoltossa käytetty tekniikka on leijukerroskattila, jossa jäte ja pääpolttoaine palavat ilmavirran avulla leijutettavassa hehkuvan hiekan ja tuhkan muodostamassa kerroksessa. Leijukerrosoltto jakautuu kahteen eri toteutukseen: kerrosleijutekniikkaan ja kiertoleijutekniikkaan.

Leijukerrosolttoon syötettävän jätteen tulisi olla kohtalaisen hyvälaatuista. Jätepolttoaineen tulisi olla palakooltaan riittävän pientä sopiakseen leijutukseen ja jäte ei saisi sisältää metalleja. Leijupolttoon syötettävä jäte ei saisi lisäksi sisältää tuhkan ja leijukerros materiaalin sulamispistettä alentavia alkaleja. Laadultaan haasteellisempia jätteitä voidaan polttaa teollisuuden rumpu-uuneissa. Rumpu-uuneja ei käsitellä syvällisemmin, koska tässä työssä ei paneuduta ongelmajätteiden polttoon vaan pelkästään energiana hyödynnettävien jätteiden polttoon [3][7][5].

3. JÄTTEENPOLTTOLAITOKSEN TOIMINTA

Jätteenpolttolaitoksia on erilaisia, mutta kaikissa niissä on yhteneväisiä piirteitä. Vähintäänkin seuraavat kohdat on otettava huomioon minkä tahansa tyyppistä jätteenpolttolaitosta suunniteltaessa:

- Jätteen vastaanotto ja varastointi
- Jätteen syöttö palotilaan
- Tulipesä
- Lämmönsiirto höyryyn
- Savukaasujen puhdistus
- Tuhkien käsittely

Tässä kappaleessa on tarkoitus kertoa jätteenpolttolaitoksen perustoiminnasta, joka toteutuu kaikilla energiantuotantoon suunnitelluilla jätteenpolttolaitoksilla. Kolmen vallitsevan tekniikan [19][5] (massapoltto arinalla, RDF/REF-polttosysteemit, modulaarinen jätteenpoltto) yhdistävät ja pakolliset toiminnot jätteenpolttolaitokselle käsitellään tässä kappaleessa.

3.1 Jätteen vastaanotto ja varastointi

Jätteet toimitetaan useimmiten niiden kuljetukseen suunnitelluilla kuorma-autoilla jätteenpolttolaitoksen varastoon. Lähes kaikki jätteenpolttolaitokset tarvitsevat jätteille puskurivaraston, koska jätettä vastaanotetaan usein vain rajoitettuna aikana, kun taas jätteenpolttolaitos polttaa jätettä jatkuvasti. Riippumatta jätteenpolttolaitoksen tyyppistä, normaali puskurivarasto on suunniteltu riittämään noin yhden arkiviikon ajaksi [5][17][19].

Suurissa laitoksissa, joissa poltetaan sekajätettä, jätteen varastointiin käytetään useimmiten varastointibunkkeria. Varastointibunkkeri on syvä kuoppa jätteiden varastointia varten. Kuorma-autot tyhjentävät jätteet bunkkeriin ja siltanosturiin kiinnitetty jätekahmari sekoittaa jätettä, jotta se olisi mahdollisimman tasalaatuista polttoon syötettäväksi. Lisäksi kahmari hoitaa jätteen levittämisen ja liian isojen esineiden poistamisen bunkkerista. Siltanosturilla liikutettavaa jätekahmariä käytetään myös jätteen siirtämiseen syötösputkiin, joista jäte menee polttoon [19][20]. Kuvassa 1 on jätekahmari toiminnassaan jätebunkkerissa.



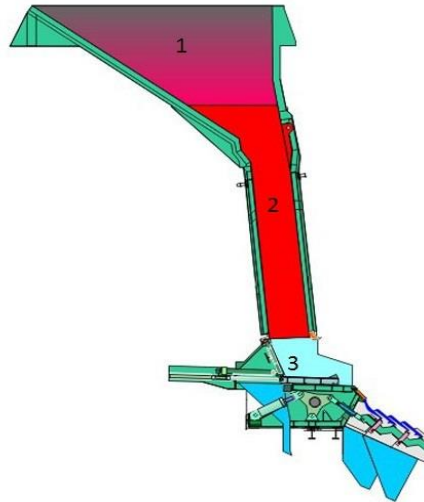
Kuva 1. Jätekahmari jätebunkkerissa [20]

Pienemissä massapolttolaitoksissa, tai modulaarisissa ja RDF/REF –polttolaitoksissa jätteet varastoidaan tasaiselle, katetulle lattiapinnalle. RDF ja REF –laitoksilla käsitelty ja käsittelemätön jäte varastoidaan usein eri rakennuksiin, joiden välillä tapahtuu jätteenkäsittely. Osa RDF-laitoksista ei käytä raskaita jätteenkäsittelymenetelmiä, vaan jäte pelkästään revitään sopivaan kokoon ja jätteestä poistetaan magneetilla metallit. Tällöin varastointi ja jätteen siirto polttoon voi tapahtua samassa tilassa. Lattiavarastoinnissa jätteiden liikuttaminen, kasaaminen ja jätteesyöttölinjastolle lastaaminen tapahtuu pyöräkuormaajalla [5][19].

Kaikille jätteenpolttolaitoksille tyypillistä on, että polttoprosessin polttoilma otetaan jätevarastosta. Näin varastoon muodostuu alipaine. Tällä menettelyllä saadaan hajukaasut hävitettyä ja sitä kautta hajuhaitat poistettua jätevaraston ympäristöstä [19].

3.2 Jätteensyöttö polttoon

Suurissa jätebunkkerin omaavissa massapolttolaitoksissa kuvan 1 mukainen jätekahmari syöttää jätettä syöttösuppilon, josta se valuu laskukouruun. Laskukourun lopussa on hydraulisesti toimiva työnin, joka työntää jätteen tulipesään. Kuvassa 2 on esitettyinä jätteensyöttöjärjestelmän pääkomponentit.



Kuva 2. Jätteensyöttöjärjestelmän periaatekuva [21] (1. Syöttösuppilo 2. Laskukouru 3. Hydraulinen työnin).

Laitoksissa, joissa jätteet säilötään lattiatasolle, jätteet työnnetään tai nostetaan pyöräkuormaajalla joko suoraan syöttösuppilon tai kuljettimilla toimivalle syöttölinjastolle, jota pitkin jäte kulkee syöttösuppilon. Kuljetinlinjastolla voi prosessista riippuen olla esimerkiksi magneettierotin ja jätteen repijä ennen kuin jätteet päätyvät syöttösuppilon. Syöttösuppilosta jätteet päätyvät laskukourun kautta hydraulisilla työntimillä työnnettynä tai pneumaattisesti tulipesään[2][19].

3.3 Polttosysteemi

Tällä hetkellä vallitseva polttotekniikka jätteenpoltossa on arinapoltto liikkuvalla arinalla. Kirjallisuuden mukaan 80 % maailman jätteenpolttolaitoksista käyttää arinatekniikkaa sen yksinkertaisuuden ja luotettavuuden takia [19]. On perusteltua täten määritellä kiinteän jätteen polttoprosessin ja palamisen päävaiheet pohjautuen arinapolttotekniikkaan. Kiinteän aineen palamiseen liittyvät seuraavat, osittain samanaikaisesti tapahtuvat vaiheet [7][2][3][17]:

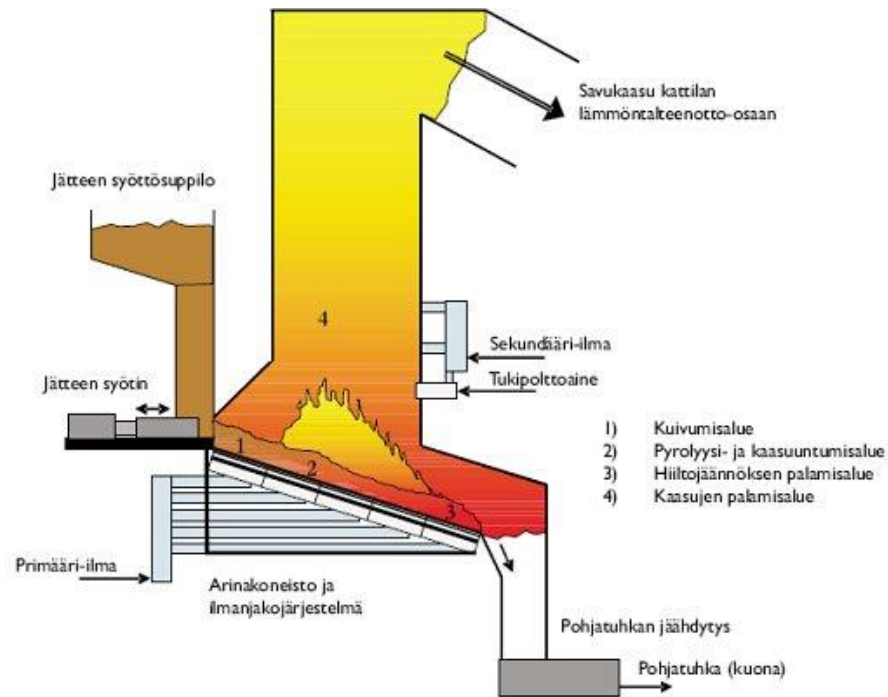
- Alkulämpeneminen ja kuivuminen
- Pyrolyysi ja kaasuuntuminen
- Jäännöshiilen palaminen
- Kaasujen palaminen

Alkulämpeneminen ja kuivuminen ovat jätteen kosteuden takia suuressa roolissa jätteenpoltossa. Palamistuloksen kannalta on toivottavaa, että kuivumisvaihe tapahtuisi poltto-prosessissa nopeasti. Kuivumisvaihetta voi nopeuttaa palamisilman esilämmityksellä ja jätteiden palakokoa pienentämällä. Merkittävä tekijä kuivumisen kannalta on myös tulipesägeometria. Tulipesän lämpösäteily kuivattaa osaltaan jätettä ja nopeuttaa täten kuivumisvaihetta.

Pyrolyysisissa kiinteä aine muuttuu lämmöntonniin vuoksi inerteiksi kaasuiksi ja polttokelpoisiksi kaasuiksi sekä tervamaiseen muotoon. Kiinteästä aineesta pyrolysoituvaa osuutta kutsutaan haihtuviksi aineiksi. Pyrolyysi alkaa endotermisena reaktiona ja muuttuu lämpötilan noustessa eksotermiseksi. Pyrolyysin jälkeen jäävää kiinteää ainetta kutsutaan jäännöshiileksi. Kaasuuntumisessa happimolekyylit tunkeutuvat polttoaineeseen ja reagoivat jäännöshiilen kanssa muodostaen kaasuja. Jos poltettavassa jätteessä on paljon haituvia aineita, on pyrolyysi merkittävässä osassa palamisprosessia [2].

Pyrolyysivaiheesta jäljelle jäänyt kiinteä jäännöshiili palaa pinnaltaan ilman liekkiä, kun happea on riittävästi ja lämpötila on riittävän korkea. Jäännöshiilen palamisvaihe on erittäin hidasta ja vaatii suhteessa enemmän arinapintaa kuin pyrolyysivaihe. Jäännöshiilen palamisaikaan voidaan vaikuttaa jätteen palakokoa pienentämällä. Jäännöshiilen palamisvaihe on palamishyötysuhteen kannalta merkittävä arinapoltoissa, sillä suurin osa tuhkasta poistuu tulipesätuhkana jäännöshiilen palamisvaiheen jälkeen [17].

Polttoilmaa syötetään tulipesään arinapoltoissa alapuolelta primääri-ilmana ja yläpuolelta sekundääri-ilmana. Primääri-ilman syöttö vastaa edellämainittujen kuivumisvaiheen, pyrolyysin ja jäännöshiilen palamisen ilmansyötöstä. Esilämmitetty primääri-ilma voidaan jakaa arinan eri osiin primääri-ilman eri syöttökohdilla arinan alla, jolloin palamista voidaan optimoida. Kirjallisuudessa esitetään jätteenpolton tyypillisenä primääri-ilman syötön jaotteluna $\frac{1}{6}$ kuivumisvaiheelle, $\frac{4}{6}$ pyrolyysivaiheelle ja $\frac{1}{6}$ loppuunpalamisvaiheelle [17]. Sekundääri-ilmalla poltetaan pyrolyysi- ja kaasuuntumisvaiheessa syntyneet haihtuvat kaasut. Sekundääri-ilma syötetään arinan yläpuolella kovalla paineella yleensä tulipesän etu- ja takaseinältä. Sekundääri-ilmalla varmistetaan savukaasujen riittävä sekoittuminen ja siten hyvä loppuunpalaminen. Kuvassa 3 on esitettyä arinapolton palamisvaiheet ja arinatulipesän periaatekuva [19].



Kuva 3. Arinapolton havainnekuva [7].

Jätteenpoltossa tulipesän geometrian suunnittelu mahdollisimman täydellisen palamisen kannalta on tärkeää. Haitallisten aineiden, kuten dioksiinit ja furaanit (PCDD/F), hajoaminen edellyttää mahdollisimman täydellistä palamista. Palaminen ei koskaan kuitenkaan ole täydellistä. Tästä syystä useimmissa päästömääräyksissä on päädytty vaatimaan tulipesägeometrialta ja lämpöeristykseltä ratkaisua, jossa savukaasujen viipymäaika on 2 sekuntia yli 850 °C lämpötilassa [17].

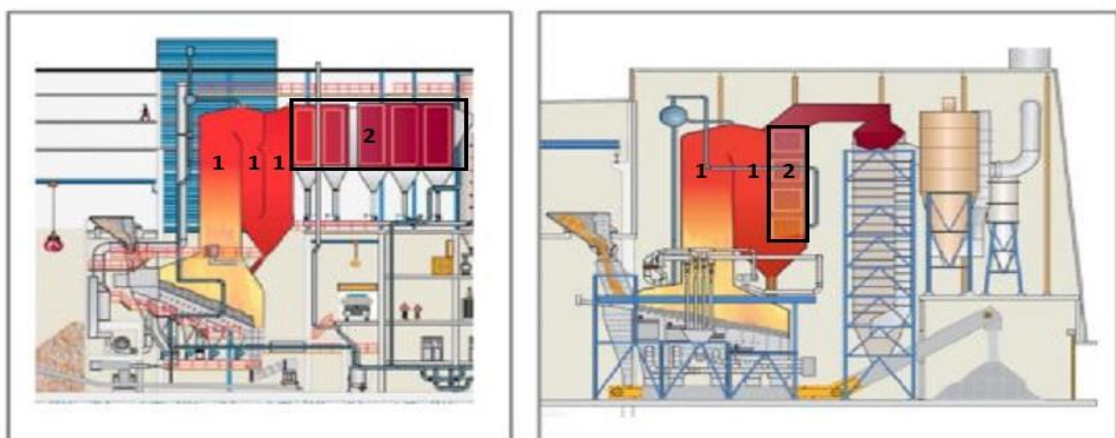
3.4 Lämmönsiirto

Jätteenpoltossa lämmönsiirtoon täytyy kiinnittää erityistä huomiota jätteenpolton savukaasujen laadun takia. Tämä johtuu siitä, että savukaasu on erittäin korrosiivista ja likaaavaa etenkin korkeissa lämpötiloissa. Lämmönsiirto-osio eli höyrykattila jakautuu yleensä säteilyosaan ja konvektio-osaan. Konvektio-osa voidaan jakaa höyryprosessista riippuen vielä tulistin-, höyrystin- ja ekonomaiseriosaan. Lisäksi konvektio-osan ekonomaiserin jälkeen kanavaan voidaan sijoittaa palamisilman esilämmitin [7]. Höyryntuotannon puolesta kattila voidaan jakaa kolmeen eri osaan: höyrystimeen, tulistimeen ja ekonomaiseriin. Höyrystimen tarkoituksena on höyrystää vesi kylläiseksi höyryksi, joka erotetaan höyrylieriössä vedestä. Höyrylieriön yläosasta höyry jatkaa tulistimeen, jonka tehtävä on lisätä höyryn energiasisältöä nostamalla höyryn lämpötilaa höyrystymislämpötilaa korkeammaksi. Ekonomaiserin lämmittää syöttövettä [23].

Lämmönsiirron tärkeimpiä huomioitavia asioita jätteenpoltossa on riittävä savukaasujen jäähtyminen ennen kattilan konvektio-osaan siirtymistä. Höyryn lämpötilan ja paineen raja-arvot korroosion ja likaantumisen estämiseksi lämmönsiirtopinnoilla on otettava

huomioon. Jotta savukaasuja saadaan jäädytettyä riittävästi, kattilassa on yhdestä kolmeen avointa jäähdytyskanavaa ennen konvektiivisia lämmönsiirtimiä. Savukaasut jäähtyvät jäähdytyskanavassa säteilemällä jäähdytyskanavan seinämiin, joissa on höyrystintputkia. Savukaasua jäähdytetään tässä kanavassa niin paljon, että sen sisältämä tuhka ei ole enää kanavan jälkeen tahmeaa ja merkittävä osa kondensoituvista yhdisteistä ehtii kiinteytyä ja erottua pois savukaasusta. Jäähdytyskanavien lopussa savukaasun lämpötilan tulisi olla luokkaa 650 °C. Jäähdytyskanavan jälkeen savukaasu päätyy tulistimiin. Käytäntö on osoittanut, että jätteenpoltossa höyryä ei kannata tulistaa yli 400-450 °C lämpötilaan ja yli 40-45 bar paineeseen korroosion välttämiseksi. 450 °C höyrynlämpötiloilla savukaasun CO, HCl, metallisuolapartikkelit ja sulfaatit aiheuttavat erittäin nopeaa korroosiota tulistinputkien pinnalla [9][17][24]. Tulistimien ja ekonomaiserin väliin sijoitetaan konvektio-osuuden höyrystin, jossa osa tarvittavasta höyrystä kehitetään. Joskus konvektio-osassa ei erikseen ole höyrystintä, vaan riittävästi vettä saadaan höyrystettyä säteilyosassa. Höyryntuotannon viimeisenä osana kattilan konvektio-osassa on ekonomaiserin tehtävä on lämmittää syöttövettä ja siirtää savukaasuista vielä lisää lämpöä höyrypiiriin. Matalan lämpötilan korroosion välttämiseksi ekonomaiserista syöttövesilieriöön tulevan veden paluulämpötilan on oltava vähintään 125-130 °C [9].

Kattilan konvektio-osa voidaan toteuttaa vaaka- tai pystymallisena. Vaakamallisen lämmöntalteenottokattilan etuja on, että putkipakettien tukirakenteet voidaan sijoittaa savukaasukanavan ulkopuolelle ja taattu käyttövarmuus jokaisen putkipaketin erillisen, kolistamalla tapahtuvan tuhkanpoiston ansiosta höyrynuohoimien sijaan. Pystymallisen lämmöntalteenottokattilan etuja on pienempi käyttöala ja tuhkanpoistolaitteiston kevyempi ratkaisu kuin vaakamallisessa kattilassa [9][22][24]. Kuvassa 4 on esitettyinä vaakamallisen ja pystymallisen lämmöntalteenottokattilan periaatekuvat.



Kuva 4. Vaaka- ja pystymallinen lämmöntalteenottokattila (1 Avoin jäähdytyskanava 2 Konvektio-osa) [22].

3.5 Tuhkankäsittely

Yhdyskuntajätteen poltossa merkittävän osan käyttökustannuksista aiheuttavat tuhkan ja kuona-aineiden käsittelyprosessit. Tuhka ja kuona-aineet vaativat käsittelytoimenpiteitä, jotta ne saadaan joko hyötykäytettyä tai loppusijoitettua ympäristömääräykset huomioiden [5][7]. Jätteenpolttolaitoksen tuhkat ja kuona-aineet voidaan jakaa kolmeen eri osaan niiden muodostumisen ja käsittelyn perusteella:

- Pohjatuhka ja sihtijäännös
- Lämmöntalteenottojärjestelmän tuhka ja kuona
- Savukaasujen puhdistusjärjestelmän jäännökset

Pohjatuhkaa eli kuonaa muodostuu polttoprosessissa palamatta jääneestä aineksesta. Tuhkanpoistosta ei saa tulla ilmaa palotilaan, jotta polttoprosessia pystytään kontrolloimaan. Ilmatiiviys varmistetaan usein vesipatsaalla. Tuhka putoaa arinapoltossa arinan lopussa edellämainitun vesipatsaan täyttämän suppilon läpi vesikaukaloon. Vesikaukalolla varmistetaan, että tuhkan sisältämä palamaton hiili ei syty palamaan. Kaukalon pohjalta tuhka siirretään joko varastointibunkkeriin tai kuljetukseen sopivaan konttiin. Siirto vesikaukalon pohjalta tapahtuu kuljettimella, pyyhkäisijällä tai hydraulisella työntimellä. Kuljetinvaihtoehtoja on monia erilaisia (kolakuljetin, hihnakuljetin, lamellikuljetin) ja se on käytännössä ainoa eroavaisuus aiheuttava tekijä pohjatuhkankäsittelyssä eri jätteenpolttolaitoksissa. Pohjatuhkaa syntyy arinapoltossa noin 15-25 % poltettavan jätteen painosta. Pohjatuhkat kuljetetaan laitokselta joko loppusijoitukseen tai hyötykäyttöön. Sihtijäännös, joka on arinan raoista arinan alapuolelle tippuvaa ainesta, siirretään ruuvikuljettimella samaan vesikaukaloon pohjatuhkan kanssa ja käsitellään pohjatuhkan mukana. Pohjatuhkan käsittelyjärjestelmän on oltava mahdollisimman toimintavarma, jotta vältetään jätteenpolttolaitoksen alasajoilta [2][5].

Tulipesästä savukaasujen mukana poistuva kiinteä, hiukkasmainen aines ja kiinteytyneet haihtuvat yhdisteet, jotka saadaan poistettua lämmöntalteenottojärjestelmistä, muodostavat lämmöntalteenottojärjestelmän tuhkan ja kuonan. Osa lämmöntalteenottojärjestelmän tuhkasta, eli kattilatuhkasta saadaan poistettua kattilan säteilykanavan pohjalta. Lämmönsiirtopintoihin, kuten tulistimiin, höyrystimeen ja ekonomaiseriin kiinni jäänyt tuhka on poistettava lämmönsiirron toimivuuden takaamiseksi. Kun nämä tuhkat poistetaan, ne tipuvat lämpöpintojen alapuolella oleviin suppiloihin. Tuhka poistetaan ilmalukkoventtiilien kautta suppiloista. Lämmöntalteenottojärjestelmän tuhkaa syntyy noin 0,5-1 % poltettavan jätteen painosta. Lämmöntalteenottojärjestelmän tuhkat ovat ympäristölle ja terveydelle haitallisempia kuin pohjatuhka, joten on suositeltavaa käsitellä ne erikseen tai sekoitettuna savukaasunpuhdistusjärjestelmän tuottaman jätteen kanssa. Lämmönsiirtojärjestelmän tuhka on pienijakoista, kuivaa ja se voi pölyntyä. Pölyntymisen välttämiseksi lämmönsiirtojärjestelmän tuhkaa usein kastellaan ennen käsittelyä ja kuljetusta loppusijoitukseen [5].

Lentotuhka ja savukaasujen puhdistusprosessista syntyvät jätteet muodostavat savukaasun puhdistusjärjestelmien jäännökset, eli APC-jätteet (Air Pollution Control residues). Savukaasujen puhdistusmenetelmiä on kolme päätyyppiä: kuiva, puolikuiva ja märkä menetelmä. Puhdistusjärjestelmä voi tuottaa yhtä tai useampaa jäännöstä. Kuivista ja puolikuivista järjestelmistä syntyy tyypillisesti vain yhtä jäännösvirtaa, kun taas märkä järjestelmä tuottaa yleensä useampia jäännösvirtoja. Kaikkien menetelmien jäännöksissä on lentotuhkaa, kattilatuhkaa, raskaita metalleja, reaktiossa syntyneitä suolapiotoisia APC-jätteitä sekä usein dioksiineja. Märän menetelmän jäännöksissä on vielä lietettä ja mahdollisesti kipsiä sekä kloorin suoloja. Kuivan ja puolikuivan menetelmän jäännöksissä voi olla ylijäänyttä kalkkia. APC-jätteet on käsiteltävä ja kuljetettava suljetuissa systeemeissä sekä kosteissa olosuhteissa, jotta vältetään pölyyntymiseltä. Ennen loppusijoitusta APC-jätteet on käsiteltävä maakohtaisen lainsäädännön puitteissa, koska kyseessä on haitallinen jäte. Käsitelymenetelmiä APC-jätteiden loppusijoittamista varten ovat erotusmenetelmät, kiinteytysmenetelmät, stabilointimenetelmät ja termiset käsitelymenetelmät. APC-jätettä syntyy tyypillisesti n. 4% poltettavan jätteen painosta [5][7][25].

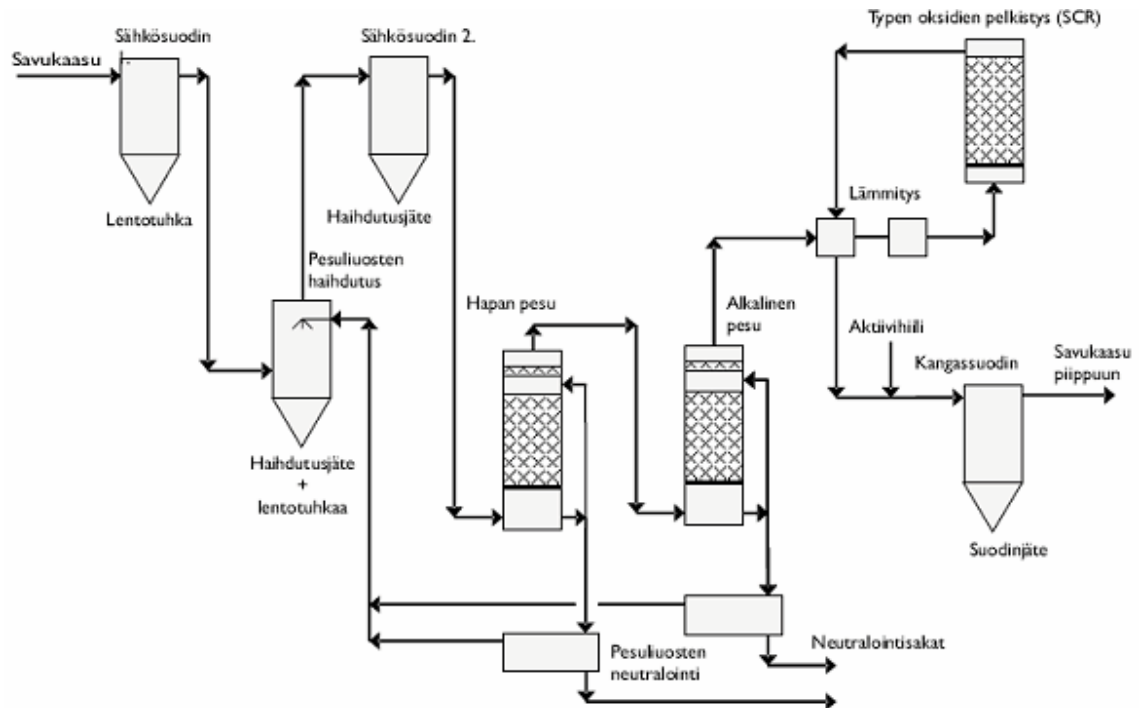
3.6 Savukaasujen puhdistus

Savukaasujen puhdistusprosessin valintaan vaikuttaa jätteen laatu, laadun vaihtelu ja polttoprosessi sekä vaadittava lainsäädännöllinen savukaasun puhtaustaso. Savukaasujen puhdistukselle on monia erilaisia kokonaisuuksia. Puhdistusprosessit voidaan kuitenkin jakaa kolmeen eri päämenetelmään:

- Märkä savukaasujen puhdistus
- Puolikuiva savukaasujen puhdistus
- Kuiva savukaasujen puhdistus

Märässä puhdistusprosessissa savukaasuista poistetaan usein ensimmäisenä pääosa hiukkasista, eli lentotuhkasta sähkösuotimella. Tämän jälkeen savukaasu menee vesipesuriin, tai toisin sanottuna happamaan pesuriin, jossa savukaasun HCl liukenee veteen. Happamasta pesusta savukaasu kiertää alkaliseen pesuun. Alkalisessa pesussa pesunesteenä on kalkkimaito tai natriumhydroksidin vesiliuos. Alkalisen pesun päätarkoituksena on poistaa rikkidioksidi savukaasusta. Katalyyttinen typen oksidien pelkistys tapahtuu alkalipesun jälkeen, jos se on tarpeen. Elohopeaa voidaan poistaa hapettamalla tai happamassa pesussa ja dioksiiniyhdisteet ja furaanit voidaan hajottaa polttoteknisesti vähintään kahden sekunnin viipymäajalla yli 850 °C lämpötilassa.

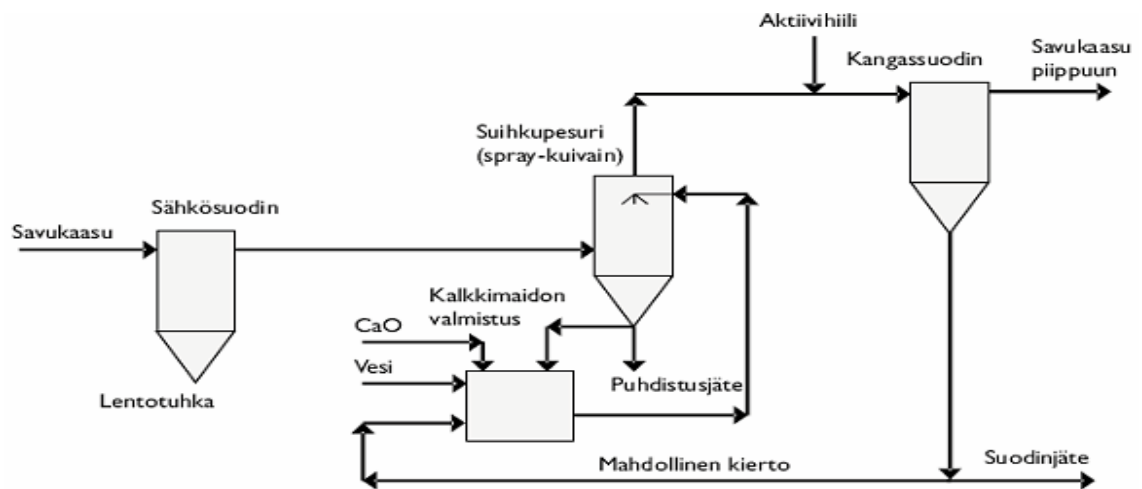
Märkä puhdistusprosessi kestää hyvin jätteen laadunvaihtelusta johtuvien savukaasujen epäpuhtauspitoisuuksien vaihtelua ja sillä saavutetaan erittäin korkea-asteinen puhdistus. Märkäpuhdistus on energiaa kuluttavin puhdistusmenetelmä ja siitä syntyy käsittelyä vaativia jätevesiä. Kuvassa 5 esitetään märkäpuhdistusprosessin vaiheet.



Kuva 5. Märkä savukaasunpuhdistusprosessi pesuliuosten neutraloinnilla [7].

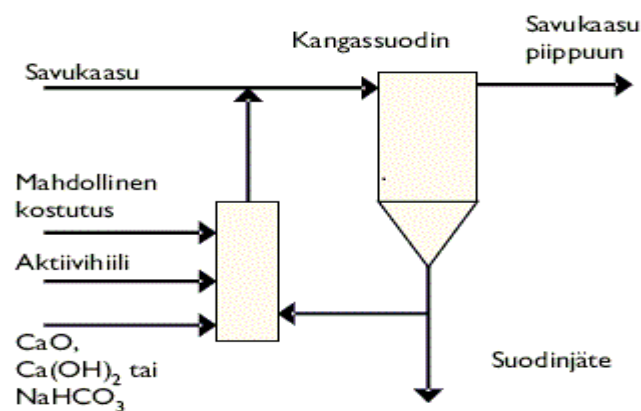
Puolikuiva puhdistusprosessi alkaa usein lentotuhkan esierotuksella sähkösuotimessa. Tämän jälkeen seuraa happamien yhdisteiden ja rikkiyhdisteiden sidonta. Yhdisteet sidotaan kalsiumhydroksidi-vesi-lietteeseen, eli kalkkimaitoon suihkupesurissa. Syntynyt liete kuivuu ja poistuu pölynä pesurista savukaasuvirtaan sekoittuneena. Savukaasuun puhalletaan hienoa aktiivihiihtä, jolla poistetaan dioksiiniyhdisteitä ja elohopeaa. Aktiivihiihtä voidaan sekoittaa myös suihkupesurin kalkkimaitoon. Suihkupesurissa syntynyt pöly erotetaan kangassuotimella savukaasusta. Jos typen oksideja ei saada polttoteknisesti tai tulipesän ammoniakkiruiskutuksella hallittua, voi puolikuivan puhdistusprosessin lopussa olla typen oksidien katalyyttinen pelkistys.

Puolikuiva puhdistusmenetelmä ei tuota jätevesiä, mutta puhdistusjätettä syntyy enemmän kuin märkämenetelmässä. Menetelmä ei kestä suuria epäpuhtauksien vaihteluita savukaasussa. Kuva 6 esittää puolikuivan puhdistusprosessin vaiheet.



Kuva 6. Esimerkki puolikuivasta savukaasujen puhdistusprosessista [7].

Kuiva savukaasujen puhdistusprosessi on periaatteeltaan samanlainen kuin puolikuiva prosessi. Eroavaisuutena puolikuivaan puhdistusprosessiin on sidonta-aineen erilainen sekoitus savukaasuun. Sidonta-aine kuivassa puhdistusprosessissa sekoitetaan savukaasuun kuivana. Sidontaan käytetään natriumkarbonaattia tai kalsiumhydroksidia. Sidonta-aine puhalletaan savukaasujen sekaan ennen kangassuodinta. Sidonta-ainetta voidaan tarvittaessa kostuttaa, koska sidontareaktiot tapahtuvat liukoisessa tilassa olevalla pinnalla. Sidonta-aineseen voidaan sekoittaa aktiivihiiltä elohopean ja dioksiiniyhdisteiden poistamiseksi savukaasuista. Kuvassa 7 esitettävä kuiva puhdistusmenetelmä on puhdistusmenetelmistä yksinkertaisin ja vaatii vähiten tilaa. Prosessi vaatii melko tasaisen jätteenlaadun, jotta päästöt pysyisivät hallinnassa [7][5][3][26].



Kuva 7. Esimerkki kuivasta savukaasujen puhdistusmenetelmästä [7].

3.7 Turbiini ja lauhdutin

Energian lopullinen hyödyntäminen kattilan höyrystä tapahtuu turbiinilla ja lauhduttimella. Höyry hyödynnetään sähkönä, prosessihöyrynä tai sähkön, höyryn ja lämpimän veden kombinaattoratkaisuna. Turbiini on voimalaitoksessa komponentti, jossa tulistettu, korkeapaineinen höyry laajenee ja lämpöenergia muuttuu turbiinin rotaatioenergiaksi. Turbiiniin kytketty generaattori tuottaa turbiinin liike-energiasta sähköä. Lauhdutin on turbiinin jälkeinen höyryprosessin komponentti, jossa matalapaineinen höyry lauhtuu vedeksi. Veden lämpö joko jäähdytetään pois tai lämpö hyödynnetään esimerkiksi kaukolämpöverkossa.

3.7.1 Lauhdevoima

Perinteisin ratkaisu voimalaitosprosessille on pelkkä sähköntuotanto. Tässä niinkutsutussa lauhdevoimalaitoksessa höyryn annetaan paisua turbiinissa loppuun asti ja höyryn loppulämpö lauhdutetaan lauhduttimessa tai jäähdytystornissa. Loppuun paisutetun höyryn lämpötila on niin alhainen, että lämmöntalteenotto ei ole taloudellisesti houkuttelevaa. Lauhdutin voi olla vesijäähdyhteinen tai ilmajäähdyhteinen riippuen voimalaitoksen sijainnista. Vesijäähdyhteistä lauhdutinta käytettäessä voimalaitoksen lähellä on oltava vesistö, josta saadaan jatkuvasti pumpattua jäähdytysvettä. Ilmajäähdyhteinen lauhdutin voi olla tyypiltään jäähdytystorni tai puhaltimella toimiva lauhdutinyksikkö, jossa ilmapuhallin puhalttaa ilmaa rivoitetun höyryputkiston läpi. Jätteenpolton alhaisien höyryn arvojen (400-450 °C, 40-45 bar) takia pelkällä sähköntuotannolla saavutetaan vain noin 25 % hyötysuhde [19].

3.7.2 Yhdistetty lämmön ja sähkön tuotanto

Yhdistetyssä lämmön ja sähkön tuotannossa höyryn ei anneta paisua aivan loppuun asti turbiinissa. Höyry annetaan paisua turbiinissa paineeseen, jossa höyryssä on vielä niin paljon lämpöenergiaa jäljellä, että sitä kannattaa hyödyntää esimerkiksi kaukolämpöverkossa. Turbiinia, jossa höyryn paisuntaa rajoitetaan, kutsutaan vastapaineturbiiniksi ja voimalaitosta, jossa tätä menettelyä käytetään, kutsutaan vastapainevoimalaitokseksi. Turbiinin vastapaineen määrittää jäähdytysaineen lämpötila ja virtaus. Höyry lauhtuu lämmönvaihtimella ja höyryn lämpö siirtyy hyödynnettävään virtausaineeseen. Virtausaineena lauhdutinpiirissä on yhteistuotannossa yleensä kaukolämpöverkon vesi. Yleisin yhteistuotannon sovellutus on kaukolämmön ja sähkön tuotanto. Lämmön ja sähkön yhteistuotannossa sähköntuotannon määrä heikkenee muutamalla prosenttiyksiköllä pelkään sähköntuotantoon nähden ollen usein selvästi alle 25 %. Yhteistuotannossa kokonaishyötysuhde voi nousta kuitenkin 85 % tasolle, jolloin muutaman prosentin menetys sähköntuotannon hyötysuhteessa ei ole merkittävä menetys verrattuna kokonaishyötysuhteen paranemiseen.

3.7.3 Yhdistetty prosessihöyryn ja sähkön tuotanto

Yhdistetyssä prosessihöyryn ja sähköntuotannossa tarkoituksena on tuottaa höyryä jollekin prosessille sekä sähköä. Sähköntuotannon hyötysuhde jää tässäkin sovelluksessa alle pelkän sähköntuotannon hyötysuhteen, kun prosessihöyrylle on käyttöä. Tietty minimimäärä höyryä on paisutettava turbiinin läpi. Prosessihöyryä ja sähköä tuottaessa käytetään väliottoturbiinia. Tarvittaessa prosessihöyryä, voidaan prosessin höyry ottaa turbiinin väliotosta. Kun höyryä ei tarvita, voidaan turbiinia käyttää normaalina lauhdeturbiinina, jossa höyryn annetaan kokonaisuudessaan paisua lauhduttimessa ja tuottaa vain sähköä. Höyryn lauhdutus voidaan toteuttaa vesijäähdytteisellä tai ilmajäähdytteisellä lauhdutinratkaisulla [9][19].

4. POLTTOTEKNIIKAN TARKASTELU

Tämän diplomityön yksi tavoitteista on selvittää jätteenpolttolle sopivin tekniikka teknisen toteutettavuuden, prosessin yksinkertaisuuden ja taloudellisen näkökulman kannalta. Polttotekniikkaa tarkastellaan käsittelemättömän tai karkeasti esikäsitellyn sekajätteen polton kannalta. Kuten kappaleessa 2 todettiin, sekajäte on laadultaan erittäin vaihtelevaa ja se asettaa tekniselle toteutukselle suuren haasteen. Polttoprosessin on myös oltava mahdollisimman yksinkertainen ja todistetusti toimiva, jotta jätteenpolttolaitoksen toimintavarmuus on taattu ja käyttö ei vaadi jatkuvaa huoltoa. Toisaalta on huomioitava, että laitoksen on oltava taloudellisesti kannattava, joten polttoprosessin investointi- ja käyttökustannukset on arvioitava prosessia valittaessa. Taulukkoon 5 on koottu eri polttolaitosprosesseja ja vertailtu niitä edellämainitut kriteerit huomioiden lähteitä [2][5][7][9][31] käyttämällä. Teknisen vertailun tuloksena leijukerrostekniikat ja kaasutusprosessit jäävät pois tarkastelusta polttoainevaatimustensa ja teknisen haasteellisuutensa vuoksi. Rumpu-uuniin perustuvat tekniikat jätetään pois tarkastelusta, koska niillä käyttökustannukset ovat arinapolttolaitoksia suuremmat. Laajan polttoaineen laadunvaihtelualueen ja prosessin luotettavuuden takia tarkasteluun jäävät erilaiset arinapolttoon perustuvat ratkaisut, joihin perehdytään tarkemmin.

Taulukko 5. Jätteenpolttoprosessien vertailu.

Tekniikka	Soveltuvuus ja rajoitukset	Edut	Haitat
Ilmajäähdytteinen arinatulipesä	Laadultaan ja kooltaan vaihtelevan jätteen poltto. Lämpöarvo 5-15 MJ/kg.	Ei suurta jätteen esikäsittelyn tarvetta. Koeteltu ja yksinkertainen tekniikka. Käyttökustannuksiin kohtuullinen.	Suuri pohjatuhan määrä. Ei sovi jauheille eikä nestemäisille jätteille. Sähköntuotannon hyötysuhde melko heikko.
Nestejäähdytteinen arinatulipesä	Laadultaan ja kooltaan vaihtelevan jätteen poltto. Lämpöarvo 10-20 MJ/kg.	Ei suurta jätteen esikäsittelyn tarvetta. Polton säätö parempi kuin ilmajäähdytteisen arinan.	Teknisesti ilmajäähdytteistä arinatulipesää haastavampi. Kalliimpi investointiaan kuin ilmajäähdytteinen arina.
Arinatulipesän ja rumpu-uunin yhdistelmä	Laadultaan vaihtelevan jätteen poltto.	Hyvä pohjatuhan laatu.	Kallis investointi ja käyttö.
Kiinteä tasoarina ja mekaaninen sekotuslaitteisto	Soveltuu myös jauhemaiselle jätteelle. Muu jäte on murskattava.	Teknisesti yksinkertainen	Tarve tukipolttolaitteelle lämpöarvon ollessa matala.

Rumpu-uunit	Hyvä palamistulos laadultaan vaihtelevalle jätteellekin.	Ei suurta jätteen esikäsittelyn tarvetta.	Arinalaitoksia korkeammat kustannukset. Rummun vuorauksia täytyy uusia ajoittain.
Leijukerrostekniikat	Kierrätyspolttoaineiden poltto.	Erittäin korkea terminen kokonaishyötysuhde.	Vaatii polttoaineelta pientä palakokoa. Jätteen esikäsittely aiheuttaa kustannuksia ja suurta energiankulutusta.
Kaasutinratkaisut	Kierrätyspolttoaineet tai korkealämpöarvoiset jätteet.	Voidaan saavuttaa hyvä sähköntuotannon hyötysuhde.	Vaativa tekniikka. Vaatii kaasun puhdistuksen ennen polttoa. Mahdollisesti korkeat kustannukset.
Modulaariset taso-uunit	Pienen kokoluokan jätteenpolto vaihteleville jätelaaduille.	Jätelaatu voi olla vaihtelevaa.	Vaikea saavuttaa samanaikaisesti taloudellisesti kannattava ja jätteenpoltoasetukset täyttävä polttoprosessi. Pohjatuhkan määrä suuri.

4.1 Arinapolton tulipesägeometria

Jätteenpoltossa tulipesän muoto on ratkaisevassa asemassa polton parhaan mahdollisen toimivuuden kannalta. Poltettavan materiaalin ominaisuudet vaikuttavat paljolti siihen, minkä mallinen tulipesä on paras kyseiselle polttoprosessille. Tulipesägeometria voi jakaa karkeasti kolmeen eri tyyppiin riippuen palamistuotteiden virtaussuunnasta tulipesässä ja tulipesän aukenemiskohdasta jälkipalotilaan arinan päällä. Nämä tulipesägeometriaat ovat myötävirta-, vastavirta- ja keskivirtausperiaate [5]. Kosteilla polttoaineilla tulipesän seinä on jäähdyttämätön, eli se on muurattu tai massattu ainakin kriittisimmiltä paikoiltaan lämpötilan ylläpidon takia [33].

4.1.1 Myötävirtaperiaate

Myötävirtaperiaate on tulipesän malli, jossa kaasut virtaavat arinan syöttöpäästä arinan päällä olevan jätteen kanssa samaan suuntaan. Kaasut nousevat arinan loppuosasta ylöspäin kohti jälkipalotilaa ja kattilaa.

Kuivalle ja paljon haihtuvia aineita sisältävälle jätteelle paras tulipesäratkaisu on myötävirtaperiaatteella toimiva tulipesä. Korkean lämpöarvon omaava ja melko kuiva jäte ei

vaadi syttyäkseen ja palaakseen paljon säteilylämmitystä tai virtaavien kaasujen lisälämmitystä. Arinalla makaava jätepeti pystyy pitämään palamista yllä sytyttyään itse. Myötävirta vähentää arinan syöttöpään lämmönsiirtoa, mikä turvaa, että palo ei leviä jätteen-syöttöön. Myötävirtaperiaatteella saavutetaan korkea jätteen loppuunpalamisaste [2][17][33].

4.1.2 Vastavirtaperiaate

Vastavirtaperiaate on tulipesän malli, jossa kaasut virtaavat vastakkaiseen suuntaan arinalla olevan jätteen kanssa. Kaasut nousevat arinan syttymisosasta kohti jälkipalotilaa ja kattilaa.

Kosteille ja vähän haihtuvia aineita sisältäville jätteille paras tulipesägeometria on vastavirtaperiaatteen tulipesä. Kosteat, melko matalan lämpöarvon omaavat jätteet tarvitsevat kuivuakseen ja syttyäkseen kuumien kaasujen säteilylämpöä ja tämä saavutetaan, kun kuumat savukaasut johdetaan arinan alkuosaan. Vastavirtaperiaatteessa arinan loppupäässä lämmönsiirto on heikkoa, joten vastavirtaperiaatteella saavutetaan huonompi jätteen loppuunpalamisaste kuin myötävirtaperiaatteella. Toisaalta korkea lämmönsiirto ei ole tavoiteltavaa arinan loppupäässä, sillä tuhkan jäähtyminen on toivottavaa [2][17][33].

4.1.3 Keskivirtausperiaate

Keskivirtausperiaate on tulipesän malli, jossa kaasut virtaavat syttymisalueelta arinan loppuosaa kohti, kunnes ne sekoittuvat arinan loppuosasta tuleviin kaasuihin. Sekoittuneet kaasut virtaavat arinan loppuosasta syöttöpäätä kohti ja nousevat arinan keskiosasta kohti jälkipalotilaa ja kattilaa. Keskivirtausperiaate eroaa käytännössä vastavirtaperiaatteesta vain tulipesän aukenemiskohdaltaan.

Keskivirtausperiaatteella toimiva tulipesä on hyvä kompromissi vastavirta- ja myötävirtaperiaatteen välillä. Keskivirtausperiaate on joustavampi ratkaisu kuin edellämainitut periaatteet, koska tulipesä avautuu haihtuvien palamisosan kohdalla, arinan keskiosassa [5]. Keskivirtausperiaate sopii vaihteleville jätteenlaaduille [2].

4.2 Arinatyypit

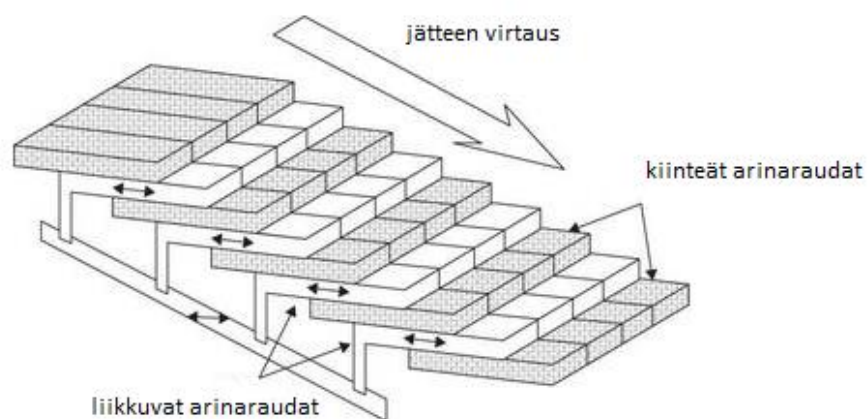
Jätteenpolttoarinoille on useita eri ratkaisuja, mutta kaikilla arinoilla pyritään samoihin tavoitteisiin. Arinatyypin valinta riippuu polttoaineen ja prosessin ominaispiirteistä. Arinan tärkeimmät tehtävät jakautuvat kolmeen päätavoitteeseen:

- Arinan on siirrettävä poltettavaa jätettä eteenpäin palotilassa
- Arinan on sekoitettava jätettä homogeenisuuden lisäämiseksi
- Arinan on mahdollistettava palamisilman puhaltaminen jätteeseen alakautta

Arinatyyppit voidaan jakaa kiinteisiin ja mekaanisiin arinoihin. Tässä työssä tarkastellaan mekaanisia arinoita, jotka voivat sopia jätteenpoltoon. Mekaanisia arinatyyppejä ovat mekaaniset edestakaisin liikkuvat myötä- ja vastasyöttöarinat, valssiarina, ketjuarina ja värinään perustuvat arinat [2][5]. Jätteenpolton kannalta mahdolliset ja nykyään houkuttelevat arinavaihtoehdot ovat mekaaninen myötäsytöarina, mekaaninen vastasyöttöarina ja valssiarina [17][19]. Ketjuarina (traveling grate) ja värinään perustuvat (vibrating grate, rocking grate) arinatyyppit jätetään tarkastelusta, koska ne eivät sekoita jätettä riittävästi ja niitä ei juurikaan käytetä nykyisissä jätteenpolttolaitoksissa [19]. Suurin osa nykyisistä jätteenpolttoarinoista on mekaanisia myötäsytö- tai vastasyöttöarinoita. Myötä- ja vastasyöttöarinoiden toiminta perustuu arinarautojen edestakaiseen liikkeeseen, jolla saadaan jätettä sekoitettua ja parannettua primääri-ilman syöttöä jätteeseen [2].

4.2.1 Mekaaninen myötäsytöarina

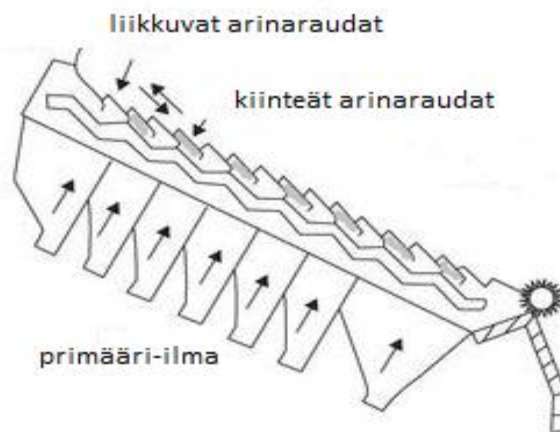
Myötäsytöarina on arinaratkaisu, jossa työntävät arinaraudat on asetettu porrastetusti riveihin. Arina koostuu paikallaan olevista ja työntävistä arinarautoista kuvan 8 mukaan. Myötäsytöarina voi olla tasainen tai hieman syöttöpäästä tuhkanpoistoon päin kallistettu (usein n. 15°) [2]. Arinan työntävien vyöhykkeiden työntösuunta on sama kuin jätteen kulkusuunta. Jätteen siirtymänopeuteen arinalla voidaan vaikuttaa arinavyöhykkeiden tahdistuksella tai muuttamalla työntöpituutta [17]. Myötäsytöarina voidaan rakentaa osioittain, joiden välillä tapahtuu suurempi jätteen tiputus kuin pelkkien arinaporrastusten ansiosta. Tiputuksilla mahdollistetaan vielä parempi jätteen sekoittuvuus kuin pelkillä porrastuksilla. Tiputuksia käytetään, jos jätteen palakoko on erittäin suuri. Myötäsytöarina on jäädytykseltään ilmajäädytteinen tai vesijäädytteinen, riippuen poltettavan jätteen lämpöarvosta [2][7].



Kuva 8. Mekaanisen myötäsytöarinan toimintaperiaate [19].

4.2.2 Mekaaninen vastasyöttöarina

Vastasyöttöarina on arinaratkaisu, jossa työntävät arinaraudat on asetettu porrastetusti riveihin, kuten myötäsyyttöarinassakin. Arina koostuu paikallaan olevista ja työntävistä arinaraudoista. Ero myötäsyyttöarinaan tulee siitä, että edestakaisin liikkuvien, porrastettujen arinavyöhykkeiden työntävä liike on eri suuntaan kuin jätteen kulkusuunta arinalla. Arina on selvästi kallellaan jätteesyötöstä tuhkanpoistoon päin (n. 25°) ja jätteiden liike alaspäin arinalla tapahtuu pääasiassa kallistuksen ansiosta [19]. Jätteen siirtymänopeuteen ei vastasyöttöarinalla voida juurikaan vaikuttaa, vaan se määräytyy arinan kallistuskulman perusteella. Jätteen sekoittuvuus on vastasyöttöarinalla puolestaan parempaa kuin myötäsyyttöarinalla [2][17]. Vastasyöttöarina voidaan rakentaa osioittain ja osioiden välille voidaan rakentaa tiputuksia, kuten myötäsyyttöarinan tapauksessa, jos niille on tarvetta. Vastasyöttöarina on jäädytykseltään ilmajäädytteinen tai vesijäädytteinen, riippuen poltettavan jätteen lämpöarvosta [2][7]. Kuvassa 9 on esitetty mekaanisen vastasyöttöarinan periaate.

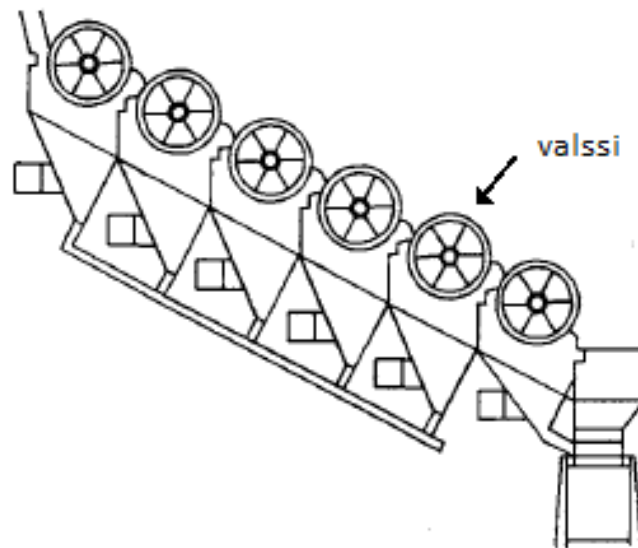


Kuva 9. Mekaaninen vastasyöttöarina [19].

4.2.3 Valssiarina

Valssiarina on arinatyyppi, jossa sylinterinmuotoiset valssit kuljettavat jätettä. Valssiarina kehitettiin korvaamaan eri tasoista koostuva ketjuarinaan perustuva polttoratkaisu. Valssiarina koostuu useasta valssista, jotka pyörivät jätteen kulkusuuntaan [2]. Valssien välissä on niinkutsuttu scraper-rauta, jonka tehtävä on siirtää jäte valssilta toiselle ja estää jätteen putoaminen valssien välistä [17]. Mekaanisista arinarakenteista valssiarina on jyrkimmin kallistettu. Rakenne on jopa 30° kallellaan jätteesyötöstä tuhkanpoistoon päin

[2][19]. Valssiarinoissa primääri-ilma syötetään valssien sisäpuolelle ja ilma siirtyy polttoainekerrokseen valsseissa olevien reikien läpi. Valssiarinan suurien valssien hidas pyörimisnopeus takaa jätteen hyvän sekoittuvuuden [34]. Jätteen kulunopeutta on helppo säätää arinalla, koska valssien pyörimisnopeutta voidaan vaihdella valssikohtaisilla nopeuden säätimillä [2]. Valssiarinan mekaaninen kestävyys on hyvä. Valssiarinan heikkous on primääri-ilman syötön huonontuminen ajan mittaan. Valssien välissä olevat scraper-raudat kuluvat, mikä aiheuttaa arinan ilmapuolen painehäviön alenemisen. Tästä seuraa, että ilma ohjautuu valssien väliin eikä valssien läpi ja täten ilmavirta ei kohdistu oikein jätepetiin ja jäähtyä valsseja riittävästi [17]. Kuvassa 10 on esitettyä valssiarina.



Kuva 10. Valssiarina [5].

5. JÄTTEENPOLTON EU-LAINSÄÄDÄNTÖ

Euroopan parlamentti ja neuvosto ovat asettaneet jätteenpoltolle direktiivin 2000/76/EC koskien jätteenpolton päästöjä. Direktiivi luotiin 4.12.2000 ja sitä sovelletaan poltto- ja rinnakkaispolttolaitoksiin. Direktiivissä painotetaan etenkin valtiosta toiseen tapahtuvaa ilmansaasteiden kaukokulkeutumista koskevassa Yhdistyneiden Kansakuntien Euroopan talouskomission yleissopimuksessa mainittuja pitoisuusrajoja hitaasti hajoavia orgaanisia yhdisteitä koskien. Näitä orgaanisia yhdisteitä ovat dioksiinit ja furaanit, joille asetetaan oikeudellisesti sitovaksi päästöjen raja-arvoiksi 0,1 ng toksisuusekvivalenttia/m³ laitoksissa, jotka polttavat kiinteää yhdyskuntajätettä yli 3 tonnia tunnissa. Lisäksi direktiivissä painotetaan metallien päästöraja-arvoja yhdyskuntajätettä poltettaessa. Päästöjä on seurattava korkealuokkaisilla mittaustekniikoilla. Poltto- ja rinnakkaispolttolaitoksien savukaasujen puhdistuksesta syntyvien vesien päästöjen raja-arvoilla rajoitetaan epäpuhtauksien siirtymistä ilmastaveteen. Jätteenpolttolaitoksen toimijan on lisäksi huolehdittava jätteen toimittamiseen ja varastointiin liittyvistä ympäristöä suojaavista toimenpiteistä parhaalla mahdollisella tavalla, jotta ehkäistään ympäristölle aiheutuvat haitat ja erityisesti ilman, maaperän sekä pinta- ja pohjavesien pilaantuminen [32].

5.1 Toimintaa koskevat vaatimukset

Polttolaitos on suunniteltava ja rakennettava niin, että käytön aikana kaikkein epäsuotuisimmassakin olosuhteissa palamiskaasujen lämpötila nousee kahdeksi sekunniksi 850 °C lämpötilaan. Lämpötilan mittaustapahtuu riippumattoman viranomaisen hyväksymästä polttokammion kohdasta. Polttolaitoksen kullakin linjalla on oltava vähintään yksi lisäpoltin. Lisäpoltin tehtävänä on pitää lämpötilaa vähintään 850 °C tasolla, jos se muuten laskisi kyseisen lämpötilatason alle. Polttimen on kytkeydyttävä automaattisesti päälle, kun polttokammion lämpötila laskee alle 850 °C raja-arvon. Poltinta on käytettävä myös laitoksen käynnistyksen- ja pysäytyksen aikana riittävän lämpötilatason saavuttamiseksi. Polttotason on oltava riittävä, jotta pohjatuhkan palamattoman hiilen määrä olisi alle 3 prosenttia tai sen polttohävikki on alle 5 prosenttia jätteen kuivapainosta.

Polttolaitoksessa on oltava käytössä automaattinen järjestelmä, joka estää jätteen syötön käynnistyksen aikana, kunnes 850 °C lämpötila on saavutettu. Automaattisen järjestelmän on estettävä jätteensyöttö myös kaikissa muissa tilanteissa, kun lämpötila alittaa 850 °C tason ja aina, kun jokin direktiivin asettamista päästörajoista ylitetään [32].

5.2 Ilmaan joutuvien päästöjen raja-arvot

Jätteenpolton päästörajoitukset ovat muuhun polttotekniikkaan verrattuna tiukat. Poltto-laitokset on suunniteltava, varustettava ja rakennettava ja niitä on käytettävä siten, että taulukossa 6 esitetyt päästöjen raja-arvot eivät ylitä savukaasussa. Savukaasujen pitoi-suuden laskennalle on direktiivin yhteydessä esitetty kaava, jolla mitatun päästöpitöisuu-den arvo saadaan vertailukelpoiseksi standardipitöisyyteen nähden:

$$E_S = \frac{21-O_S}{21-O_M} * E_M \quad (4)$$

jossa E_S on laskettu päästöpitöisyys standardoituna [mg/m^3], O_S standardin mukainen happipitöisyys, eli 11 % tilavuusprosentteina savukaasusta [$\text{vol} \%$], O_M mitattu happipi-töisyys savukaasusta [$\text{vol} \%$] ja E_M mitattu päästöpitöisyys [mg/m^3].

Taulukko 6. Jätteenpolttodirektiivin 2000/76/EC päästöjen raja-arvot koskien uutta jätteenpolttolaitosta

Vuorokausikeskiarvot	
Päästö	Raja-arvo
Hiukkasten kokonaismäärä	10 mg/m^3
Kaasumaiset ja höyrymäiset orgaaniset aineet orgaanisen hiilen kokonaismääränä	10 mg/m^3
Kloorivety (HCl)	10 mg/m^3
Fluorivety (HF)	1 mg/m^3
Rikkidioksidi (SO_2)	50 mg/m^3
Typpimonoksidi (NO) ja typpidioksidi (NO_2) typpidioksi-dina	200 mg/m^3
Hiilimonoksidi (CO)	50 mg/m^3
Vähintään 30 minuutin ja enintään kahdeksan tunnin näyteenottoajan kuluessa mitatta-vat kaikki keskiarvot	
Yhdiste/metalli	Raja-arvo
Kadmium ja sen yhdisteet puhtaana kadmiumina (Cd)	Yhteensä 0,05 mg/m^3
Tallium ja sen yhdisteet puhtaana talliumina (Tl)	
Elohopea ja sen yhdisteet puhtaana elohopeana (Hg)	0,05 mg/m^3
Antimoni ja sen yhdisteet puhtaana antimonina (Sb)	Yhteensä 0,5 mg/m^3
Arseeni ja sen yhdisteet puhtaana arseenina (As)	
Lyijy ja sen yhdisteet puhtaana lyijynä (Pb)	
Kromi ja sen yhdisteet puhtaana kromina (Cr)	
Koboltti ja sen yhdisteet puhtaana koboltina (Co)	
Kupari ja sen yhdisteet puhtaana kuparina (Cu)	
Mangaani ja sen yhdisteet puhtaana mangaanina (Mn)	
Nikkeli ja sen yhdisteet puhtaana nikkelinä (Ni)	
Vanadiini ja sen yhdisteet puhtaana vanadiinina (V)	
Keskiarvot on mitattava vähintään kuuden ja enintään kahdeksan tunnin pituisen näytteenottojakson aikana. Päästöraja viittaa dioksiinien ja furaanien kokonaispitöisyyteen, joka määritetään toksisuusekvivalenteina taulukossa 7	
Dioksiinit ja furaanit	0,1 ng/m^3

Dioksiinien ja furaanien kokonaispitoisuuksien määrittämiseksi on taulukossa 7 lueteltujen dioksiinien ja furaanien mitatut massapitoisuudet kerrottava taulukossa ilmoitetulla toksisuusekvivalenttikertoimella ennen mittausten yhteenlaskua. Yhteenlaskettu pitoisuus ei saa ylittää taulukossa 6 ilmoitettua raja-arvoa 0,1 ng/m³.

Taulukko 7. *Dibentso-p-dioksiinien ja dibentsofuraanien ekvivalenttikertoimet*

Dibentso-p-dioksidit ja dibentsofuraanit		Toksisuusekvivalenttikerroin
2,3,7,8	-Tetraklooridibentsodioksiini (TCDD)	1
1,2,3,7,8	-Pentaklooridibentsodioksiini (PeCDD)	0,5
1,2,3,4,7,8	-Heksaklooridibentsodioksiini (HxCDD)	0,1
1,2,3,6,7,8	-Heksaklooridibentsodioksiini (HxCDD)	0,1
1,2,3,7,8,9	-Heksaklooridibentsodioksiini (HxCDD)	0,1
1,2,3,4,6,7,8	-Heptaklooridibentsodioksiini (HpCDD)	0,01
	-Oktaklooridibentsodioksiini (OCDD)	0,001
2,3,7,8	-Tetraklooridibentsofuraani (TCDF)	0,1
2,3,4,7,8	-Pentaklooridibentsofuraani (PeCDF)	0,5
1,2,3,7,8	-Pentaklooridibentsofuraani (PeCDF)	0,05
1,2,3,4,7,8	-Heksaklooridibentsofuraani (HxCDF)	0,1
1,2,3,6,7,8	-Heksaklooridibentsofuraani (HxCDF)	0,1
1,2,3,7,8,9	-Heksaklooridibentsofuraani (HxCDF)	0,1
2,3,4,6,7,8	-Heksaklooridibentsofuraani (HxCDF)	0,1
1,2,3,4,6,7,8	-Heptaklooridibentsofuraani (HpCDF)	0,01
1,2,3,4,7,8,9	-Heptaklooridibentsofuraani (HpCDF)	0,01
	-Oktaklooridibentsofuraani (OCDF)	0,001

Polttolaitoksessa on oltava jatkuvat mittaukset typen oksideista (NO_x), hiilimonoksidista (CO), hiukkasten kokonaismäärästä, orgaanisen hiilen kokonaismäärästä, vetykloridista (HCl), vetyfluoridista (HF) ja rikkidioksidista (SO₂). Jatkuvatoiminen mittaus on suoritettava myös prosessin toimintaan liittyville parametreille, joita ovat palamislämpötila, savukaasun happipitoisuus, savukaasun paine, savukaasun lämpötila ja savukaasun vesihöyrysisältö. Raskasmetalleille, dioksiineille ja furaaneille on tehtävä mittaukset vähintään kahdesti vuodessa. Mittaustulokset on tallennettava ja käsiteltävä asianmukaisesti, jotta viranomaiset voivat tarkastaa noudatetaanko lainsäädännössä asetettuja päästöjen raja-arvoja [32].

5.3 Savukaasujen puhdistuksesta syntyvät jätevesipäästöt

Jos savukaasut puhdistetaan menetelmällä, josta syntyy jätevesiä, on savukaasujen puhdistuksesta syntyvän jäteveden päästämiseen oltava viranomaisen myöntämä lupa. Jätteenpolttolaitoksen toimijan on esitettävä ainetaselaskelmat jätevesipäästöistä, joilla on pystyttävä osoittamaan, että direktiivin vesistöpäästöjen raja-arvoihin päästään. Päästöjen raja-arvoihin pääsemiseksi ei saa missään olosuhteissa suorittaa jäteveden laimennusta.

Jätteenpolttolaitoksen savukaasujen puhdistuksesta syntyville jätevesille on suoritettava omat mittauksensa. Jatkuvat mittaukset on suoritettava jäteveden pH:lle lämpötilalle ja virtaamalle. Suspendoidun kiintoaineksen kokonaismäärälle on suoritettava päivittäisiä mittauksia pistokokeina. Kuukausittain on mitattava taulukon 8 aineille 2-10 virtaukseen suhteutetut mittaukset. Dioksiinien ja furaanien pitoisuudet on mitattava vähintään puolen vuoden välein [32].

Taulukko 8. Savukaasujen puhdistuksesta syntyvään jäteveeseen sovellettavat päästöjen raja-arvot

Epäpuhtaudet	Päästöjen raja-arvot massapitoisuuksina suodattamattomien näytteiden osalta	
	95 %*	100 %*
1. Direktiivissä 91/271/ETY määritelty suspendoidun kiintoaineksen kokonaismäärä	30 mg/l	45 mg/l
2. Elohopea ja sen yhdisteet puhtaana elohopeana (Hg)	0,03 mg/l	
3. Kadmium ja sen yhdisteet puhtaana kadmiumina (Cd)	0,05 mg/l	
4. Tallium ja sen yhdisteet puhtaana talliumina (Tl)	0,05 mg/l	
5. Arseeni ja sen yhdisteet puhtaana arseenina (As)	0,15 mg/l	
6. Lyijy ja sen yhdisteet puhtaana lyijynä (Pb)	0,2 mg/l	
7. Kromi ja sen yhdisteet puhtaana kromina (Cr)	0,5 mg/l	
8. Kupari ja sen yhdisteet puhtaana kuparina (Cu)	0,5 mg/l	
9. Nikkeli ja sen yhdisteet puhtaana nikkelinä (Ni)	0,5 mg/l	
10. Sinkki ja sen yhdisteet puhtaana sinkkinä (Zn)	1,5 mg/l	
11. Dioksiinit ja furaanit taulukon 7 mukaisesti määritettyjen yksittäisten dioksiinien ja furaanien summana	0,3 mg/l	

*95 % mittausarvoista pitää alittaa 30 mg/l pitoisuus ja 100% mittausarvoista pitää alittaa 45 mg/l pitoisuus.

5.4 Muut huomioitavat asiat

Jätteenpolttolaitokseen on asennettava mittauslaitteet, joilla pystytään seuraamaan luotetavasti polttoprosessin kannalta merkittäviä parametreja, olosuhteita ja massapitoisuuksia. Toimivaltaisen viranomaisen on vahvistettava, että laitteistot ovat määräysten mukaisia ja asennettu oikein sekä oikeaan kohtaan prosessia. Laitteistojen toimintaa on valvot-

tava ja laitteistoille on tehtävä tarkastukset vuosittain. Laitteistojen kaikki mittaustoiminnot ja itse laitteistojen kalibrointi ja vertailumittaukset on suoritettava CEN-standardien mukaisesti.

Yksittäisten mitattujen pitoisuuksien 95 prosentin luottamusvälin arvot eivät saa ylittää seuraavia, taulukon 9 prosenttiosuuksia päivittäisistä päästöjen raja-arvoista.

Taulukko 9. *Yksittäisten mittaustulosten 95 % luottamusvälin marginaalit*

Hiilimonoksidi	10 %
Rikkidioksidi	20 %
Typpioksidi	20 %
Hiukkasten kokonaismäärä	30 %
Orgaanisen hiilen kokonaismäärä	30 %
Kloorivety	40 %
Fluorivety	40 %

Poltojätteen määrä ja haitallisuus on pyrittävä minimoimaan. Poltojäte on kierrätettävä itse laitoksessa tai sen ulkopuolella paikallisen lainsäädännön mukaan parhaalla mahdollisella tavalla. Kattilatuhkan ja savukaasujen puhdistuksessa syntyvien kuivien, pölymäisten jätteiden kuljetuksen ja välivarastoinnin on tapahduttava suljetuissa säiliöissä. Näin estetään jätteiden leviäminen. Poltojätteen fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet sekä pilaamispotentiali on selvitettävä ennen jatkokäsittelyä tai loppusijoitusta. Poltojätteen liukoisen jakeen ja raskasmetallien liukoisen jakeen määrä on tutkittava [32].

6. TULIPESÄN ENERGIIVIRRAT

Tulipesän energiavirrat koostuvat tulipesään tulevista ja tulipesästä lähtevistä energiavirroista. Tulipesään tulevia energiavirtoja ovat polttoaineena toimivan jätteen polttoaineteho ja palamisilman mukana tuleva energiavirta. Tulipesästä lähtevät energiavirrat ovat muodostuneiden savukaasujen energiavirta ja palamattoman polttoaineen sekä seinämän läpi säteilyllä siirtyvän energian eli säteilyhäviöiden muodostamat energiavirrat.

6.1 Yhdyskuntajäte

Polttoaineena tulipesässä on yhdyskuntajäte, jota on hieman esikäsitelty. Esikäsitelyssä poistetaan selvimmät palamiseen sopimattomat kappaleet linjastolla ja jäte revitään palamiselle suotuisaan kokoon. Laskennassa jätteenä käytetään koostumukseltaan seuraavaa, taulukon 10 mukaista jätettä.

Taulukko 10. Laskennassa käytettävän jätteen kuiva-aineen koostumus

Komponentti	Massaosuus [%]
Orgaaninen aines	57
Paperijäte	9
Muovijäte	13
Lasi	4
Metalli	4
Muut	13
Yhteensä	100

6.1.1 Jätteen alkuainekoostumus

Taulukon 10 komponenttina olevat muut jätteet koostuvat tekstiileistä, kumista, sähköjätteestä ja tuhkasta [29]. Laskennan kannalta muiden jätteiden arvioidaan koostuvan puoliksi tekstiileistä ja puoliksi tuhkasta. Orgaanisen aineksen arvioidaan koostuvan tasisesti puusta, ruokajätteestä ja pihajätteistä. Kirjallisuudessa [2] on esitetty taulukko, jolla voi arvioida yhdyskuntajätteen alkuainekoostumusta fyysisen koostumuksen perusteella.

Fyysiset jätekomponentit ja niiden alkuainekoostumukset esitetään taulukossa 11.

Taulukko 11. *Jätekomponenttien alkuainekoostumukset polton kannalta [2].*

Komponentti	Alkuainepitoisuus [m%]					
	C	H	O	N	S	Tuhka
Metalli	4,5	0,6	4,3	0,05	0,01	90,54
Paperi	45,4	6,1	42,1	0,3	0,12	5,8
Muovi	59,8	8,3	19	1	0,3	11,6
Tekstiilit	46,2	6,4	41,8	2,2	0,2	3,2
Puu	48,3	6	42,4	0,3	0,11	2,8
Ruokajäte	41,7	5,8	27,6	2,8	0,25	21,85
Pihajäte	49,2	6,5	36,1	2,9	0,35	4,95
Lasi	0,52	0,07	0,36	0,03	-	99,02

Taulukon 10 jätteen kuiva-ainekoostumuksella ja taulukon 11 komponenttien alkuainepitoisuuksien perusteella saadaan jätteen kuiva-aineelle alkuainekoostumus. Kun polttoon menevän jätteen kosteuspuiteosuudeksi arvioidaan 40%, myös kostean polttoaineen koostumus voidaan määrittää. Taulukossa 12 esitetään jätteen kuiva-aineen sekä kostean jätteen koostumus, jolle suoritetaan savukaasuanalyysin laskenta.

Taulukko 12. *Jätteen kuiva-aineen alkuainekoostumus sekä kostean jätteen koostumus.*

Komponentti	Osuus kuiva-aineesta [m%]	Osuus kosteasta jätteestä [m%]
Hiili (C)	42,36	25,41
Vety (H)	5,68	3,41
Happi (O)	30,10	18,06
Typpi (N)	1,64	0,98
Rikki (S)	0,20	0,12
Tuhka	20,02	12,02
Kosteus (H ₂ O)	-	40
Yhteensä	100	100

6.1.2 Jätteen energiavirta

Työn yhtenä merkittävimmistä lähtöarvoista on poltettavan jätteen määrä. Jätettä poltetaan voimalaitoksessa 4 tonnia tunnissa, mikä tarkoittaa noin 1,1 kg/s jätteen massavirtana SI-yksiköissä.

Voimalaitoksen energianlähteenä toimii syötettävä jätevirta. Jätevirran polttoaineteho määritetään seuraavalla kaavalla:

$$\phi_{pa} = \dot{m}q_{iw} \quad (5)$$

jossa \dot{m} on polttoaineen massavirta [kg/s] ja q_{iw} kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo [MJ/kg]. Lämpöarvo osoittaa, kuinka paljon energiaa poltettaessa syntyy kilogrammaa polttoainetta kohti palamisen ollessa täydellistä. Jätteen fyysisen koostumuksen perusteella määritetään kaavoilla 1-3 taulukon 10 kuiva-aineesta koostuvalle jätteelle lämpöarvo, kun jätteen kosteuspitoisuus on 40 %. Lämpöarvon vaihteluväliksi saadaan n. 7,5-12 MJ/kg kyseisellä jätteenkoostumuksella. Jätteen lämpöarvolle on tieteellisempi ja tarkempi laskentamenetelmä, kun jätteen alkuainekoostumus tiedetään. Jätteelle lasketaan alkuainekoostumukseen perustuva lämpöarvo Dulongin korrelaatiolla kaavoilla 6-8:

$$q_s = 338,2 * C + 1442,8 * \left(H - \frac{O}{8}\right) + 49,2 * S \quad (6)$$

$$q_i = q_s - 219,6 * H \quad (7)$$

$$q_{iw} = q_i * \frac{100-w}{100} - 24,43 * w \quad (8)$$

Kaavoissa q_s on jätteen kalorimetrinen lämpöarvo, q_i tehollinen kuiva-aineen lämpöarvo ja q_{iw} kostean jätteen tehollinen lämpöarvo yksikössä kJ/kg. Kaavoissa esiintyvät kirjaimet C, H, O, N ja S ovat hiilen, vedyn, hapen, typen ja rikin massaosuudet prosentteina polttoaineena toimivan jätteen kuiva-aineesta. Kirjain w kaavoissa on jätteen kosteus massaprosentteina. Dulongin korrelaatiolla laskettuna kostean jätteen tehollinen lämpöarvo on 11,1 MJ/kg. Prosessin laskennassa käytetään jätteelle lämpöarvoa 8 MJ/kg, jotta vältetään mahdollinen jätteen polttoainetehon yliarviointi.

6.2 Palamisilma

Jäte tarvitsee palaakseen happea ja happi syötetään polttoprosessiin ilman mukana. Ilma koostuu hapesta, typestä ja reagoimattomista kaasuista sekä kosteudesta. Ilmaa tarkastellaan prosessissa sekä palamisen stoikiometrian kannalta tulipesän energiataseessa, että ilmavirran energiasisällön ja sitä kautta ilman mukana tulevan energiavirran vuoksi [17].

6.2.1 Kuiva ilma

Kuiva ilma on palamisen tarkastelun kannalta järkevä jakaa kahteen osaan. Nämä kaksi osaa ovat happi (O₂) ja raakatyyppi (N_{2r}). Raakatypen muodostavat typpi ja muut reagoimattomat aineet. Kuivassa ilmassa on happea 20,948 vol-% ja raakatyyppeä 79,052 vol-%. Tilavuussuhde kaasuille on sama kuin moolisuhde, joten kuivan ilman moolisuhde raakatypen ja hapen välillä on noin 3,77. Moolimassa kuivalle ilmalle on 28,9647 g/mol.

Palaessa happi reagoi polttoaineen kanssa ja raakatyppi siirtyy savukaasuihin sellaiseenaan. Täten palamiseen tarvittavan hapen tarve määrää ilman tarpeen [17][35].

6.2.2 Ilman kosteus

Polttoon syötettävässä ilmassa on aina jonkin verran kosteutta, eli vesihöyryä. Vesihöyryn osapaine ilmassa määräytyy ulkoilman suhteellisen kosteuden ja kylläisen veden höyrynpaineen mukaan vallitsevassa lämpötilassa. Vesihöyryn osapaine ilman lämpötilassa saadaan seuraavasta kaavasta:

$$p_h = \varphi p'_h \quad (9)$$

jossa φ on suhteellinen kosteus ja p'_h kylläisen veden höyrynpaine ilman lämpötilassa.

Vesihöyryn osapaineen avulla saadaan ilman sisältämän vesihöyryn mooliosuus seuraavasti:

$$x_{H_2O} = \frac{p_h}{p_{tot}} \quad (10)$$

jossa p_{tot} on vallitseva ilmanpaine.

Kuten edellä mainittiin, palamisen ilmantarve määräytyy hapen tarpeen mukaan, joka määrittää kuivan ilman tarpeen. Tästä johtuen todellisen kostean ilman tarpeen laskentaan tarvitaan vesihöyryn ainemäärän ja kuivan ilman ainemäärän suhde. Vesihöyryn ja kuivan ilman suhde esitetään seuraavalla kaavalla:

$$\frac{n_{H_2O}}{n_{ki}} = \frac{x_{H_2O}}{1-x_{H_2O}} \quad (11)$$

jossa n_{H_2O} on vesihöyryn määrä mooleissa ja n_{ki} on kuivan ilman moolimäärä [36].

6.2.3 Ilman lämpövirta

Kaasuille on olemassa taulukoituja entalpian arvoja eri lämpötiloissa. Eri lämpötilan mukaan entalpian arvoa kutsutaan taulukkoentalpiaksi tai tuntuvaksi entalpiaksi. Tuntuva entalpia tarkoittaa kaasun energiasisältöä kilogrammaa kohti [kJ/kg].

Tuntuvan entalpian laskemiselle eri kaasuille eri lämpötiloissa on kirjallisuudessa [17] esitetty polynomimuotoinen yhtälö:

$$h_t = \sum_{k=1}^{12} H_k T_R^{k-5} + H_{13} \ln T_R \quad (12)$$

jossa H_k on taulukon 2 arvo tarkasteltavalle kaasulle ja T_R on dimensioton lämpötila, joka määritellään:

$$T_R = \frac{T}{1000K} \quad (13)$$

jossa T on tarkasteltava lämpötila. Yhtälö 13 on voimassa lämpötila-alueella $200 \text{ K} \leq T \leq 2500 \text{ K}$.

Taulukkoon 13 on koottu valituille kaasuille tuntuvan entalpiian sovituksen laskentaan tarvittavat H_k :n arvot.

Taulukko 13. *Tuntuvan entalpiian polynomisovituksen kertoimet*

Kerroin	Kaasukomponentti									
	Ar	Ne	N2	O2	CO	CO2	H2O	SO2	kuiva ilma	N2r
H1	0	0	-0,122	0,123153	-0,01318	-0,05345	0,232712	0,052349	-0,06362	-0,11985
H2	0	0	4,229193	-3,78654	1,024031	1,804977	-8,19177	-1,90932	2,31845	4,156673
H3	0	0	-70,3521	54,22785	-25,9683	-28,7979	136,2086	32,84585	-40,594	-69,145
H4	0	0	865,6742	-546,912	422,4845	328,8274	-1651,1	-407,903	527,3447	850,8048
H5	-155,137	-307,123	3135,744	-1373,85	2079,619	838,3635	-6821,96	-1658,15	2048,562	3079,054
H6	520,3325	1030,095	-6330,37	3149,89	-4066,01	-1767,08	15378,22	3545,055	-4045,85	-6212,49
H7	0	0	5124,027	-763,875	3932,254	2274,355	-9841,4	-1526,92	3693,969	5036,219
H8	0	0	-2832,43	233,7158	-2298,38	-1287,17	6367,644	788,8736	-2085,58	-2783,91
H9	0	0	1120,668	-44,8178	947,2032	513,6545	-2764,6	-300,795	836,2013	1101,474
H10	0	0	-292,858	5,216388	-255,349	-134,354	759,386	77,21932	-220,024	-287,843
H11	0	0	44,99835	-0,34226	40,20613	20,58822	-119,376	-11,7724	33,91335	44,22761
H12	0	0	-3,06652	0,010248	-2,7944	-1,397	8,186858	0,800333	-2,31413	-3,01399
H13	0	0	3217,072	-1527,38	1921,027	1093,739	-5989,57	-1472,74	2076,578	3161,733

Molaarinen tuntuvan entalpiian arvo [kJ/kmol] saadaan laskettua kertomalla polynomisovitteella saatu tuntuvan entalpiian arvo aineen moolimassalla seuraavasti:

$$H_{mt} = h_t M \quad (14)$$

jossa M tarkoittaa aineen moolimassaa [kg/kmol]. Moolimassat taulukon 13 kaasuille on esitetty taulukossa 14.

Taulukko 14. *Moolimassat laskuissa tarvittaville kaasuille*

Kaasu	Ar	Ne	N ₂	O ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	Kuiva ilma	N _{2r}
Moolimassa [g/mol]	39,95	20,18	28,01	31,99	28,01	44,01	18,05	64,07	28,97	28,17

Kostealle ilmalle molaarinen tuntuva entalpia saadaan laskettua ilman ja veden mooliosuuksien perusteella seuraavasti:

$$H_{mt,i} = \frac{n_{H_2O}}{n_{H_2O} + n_{ki}} * H_{mt,H_2O} + \frac{n_{ki}}{n_{H_2O} + n_{ki}} * H_{mt,ki} \quad (15)$$

jossa H_{mt,H_2O} ja $H_{mt,ki}$ ovat yhtälöiden 12-14 avulla lasketut veden ja kuivan ilman mooliariset tuntuvat entalpiat.

Ilman polttoprosessiin tuoma lämpövirta on laskettavissa kaavalla:

$$\phi_i = \lambda \dot{n}_i H_{mt,i}$$

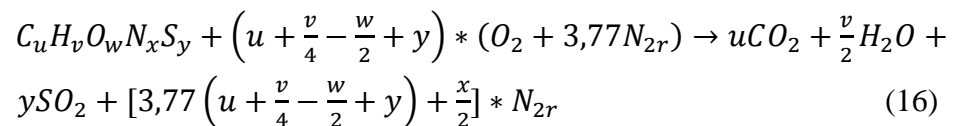
jossa λ tarkoittaa polton ilmakerrointa, joka selitetään tarkemmin savukaasuosiossa. Merkintä \dot{n}_i vastaa kostean ilman stoikiometristä ainemäärävirtaa [mol/s], sisältäen kuivan ilman moolivirran sekä kosteuden moolivirran ilmassa. Ilman mukana tulevalle energiavirralle saadaan arvo, kun palamisilman esilämmitykseen käytettävissä oleva lämpöteho koko voimalaitosprosessin loppupäässä saadaan selvitettyä. Palamisilman tuoma energiavirta prosessiin on 790 kW, kun prosessin loppupäässä palamisilma saadaan lämmitettyä 78 °C lämpötilaan.

6.3 Savukaasu

Polttoaineen palaessa syntyy savukaasuja, joiden määrä ja koostumus saadaan selvitettyä savukaasuanalyysillä. Savukaasut muodostavat merkittävimmän osan tulipesästä poistuvista energiavirroista. Savukaasujen energiavirta eli teho saadaan selvitettyä, kun tiedetään savukaasujen koostumus ja niiden lämpötila.

6.3.1 Savukaasuanalyysi

Palamisessa syntyvien kaasujen selvittäminen aloitetaan tutkimalla tiettyä määrää polttoainetta. Tässä työssä tarkastelun pohjana on 1 kg jätettä taulukon 12 kostean jätteen koostumuksella. Polttoaine jaetaan reagoiviin ja reagoimattomiin komponentteihin ja selvitetään syntyneet savukaasut. Palamisilmantarve määräytyy hapen tarpeen mukaan siten, että jokaiselle palavalle komponentille lasketaan sen ja hapen reaktion synnyttämän savukaasukomponentin mukainen määrä happea. Polttoaineen palavien komponenttien yleinen yhtälö voidaan esittää hiiltä, vetyä, happea typpeä ja rikkiä sisältävälle polttoaineelle seuraavalla kaavalla:



Polttoaineen sisältämä typpi ja kosteus siirtyvät laskennassa suoraan savukaasuihin reagoimatta. Jos polttoaine sisältää happea, se vähentää tarvittavaa hapenmäärää ja sitä kautta palamisilman määrää.

Jotta todellisuudessa palaminen tapahtuisi täydellisesti, on palamiseen syötettävän ilmamäärän oltava suurempi kuin stoikiometrinen ilmamäärä. Stoikiometrinen ilmamäärä tarkoittaa ilmamäärää, jossa jokainen happiatomi reagoisi polttoaineen palavan komponentin kanssa. Ilmakerroin λ kuvaa todellisen ilmamäärän ja stoikiometrisen ilmamäärän suhdetta. Todellisessa poltossa savukaasuihin tulee stoikiometrisen palamisen savukaasujen lisäksi vielä $(\lambda-1) \dot{n}_i$ verran ilmaa, eli yli-ilma [36]. Erilaisilla polttoaineilla ja polttotekniikoilla yli-ilman määrä vaihtelee suuresti. Arinapoltossa ja etenkin jätteenpoltossa arinalla yli-ilman määrä on melko suuri. Kirjallisuudessa esitetään jätteenpoltolle ilmakerroimen arvoja 1,4-2 [2][5]. Laskuissa käytettävä ilmakerroin on 1,8.

Savukaasuanalyysi tuotti koostumukseltaan taulukon 15 mukaisen savukaasun:

Taulukko 15. Savukaasun koostumus.

Savukaasu	Mooliosuus [mol%]	Massaosuus [m%]
CO ₂	7,8	12,2
H ₂ O	15,7	10,0
N ₂	60,5	59,8
O ₂	15,99	18,06
SO ₂	0,01	0,03

6.3.2 Savukaasujen lämpövirta

Savukaasujen loppulämpötila eristetyssä tulipesässä riippuu adiabaattisesta palamislämpötilasta, eli häviöttömän ja jäädyttämättömän tulipesän lämpötilasta sekä häviöiden aiheuttamasta lämpötilan alenemisesta. Häviöt tulipesässä muodostuvat tulipesän seinämien läpi johtuvasta lämpövirrasta, ja palamattoman polttoaineen mukana hukkaan menevästä lämpövirrasta [17][37]. Adiabaattinen palamislämpötila selvitetään kirjoittamalla tulipesän energiatase häviöttömälle tulipesälle ja ratkaistaan savukaasujen lämpövirta:

$$\phi_{ska} = \phi_{pa} + \phi_i \quad (17)$$

Yhtälössä ϕ_{ska} on adiabaattista palamislämpötilaa vastaava lämpövirta ja ϕ_{pa} ja ϕ_i ovat polttoaineteho ja ilman lämpövirta. Laskennassa on suoritettava alkuarvaus savukaasujen adiabaattiselle lämpötilalle T_{ad} [K]. Tämän jälkeen savukaasun komponenttien osuuk-sien perusteella yhtälöitä 12-14 käyttäen lasketaan koko savukaasun molaarinen tuntuva entalpia arvatussa lämpötilassa ja kerrotaan se savukaasuanalyysin mukaisella kokonais-savukaasuvirralla seuraavasti:

$$\sum x_j H_{mt,j}(T_{ad}) \dot{n}_{sk} \quad (18)$$

jossa x_j ja $H_{mt,j}(T_{ad})$ ovat savukaasukomponentin j mooliosuus ja molaarinen tuntuva entalpia arvatussa lämpötilassa. Termi \dot{n}_{sk} on savukaasun kokonaismoolivirta. Lämpötilan T_{ad} arvoa muutetaan niin kauan, kunnes seuraava yhtälö toteutuu:

$$\phi_{ska} = \sum x_j H_{mt,j}(T_{ad}) \dot{n}_{sk} \quad (19)$$

Savukaasujen poistumislämpötila tulipesästä saadaan laskemalla tulipesälle energiatase. Savukaasun adiabaattiseksi palamislämpötilaksi saadaan yhtälön 19 perusteella 1245 K eli 972 °C. Energiataseen yhtälö eristetyille tulipesälle esitetään tulipesään tulevien ja tulipesästä lähtevien energiavirtojen avulla seuraavasti:

$$\phi_{pa} + \phi_i = \phi_{sk,out} + \phi_h \quad (20)$$

jossa $\phi_{sk,out}$ on tulipesästä lähtevien savukaasujen energiavirta ja ϕ_h on tulipesän häviöiden muodostama energiavirta. Tässä työssä häviöiden arvioitiin olevan palamattoman polttoaineen häviöitä 5 % polttoainetehosta ja seinämien läpi johtuvaa lämpövirtaa 2 % polttoainetehosta [23][34]. Tulipesästä poistuvien savukaasujen lämpövirta on 8970 kW energiataseen mukaan. Kun savukaasujen lämpövirta on 8970 kW, tarkoittaa se kyseisellä savukaasulla noin 920 °C poistumislämpötilaa tulipesästä yhtälön 21 mukaisesti:

$$\phi_{sk,out} = \sum x_j H_{mt,j}(T_{out}) \dot{n}_{sk} \quad (21)$$

Yhtälössä $H_{mt,j}(T_{out})$ on savukaasukomponentti j :n molaarinen tuntuva entalpia tulipesän poistumislämpötilassa T_{out} [K].

Tulipesän laskennassa käytettävä keskilämpötila esitetään kirjallisuudessa [23] kaavalla:

$$T_g = \sqrt{T_{ad} T_{out}} \quad (22)$$

Lämpötilat yhtälöissä on esitettävä Kelvin-asteina. Yhtälön 22 perusteella tulipesän keskilämpötilaksi T_g saadaan 1218 K eli noin 945 °C.

Savukaasujen viipymäaika tulipesässä arvioidaan savukaasun tilavuusvirran, tulipesän tilavuuden ja savukaasujen nopeuden perusteella seuraavalla kaavalla:

$$t = \frac{\rho V}{\dot{m}} \quad (23)$$

jossa t on viipymäaika [s], ρ on savukaasun tiheys [kg/m³] tulipesän keskilämpötilassa T_g , V on tulipesän tilavuus [m³] ja \dot{m} on savukaasun massavirta [kg/s]. Savukaasun tiheyden ollessa n. 0,32 kg/m³ tulipesän keskilämpötilassa, massavirran ollessa 8,42 kg/s ja tulipesän tilavuuden ollessa n. 56 m³ saadaan savukaasujen viipymäajaksi tulipesässä 2,2 sekuntia. Kyseinen viipymäaika täyttää EU -lainsäädännössä asetetun tulipesän viipymäajan kriteerit [32].

7. SÄTEILYKANAVAN LÄMMÖNSIIRTO

Tulipesän jälkeen savukaasut etenevät säteilykanavaan tai toisin sanottuna jäähdytyskanavaan, jossa savukaasua jäähdytetään. Savukaasujen jäähdyttämällä saadaan aikaan säteilykanavan seinämän membraaniputkissa virtaavan veden höyrystyminen. Säteilykanavan lämmönsiirto tapahtuu suurilta osin säteilyllä, mutta kanavan kapeuden vuoksi konvektiivisella lämmönsiirrolla on myös huomattava merkitys lämmönsiirrossa ja sitä ei voi jättää huomioimatta. Lämpötilat ovat laskennassa haettavia suureita, joille ratkaistaan arvot, kun muut yhtälöt ja taselaskut on saatu luotua. Säteilylämmönsiirron ja konvektiivisen lämmönsiirron suureet ovat kuitenkin lämpötilan funktioita, joten laskenta on aloitettava arvioituilla lämpötiloilla ja tarkennettava oikeisiin arvoihin laskennan edetessä. Säteilyn yhtälöitä varten kirjallisuudessa on esitetty oletukset kaasun säteilylle, jotta laskenta voidaan suorittaa [35][37]:

1. Säteilykanavan savukaasujen säteily tapahtuu säteilykanavan keskilämpötilassa T_g .
2. Kaasun säteily on harmaan kaasun säteilyä, joka määräytyy vain hiilidioksidin ja vesihöyryn säteilyinä.
3. Pinta-ala A_s , johon kaasu säteilee, on harmaa ja sillä on emissiivisyys ε_w , joka riippuu pintamateriaalista.
4. Seinämän lämpötila T_w on vakio.

7.1 Kaasun säteily

Kaasun säteilyteholle ympäröiviin tulipesän seiniin on kirjallisuudessa [17][37] esitetty yhtälö:

$$\phi_s = \frac{\sigma A_s (\varepsilon_g T_g^4 - \alpha_g T_w^4)}{1 + \frac{\alpha_g}{\varepsilon_w} - \alpha_g} \quad (24)$$

jossa σ on Stefan-Boltzmanin vakio ($5,67 * 10^{-8} \frac{W}{mK^4}$), A_s on säteilypinta-ala, ε_w on seinämän emissiviteetti ja ε_g on kaasun emissiviteetti säteilylämpötilassa T_g . T_g on savukaasun keskilämpötila säteilykanavassa. Termi α_g kuvaa kaasun absorptiosuhdetta lämpötilassa T_w .

Savukaasun säteilyn voidaan olettaa johtuvan täysin veden ja hiilidioksidin säteilystä.

Kaasun emissiivisyyden määrittämiseksi on selvítettävä veden ja hiilidioksidin emissiivisyydet lämpötilassa T_g . Savukaasun emissiviteetille pätee yhtälö:

$$\varepsilon_g = \varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{CO_2} - \Delta\varepsilon_g, \quad (25)$$

jossa ε_{H_2O} ja ε_{CO_2} ovat veden ja hiilidioksidin emissiivisyydet ja $\Delta\varepsilon_g$ on tarvittava korjaustermi vesihöyryn ja hiilidioksidin osittaisten emissiovöiden päällekkäisyyksien takia [37].

Kaasukomponenttien H_2O ja CO_2 emissiviteettien määrittämiseksi täytyy selvittää molempien kaasujen osapaineet säteilykanavassa. Osapaineiden selvittämiseksi on olemassa yhtälöt:

$$p_{H_2O} = x_{H_2O} p_{tot} \quad (26)$$

$$p_{CO_2} = x_{CO_2} p_{tot} \quad (27)$$

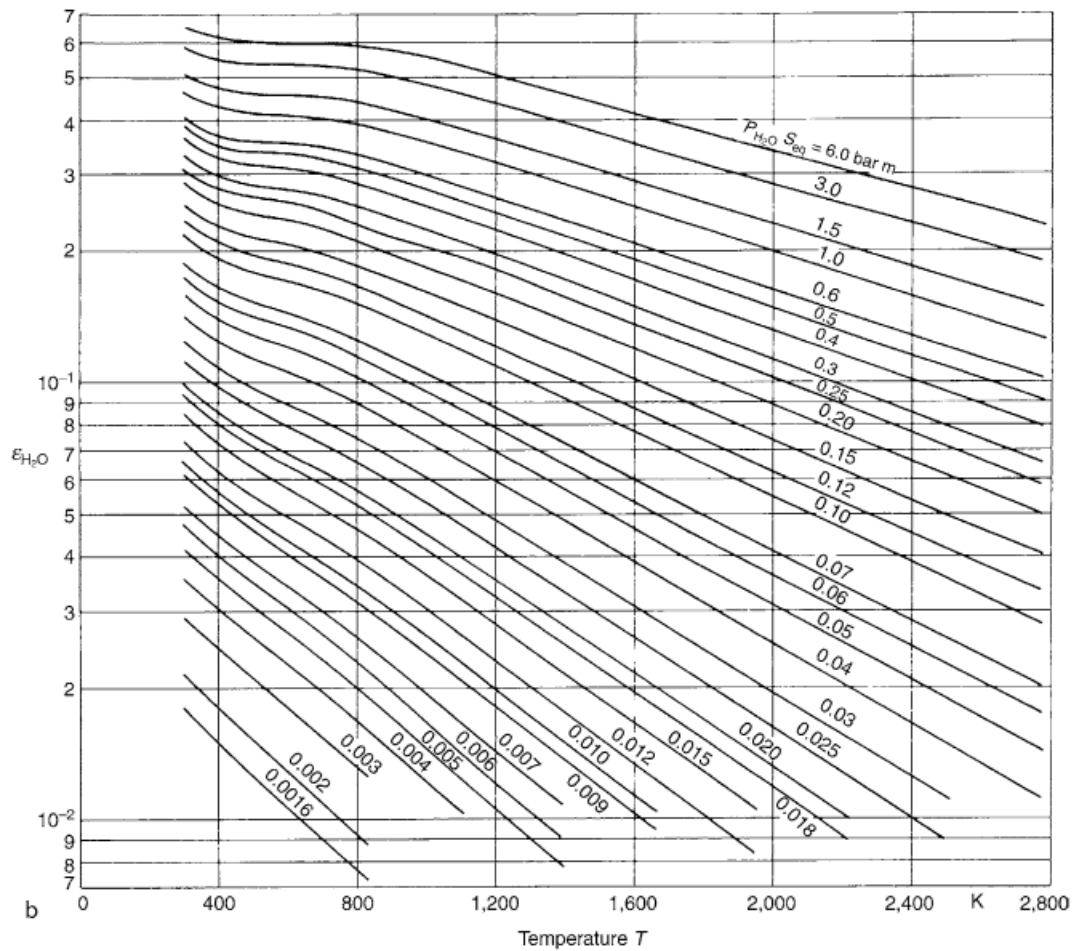
joissa p_{H_2O} ja p_{CO_2} ovat veden ja hiilidioksidin osapaineet, x_{H_2O} ja x_{CO_2} ovat veden ja hiilidioksidin mooliosuudet savukaasuissa ja p_{tot} on vallitseva kokonaispaine säteilykanavassa.

Säteilymatka vaikuttaa emissiviteettien ja absorptiokertoimien arvoihin. Aina kun kaasutilavuus eroaa ideaalitapauksesta, eli puoliavaruudesta, on huomattava, että säteily kulkee eri matkan eri säteilypinnan pisteisiin. On otettava käyttöön termi säteilevän kerroksen paksuus s_{eq} , mikä ottaa huomioon eriävät säteilymatkat kaasutilavuudessa. Säteilevän kerroksen paksuus mielivaltaiselle tilavuudelle on laskettavissa kaavalla:

$$s_{eq} = 0,9 \frac{4V}{A_s} \quad (28)$$

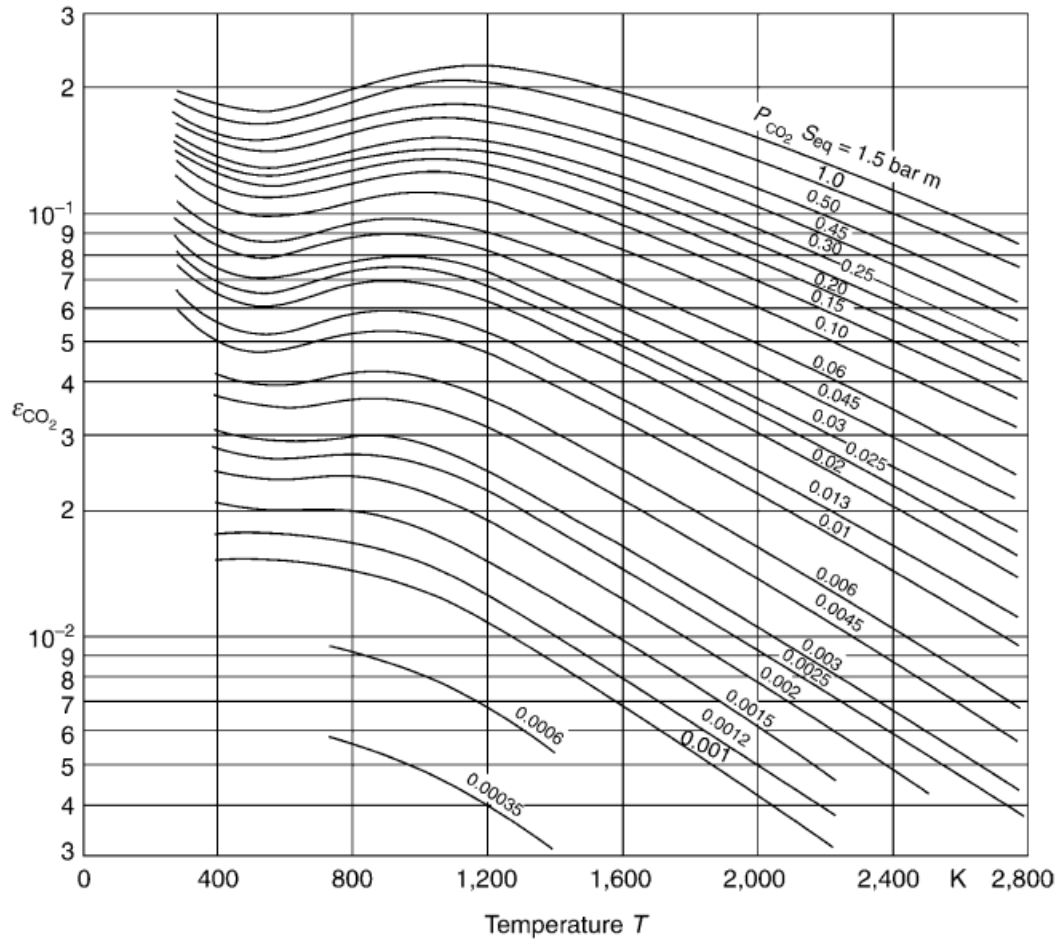
jossa V on kaasutilavuus ja A_s on ympäröivien seinien pinta-ala.

Vesihöyryn emissiviteetin selvittämiseksi normaalipaineessa pitää ratkaista tulon $p_{H_2O}S_{eq}$ arvo, kun p_{H_2O} on ilmoitettu baareina [bar]. Kuvasta 11 saadaan vesihöyrylle emissiviteetti tulon $p_{H_2O}S_{eq}$ ja säteilykanavan keskilämpötilan T_g avulla.



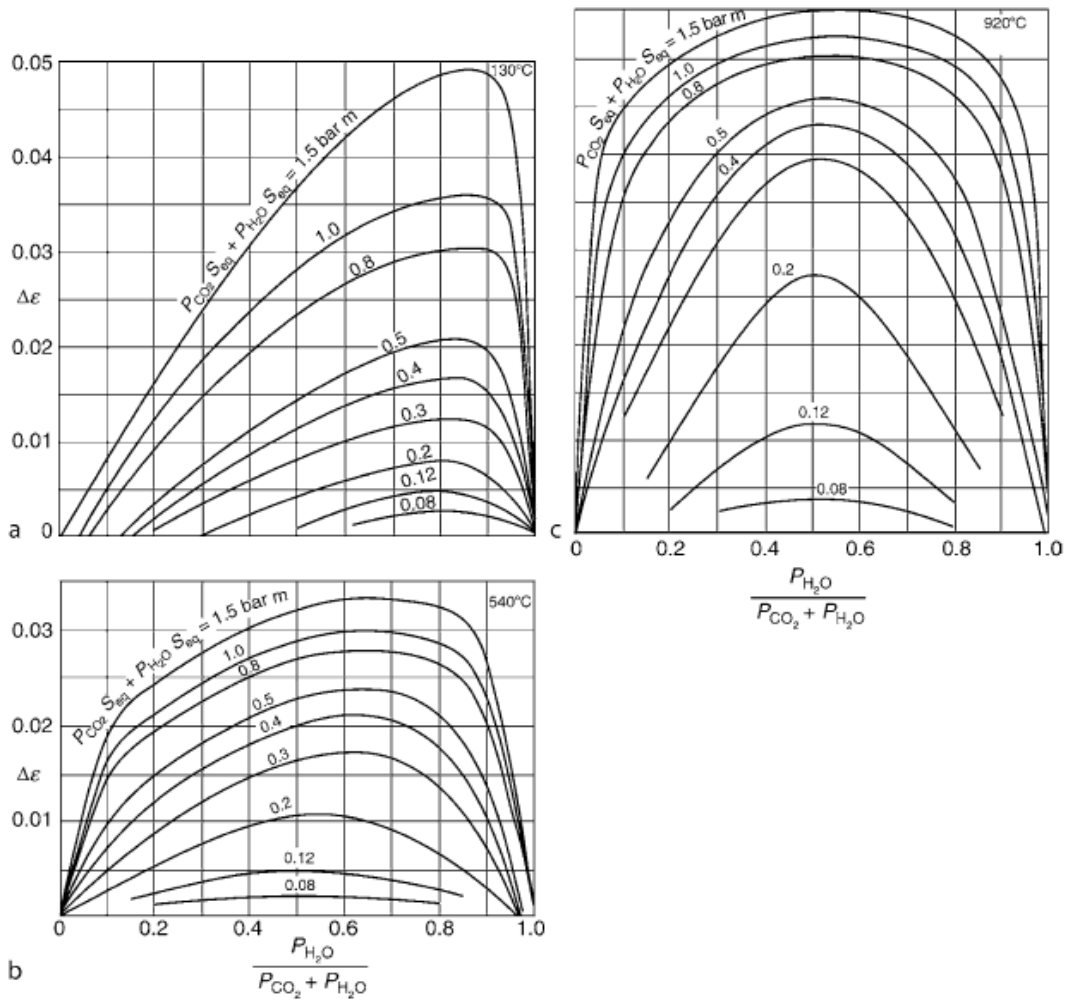
Kuva 11. Vesihöyryn emissiviteetti lämpötilan ja tulon $p_{H_2O}S_{eq}$ funktiona [37].

Hiilidioksidin emissiviteetin selvittämiseksi normaalipaineisessa säteilykanavassa pitää vastaavasti ratkaista tulo $p_{CO_2} s_{eq}$ ja säteilykanavan keskilämpötilan T_g avulla. Kuvassa 12 on esitettyä hiilidioksidin emissiivisyys.



Kuva 12. Hiilidioksidin emissiivisyys tulon $p_{CO_2} s_{eq}$ ja lämpötilan funktiona [37].

Korjaustermin $\Delta\epsilon_g$ selvittämiseksi on ratkaistava vesihöyryn osapaineen suhde vesihöyryn ja hiilidioksidin yhteenlaskettuihin osapaineisiin ($\frac{p_{H_2O}}{p_{CO_2} + p_{H_2O}}$). Tämän painesuhteen ja kuvan 3 c perusteella saadaan korjaustermin arvo kaasun kokonaisemissiviteetille [37].



Kuva 13. Emissiviteetin korjauskertoimen arvoja eri lämpötiloissa [37].

Savukaasun absorptiokerroin muodostuu vesihöyryn ja hiilidioksidin absorptiokertoimien arvoista seinämän lämpötilassa T_w ja päällekkäisten emissiovöiden takia määritetystä korjauskertoimesta seuraavasti:

$$\alpha_g = \alpha_{H_2O} + \alpha_{CO_2} - \Delta\varepsilon_{gw} \quad (29)$$

jossa α_{H_2O} ja α_{CO_2} ovat vesihöyryn ja hiilidioksidin absorptiokertoimet seinämän lämpötilassa ja $\Delta\varepsilon_{gw}$ on kaasun emissiviteetin korjauskerroin seinämän lämpötilassa.

Vesihöyryn absorptiokerroin saadaan yhtälöstä:

$$\alpha_{H_2O} = \left(\frac{T_g}{T_w}\right)^{0,45} \varepsilon_{H_2O} \quad (30)$$

jossa ε_{H_2O} on selvitetty kuvasta 11 tulon $p_{H_2O} S_{eq} \left(\frac{T_w}{T_g}\right)$ ja seinämän lämpötilan T_w avulla.

Hiilidioksidin absorptiokerroin saadaan yhtälöstä:

$$\alpha_{CO_2} = \left(\frac{T_g}{T_w}\right)^{0,65} \varepsilon_{CO_2} \quad (31)$$

jossa ε_{CO_2} on selvitetty kuvasta 12 tulon $p_{CO_2} s_{eq} \left(\frac{T_w}{T_g}\right)$ ja seinämälämpötilan T_w avulla.

Korjaustermin $\Delta\varepsilon_{gw}$ määrittäminen tapahtuu vastaavasti kuin korjaustermin $\Delta\varepsilon_g$. Nyt tarvittavan termin arvo saadaan kuvista 13a ja 13b, koska ne vastaavat seinämälämpötilaa T_w [37]. Seinämän lämpötila säteilykanavassa on 300 °C, mikä on 50 °C korkeampi lämpötila kuin höyryn lämpötila höyrystinputkissa. Seinämän emissiviteetti ε_w säteilylämmönsiirron kaavaan (yhtälö 23) selvitetään kirjallisuudesta. Seinämän ollessa membraaniputkiseinämää, on seinämän emissiviteetin arvo $\varepsilon_w = 0,8$ [23].

7.2 Konvektiivinen lämmönsiirto

Konvektiiviselle lämmönsiirrolle virtauskanavan pinnassa on olemassa yleinen yhtälö:

$$\phi_c = h_c A_s \Delta T \quad (32)$$

jossa ϕ_c on konvektiolla siiretty lämpövirta savukaasusta kanavan seinämän höyryputkistoihin, h_c konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, A_s on kanavan seinämien pinta-ala ja ΔT pinnan ja savukaasun välinen lämpötilaero.

Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin ratkaistaan yhtälöstä:

$$h_c = Nu_{D_h} \frac{k}{D_h} \quad (33)$$

jossa Nu_{D_h} on hydraulisen poikkileikkauksen mukainen Nusseltin luku, k on savukaasun lämmönjohtavuus [W/mK] kaasun keskilämpötilan ja seinämän välisessä keskilämpötilassa ja D_h on hydraulinen halkaisija [m], joka lasketaan seuraavasti:

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (34)$$

A_c on kaavassa kanavan poikkileikkauksen pinta-ala [m²] ja P kanavan kehän pituus [m]. Putkivirtauksen hydraulista halkaisijaa vastaava Nusseltin luku saadaan laskettua seuraavalla kaavalla:

$$Nu_{D_h} = 0,023 Re_{D_h}^{0,8} Pr^{0,4} \quad (35)$$

jossa Re_{D_h} on Reynoldsin luku ja Pr Prandtl'in luku. Yhtälön 35 turbulenttisen putkivirtauksen mukainen Nusseltin luvun korrelaatio on voimassa, kun Reynoldsin luku on yli

10 000. Prandtl'in luku on lämpötilariippuvainen dimensioton suure. Savukaasuille kyseisen säteilykanavan lämpötila-alueella saadaan Prandtl'in luvun arvoksi 0,72 [38]. Reynoldsin luku on virtaustekninen yksikötön luku, jolle saadaan arvo virtausnopeuden, virtauskanavan hydraulisen halkaisijan ja virtausaineen kinemaattisen viskositeetin avulla seuraavasti:

$$Re_{D_h} = \frac{vD_h}{\nu} \quad (36)$$

Kaavassa v on virtausnopeus [m/s] ja ν on kinemaattinen viskositeetti [m²/s], joka riippuu savukaasun lämpötilasta ja jolle saadaan tarkka arvo vasta, kun koko säteilykanavan lämmönsiirtoyhtälö on iteroitu riittävään tarkkuuteen [38]. Konvektiivisen lämmönsiirron lämpötilaerona ΔT käytetään savukaasun keskilämpötilan T_g ja seinämän lämpötilan T_w erotusta.

7.3 Säteilykanavan kokonaislämmönsiirto

Säteilykanavan kokonaislämmönsiirto muodostuu säteilystä ja konvektiosta. Savukaasut jäähtyvät säteilyn ja konvektion vaikutuksesta ja poistuvat säteilykammioista alemmassa lämpötilassa kuin tullessa säteilykammioon. Säteilykanavan energiatase, jossa yhdistyy säteilylämmönsiirto ja konvektiivinen lämmönsiirto, esitetään muodossa:

$$\phi_{sk,in} - \phi_{sk,out} = \frac{\sigma A_s (\varepsilon_g T_g^4 - \alpha_g T_w^4)}{1 + \frac{\alpha_g}{\varepsilon_w} - \alpha_g} + h_c A_s \Delta T \quad (37)$$

jossa $\phi_{sk,in}$ on säteilykammioon tulevien ja $\phi_{sk,out}$ säteilykammioista lämmöntalteenotokattilaan lähtevien savukaasujen lämpövirta. Energiataseen yhtälö ratkeaa iteroimalla savukaasujen poistumislämpötilaa niin monta kertaa, että yhtälön muut, lämpötilariippuvaiset suureet eivät enää saa eri arvoja kuin edellisellä iterointikierröksellä. Taulukkoon 16 on koottu energiataseen lopulliset yhtälöiden termien arvot, joilla energiataseen yhtälö on voimassa.

Taulukko 16. Säteilykanavan lämmönsiirron suureet.

Termi	Arvo	Yksikkö
A_s	113	m ²
ε_g	0,33	-
α_g	0,38	-
ε_w	0,8	-
T_g	1053	K
T_w	573	K
$T_{sk,out}$	914	K
h_c	15,6	W/m ² K

Säteilykanavan säteilylämmönsiirto ϕ_s on 2153 kW ja konvektiivinen lämmönsiirto ϕ_c on 844 kW. Näin ollen kokonaislämmönsiirto säteilykanavassa on $\phi_{sät} = 2997$ kW. Savukaasut poistuvat säteilykanavasta lämpötilasta $914 \text{ K} = 641 \text{ °C}$, mikä on riittävän alhainen lämpötila säteilykanavaa seuraavien tulistimien lämpötilakorroosiota ajatellen. Savukaasujen lämpövirta niiden poistuessa säteilykanavasta on 5977 kW yhtälön 21 mukaisesti.

Kun tiedetään, että säteilykanavassa siirretty lämpöteho höyryyn vastaa savukaasun jäädytystehoa, saadaan selville höyrystyvän veden määrä säteilykanavan putkistoissa. Höyrystyvän veden lämpötila määräytyy ekonomaiserialta höyrylieriöön tulevan veden lämpötilan mukaan. Ekonomaiserialla lämmitetyn veden lämpötila prosessissa on 178 °C . Höyrystinputkissa tämä 178 °C vesi ensin lämpenee vielä painetasoa vastaavaan kylläisen höyryn lämpötilaan (250 °C) ja höyrystyy. Säteilykanavassa höyrystyvän veden massavirta saadaan selville yhtälöllä:

$$\phi_{sät} = \dot{m}_{sät} (h_{höyry} - h_{vesi}) \quad (38)$$

jossa $\dot{m}_{sät}$ on säteilykanavassa höyrystyvän veden massavirta, $h_{höyry}$ kylläisen höyryn entalpia (250 °C , 40 bar) [kJ/kg] ja h_{vesi} esilämmitetyn veden entalpia 178 °C lämpötilassa. Kylläisen höyryn entalpian ollessa 2800 kJ/kg ja veden entalpian ollessa 753 kJ/kg saadaan säteilykammiossa tuotettavan höyryn määräksi $\dot{m}_{sät} = 1,46 \text{ kg/s}$.

8. LÄMMÖNTALTEENOTTOKATTILAN LÄMMÖNSIIRTO

Lämmöntalteenottokattila sijoittuu jätteenpolttolaitosprosessissa välittömästi säteilykanavan perään. Lämmöntalteenottokattilassa lämpö siirtyy savukaasuista lämmöntalteenottokattilan putkissa virtaavaan höyryyn konvektiivisesti. Säteilylämmönsiirto lämmöntalteenottokattilan lämpötila-alueella on niin pientä, että sillä ei ole vaikutusta kokonaislämmönsiirrossa. Lämmöntalteenottokattilassa savukaasut virtaavat ensin tulistimen läpi, sitten höyrystimen läpi ja lopulta ekonomaiseriputkien läpi ja jäähtyvät. Ekonomaiserin jälkeen kanavassa on vielä palamisilman esilämmitin (LUVO), jossa savukaasuista siirretään lämpöä palamisilmaan.

8.1 Tulistimen energiatase

Savukaasut virtaavat säteilykanavasta tulistinputkiin ja luovuttavat osan lämmöstään tulistimessa. Tulistimessa tuotetaan 400 °C ja 40 bar tulistettua höyryä. Näillä höyryn lämpötilan ja paineen arvoilla höyryn energiasisältö, eli entalpia saa arvon $h = 3214$ kJ/kg.

Tulistimelle voidaan kirjoittaa energiatase savukaasujen luovuttamalle, ja höyryn vastaanottamalle lämpövirralle:

$$\phi_{sk,in} - \phi_{sk,out} = \dot{m}_h(h_{out} - h_{in}) \quad (39)$$

Taseen yhtälössä $\phi_{sk,in}$ on tulistimelle tulevan savukaasun energiavirta, $\phi_{sk,out}$ on tulistimen jälkeinen savukaasun energiavirta, \dot{m}_h on tulistinputkissa virtaavan höyryn massavirta [kg/s], h_{out} on tulistetun höyryn entalpia [kJ/kg] ja h_{in} on höyrystimiltä tulleen kylläisen höyryn entalpia [kJ/kg]. Kylläisen höyryn entalpia prosessin painetasolla 40 bar on 2800 kJ/kg ja sen lämpötila on 250 °C.

Tulistimen energiataseessa tulistettavan höyryn massavirta \dot{m}_h muodostuu säteilykanavassa tuotetusta höyryvirrasta ja lämmöntalteenottokattilan konvektiivisessa höyrystimessä tuotetusta höyryvirrasta ollen niiden summa:

$$\dot{m}_h = \dot{m}_{sät} + \dot{m}_{konv} \quad (40)$$

Yhtälössä $\dot{m}_{sät}$ on säteilykanavassa tuotetun kylläisen höyryn massavirta [kg/s] ja \dot{m}_{konv} lämmöntalteenottokattilan putkistossa tuotetun kylläisen höyryn massavirta. Tulistimen massavirralla saadaan selvitettyä arvo, kun koko voimalaitoksen höyryprosessin osille on muodostettu toisistaan riippuvaiset yhtälöt.

Kun koko höyryprosessille on laskennassa saatu yhtälöt, saadaan tulistimessa tulistettavan höyryn massavirraksi 2,73 kg/s. Tulistimelle höyrylieriön kautta saapuva höyry muodostuu säteilykanavassa höyrystetystä höyrystä (1,46 kg/s) ja lämmöntalteenottokattilassa höyrystetystä höyrystä (1,27 kg/s). Tulistimen energiataseesta saadaan täten selvitettyä, minkä verran savukaasut jäähtyvät tulistimessa. Savukaasujen lämpötila tulistimen jälkeen on 532 °C ja savukaasujen energiavirta on 4850 kW.

8.2 Höyrystimen energiatase

Tulistimen jälkeen savukaasut virtaavat lämmöntalteenottokattilan höyrystimelle, eli konvektiiviselle höyrystimelle. Konvektiiviselle höyrystimelle tullessaan savukaasujen energiavirta on 4850 kW. Höyrypuolella höyrystimessä tuotetaan 40 bar paineella kyläistä höyryä. Kylläisen, 40 bar paineisen höyryn lämpötila on 250 °C ja entalpia 2800 kJ/kg. Tulistimen massataseesta saadaan yhtälön 40 perusteella lämmöntalteenottokattilan höyrystimen massavirraksi 1,27 kg/s.

Lämmöntalteenottokattila toteutetaan yhden painetason periaatteella, eli ekonomaiserilla, höyrystimellä ja tulistimella vallitsee sama painetaso, kun putkistohäviöitä ei huomioida. Lämmöntalteenottokattilassa ekonomaiserin loppulämpötilan on jäätävä höyrystyslämpötilaa vähintään 20 °C alemmaksi ja pinch-point lämpötilaero on höyrystimen lämpötilan ja savukaasun loppulämpötilan lämpötilaero höyrystimen loppupäässä [34]. Pinch-point lämpötilaero on energiataloudellinen mitoituskriteeri voimalaitoksessa. Se tarkoittaa prosessin pienintä lämpötilaeroa savukaasupuolen ja höyrypuolen välillä. Kun pinch-point lämpötilaeroa pienennetään, saadaan siirrettyä lämpöä enemmän ja hyötysuhde paranee, mutta tällöin lämmönsiirtopinnat kasvaisivat suuremmaksi ja täten myös voimalaitoksen kustannukset. Tässä työssä voimalaitoksen mitoituspisteen pinch-point lämpötilaerona käytetään hyväksi todettua kompromissia investointikustannusten ja höyryntuoton välillä [34]. Pinch-point lämpötilaero tässä työssä voimalaitoksen nimellistehon mitoituspisteessä on 20 °C, mikä tarkoittaa, että savukaasujen loppulämpötila höyrystimen jälkeen on 270 °C. Höyrystimen energiataseeksi muodostuu:

$$\phi_{sk,in} - \phi_{sk,out} = \dot{m}_{konv}(h_{höyry} - h_{vesi}) \quad (41)$$

jossa $\phi_{sk,in}$ on höyrystimelle tulevan ja $\phi_{sk,out}$ höyrystimeltä lähtevän savukaasun energiavirta, \dot{m}_{konv} on höyrystimen massavirta (1,27 kg/s), $h_{höyry}$ on höyrystyneen höyryn entalpia (2800 kJ/kg) ja h_{vesi} on höyrystimelle tulevan veden entalpia (758 kJ/kg). Yhtälön 41 perusteella savukaasun energiavirta konvektiivisen, lämmöntalteenottokattilan höyrystimen jälkeen on 2270 kW.

8.3 Ekonomaiserin energiatase

Höyrystimen jälkeen savukaasut virtaavat ekonomaiserille. Ekonomaiserilla lämmitetään syöttövesisäiliöstä höyrylieriöön tulevaa vettä, joka virtaa lieriöstä säteilykanavan ja konvektio-osan höyrystimille. Ekonomaiserille tulevan veden lämpötila määräytyy syöttövesisäiliön lämpötilan ja paineen mukaan. Syöttövesisäiliön paine ja lämpötila riippuvat puolestaan turbiinin välitosta otettavan höyryn paineen ja sitä kautta kylläisen veden lämpötilan mukaan vallitsevassa paineessa [34]. Turbiinilta otetaan väliottohöyry lämmittämään syöttövettä 3 bar paineessa. Tällä paineella syöttöveden lämpötilaksi saadaan 133,5 °C. Savukaasun lämpötila ekonomaiserin jälkeen asetetaan lähteiden [2][5][9] perusteella 215 °C: een. 133,5 °C syöttöveden tulolämpötilalla ja 215 °C savukaasujen loppulämpötilalla ekonomaiserissa varmistetaan, ettei happokastepisteen aiheuttamaa syöpmistä tapahdu ekonomaiseriputkien pinnalla.

Ekonomaiserin energiatase esitetään seuraavasti:

$$\phi_{sk,in} - \phi_{sk,out} = \dot{m}_h(h_{vesi,in} - h_{vesi,out}) \quad (42)$$

jossa $\phi_{sk,in}$ on ekonomaiserille tulevan savukaasun energiavirta (2270 kW) ja $\phi_{sk,out}$ ekonomaiserilta lähtevän savukaasun energiavirta, joka 215 °C lämpötilassa on 1746 kW. Termi \dot{m}_h tarkoittaa syöttöveden massavirtaa (2,73 kg/s) ja $h_{vesi,in}$ on syöttövesisäiliön lämpötilan mukainen ja syöttövesipumpun nostattaman paineen mukainen ekonomaiserille tulevan veden entalpia 566 kJ/kg. Energiataseen yhtälöstä saadaan ratkaistua ekonomaiserissa lämmentyneen veden entalpia $h_{vesi,out}$. Entalpian arvoksi saadaan 758 kJ/kg. Ekonomaiseriputkistoissa vallitsee syöttövesipumpun tuottama noin 42 bar paine. Ekonomaiserin painetason ja entalpian arvojen perusteella ekonomaiserissa saadaan lämmitettyä vettä 178 °C lämpötilaan.

8.4 Ilman esilämmittimen energiatase

Ilman esilämmitin on kattilan viimeisin lämmönsiirrin. Tämän jälkeen kattilan savukaasuista ei oteta enää talteen energiaa. Ilman esilämmittimen jälkeisen savukaasun lämpötilan alarajana toimii happokastepiste. Jätteenpoltolle on turvallista asettaa täten savukaasun loppulämpötilaksi 130 °C, mikä on happokastepistettä korkeampi lämpötila [5][34]. Savukaasu saapuu ilman esilämmittimelle lämpötilassa 215 °C ja sen energiavirta on 1746 kW. Ilmaa esilämmittimeen virtaa savukaasuanalyysin mukaisesti 230 mol/s ja ilman sisääntulolämpötilaksi arvioidaan 25 °C. Täten sisään tulevan ilman energiasisältö, eli tuntuva entalpian arvo on 0 kJ/mol ja energiavirran arvo 0 kW, koska kaasujen tuntuvan entalpian arvojen nollapiste on 25 °C [17]. Sama voidaan myös todeta laskennallisesti sijoittamalla lämpötilat ja kostean ilman mooliosuudet yhtälöihin 12-15 ja laskemalla kaasun tuntuvalle entalpialle lukuarvo. Ilman esilämmittimen energiataseelle pätee yhtälö:

$$\phi_{sk,in} - \phi_{sk,out} = \phi_{ilma,out} - \phi_{ilma,in} \quad (43)$$

jossa $\phi_{sk,in}$ ja $\phi_{sk,out}$ ovat esilämmittimelle virtaavien savukaasujen sisäänmeno- ja ulostuloenergiavirrat 1746 kW ja 956 kW. Termi $\phi_{ilma,in}$ on sisääntulevan ilman lämpövirta, joka tässä tapauksessa on 0 kW. Energiataseessa ratkaistavaksi jää minkä verran ilma lämpenee esilämmittimessä. Lämenneen ilman energiavirta esilämmittimeltä tulipesään, eli $\phi_{ilma,out}$ saa arvon 790 kW. Tällä energiavirralla esilämmitetyn ilman lämpötilaksi saadaan 78 °C.

9. TURBIINI JA LÄMMÖNTUOTANTO

Prosessissa tuotettu höyry hyödynnetään sähkön ja lämmön yhteistuotannossa. Turbiinina toimii vastapaine turbiini, jossa on yksi väliotto syöttöveden lämmittämistä varten. Luvun 3 perusteluihin tukeutuen on järkevintä tuottaa sähköä ja hyödyksi käytettävää lämpöä, eikä pelkästään sähköä. Täten prosessin kokonaishyötysuhde paranee merkittävästi sähköntuotannon kuitenkaan selvästi vähenemättä.

9.1 Turbiinin teho

Tulistimelta turbiiniin tulevan tuorehöyryn lämpötila on 400 °C ja paine on 40 bar. Tulistetun höyryn entalpia on 3214 kJ/kg ja entropia $s = 6,77$ kJ/kgK. Turbiinissa on höyryn väliotto 3 bar paineessa, jotta syöttövettä saadaan lämmitettyä riittävästi ennen varsinaista syöttöveden esilämmitintä eli ekonomaiseria. Välioton paine, 3 bar, on samalla syöttövesisäiliön paine. Syöttövesisäiliö toimii syöttöveden sekoitusesilämmittimenä, jossa syöttövesi lämmitetään 3 baarisen kyläisen veden lämpötilaan, eli 133,5 °C. Turbiinissa koko tuorehöyry paisuu ensin 3 bar paineeseen. Tämän jälkeen se osa höyrystä, mikä ei poistu höyryn väliotossa, paisuu 105 °C vastaavaan kyläisen höyryn paineeseen. Tämä kyläisen höyryn paine tarkoittaa turbiinin vastapainetta, minkä mukaan turbiinia nimitetään vastapaineturbiiniksi. Kyseisen turbiinin vastapaineeksi tulee kyläisen höyryn paineen mukaan 1,2 bar. Turbiinigeneraattorilta saatavalle sähköteholle voidaan kirjoittaa yhtälö massavirtojen ja höyryn entalpioiden mukaan:

$$P_e = \eta_{mg}(\dot{m}_h(h_{40bar} - h_{3bar}) + (\dot{m}_h - \dot{m}_{3bar})(h_{3bar} - h_{1,2bar})) \quad (44)$$

jossa η_{mg} on turbiini-generaattoriyhdistelmän sähkömekaaninen hyötysuhde, \dot{m}_h tuorehöyryn massavirta, h_{40bar} turbiinille tulevan höyryn entalpia, h_{3bar} on väliottohöyryn entalpia, \dot{m}_{3bar} on höyryn välioton massavirta ja $h_{1,2bar}$ on turbiinin läpi virranneen 1,2 bar vastapaineessa olevan höyryn entalpia.

Turbiinin paisunta ei ole isentrooppista, eli häviötöntä. Laskennassa on otettava huomioon, että paisunta turbiinissa ei ole häviötöntä, ja tämän ilmiön mallintamiseen käytetään turbiinin isentrooppista hyötysuhdetta η_s . Isentrooppinen hyötysuhde tarkoittaa todellisen paisunnan suhdetta häviöttömän turbiinin paisuntaprosessiin ja sille voidaan käyttää laskennassa arvoa 0,88 [39]. Isentrooppisen hyötysuhteen kaava on seuraavanlainen:

$$\eta_s = \frac{\Delta h}{\Delta h_s} \quad (45)$$

Yhtälössä Δh tarkoittaa todellisen paisunnan entalpian muutosta ja Δh_s isentrooppisen paisunnan entalpian muutosta. Kun tuorehöyryn arvoilla turbiiniin virtaavalla höyryllä on

entropia $s = 6,77 \text{ kJ/kgK}$, saadaan isentrooppisen paisunnan entalpioiksi väliottohöyrylle $h_{3bar,s} = 2635 \text{ kJ/kg}$ ja turbiinin läpi kokonaan virranneelle höyrylle $h_{1,2bar,s} = 2485 \text{ kJ/kg}$. Kun tiedetään isentrooppisen hyötysuhteen olevan 0,88, saadaan yhtälöstä 45 ratkaistua molempien painetasojen todelliset höyryn entalpiat. Väliottohöyryn todellinen entalpia, h_{3bar} on 2705 kJ/kg ja turbiinin läpi kokonaan virranneen höyryn todellinen entalpia turbiinin jälkeen, $h_{1,2bar}$ on 2572 kJ/kg . Turbiini-generaattoriyhdistelmän sähkömekaaninen hyötysuhde η_{mg} on kirjallisuuden [33] mukaan 0,98. Syöttövesisäiliön energiataseesta, yhtälöstä 48, saadaan laskettua turbiinin läpi kokonaan virtaavan höyryn massavirta $\dot{m}_h = 2,58 \text{ kg/s}$ ja väliottohöyryn massavirta $\dot{m}_{3bar} = 0,15 \text{ kg/s}$. Yhtälö 44 ratkaistaan lasketuilla höyryn arvoilla, massavirroilla ja hyötysuhteilla. Tuloksena saadaan turbiinilla tuotetuksi sähkötehoksi 1696 kW .

9.2 Laitoksen lämpöteho

Turbiinin jälkeen höyryn entalpia on vielä 2572 kJ/kg , mikä tarkoittaa, että höyryssä on paljon käyttämättä olevaa lämpöenergiaa jäljellä. Höyry on lauhdutettava vedeksi, jotta se voidaan pumpata uudelleen kiertoon prosessiin ja tuottamaan sähköä sekä lämpöä. Höyryn lauhduttamisessa vapautuva energia otetaan tässä laitoksessa talteen lauhdutinpiirissä virtaavaan veteen ja käytetään puhtaan veden tuotantoon. Höyryn lauhtumislämpötilaksi valikoitui $105 \text{ }^\circ\text{C}$ ja lauhduttimen/lämmönsiirtimen asteisuus on järkevä olla noin $5 \text{ }^\circ\text{C}$ [33]. Tästä seuraa, että lauhdutinpiirissä vesi lämpenee $100 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilaan. Lauhdutinpiirin lämpötilaksi valitaan 3 bar , jotta varmistutaan, että lauhdutinpiirin vesi ei ala kiehua. Lauhduttimen paluuveden arvioidaan olevan n. $90 \text{ }^\circ\text{C}$, kun vesi käy luovuttamassa lämpönsä puhtaan veden tuotantoyksikössä. Laitoksen lämmöntuotannolle saadaan muodostettua energiatase lauhtuvan höyryn ja lauhdutinpiirin veden välille:

$$\dot{m}_{\text{höyry}}(h_{1,2bar,\text{höyry}} - h_{1,2bar,\text{vesi}}) = \dot{m}_{\text{vesi}}(h_{l,\text{meno}} - h_{l,\text{paluu}}) \quad (46)$$

jossa $\dot{m}_{\text{höyry}}$ on höyryvirta turbiinin jälkeen [kg/s], $h_{1,2bar,\text{höyry}}$ on lauhtuvan höyryn entalpia, $h_{1,2bar,\text{vesi}}$ lauhtuneen veden entalpia, \dot{m}_{vesi} on lauhdutinpiirin veden massavirta, $h_{l,100^\circ\text{C}}$ on lauhduttimelta lähtevän veden entalpia ja $h_{l,\text{paluu}}$ on lauhduttimelle tulevan veden entalpia. Lauhduttimelle tulevan veden entalpia $h_{l,\text{paluu}}$ on 377 kJ/kg ja lauhduttimelta lähtevän veden entalpia $h_{l,\text{meno}}$ on 419 kJ/kg . Lauhtuneen veden entalpia $h_{1,2bar,\text{vesi}}$ lauhduttimen jälkeen on 440 kJ/kg . Lauhdutinpiirin veden massavirraksi saadaan lauhduttimen energiataseesta 138 kg/s . Laitoksen hyötylämpöteho voidaan ilmoittaa lauhdutinpiirin tehona seuraavalla kaavalla:

$$\phi_{\text{lämpö}} = \dot{m}_{\text{vesi}}(h_{l,\text{meno}} - h_{l,\text{paluu}}) \quad (47)$$

Yhtälön mukaan prosessista saatava lämpöteho $\phi_{\text{lämpö}}$ on noin 5800 kW .

9.3 Syöttöveden arvot

Syöttöveden arvot määräytyvät syöttövesisäiliön lämpötilan ja painetason mukaan, sekä syöttövesipumpun painetasonnoston mukaan. Syöttövesisäiliölle energiatase voidaan kirjoittaa seuraavasti:

$$\dot{m}_{vesi.out} h_{vesi.out} = \dot{m}_{lauhde} h_{1,2bar,vesi} + \dot{m}_{3bar} h_{3bar} \quad (48)$$

jossa $\dot{m}_{vesi.out}$ on syöttövesisäiliöstä lähtevän veden massavirta, $h_{vesi.out}$ syöttövesisäiliöstä lähtevän veden entalpia, \dot{m}_{lauhde} on lauhduttimelta tulevan veden massavirta, $h_{1,2bar,vesi}$ on lauhduttimelta tulevan veden entalpia, \dot{m}_{3bar} on turbiinin väliottohöyryn massavirta ja h_{3bar} on väliottohöyryn entalpia. Syöttövesisäiliö toimii sekoituselämittimenä syöttövedelle, jotta syöttöveden lämpötila nousisi riittävän korkeaksi ennen ekonomaiseria. Syöttövesi lämpenee energiarikkaan väliottohöyryn avulla. Kun tiedetään, että väliottohöyryn paine on 3 bar ja painetasoa vastaavan kylmän veden lämpötila on 133,5 °C, saadaan syöttövesisäiliöstä lähtevän veden entalpiaksi $h_{vesi.out} = 561,5$ kJ/kg. Lauhduttimelta saapuvan veden entalpiain $h_{1,2bar,vesi}$ tiedetään olevan 440 kJ/kg ja väliottohöyryn entalpia h_{3bar} on 2704 kJ/kg. Prosessissa virtaava kokonaisvedenmäärä on sama kuin syöttövesisäiliöstä lähtevän veden massavirta $\dot{m}_{vesi.out}$. Kokonaisvesivirta systeemissä on 2,73 kg/s. Ratkaistavaksi energiataseessa jää väliottohöyryn massavirta \dot{m}_{3bar} ja syöttövesisäiliöön saapuvan lauhduneen veden massavirta \dot{m}_{lauhde} . Väliottohöyryn massavirraksi saadaan 0,15 kg/s ja syöttövesisäiliöön tulevan lauhde massavirraksi saadaan 2,58 kg/s.

Syöttövesisäiliöstä vesi virtaa syöttövesipumpulle, jossa syöttöveden paine nostetaan prosessin haluttuun paineeseen. Syöttövesipumppu nostaa veden paineen putkistohäviöistä johtuen noin 5 % halutun tuorehöyryn painetta korkeammaksi [33]. Tuorehöyrynpaineen halutaan olevan 40 bar, joten syöttövesipumpulla höyrypiirin paine nostetaan 42 barin paineeseen. Syöttövesipumpun entalpiannousu lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$\Delta h = v \Delta p \quad (49)$$

Yhtälössä v on veden keskimääräinen ominaistilavuus pumpussa [m^3/kg] ja Δp pumpun tuottama paineen muutos [Pa]. Pumpussa virtaavan veden keskimääräinen ominaistilavuus on keskiarvo syöttövesisäiliön painetta (3 bar) ja pumpun tuottamaa painetta (42 bar) vastaavista veden ominaistilavuuksista. Keskimääräiseksi veden ominaistilavuudeksi saadaan 0,00117 m^3/kg . Pumpun paine ero Δp on 39 bar, eli 3 900 000 Pa. Pumpun aiheuttama entalpiamuutos Δh vedelle on täten noin 4,5 kJ/kg. Syöttöveden entalpia pumpun jälkeen on täten:

$$h_{sv} = h_{vesi.out} + \Delta h \quad (50)$$

jossa $h_{vesi,out}$ on syöttövesisäiliöstä lähtevän veden entalpia (561,5 kJ/kg) ja Δh on pumpun aiheuttama entalpiain muutos (4,5 kJ/kg). Syöttövesi virtaa täten ekonomaiselle entalpiassa $h_{sv} = 566$ kJ/kg.

Syöttövesipumpun tehontarve voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä:

$$P_{sv} = \frac{\dot{m}_{vesi} \Delta h}{\eta_p} \quad (51)$$

jossa \dot{m}_{vesi} on syöttöveden massavirta, Δh pumpun aiheuttama entalpiannousu ja η_p on pumpun hyötysuhde. Syöttövesipumpun hyötysuhteelle voidaan antaa arvoksi $\eta_p = 0,8$ [23][40]. Syöttövesipumpun tehontarpeeksi saadaan täten 15,5 kW.

10. KONVEKTIO-OSAN LÄMMÖNSIIRTIMIEN MITOITUS

Luvuissa 8 ja 9 esitettyjen voimalaitoksen energiataseiden ja höyrypiirin lämpövirtojen toteuttamiseksi on konvektio-osan lämmönsiirtimille tehtävä fyysinen mitoitus. Fyysinen mitoitus tapahtuu putkipaketeista muodostuvalle lämmönsiirtokokonaisuudelle putkien ulkopuolisen lämmönsiirron, putkien läpi tapahtuvan johtumisen ja putkien sisäpuolisen lämmönsiirron kokonaisyhtälöt muodostamalla. Kun lämmönsiirrolle on muodostettu kokonaislämmönsiirtoyhtälö, saadaan konvektio-osan lämmönsiirtiminä käytettäville putkipaketeille fyysiset mitat. Mitoituslaskujen perustana käytetään kirjaa Basic Heat and Mass Transfer [38] sekä Tampereen teknillisen yliopiston höyrytekniikan kurssin opetusmonistetta [23].

10.1 Tulistimen mitoitus

Tulistinputkipaketin mitoituksen perustana toimii savukaasujen virtauskanavan poikkipinta-ala, joka on noin 4,44 m². Putkipakettien on leveys- ja korkeussuunnassa mahdollista kytkeä kyseiselle alalle. Virtauskanavan suurin mahdollinen leveys on 1,94 m ja korkeus 2,29 m. Tulistin muodostuu teräsputkista, jotka ovat poikittain savukaasun virtaussuuntaan nähden. Tulistinputkien sisäpuolella virtaa höyry ja ulkopuolella savukaasu. Tulistimen mitoitus riippuu putkien ulkopuolisesta konvektiivisesta lämmönsiirrosta, putken seinämän konduktiivisesta lämmönsiirrosta sekä putken sisäpuolen konvektiivisesta lämmönsiirrosta [38]. Tulistimelle tulevan savukaasun lämpötila on 641 °C ja se poistuu tulistimelta 532 °C lämpötilassa. Tulistimessa virtaava höyry saapuu tulistimeen lämpötilassa 250 °C ja poistuu tuorehöyrynä 400 °C lämpötilassa. Putken pintalämpötilana T_s käytetään seuraavan kaavan lämpötilaa:

$$T_s = \frac{(T_{h,in} + 20\text{ °C}) + (T_{h,out} + 20\text{ °C})}{2} \quad (52)$$

jossa $T_{h,in}$ on höyryn lämpötila tulistimelle tullessaan ja $T_{h,out}$ tulistetun höyryn lämpötila. Lämpötilanlisäys 20 °C on kirjallisuudesta [34] selvitetty lämpötilaero höyryn ja putken pintalämpötilalle tulistimessa. Putken pintalämpötilan keskiarvoksi T_s tulistimessa saadaan 345 °C. Savukaasujen lämpötilasta riippuvat ominaisuudet saadaan putken pinnan ja savukaasuvirran keskilämpötilassa T_b . Savukaasuominaisuuksien keskilämpötila selvitetään yhtälöstä:

$$T_b = \frac{T_s + \frac{T_{sk,in} + T_{sk,out}}{2}}{2} \quad (53)$$

jossa $T_{sk,in}$ ja $T_{sk,out}$ ovat savukaasujen tuleva ja lähtevä lämpötila tulistimella. Savukaasun ominaisuuksien lämpötilaksi T_b saadaan 465 °C. Tässä lämpötilassa saadut lämpötilariippuvaiset ja laskennassa tarvittavat suureet esitetään taulukossa 17.

Taulukko 17. Savukaasun ominaisuudet tulistimen lämmönsiirrolle.

Ominaisuus	Symboli	Arvo	Yksikkö
Kinemaattinen viskositeetti	ν	$70,8 \cdot 10^{-6}$	m^2/s
Lämmönjohtavuus	k	0,051	W/mK
Tiheys	ρ	0,48	kg/m^3

10.1.1 Ulkopuolinen virtaus tulistinputkipakettiin

Tulistimen ulkopuolen lämmönsiirron yhtälöt ovat pakotetun konvektion yhtälöitä ristivirrassa olevaan putkipakettiin. Jätteenpolton savukaasun likaavuuden takia putkipaketin putket ovat rivissä, eikä porrastetusti. Putkissa ei käytetä rivoitusta [2]. Putkipaketille selvitetään ulkopuolen keskimääräinen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin $h_{c,u}$ [W/m²K] seuraavasta yhtälöstä:

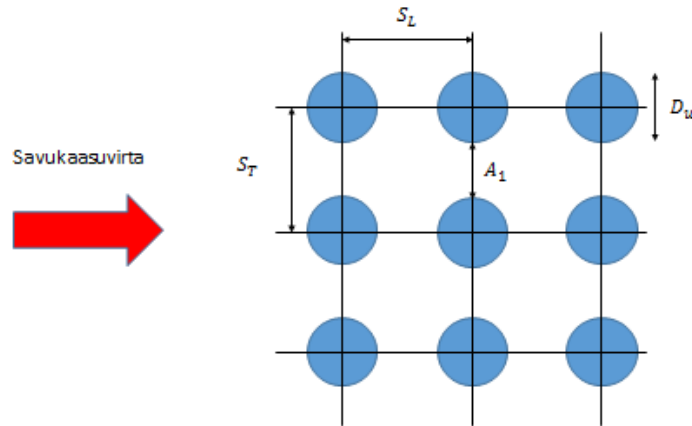
$$h_{c,u} = k \frac{Nu}{D_u} \quad (54)$$

Yhtälössä k taulukossa 17 ilmoitettu savukaasun lämmönjohtavuus [W/mk], Nu on keskimääräinen Nusseltin luku putkipaketille ja D_u on tulistinputken ulkohalkaisija. Nusseltin luku selvitetään yhtälön 55 perusteella:

$$Nu = C_1 Re_{D_u,max}^m \quad (55)$$

jossa C_1 ja m ovat taulukosta 18 saatavat putkirivistön geometriasta riippuvat virtaustekniset vakiot ja $Re_{D_u,max}$ on putkistopakettissa esiintyvän suurimman mahdollisen virtausnopeuden, v_{max} mukainen Reynoldsin luku. Yhtälö 55 on voimassa Reynoldsin luvun arvoilla $2000 \leq Re_{D_u,max} \leq 40\,000$.

Kuva 14 havainnollistaa putkipaketin asettelua suhteessa virtaussuuntaan. Kuvasta saadaan myös selville taulukon 18 virtausgeometrian merkintöjen tarkoitus.



Kuva 14. Putkipaketti, putket rivissä.

Taulukkoon 18 on koottu virtausgeometriasta riippuvat vakiot C_1 ja m kuvassa 18 esiintyvien putken eri poikittais- ja pitkittäisetäisyyksillä S_T ja S_L . Jätteenpolton savukaasujen likaavuuden vuoksi putkivälit pidetään riittävän isoina ($\frac{S_T}{D_u} = 2$ ja $\frac{S_L}{D_u} = 2$).

Taulukko 18. Vakioiden C_1 ja m arvot eri putken etäisyyksillä.

	S_T/D_u							
	1,25		1,5		2,0		3,0	
S_L/D_u	C_1	m	C_1	m	C_1	m	C_1	m
1,25	0,348	0,592	0,275	0,608	0,100	0,704	0,0633	0,752
1,50	0,367	0,586	0,250	0,620	0,101	0,702	0,0678	0,744
2,0	0,418	0,570	0,299	0,602	0,229	0,632	0,198	0,648
3,0	0,290	0,601	0,357	0,584	0,374	0,581	0,286	0,608

Reynoldsin luku selvitetään putken ulkohalkaisijan, putkipaketissa vallitsevan suurimman mahdollisen nopeuden ja savukaasun kinemaattisen viskositeetin avulla seuraavasti:

$$Re_{D_u, max} = \frac{v_{max} D_u}{\nu} \quad (56)$$

Kaavassa v_{max} on kuvassa 14 esitettävän kapeimman virtauskohdan A_1 savukaasun nopeus ja ν on taulukossa 17 ilmoitettu savukaasun kinemaattinen viskositeetti.

Virtausnopeuden maksimiarvo v_{max} saadaan laskettua yhtälöstä 57:

$$v_{max} = \frac{S_T}{S_T - D_u} V \quad (57)$$

Yhtälössä termi V on savukaasun keskinopeus putkipaketissa, joka saadaan laskettua savukaasun massavirran tiheyden ja virtauspoikkipinta-alan avulla:

$$V = \frac{\dot{m}_{sk}}{\rho A_c} \quad (58)$$

Termi \dot{m}_{sk} tarkoittaa savukaasun massavirtaa, ρ savukaasun tiheyttä ja A_c vapaata virtauspoikkipinta-alaa. Vapaa virtauspoikkipinta-ala saadaan yhtälöstä:

$$A_c = A - N_T D_u L_p \quad (59)$$

jossa A on virtauskanavan vapaa poikkipinta-ala ilman putkia, N_T on vierekkäisten putkien määrä ja L_p yksittäisen putken pituus. Vierekkäisten putkien määrä N_T kohtisuorassa savukaasuvirtaukseen nähden määritetään putken sisäpuolisen virtauksen yhtälöissä höyryn virtausnopeuden perusteella, kuitenkin huomioiden, että putket mahtuvat virtauskanavaan.

10.1.2 Tulistimen sisäpuolen lämmönsiirto

Tulistinputkessa virtaavan höyryn ominaisuudet tulistinputkipaketin sisäpuoliselle virtaukselle saadaan höyryn keskilämpötilassa tulistinputkissa. Keskilämpötila tulistinputkissa on höyryn sisääntulo- ja poistumislämpötilan keskiarvo:

$$T_h = \frac{T_{h,in} + T_{h,out}}{2} \quad (60)$$

Tulistimelle tulevan höyryn ja tulistetun höyryn lämpötilojen ollessa 250 °C ja 400 °C, on tulistimen höyryn keskilämpötila $T_h = 325$ °C. Höyryn lämmönsiirrossa tarvittavat lämpötilasta riippuvat ominaisuudet selvitetään tulistimen höyryn keskilämpötilassa. Lämmönsiirrossa tarvittavat höyryn ominaisuudet esitetään taulukossa 19.

Taulukko 19. Höyryn ominaisuudet tulistimen höyryn keskilämpötilassa.

Ominaisuus	Symboli	Arvo	Yksikkö
Tiheys	ρ	15,9	kg/m ³
kinemaattinen viskositeetti	ν	$1,32 \cdot 10^{-6}$	m ² /s
Lämmönjohtavuus	k	0,052	W/mK
Prandtl'in luku	Pr	1,07	-

Tulistinputken sisäpuolen konvektion yhtälöt ovat pakotetun putken sisäpuolisen konvektiivisen virtauksen yhtälöitä. Putken sisäpuoliselle konvektiiviselle lämmönsiirtokertoimelle $h_{c,i}$ [W/m²K] esitetään yhtälö:

$$h_{c,i} = k \frac{Nu}{D_i} \quad (61)$$

jossa k on höyryn lämmönjohtavuus [W/mK], joka on esitetty taulukossa 19, Nu on Nusseltin luku ja D_i on tulistinputken sisähalkaisija. Nusseltin luku putken sisäpuoliselle virtaukselle saadaan ratkaistua kaavasta:

$$Nu = 0,023 Re_{Di}^{0,8} Pr^{0,4} \quad (62)$$

Re_{Di} on putken sisäpuolen virtausta vastaava Reynoldsin luku ja Pr on Prandtl'in luku, joka selvitetään höyryn lämpötilan ja paineen perusteella. Prandtl'in luku tulistimen höyrylle on taulukon 19 mukainen 1,07. Reynoldsin luku putken sisäpuoliselle virtaukselle saadaan yhtälöstä:

$$Re_{Di} = \frac{v D_i}{\nu} \quad (63)$$

jossa v on höyryvirtauksen nopeus ja ν [m²/s] höyryn kinemaattinen viskositeetti [m²/s], joka on ilmoitettu taulukossa 19.

Höyryn nopeuden v on oltava riittävä tulistimessa, jotta lämmönsiirron edellytykset putkiston ylikuumentumisen välttämiseksi estettäisiin. Rivissä kohtisuoraan virtaukseen nähtävien putkien määrä N_T määräytyy täten höyryn riittävän nopeuden mukaan. Riittävä nopeus höyrylle tulistimessa on 10 m/s [23] ja rinnakkaisten tulistinputkien määrä mitoitetaan kyseiselle höyryn virtausnopeudelle:

$$N_T = \frac{\dot{m}_h}{\rho v \pi \left(\frac{D_i}{2}\right)^2} \quad (64)$$

jossa \dot{m}_h on höyryn massavirta, ρ tiheys, v nopeus ja D_i putken sisähalkaisija. Yhtälöstä saadaan ratkaisuna $N_T = 22,9$. Putkien määrä pitää olla tasaluku, ja höyryn nopeus saa mieluummin olla yli 10 m/s kuin alle sen, joten luku 22,9 pyöristetään alaspäin. Virtausuuntaan nähden kohtisuoraan rivissä olevien tulistinputkien määrä N_T on 22 ja höyryn virtausnopeus v yhtälön 64 mukaisesti tulistimessa 10,45 m/s.

10.1.3 Tulistimen kokonaislämmönsiirto ja mitoitus

Tulistimen kokonaislämmönsiirto määritetään lämmönläpäisykerroimen U_L [W/mK], tulistinputkiston kokonaispituuden L [m] ja logaritmisen keskilämpötilaeron ΔT_{lm} [K] avulla yhtälön 65 mukaisesti:

$$\phi_{tulistin} = LU_L \Delta T_{lm} F \quad (65)$$

Yhtälössä kerroin F on ristivirtakytkennän korjauskerroin, jota on käytettävä, kun virtaus ei ole puhtaasti vastavirtainen eikä myötävirtainen [23][41]. Tulistimen lämmönläpäisykerroimen U_L laskemiseksi tarvitaan tulistinputkiston ulkopuolinen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin $h_{c,u}$ ja sisäpuolen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin $h_{c,i}$. Lisäksi on selvitettävä putkimateriaalin lämmönjohtavuus putken seinämälämpötilassa T_s . Lämmönsiirron kirjallisuudesta [38] tulistimen putkimateriaaliksi valikoituu teräs, jonka lämmönjohtavuus lämpötilassa $T_s = 345$ °C on noin 48 W/mK. Tulistinputkiston kokonaislämmönläpäisykerroin saadaan selvitettyä yhtälöstä:

$$\frac{1}{U_L} = \frac{1}{2\pi \left(\frac{D_i}{2}\right) h_{c,i}} + \frac{\ln\left(\frac{D_u}{D_i}\right)}{2\pi k_s} + \frac{1}{2\pi \left(\frac{D_u}{2}\right) h_{c,u}} \quad (66)$$

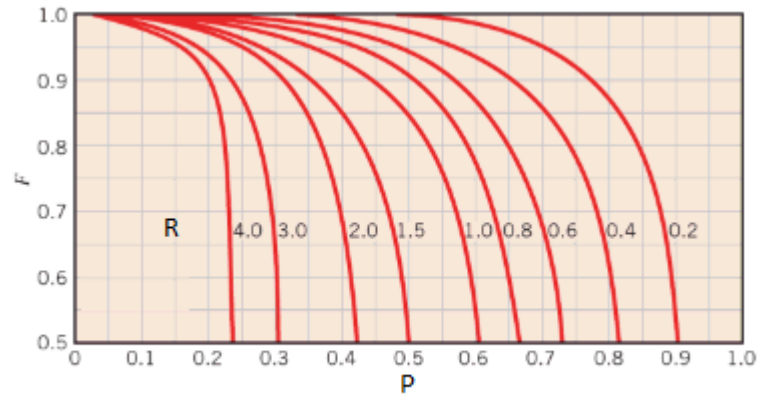
jossa k_s on putkimateriaalin lämmönjohtavuus lämpötilassa T_s .

Lämmönsiirron lämpötilaerona käytetään logaritmista keskilämpötilaeroa ΔT_{lm} , joka kuvaa paremmin lämpötilaeroa lämmönsiirrossa kuin keskimääräinen lämpötilaero. Logaritminen keskilämpötilaero tulistimelle esitetään seuraavalla yhtälöllä:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{sk,out} - T_{h,in}) - (T_{sk,in} - T_{h,out})}{\ln\left(\frac{T_{sk,out} - T_{h,in}}{T_{sk,in} - T_{h,out}}\right)} \quad (67)$$

Yhtälössä $T_{sk,in}$ ja $T_{sk,out}$ ovat savukaasujen tulo- ja poistumislämpötilat tulistimella ja $T_{h,in}$ sekä $T_{h,out}$ ovat höyryn tulo- ja poistumislämpötilat tulistimella.

Lämmönsiirtoyhtälön ristivirtalämmönsiirron korjauskertoimen F selvittäminen tapahtuu kuvan 15 mukaiselta käyrästä.



Kuva 15. Ristivirtalämmönsiirron korjauskertoimen F [41].

Käyrästä tulkitakseen, on selvitettävä kuvassa näkyville termeille R ja P arvot. R ja P ovat lämpötilojen yhtälöiden lukuarvoja ja niitä varten on ratkaistava seuraavat yhtälöt:

$$P = \frac{T_{h,out} - T_{h,in}}{T_{sk,in} - T_{sk,out}} \quad (68)$$

$$R = \frac{T_{sk,in} - T_{sk,out}}{T_{h,out} - T_{h,in}} \quad (69)$$

Yhtälöiden 68 ja 69 perusteella saadaan kuvan 15 käyrästä ristivirtalämmönsiirtimen korjauskertoimeksi F arvo 0,95.

Kun tiedetään tulistimella savukaasuista höyryyn siirrettävän lämpötehon olevan energiataseen yhtälön 39 mukaisesti 1127 kW, voidaan ratkaista tulistinputkien tarvittava yhteispituus yhtälöstä 65. Tulistinputkien yhteenlasketuksi pituudeksi L saadaan 500,5 metriä. Yhdessä putkirivissä olevia putkia kanavassa on $N_T = 22$ kappaletta yhtälön 64 mukaisesti. Peräkkäisten putkirivien määrälle N_L esitetään seuraava yhtälö:

$$N_L = \frac{L}{N_T L_p} \quad (70)$$

jossa L_p on yksittäisen tulistinputken mitta. Yksittäisen tulistinputken mitta L_p on 2,29 m virtauskanavan korkeuden mukaisesti. Yhtälön 70 ratkaisuna saadaan tarvittavien peräkkäisten putkirivien määräksi $N_L = 9,9$ kappaletta. Tämä luku pyöristetään ylöspäin, jotta riittävä lämmönsiirto tulistimella varmasti saavutetaan. Peräkkäisten tulistinputkirivien määräksi N_L tulee 10 kappaletta. Tulistinpaketin savukanavan virtaussuuntainen pituus saadaan selvitettyä seuraavalla yhtälöllä:

$$L_{tulistin} = (N_L - 1)S_L + D_u \quad (71)$$

jossa S_L ja D_u ovat virtauskanavan suuntainen putkiväli ja tulistinputken ulkohalkaisija. Tulistimen leveydelle, $W_{tulistin}$, saadaan arvo yhtälöllä:

$$W_{tulistin} = N_t S_T + D_u \quad (72)$$

jossa N_t ja S_T ovat virtausta vastaan kohtisuorassa rivissä olevien putkien määrä ja putkiväli kohtisuoraan virtaukseen nähden.

Tulistimen mitoituksen tulokset ja tärkeimmät mitoituksessa tarvittavat arvot esitetään taulukossa 20.

Taulukko 20. Tulistimen mitoituksen tulokset.

Suure	Symboli	Arvo	Yksikkö
Tulistimen pituus	$L_{tulistin}$	0,722	m
Tulistimen leveys	$W_{tulistin}$	1,71	m
Tulistimen korkeus	L_p	2,29	m
Putkirivin putkimäärä	N_T	22	kpl
Putkirivien määrä	N_L	10	kpl
Putkiväli pituussuunnassa	S_L	0,076	m
Putkiväli leveyssuunnassa	S_T	0,076	m
Tulistinputken ulko- halkaisija	D_u	0,038	m
Tulistinputken sisä- halkaisija	D_i	0,0308	m
Tulistimen lämmönlä- päisykerroin	U_L	9,16	W/mK
Savukaasun virtaus- nopeus tulistimessa	V	6,9	m/s
Höyryn virtausno- peus tulistimessa	v	10,45	m/s

10.2 Höyrystimen mitoitus

Höyrystinputkipaketin mitoituksen perustana toimii savukaasujen virtauskanavan poikkipinta-ala, kuten tulistinputkillekin. Tämä virtauksen poikkipinta-ala on noin 4,44 m². Putkipakettien on leveys- ja korkeussuunnassa mahdollista mahduttava kyseiselle alalle. Virtauskanavan suurin mahdollinen leveys on 1,94 m ja korkeus 2,29 m. Höyrystin on teräsputkipaketti, jonka putket ovat poikittain savukaasun virtaussuuntaan nähden. Höyrystinputkien sisäpuolella virtaa höyrystyvä vesi ja höyrystynyt höyry sekä ulkopuolella savukaasu. Höyrystimen mitoitus perustuu putkien ulkopuoliseen konvektiiviseen lämmönsiirtoon, putken seinämän konvektiiviseen lämmönsiirtoon sekä putken sisäpuolen konvektiiviseen lämmönsiirtoon [38]. Höyrystimelle tulevan savukaasun lämpötila on 532 °C ja se

poistuu höyrystimeltä 270 °C lämpötilassa. Höyrystimessä virtaava vesi saapuu höyrystimelle lämpötilassa 178 °C ja poistuu kylläisenä höyrinä 250 °C lämpötilassa. Höyrystintä mitoitettaessa höyrystimen tulo- ja lähtölämpötilat ovat laskennallisesti samat, koska veden lämmittämiseen käytettävä energia on pieni verrattuna höyrystymiseen tarvittavaan energiaan. Höyrystimen lämmönsiirto tulisi yliarvioitua käytettäessä höyrin tulolämpötilana 178 °C lämpötilaa. Putken pintalämpötilana T_s käytetään seuraavan kaavan lämpötilaa:

$$T_s = \frac{(T_{h,in} + 10\text{ °C}) + (T_{h,out} + 10\text{ °C})}{2} \quad (73)$$

jossa $T_{h,in}$ on veden lämpötila höyrystimelle tullessaan ja $T_{h,out}$ höyrystetyn höyrin lämpötila. Kuten edellä mainittiin, $T_{h,in}$ ja $T_{h,out}$ ovat tässä yhtä suuria, eli kylläisen veden ja höyrin lämpötila 40 bar paineessa. Lämpötilanlisäys 10 °C on kirjallisuudesta [34] selvitetty lämpötilaero höyrin ja putken pintalämpötilalle höyrystimessä. Putken pintalämpötilan keskiarvoksi T_s höyrystimessä saadaan 260 °C. Savukaasujen lämpötilasta riippuvat ominaisuudet saadaan putken pinnan ja savukaasuvirran keskilämpötilassa T_b . Savukaasuominaisuuksien keskilämpötila selvitetään yhtälöstä:

$$T_b = \frac{T_s + \frac{T_{sk,in} + T_{sk,out}}{2}}{2} \quad (74)$$

jossa $T_{sk,in}$ ja $T_{sk,out}$ ovat savukaasujen tuleva ja lähtevä lämpötila höyrystimellä. Savukaasun ominaisuuksien lämpötilaksi T_b saadaan 330 °C. Tässä lämpötilassa saadut lämpötilariippuvaiset ja laskennassa tarvittavat suureet esitetään taulukossa 21.

Taulukko 21. Savukaasun ominaisuudet höyrystimen lämmönsiirrolle.

Ominaisuus	Symboli	Arvo	Yksikkö
Kinemaattinen viskositeetti	ν	$50,0 \cdot 10^{-6}$	m^2/s
Lämmönjohtavuus	k	0,043	W/mK
Tiheys	ρ	0,59	kg/m^3

10.2.1 Ulkopuolinen virtaus höyrystinputkipakettiin

Kuten tulistimen, höyrystimen ulkopuolen lämmönsiirron yhtälöt ovat pakotetun konvektion yhtälöitä ristivirrassa olevaan putkipakettiin. Jätteenpolton savukaasun likaavuuden takia putkipaketin putket ovat rivissä, eikä porrastetusti. Putkissa ei käytetä rivoitusta [2]. Höyrystinputkipaketille selvitetään ulkopuolen keskimääräinen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin $h_{c,u}$ [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$], kuten tulistimelle yhtälöstä 54. Lämmönsiirron yhtälöt 55-59 pätevät höyrystimelle vastaavasti kuin tulistimelle ja höyrystin mitoitetaan vastaavasti kuin tulistin. Savukaasun lämpötilariippuvaiset ominaisuudet ovat höyrystimen alueella

olevan savukaasun arvoja, taulukon 21 mukaisesti. Virtausgeometria höyrystimellä on sama kuin tulistimella ($\frac{S_T}{D_u} = 2$ ja $\frac{S_L}{D_u} = 2$).

Toisin kuin tulistimessa, höyrystimessä höyrystyvän höyryn nopeuden ei pidä olla suuri. Höyrystyvän höyryn lämmönsiirto on parempaa kuin tulistimessa tulistuvan höyryn, joten tästä syystä savukaasuvirtausta vastaan kohtisuorassa rivissä olevien putkien määrä N_T ei määräydy höyrystimellä höyryn virtausnopeuden mukaan [41][38]. Höyrystimen putkirivissä olevien vierekkäisten putkien määrä N_T määräytyy höyrystimelle virtauskanavan leveyden mukaan seuraavasti:

$$N_T = \frac{W_{kanava} - D_u}{S_T} \quad (75)$$

jossa W_{kanava} on virtauskanavan suurin mahdollinen leveys, D_u höyrystinputken ulkohalkaisija ja S_T höyrystinputkien putkijako leveyssuunnassa. Virtauskanavan leveydellä 1,94 m, putkivälillä 0,076 m ja höyrystinputken ulkohalkaisijalla 0,038 m saadaan rivissä olevien putkien määräksi 25,02 putkea. Arvo pitää pyöristää alaspäin, jotta putket mahduttavat kanavaan, joten rinnakkaisten putkien määrä N_T höyrystimessä on 25 kappaletta.

10.2.2 Höyrystimen sisäpuolen lämmönsiirto

Konvektiivisessa höyrystimessä virtaavan höyry-vesiseoksen ominaisuudet höyrystinputkipaketin sisäpuoliselle virtaukselle saadaan kylläisen höyry-vesiseoksen lämpötilassa $T_h = 250$ °C höyrystinputkissa. Höyrystimessä virtaavan vesivirran suhdetta höyrystyvään vesivirtaan nimitetään höyrystimen kiertoluvuksi. Höyrystimelle kiertoluvuksi voidaan valita 5 [34]. Höyrystimen kiertoluvun ja höyrystimen höyrypitoisuuden yhteys esitetään seuraavassa yhtälössä:

$$N = \frac{1}{x} \quad (76)$$

jossa N on höyrystimen kiertoluku ja x on höyryn massaosuus höyrystinputkistossa. Kun höyrystimellä tuotetun höyryn määrä konvektiivisella höyrystimellä on 1,27 kg/s, on höyrystimellä virtaavan höyry-vesiseoksen massavirta $\dot{m}_{hv} = 6,35$ kg/s, kun kiertoluku on 5. Kiertoluvulla $N = 5$, höyryn massaosuus x on 0,2.

Laskennassa käytettävä höyry-vesiseoksen keskimääräinen tiheys saadaan selvitettyä massaosuuksien perusteella höyryn keskilämpötilassa seuraavalla yhtälöllä:

$$\rho_{hv} = x\rho_h + (1 - x)\rho_v \quad (77)$$

jossa ρ_h on höyryn tiheys lämpötilassa T_h ja ρ_v on veden tiheys lämpötilassa T_h . Lämmönsiirrossa tarvittavat höyry-vesiseoksen ominaisuudet esitetään taulukossa 22.

Taulukko 22. Höyry-vesiseoksen ominaisuudet höyrystimessä.

Ominaisuus	Symboli	Arvo	Yksikkö
Tiheys	ρ	642	kg/m ³
kinemaattinen viskositeetti	ν	$1,32 \cdot 10^{-7}$	m ² /s
Lämmönjohtavuus	k	0,62	W/mK
Prandtl'in luku	Pr	0,836	-

Höyrystinputken sisäpuolen yhtälöt ovat pakotetun konvektiivisen virtauksen yhtälöitä putkessa. Höyrystinputkiston sisäpuolinen lämmönsiirtokerroin ratkaistaan yhtälöillä 61-63 kuten tulistimellekin, mutta yhtälöissä käytetään höyrystimen homogeenisen virtausmallin höyry-vesiseoksen aineominaisuuksien arvoja.

10.2.3 Höyrystimen kokonaislämmönsiirto ja mitoitus

Höyrystimen kokonaislämmönsiirto määritetään lämmönläpäisykerroimen U_L [W/mK], höyrystinputkiston kokonaispituuden L [m] ja logaritmisesta keskilämpötilaeron ΔT_{lm} [K] avulla yhtälön 78 mukaisesti:

$$\phi_{höyrystin} = LU_L \Delta T_{lm} \quad (78)$$

Yhtälössä ei käytetä korjauskerrointa F , kuten tulistimen kokonaislämmönsiirron yhtälössä, sillä höyrystimen höyrynlämpötila on mitoituksen kannalta vakio ($T_h = T_{h,in} = T_{h,out}$) [41]. Höyrystimen lämmönläpäisykerroimen U_L laskemiseksi tarvitaan höyrystinputkiston ulkopuolinen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin $h_{c,u}$ ja sisäpuolen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin $h_{c,i}$. Lisäksi on selvitettävä putkimateriaalin lämmönjohtavuus putken seinämlämpötilassa T_s . Lämmönsiirron kirjallisuudesta [38] höyrystimen putkimateriaaliksi valikoituu teräs, jonka lämmönjohtavuus k_s lämpötilassa $T_s = 260$ °C on noin 48,8 W/mK. Höyrystinputkistolle selvitetään kokonaislämmönläpäisykerroin yhtälöstä 66 kuten tulistimellekin. Lämmönsiirron logaritminen keskilämpötilaero ΔT_{lm} höyrystimelle lasketaan vastaavasti kuin tulistimelle yhtälöllä 67.

Lämmöntalteenottokattilan höyrystimellä tapahtuva lämmönsiirto on energiataseen yhtälön 41 mukaan 2816 kW. Höyrystinputkien tarvittava kokonaispituus ratkaistaan yhtälöstä 65. Höyrystinputkien kokonaispituudeksi L saadaan 2723,6 metriä. Yhden putkiryhmän putkimäärä N_T höyrystimelle on 25 putkea, joten yksittäisen höyrystinputken pituuden L_P ollessa 2,29 m voidaan yhtälöstä 70 ratkaista peräkkäisten höyrystinputkirivien määrä N_L . Yhtälön 70 ratkaisuna saadaan peräkkäisten höyrystinputkirivien määräksi $N_L = 47,6$ kappaletta. Luku pyöristetään ylöspäin riittävän lämmönsiirron takaamiseksi. Peräkkäisten höyrystinputkirivien määrä lämmöntalteenottokattilan höyrystinpaketissa on täten 48 kappaletta.

Höyrystinpaketin savukanavan virtaussuuntainen pituus saadaan selvitettyä yhtälöllä 71 ja vastaavasti höyrystinpaketin leveys yhtälöllä 72. Höyrystimen mitoituksen tulokset esitetään taulukossa 23.

Taulukko 23. Höyrystimen mitoituksen tulokset.

Suure	Symboli	Arvo	Yksikkö
Tulistimen pituus	$L_{höyrystin}$	3,61	m
Tulistimen leveys	$W_{höyrystin}$	1,94	m
Tulistimen korkeus	L_p	2,29	m
Putkirivin putkimäärä	N_T	25	kpl
Putkirivien määrä	N_L	48	kpl
Putkiväli pituussuunnassa	S_L	0,076	m
Putkiväli leveyssuunnassa	S_T	0,076	m
Höyrystinputken ulkohalkaisija	D_u	0,038	m
Höyrystinputken sisähalkaisija	D_i	0,0308	m
Höyrystimen lämmönläpäisykerroin	U_L	9,9	W/mK
Savukaasun virtausnopeus höyrystimestä	V	6,26	m/s
Höyryn virtausnopeus höyrystimestä	v	0,6	m/s

10.3 Ekonomaiserin mitoitus

Ekonomaiserin, kuten muidenkin lämmönsiirtimien edellä, on mahdollista leveys- ja korkeussuunnassa poikkipinta-alaltaan 4,44 m² savukaasukanavaan. Kanavan maksimikorkeus on 2,29 m ja leveys 1,94 m. Ekonomaiserin on teräsputkipaketti, jonka putket ovat poikittain savukaasun virtaussuuntaan nähden. Ekonomaiserissa virtaa lämmitettävä vesi putkien sisäpuolella ja jäähtyvä savukaasu putkien ulkopuolella. Ekonomaiserin mitoitaan putken ulkopuolisen ja sisäpuolisen konvektiivisen lämmönsiirron, sekä putkimateriaalissa johtumalla tapahtuvan lämmönsiirron perusteella. Ekonomaiserille tulevan savukaasun lämpötila on 270 °C ja savukaasu poistuu ekonomaiserilta 215 °C lämpötilassa. Ekonomaiserille tuleva vesi on 133,5 °C lämpötilassa ja vettä lämmitetään ekonomaiserilla 178 °C lämpötilaan. Ekonomaiseriputkien keskimääräiseksi putkien pintalämpötilaksi T_s saadaan yhtälöä 73 käyttämällä 165,8 °C.

Savukaasujen lämpötilasta riippuvat ominaisuudet saadaan putken pinnan ja savukaasuvirran keskilämpötilassa T_b . Savukaasuominaisuuksien keskilämpötila selvitetään yhtä-

löstä 74. Savukaasun laskennalliseksi keskilämpötilaksi T_b aineominaisuuksia varten saadaan 204 °C. Taulukossa 24 esitetään laskennallisen savukaasujen keskilämpötilan avulla selvitettyt savukaasun ominaisuudet ekonomaiserilla.

Taulukko 24. Savukaasun ominaisuudet ekonomaiserin lämmönsiirrolle.

Ominaisuus	Symboli	Arvo	Yksikkö
Kinemaattinen viskositeetti	ν	$32,9 \cdot 10^{-6}$	m^2/s
Lämmönjohtavuus	k	0,035	W/mK
Tiheys	ρ	0,76	kg/m^3

10.3.1 Ulkopuolinen virtaus ekonomaiseriputkipakettiin

Ekonomaiserin ulkopuolen lämmönsiirron yhtälöt ovat pakotetun konvektion yhtälöitä ristivirrassa olevaan putkipakettiin. Kuten höyrystimen ja tulistimen, myös ekonomaiseriputkipaketin putket ovat rivissä, eikä porrastetussa järjestyksessä savukaasun liikaavuuden vuoksi. Ekonomaiserin ulkopuolen keskimääräinen lämmönsiirtokerroin $h_{c,u}$ [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] selvitetään yhtälöstä 54 taulukon 24 savukaasun ominaisuuksien avulla.

Ekonomaiserin ulkopuolinen konvektiivinen lämmönsiirto ratkaistaan yhtälöillä 55-59 kuten tulistimelle ja höyrystimelle. Yhtälöissä käytetään ekonomaiserin savukaasujen ominaisuuksia. Virtausgeometria ekonomaiserissa on täysin sama kuin tulistimessa ja höyrystimessä ($\frac{S_T}{D_u} = 2$ ja $\frac{S_L}{D_u} = 2$).

Ekonomaiserissa vierekkäisten putkien määrä, N_T , savukaasuvirtaa vastaan kohtisuorassa putkirivissä määräytyy ekonomaiserin vesipuolen virtausnopeuden perusteella kuten tulistimellekin. Ekonomaiseriputkessa on oltava riittävä virtausnopeus. Vierekkäisten ekonomaiseriputkien määrä selvitetään ekonomaiserin sisäisen lämmönsiirron yhteydessä.

10.3.2 Ekonomaiserin sisäpuolen lämmönsiirto

Ekonomaiseriputkistossa virtaavan veden ominaisuudet ekonomaiserin sisäpuoliselle virtaukselle saadaan yhtälön 60 mukaisen veden keskilämpötilan mukaan. Ekonomaiserin keskilämpötilaksi T_h saadaan 155,8 °C. Taulukkoon 25 on koottu ekonomaiserin keskilämpötilaa vastaavat veden ominaisuudet, joita tarvitaan lämmönsiirron yhtälöissä.

Taulukko 25. Veden ominaisuudet ekonomaiserin keskilämpötilassa.

Ominaisuus	Symboli	Arvo	Yksikkö
Tiheys	ρ	913,6	kg/m ³
kinemaattinen viskositeetti	ν	$1,93 \cdot 10^{-7}$	m ² /s
Lämmönjohtavuus	k	0,68	W/mK
Prandtl'in luku	Pr	1,11	-

Ekonomaiserin sisäpuolen konvektion yhtälöt ovat pakotetun putken sisäpuolisen konvektiivisen virtauksen yhtälöitä. Putken sisäpuolinen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin $h_{c,i}$ [W/m²K] lasketaan yhtälöllä 61, joka on esitettyä tulistimen mitoituksen yhteydessä. Putkiston sisäpuolisen lämmönsiirtokertoimen ratkaisemiseksi on myös selvitettävä ekonomaiserin virtauksen yhtälöt 62-64 taulukon 25 aineominaisuuksilla.

Ekonomaiseriputkiston rinnakkaisten sisääntulojen määrä, eli rivissä vierekkäin olevien putkien määrä määritetään riittävän höyryvirtausnopeuden mukaan, kuten tulistimelle, eikä kanavan leveyden mukaan, kuten höyrystimelle. Riittäväksi veden virtausnopeudeksi ekonomaiseriputkistossa arvioidaan 0,3 m/s ja se sijoitetaan yhtälöön 64. Yhtälö 64 antaa rinnakkaisten sisääntulojen määräksi $N_T = 13,35$ kappaletta. Luku pyöristetään alaspäin, jotta varmistetaan, että virtaus on riittävä. Ekonomaiserin rinnakkaisten putkien lukumääräksi tulee täten $N_T = 13$ kappaletta ja veden virtausnopeudeksi ν putkistossa saadaan 0,308 m/s.

10.3.3 Ekonomaiserin kokonaislämmönsiirto ja mitoitus

Ekonomaiserin kokonaislämmönsiirto määritetään lämmönläpäisykerroimen U_L [W/mK], ekonomaiseriputkiston kokonaispituuden L [m], logaritmisen keskilämpötilaeron ΔT_{lm} [K] ja ristivirtakytkennän korjauskertoimen F avulla yhtälön 65 mukaisesti.

Ekonomaiserin lämmönläpäisykerroin selvitetään yhtälön 66 avulla sisäisen ja ulkoisen lämmönsiirron konvektiivisten lämmönsiirtokertoimien sekä putkimateriaalin lämmönjohtavuuden avulla. Putkimateriaalina käytettävän teräksen lämmönjohtavuus selvitetään taulukoiduista arvoista lämpötilan mukaan. Ekonomaiseriputken lämpötila T_s on 165,8 °C. Tässä lämpötilassa putkimateriaalina käytettävän teräksen lämmönjohtavuus k_s on noin 50 W/mK. Lämmönsiirron lämpötilaerona käytetään logaritmista keskilämpötilaeroa ΔT_{lm} kuten höyrystimelle ja tulistimelle savukaasun tulo- ja poistumislämpötiloilla sekä veden tulo- ja poistumislämpötiloilla ekonomaiserilla. Logaritminen lämmönsiirron keskilämpötilaero ratkaistaan yhtälöstä 67 ekonomaiserin lämpötilan arvoilla.

Lämmönsiirtoyhtälön ristivirtalämmönsiirron korjauskertoimen F selvittäminen tapahtuu kuvan 15 mukaiselta käyrästä ratkaisemalla käyrästä esiintyvien suureiden P ja R

yhtälöt. Käyrästä termien P ja R arvot ratkaistaan yhtälöillä 68 ja 69. Ekonomaiserin ristivirtalämmönsiirron korjauskertoimen F arvoksi saadaan 0,9.

Kun tiedetään ekonomaiserilla savukaasuista höyryyn siirrettävän lämpötehon olevan energiataasen yhtälön 42 mukaisesti 524 kW, voidaan ratkaista ekonomaiseriputkien tarvittava yhteispituus yhtälöstä 65. Ekonomaiseriputkien yhteenlasketuksi pituudeksi L saadaan 691,7 metriä. Yhdessä putkirivissä olevia putkia kanavassa on $N_T = 13$ kappaletta yhtälön 64 mukaisesti. Peräkkäisten putkirivien määrä N_L lasketaan yhtälöllä 70. Putkirivien määrä N_L yksittäisen ekonomaiseriputken pituuden L_p ollessa 2,29 metriä on 23,23 kappaletta. Putkien määrälle saatu arvo pyöristetään ylöspäin seuraavaan kokonaislukuun, jolloin putkirivien määrä N_L on 24 kappaletta. Ekonomaiseriputkipaketin pituus ja leveys selvitetään yhtälöillä 71 ja 72, kun putkimäärät tiedetään. Ratkaisuna saadaan ekonomaiserin pituudeksi $L_{ekonomaiser}$ 1,786 metriä ja leveydeksi $W_{ekonomaiser}$ 1,026 metriä. Ulkoisten mittojen perusteella ekonomaiser kannattaa sijoittaa savukaasukanavaan niin, että ekonomaiserin pituussuunta on kohtisuorassa savukaasuvirtaukseen nähden ja leveyssuunta virtauksen suuntaisesti.

Ekonomaiserin mitoituksen tärkeimmät tulokset ja mitoituksessa tarvittavat arvot esitetään taulukossa 26.

Taulukko 26. Ekonomaiserin mitoituksen tulokset.

Suure	Symboli	Arvo	Yksikkö
Ekonomaiserin pituus	$L_{ekonomaiser}$	1,786	m
Ekonomaiserin leveys	$W_{ekonomaiser}$	1,026	m
Ekonomaiserin korkeus	L_p	2,29	m
Putkirivin putkimäärä	N_T	13	kpl
Putkirivien määrä	N_L	24	kpl
Putkiväli pituussuunnassa	S_L	0,076	m
Putkiväli leveyssuunnassa	S_T	0,076	m
Ekonomaiseriputken ulkohalkaisija	D_u	0,038	m
Ekonomaiseriputken sisähalkaisija	D_i	0,0308	m
Ekonomaiserin lämmönläpäisykerroin	U_L	9,7	W/mK
Savukaasun virtausnopeus ekonomaiserilla	V	5,55	m/s
Höyryn virtausnopeus ekonomaiserilla	v	0,308	m/s

10.4 Ilman esilämmittimen mitoitus

Ilman esilämmittimen (LUVO, Luftvorwärmer) mitoitus perustuu samaan virtauskanavan suurimpaan mahdolliseen poikkipinta-alaan kuin lämmöntalteenottokattilan lämmönsiirtimien. Poikkipinta-alaa virtaussuunnassa on maksimissaan 4,44 m² virtauskanavan maksimikorkeuden ollessa 2,29 m ja leveyden 1,94 m. Ilman esilämmittimen putkien on mahdollista kyseiselle pinta-alalle. Ilman esilämmitin on teräsputkipaketti, kuten muutkin konvektiivisen lämmönsiirron lämmönsiirtimet tässä työssä. Putkipaketin putket ovat poikittain savukaasun virtaussuuntaan nähden. Toisin kuin muissa savukaasukanavan lämmönsiirtimissä, ilman esilämmittimessä putket ovat poikittain ja vaakatasossa savukaasukanavassa, jotta ilmanotto ja tuhkaneräys onnistutaan toteuttamaan parhaalla mahdollisella tavalla systeemissä. Ilman esilämmitin toteutetaan rekuperatiivisena esilämmittimenä, jossa putkien sisällä virtaa ilma ja savukaasukanavassa putkien ulkopuolella virtaa savukaasu. Mitoitus lämpötekniisesti perustuu putkien sisäpuolen ja ulkopuolen konvektiiviseen lämmönsiirtoon sekä putkimateriaalissa konduktiiviseen lämmönsiirtoon. Ilman esilämmittimeen tulevan savukaasun lämpötila on 215 °C ja se poistuu ilman esilämmittimeltä 130 °C lämpötilassa. Esilämmitettävä ilma saapuu esilämmittimelle 25 °C lämpötilassa ja poistuu esilämmitettynä 78 °C lämpötilassa.

Ilman esilämmittimien putken keskimääräisenä lämpötilana T_s käytetään ilman ja savukaasun keskilämpötilojen keskilämpötilaa seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$T_s = \frac{\frac{T_{sk,in} + T_{sk,out}}{2} + \frac{T_{i,in} + T_{i,out}}{2}}{2} \quad (79)$$

jossa $T_{sk,in}$ ja $T_{sk,out}$ ovat savukaasun tulo- ja lähtölämpötilat esilämmittimellä ja $T_{i,in}$ sekä $T_{i,out}$ ovat ilman tulo- ja lähtölämpötilat esilämmittimellä. Lämpötilaa T_s käytetään ilman esilämmittimen yhteydessä vain putken lämmönjohtuvuuden k_s arvioimiseen. Savukaasujen ominaisuudet selvitetään savukaasujen keskilämpötilassa T_b ilman esilämmittimellä. Savukaasujen keskilämpötila ilman esilämmittimellä on 172,5 °C. Savukaasun ominaisuudet savukaasun keskilämpötilassa ovat esitettyinä taulukossa 27.

Taulukko 27. Savukaasun ominaisuudet lämmönsiirrolle ilman esilämmittimellä.

Ominaisuus	Symboli	Arvo	Yksikkö
Kinemaattinen viskositeetti	ν	$26,5 \cdot 10^{-6}$	m ² /s
Lämmönjohtavuus	k	0,03	W/mK
Tiheys	ρ	0,86	kg/m ³

10.4.1 Ulkopuolinen virtaus ilman esilämmittimellä

Ulkopuolisen lämmönsiirron yhtälöt ilman esilämmittimellä ovat pakotetun konvektion yhtälöitä ristivirrassa olevaan putkipakettiin. Ilman esilämmittimen putkipaketin putket ovat rivissä ja rivit ovat jaettuna tasaisesti pituus- ja leveysuunnassa ($\frac{S_T}{D_u} = 2$ ja $\frac{S_L}{D_u} = 2$). Ilman esilämmittimen ulkopuolen keskimääräinen lämmönsiirtokerroin $h_{c,u}$ [W/m²K] ratkaistaan yhtälön 54 perusteella ja aineominaisuuksina käytetään taulukon 27 savukaasun ominaisuuksia. Ilman esilämmittimen ulkopuolisen lämmönsiirron ratkaisemiseksi käytetään yhtälöitä 55-59.

Ilman esilämmittimen vierekkäisten rivissä olevien putkien määrän N_T määrittää savukaasukanavan korkeus. Rivissä olevien putkien määrä, N_T , ilman esilämmittimellä ratkaistaan yhtälöstä:

$$N_T = \frac{H_{kanava} - D_u}{S_T} \quad (80)$$

Yhtälössä H_{kanava} on savukaasukanavan korkeus. Virtauskanavan korkeudella 2,29 m, putkivälillä $S_T = 0,076$ m ja putken ulkohalkaisijalla 0,038 m saadaan rivissä olevien putkien määräksi 29,63 putkea. Arvo pyöristetään alaspäin, jotta putket mahtuvat kanaavaan. Rinnakkaisten putkien määrä N_T ilman esilämmittimessä on 29 kappaletta. Peräkkäisten sisääntulojen, eli peräkkäisten putkien määrä N_{TL} , joille kokonaisilmavirta jaetaan, ratkaistaan ilman esilämmittimen sisäpuolisen virtausnopeuden perusteella kappalessa 10.4.2 siten, että ilman nopeus ei olisi liian suuri putkistoissa.

10.4.2 Ilman esilämmittimen sisäpuolen lämmönsiirto

Ilman esilämmittimessä virtaavan ilman ominaisuudet putkipaketin sisäpuoliselle virtaukselle saadaan ilman keskilämpötilassa putkistossa. Ilman keskilämpötilaksi T_i saadaan tulo- ja lähtölämpötilojen perusteella 51,5 °C. Ilman lämmönsiirrossa tarvittavat lämpötilariippuvaiset ominaisuudet selvitetään tässä ilman keskilämpötilassa. Ominaisuudet esitetään taulukossa 28.

Taulukko 28. Ilman ominaisuudet ilman keskilämpötilassa.

Ominaisuus	Symboli	Arvo	Yksikkö
Tiheys	ρ	1,07	kg/m ³
kinemaattinen viskositeetti	ν	$17,8 \cdot 10^{-6}$	m ² /s
Lämmönjohtavuus	k	0,03	W/mK
Prandtl'in luku	Pr	0,69	-

Ilman esilämmittimen sisäpuolen konvektion yhtälöt ovat pakotetun konvektion yhtälöitä virtaukselle putkessa. Ilman esilämmittimen konvektiivinen lämmönsiirto putken sisäpuolen virtaukselle ratkaistaan yhtälöillä 61-63 taulukon 28 mukaisilla ilman ominaisuuksilla.

Jos koko ilmamäärä, joka virtaa ilman esilämmittimessä, syötettäisiin esilämmittimeen vain yhdessä putkirivissä, olisi ilman virtausnopeus liian suuri. Syötettävä esilämmitettävä ilmamäärä on jaettava useammalle putkirivistölle. Valitaan riittävän pieneksi ilman virtausnopeudeksi $v = 15$ m/s. Peräkkäisten sisääntulorivien määrä N_{TL} ratkaistaan yhtälöstä:

$$N_{TL} = \frac{\dot{m}_i}{\rho v \pi \left(\frac{D_i}{2}\right)^2 N_T} \quad (81)$$

jossa \dot{m}_i on savukaasuanalyysin mukainen ilman massavirta, ρ taulukon 28 mukainen ilman tiheys ja D_i ilman esilämmittimen putken sisähalkaisija. Peräkkäisten sisääntulorivien määräksi saadaan 19,13 kappaletta. Tulos pyöristetään ylöspäin seuraavaan kokonaislukuun ja peräkkäisten sisääntulorivien määräksi saadaan $N_{TL} = 20$ kappaletta. Tällä peräkkäisten sisääntulorivien määrällä saadaan ilman virtausnopeudeksi putkistossa 14,35 m/s.

10.4.3 Ilman esilämmittimen kokonaislämmönsiirto

Ilman esilämmittimen kokonaislämmönsiirto määritetään lämmönläpäisykerroimen U_L [W/mK], ilman esilämmitysputkiston kokonaispituuden L [m], logaritmisen keskilämpötilaeron ΔT_{lm} [K] ja ristivirtakytkennän korjauskertoimen F avulla yhtälön 65 mukaisesti.

Ilman esilämmittimen lämmönläpäisykerroin selvitetään yhtälön 66 avulla sisäisen ja ulkoisen lämmönsiirron konvektiivisten lämmönsiirtokertoimien sekä putkimateriaalin lämmönjohtavuuden avulla. Putkimateriaalina käytettävän teräksen lämmönjohtavuus selvitetään taulukoiduista arvoista lämpötilan mukaan. Ilman esilämmittimen putken lämpötila T_s on 125 °C. Tässä lämpötilassa putkimateriaalina käytettävän teräksen lämmönjohtavuus k_s on 51,2 W/mK.

Lämmönsiirron lämpötilaerona käytetään logaritmistä keskilämpötilaeroa ΔT_{lm} kuten höyrystimelle ja tulistimelle savukaasun tulo- ja poistumislämpötiloilla sekä ilman tulo- ja poistumislämpötiloilla ilman esilämmittimellä. Logaritminen lämmönsiirron keskilämpötilaero ratkaistaan yhtälöstä 67 esilämmittimen lämpötilan arvoilla.

Lämmönsiirtoyhtälön ristivirtalämmönsiirron korjauskertoimen F selvittäminen tapahtuu kuvan 15 mukaiselta käyrästä ratkaisemalla käyrästä esiintyvien suureiden P ja R yhtälöt. Käyrästä termien P ja R arvot ratkaistaan yhtälöillä 68 ja 69. Ilman esilämmittimen ristivirtalämmönsiirron korjauskertoimen F arvoksi saadaan 0,92.

Kun tiedetään ilman esilämmittimellä savukaasuista höyryyn siirrettävän lämpötehon olevan energiataseen yhtälön 43 mukaisesti 790 kW, voidaan ratkaista ilman esilämmityspotkien tarvittava yhteispituus yhtälöstä 65. Putkien yhteenlasketuksi pituudeksi L saadaan 2004 metriä. Yhdessä putkirivissä olevia putkia kanavassa on $N_T = 29$ kappaletta yhtälön 80 mukaisesti. Peräkkäisten sisääntulorivien määrän N_{TL} tiedetään olevan 20 kappaletta yhtälön 81 mukaan. On selvítettävä, montako lämmönsiirtoputkipakettia tarvitaan, jotta saavutetaan riittävä putkipituus lämmönsiirrolle. Tarpeen mukaan on mahdollista kytkeä useita ristivirtalämmönsiirtimiä peräkkäin. Riippuen lämmönsiirtopakettien määrästä, ilman esilämmitin voi olla U, N tai M -mallinen lämmönsiirrin [34]. Lämmönsiirtopakettien määrä N_{LP} selvitetään yhtälöllä:

$$N_{LP} = L/N_{TL}N_T L_p \quad (82)$$

jossa L on putkiston putkien tarvittava yhteispituus, N_{TL} yksittäisen lämmönsiirtopaketin putkirivien määrä, N_T putkirivissä olevien putkien määrä ja L_p yksittäisen putken pituus. Yksittäisen putken pituus L_p ilman esilämmittimellä on 1,74 m. Yhtälön 82 ratkaisuna saadaan lämmönsiirtopakettien määräksi N_{LP} 1,98 kappaletta. Tulos pyöristetään seuraavaan kokonaislukuun, joten $N_{LP} = 2$. Ilman esilämmitin koostuu täten kahdesta 20x29 putkea sisältävästä lämmönsiirtoputkipaketista ja on U-mallinen lämmönsiirrin. Ilman esilämmittimen pituus $L_{esilämmitin}$ savukaasun virtaussuunnassa saadaan selvitettyä yhtälöstä:

$$L_{esilämmitin} = N_{LP}(N_{TL} - 1)S_L + N_{LP}D_u \quad (83)$$

Ilman esilämmittimen pituudeksi saadaan yhtälön 83 ratkaisuna $L_{esilämmitin} = 2,964$ m.

Ilman esilämmittimen korkeus $H_{esilämmitin}$ saadaan yhtälöstä:

$$H_{esilämmitin} = N_T S_T + D_u \quad (84)$$

Ilman esilämmittimen korkeudeksi saadaan noin 2,24 metriä.

Ilman esilämmittimen mitoituksen tärkeimmät tulokset ja mitoituksessa tarvittavat arvot esitetään taulukossa 29. Ilman esilämmitintä nimitetään taulukossa Luvoksi.

Taulukko 29. Ilman esilämmittimen mitoituksen tulokset.

Suure	Symboli	Arvo	Yksikkö
Luvon pituus	$L_{esilämmitin}$	2,964	m
Luvon leveys	$W_{esilämmitin}$	1,74	m
Luvon korkeus	$H_{esilämmitin}$	2,24	m
Luvoputken pituus	L_p	1,74	m
Putkirivin putkimäärä	N_T	29	kpl
Putkirivien määrä yhdessä lämmönsiirtopaketissa	N_{TL}	20	kpl
Lämmönsiirtopaketien määrä	N_{LP}	2	kpl
Putkiväli pituussuunnassa	S_L	0,076	m
Putkiväli leveyssuunnassa	S_T	0,076	m
Luvoputken ulkohalkaisija	D_u	0,038	m
Luvoputken sisähalkaisija	D_i	0,0308	m
Luvon lämmönläpäisykerroin	U_L	3,64	W/mK
Savukaasun virtausnopeus luvolla	V	4,75	m/s
Ilman virtausnopeus luvolla	v	14,35	m/s

11. PAINEHÄVIÖT JA SAVUKAASUPUHALTIMEN MITOITUS

Savukaasupuhaltimen tehtävänä voimalaitoksessa on imeä savukaasut kanavien läpi niin, että savukaasukanavassa ja palotilassa säilyy koko ajan hieman ympäristön painetta pienempi paine. Savukaasupuhaltimen tehontarve määräytyy pitkälti virtauskanavassa olevien lämmönsiirtimien ja savukaasunpuhdistuslaitteistojen aiheuttaman painehäviön seurauksena. Savukaasupuhaltimen tehontarpeen arvioimiseksi on selvitettävä kaikkien merkittävien painehäviötä aiheuttavien prosessin osien painehäviö savukaasukanavassa [23][34].

11.1 Vapaiden kanavien painehäviöt

Voimalaitosprosessissa savukaasun vapaan virtauksen kanaviksi jää eristetyn tulipesän alue sekä säteilykammio. Vapaan virtauskanavan painehäviölle esitetään kirjallisuudessa [34][38] seuraavaa yhtälöä:

$$\Delta p = \left(\frac{\xi l}{d_h} + \sum \zeta \right) \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (85)$$

jossa ξ on kitkakerroin, l on kanavan pituus, d_h on kanavan hydraulinen halkaisija, $\sum \zeta$ on kanavan kertavastusten summa ρ savukaasun keskimääräinen tiheys kanavassa ja V on keskimääräinen virtausnopeus savukaasulle.

Vapaan kanavan painehäviö määritetään karhean putken turbulentille virtaukselle kahdessa osassa. Ensimmäinen osa on eristetyn tulipesän ja eritetyn palotilan alue ja toinen osa on säteilykanava. Molemmissa kanavissa kitkakertoimena käytetään kerrointa $\xi = 0,07$, mikä vastaa Moody'n käyrästä karhean putken turbulentin virtauksen kitkakerrointa. Tulipesän alueella kanavan hydraulinen halkaisija d_h on 2,2 m ja säteilykanavan alueella 1,49 m. Kummassakin tapauksessa virtauskanava on verrattain leveä ja merkittävimäksi painehäviön aiheuttajaksi koituvat kanavien kertavastukset $\sum \zeta$. Kertavastuksina kanavissa toimivat 90° mutkat, joita tulipesän kanavassa on 2 kappaletta ja säteilykanavassa 3 kappaletta, sekä kanavan poikkileikkausalan muutokset, joita on 1 kappale siirryttäessä eristetystä kanavasta säteilykammioon ja 1 kappale siirryttäessä säteilykammioista lämmöntalteenottokattilaan. Kirjallisuudessa kertavastusten arvot 90° putkimutkille vaihtelevat suuresti ollen välillä $0,5 \leq \zeta \leq 1,5$ [33]. Virtauksen poikkipinta-alan muutokselle saadaan kirjallisuudesta arvo $\zeta = 0,24$ kyseisen kanavan poikkipinta-alan muutokselle [44]. Suurimmallakin kertavastuksen arvolla yhtälöt tuottavat tulipesän alueen vapaan kanavan painehäviöksi $\Delta p_{tulipesä} \cong 15$ Pa ja säteilykanavan painehäviöksi

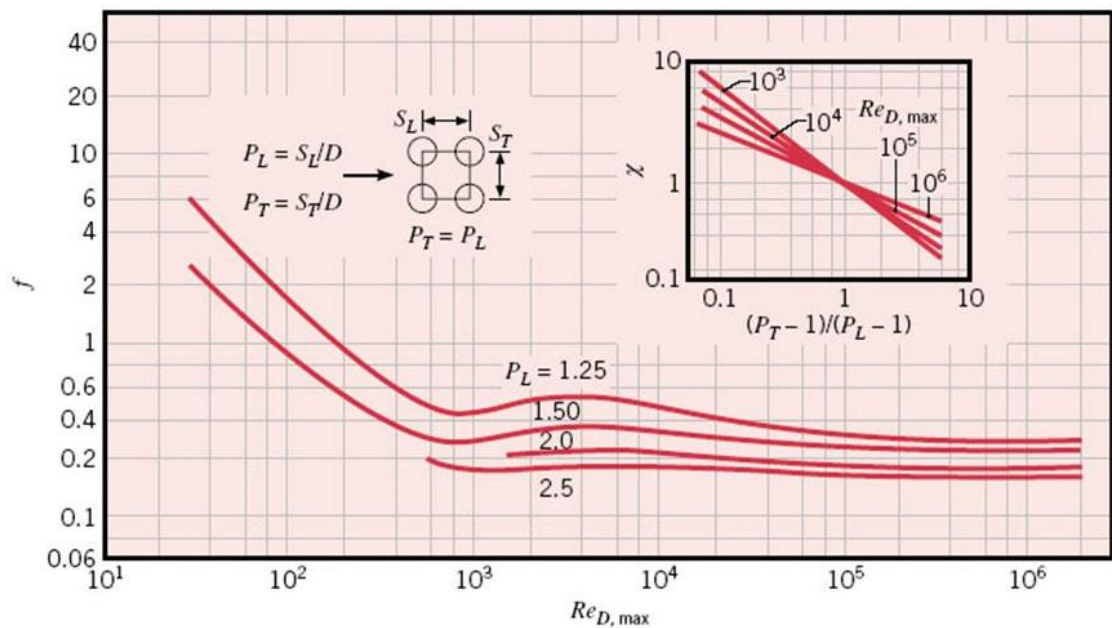
$\Delta p_{\text{säteilykanava}} \cong 80 \text{ Pa}$. Nämä painehäviöt ovat pieniä verrattuna lämmönsiirtimien ja savukaasunpuhdistuslaitteiden painehäviöihin.

11.2 Lämmönsiirtimien painehäviöt

Lämmönsiirtimien mitoittamisessa putkipaketin virtaukseen aiheuttama painehäviö on toinen merkittävä mitoituskriteeri virtauksesta putkipakettiin tapahtuvan lämmönsiirron lisäksi. Putkipaketin läpi virtaamiseen tarvittava teho savukaasuvirtaukselle voidaan ajatella lämmönsiirtimen pääkäyttökustannukseksi [23]. Lämmönsiirtimien painehäviölle esitetään seuraava yhtälö:

$$\Delta p = N_L \chi \left(\frac{\rho v_{\max}^2}{2} \right) f \quad (86)$$

Yhtälössä N_L on putkirivien määrä virtaussuunnassa, χ on kuvasta 16 saatava korjaus-termi, jota käytetään, jos putkiväli pituussuunnassa on eri kuin leveyssuunnassa, ρ on savukaasun tiheys lämmönsiirtimen savukaasupuolen keskilämpötilassa, v_{\max} on savukaasun suurin mahdollinen nopeus putkipaketissa ja f on kuvasta 16 selvitettävä kitka-kerroin. Kaikki lämmönsiirtimet on mitoitettu tasaputkivälillä ($\frac{S_T}{D_u} = \frac{S_L}{D_u} = 2$), joten korjaus-termi χ saa arvon 1 kaikissa lämmönsiirtimissä.



Kuva 16. Yhtälön 86 putkipaketin kitkakerroin f ja korjauskerroin χ putkipaketille, jossa putket ovat rivissä [41].

Kuvan 16 tulkinnessa tarvittavat arvot, kuten Reynoldsin luku ja putkijako on selvitetty lämmönsiirtimien mitoituksen yhteydessä luvussa 10.

Yhtälön 86 ratkaisut eri lämmönsiirtimille laskentasuureineen esitetään taulukossa 30.

Taulukko 30. Painehäviöt ja laskentasuureet eri lämmönsiirtimissä.

Tulistin			
Painehäviö	Δp	92	Pa
Putkirivien lkm. virtaussuunnassa	N_L	10	kpl
Savukaasun tiheys	ρ	0,48	kg/m ³
Virtauksen maksiminopeus	v_{max}	13,8	m/s
Painehäviön korjauskerroin	χ	1	-
Reynoldsin luku	$Re_{D_u,max}$	7400	-
Kitkakerroin	f	0,2	-
Höyrystin			
Painehäviö	Δp	442	Pa
Putkirivien lkm. virtaussuunnassa	N_L	48	kpl
Savukaasun tiheys	ρ	0,59	kg/m ³
Virtauksen maksiminopeus	v_{max}	12,5	m/s
Painehäviön korjauskerroin	χ	1	-
Reynoldsin luku	$Re_{D_u,max}$	9520	-
Kitkakerroin	f	0,2	-
Ekonomaiseri			
Painehäviö	Δp	130	Pa
Putkirivien lkm. virtaussuunnassa	N_L	13	kpl
Savukaasun tiheys	ρ	0,76	kg/m ³
Virtauksen maksiminopeus	v_{max}	11,5	m/s
Painehäviön korjauskerroin	χ	1	-
Reynoldsin luku	$Re_{D_u,max}$	13230	-
Kitkakerroin	f	0,2	-
Ilman esilämmitin			
Painehäviö	Δp	310	Pa
Putkirivien lkm. virtaussuunnassa	N_L	40	kpl
Savukaasun tiheys	ρ	0,86	kg/m ³
Virtauksen maksiminopeus	v_{max}	9,5	m/s
Painehäviön korjauskerroin	χ	1	-
Reynoldsin luku	$Re_{D_u,max}$	13580	-
Kitkakerroin	f	0,2	-

11.3 Savukaasunpuhdistuslaitteiden painehäviöt

Savukaasunpuhdistuslaitteistoksi valikoituu multisykloni tai multisyklonin ja letkusuodattimen yhdistelmä. Savukaasunpuhdistuslaitteiston valinta perustuu siihen, että pyritäänkö kohteessa noudattamaan EU -direktiivin mukaisia päästömääräyksiä vai Worldbankin kevyemmän päästötason mukaisia päästömääräyksiä [9]. Yhteistyöyrityksemme ilmoittaa antamiemme prosessin tietojen perusteella pelkällä multisyklonilla varustetun savukaasunpuhdistuslaitteiston painehäviöksi 1900 Pa ja multisyklonilla ja letkusuodattimella varustetun savukaasunpuhdistuslaitteiston painehäviöksi 2500 Pa [45].

11.4 Savukaasupuhaltimen mitoitus

Savukaasupuhallin mitoitetaan kattamaan koko järjestelmässä syntyvä painehäviö. Painehäviö syntyy pääasiassa savukaasujenpuhdistusjärjestelmän komponenttien ja lämmöntalteenottokattilan lämmönsiirtimien tuottamasta painehäviöstä. Prosessin kokonaispainehäviöksi saadaan 3000 Pa, jos savukaasunpuhdistusjärjestelmä koostuu vain multisyklonista ja jos savukaasut puhdistetaan multisyklonin ja letkusuodattimen yhdistelmällä, on kokonaispainehäviö 3600 Pa. Yhteistyöyrityksemme tekemän mitoituksen perusteella 3000 Pa painehäviöllä järjestelmän savukaasupuhaltimeksi tulee 45 kW puhallin ja 3600 Pa painehäviöllä 55 kW savukaasupuhallin [45].

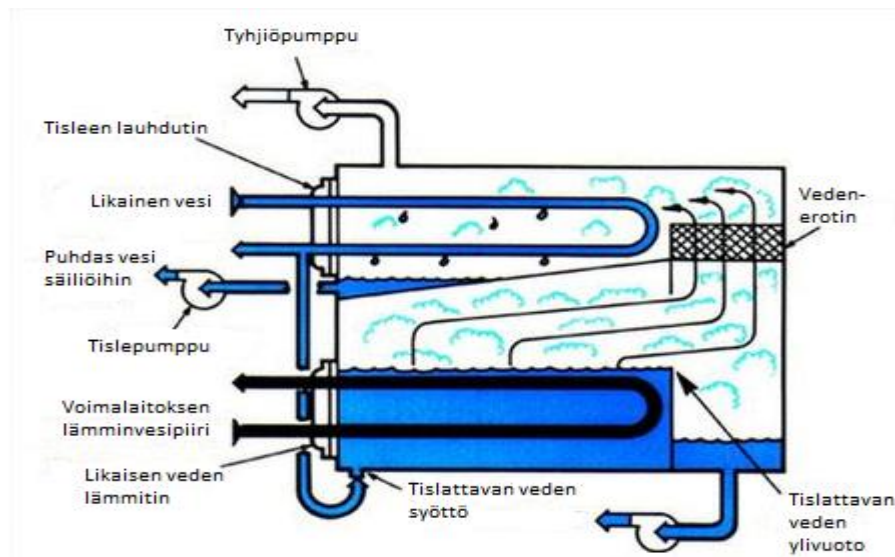
12. PUHTAAN VEDEN TUOTANTO LÄMMÖLLÄ

Voimalaitoksen lauhdutinpiirin, eli tässä työssä lämminvesipiirin veden massavirta on luvussa 9 ilmoitettu 138 kg/s ja lämminvesipiirin menolämpötila ja paluulämpötila ovat 100 °C ja 90 °C. Lämminvesipiirin lämpötilanmuutos seuraa puhtaan veden tuotantolaitoksen tislusprosessista. Lämmin vesi virtaa tislaamolle 100 °C lämpötilassa ja luovuttaa lämpöään likaisen veden höyrystysprosessissa niin, että se palaa lauhduttimelle 90 °C lämpötilassa.

Puhtaan veden tuotanto toteutetaan tislaamalla vettä alipaineessa. Tislaus tapahtuu alipaineessa, koska vettä pitää saada höyrystettyä 90 °C lämpötilassa lämminvesipiirin lämpötilan mukaan. Likainen, tislattava vesi saapuu tislauslaitokselle ympäristön lämpötilassa 25 °C [42]. Alipaineiselle vedentislaamolaitokselle voidaan esittää energiataase:

$$\dot{m}_{vesi}(h_{l,meno} - h_{l,patuu}) = \dot{m}_{tisle}(h_{t,höyry} - h_{t,vesi}) \quad (87)$$

jossa \dot{m}_{vesi} on lauhdutinpiirin veden massavirta, $h_{l,meno}$ on lauhdutinpiirin veden entalpia 100 °C lämpötilassa, $h_{l,patuu}$ on lauhdutinpiirin veden entalpia 90 °C lämpötilassa. Yhtälössä \dot{m}_{tisle} on tisleen, eli höyrystämällä tuotetun tisleen massavirta, $h_{t,höyry}$ on tislehöyryn entalpia ja $h_{t,vesi}$ on tislaukseen tulevan likaisen veden entalpia tulolämpötilassa. Kuvassa 17 esitetään alipaineessa toimivan tislauslaitoksen toimintaperiaate.



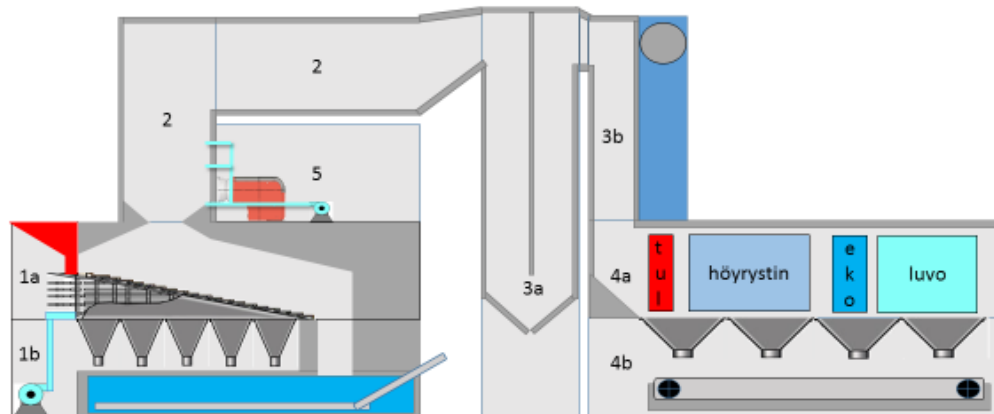
Kuva 17. Alipaineessa toimiva tislaukseen perustuva vedenpuhdistuslaitos [43].

Tislausprosessin painetaso määräytyy tislauslämpötilan mukaan. Paineen pitää olla riittävän alhainen, jotta vesi voi 90 °C lämpötilassa höyrystyä. Veden höyrystymislämpötilaa

90 °C vastaava painetaso on 0,70 bar. Kylläisen höyryn entalpia 0,70 bar paineessa on $h_{t,höyry} = 2660$ kJ/kg ja likaisen veden entalpia prosessiin tullessa on $h_{t,vesi} = 272$ kJ/kg. Selvitetyillä lähtöarvoilla saadaan ratkaistua alipaineisen vedentislausprosessin energiataseen yhtälö, eli yhtälö 87. Yhtälöstä saadaan ratkaisuna puhdistettavan veden määrä \dot{m}_{tislle} . Vettä saadaan puhdistettua energiataseen mukaan 2,3 kg/s. Tämä tarkoittaa, että puhtaan veden tuotantomäärä päivässä on noin 200 m³.

13. VOIMALAITOKSEN MODULAARINEN TOTEUTUS

Jätteenpolttolaitos toteutetaan modulaarisesti, eli jätteenpolttolaitos koostuu valmiiksi rakennetuista moduuleista. Moduulit rakennetaan valmiiksi kuljetukseen sopivassa muodossa, jotta paikan päällä voimalaitoksen sijoituspaikassa rakentamiseen käytettävät resurssit olisivat mahdollisimman pienet. Modulaarinen toteutettavuus toimi laskentasiiossa laskennan perustana siten, että prosessi olisi teknisesti toteutettavissa modulaarisesti. Kuvassa 18 esitetään laitoksen poltto- ja höyryntuotantoprosessin kannalta oleellisin rakenne. Muut voimalaitoksen rakenteet on helppo toteuttaa omina modulaarisina kokonaisuuksinaan.



Kuva 18. Voimalaitoksen höyryntuotanto-osio (1. a) arinakontti b) arinan tuhkanpoistokontti 2. polttokammio 3. a) säteilykanavan ensimmäinen kontti b) säteilykanavan toinen kontti 4. a) lämmöntalteenottoyksikkö b) lämmöntalteenoton tuhkanpoisto 5. käynnistyspoltin- ja sekundäri-ilmansyöttöyksikkö).

14. VOIMALAITOKSEN TALOUS

Jätteenpolttolaitoksen kannattavuutta arvioidaan takaisinmaksuaikaan perustuvalla menetelmällä. Voimalaitoksen investointikustannus arvioidaan ja selvitetään, kuinka monen vuoden kuluttua voimalaitoksen kokonaistuotot kattavat alkuperäisen investointikustannuksen.

14.1 Investointikustannus

Voimalaitoksen investointikustannusta arvioidaan kirjallisuuslähteiden ja tilastojen perusteella. Lähteiden investointikustannusarviot perustuvat tuotetun sähkötehon määrään jätteenpolttolaitoksilla maailmassa. Lähteitä [9][46] mukailleen jätteenpolttolaitoksen investointikustannus on noin 12-15 miljoonaa euroa.

14.2 Vuosittaiset tuotot

Vuosittaiset tuotot jätteenpolttolaitoksella koostuvat sähkön, lämmön ja puhtaan veden mynnistä. Sähkön mynnistä saatavan tuoton arvioidaan olevan noin 1,25 miljoonaa euroa vuodessa, sen ollen merkittävin tulonlähde voimalaitokselle. Puhtaan veden mynnistä saatavan tuoton arvioidaan olevan noin 330 000 euroa vuosittain ja lämmön mynnistä arvioidaan saatavan 200 000 euron vuosituotot. Kokonaistuotot vuodessa ovat täten noin 1,78 miljoonaa euroa.

14.3 Vuosittaiset kulut

Vuosittaiset kulut muodostuvat käyttökustannuksista, huoltokustannuksista, jätteenkeräyskustannuksista ja tuhkan kaatopaikkasijoituksen jätemaksuista. Käyttökustannukset sisältävät työntekijöiden ja hallinnon palkat, voimalaitoksen laitteiden vuosittaiset käyttökustannukset ja tarvittavat tukipolttoaine- ja kemikaalimaksut. Käyttökustannuksien arvioidaan olevan vuosittain noin 650 000 euroa. Jätteen keräyksestä aiheutuvat kustannukset ovat noin 300 000 euroa vuodessa. Huoltokustannukset koostuvat tilattavista huolto-
töistä ja huollettavien osien vaihtamisesta. Huoltokustannusten arvioidaan olevan noin 150 000 euroa vuodessa. Voimalaitoksen tuhkien käsittely ja loppusijoitus kaatopaikoille tulee olemaan merkittävä kuluerä vuodessa, sen ollen noin 160 000 euroa. Vuosittaiset kokonaiskulut ovat noin 1,26 miljoonaa euroa.

14.4 Takaisinmaksuaika ja kannattavuus

Jätteenpolttolaitoksen takaisinmaksuaikaa arvioidaan diskonttaamalla voimalaitoksen vuosittaiset käyttökatteet nykyarvoonsa ja laskemalla, kuinka monen vuoden kuluttua voimalaitoksen investointiin käytetty rahasumma on tienattu. Korkotasona diskonttauksessa käytetään 8 % vuosikorkoa. Laskenta tuottaa odotettuja tuloksia ja jätteenpolttolaitos ei maksa itseään takaisin optimistisimmankaan arvion mukaan käyttöikänsä aikana, vaikka investointikustannuksena käytettäisiin 12 miljoonan euron investointikustannusta.

15. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä selvitettiin, miten jätteenpolttolaitos on toteutettavissa pienessä kokoluokassa modulaarisesti, mahdollisimman luotettavalla tekniikalla ja taloudellinen kannattavuus huomioiden. Työ perustui pitkälti modulaarisuuden asettamiin reunaehtoihin voimalaitoksen toteutettavuuden kannalta. Taloudellinen tarkastelu suoritettiin parhaaksi valitun tekniikan toteutukselle.

Työn teoriaosa alkoi jätteen koostumuksen arvioinnista kirjallisuuslähteitä käyttäen. Koostumuksen perusteella jätteen lämpöarvoa arvioitiin ja lämpöarvolle esitettiin perustellut raja-arvot. Teoriaosuudessa itse jätteenpolttoprosessin toiminta esitettiin perusteellisesti jätteenpolttolaitoksen prosessin toimivuuden kannalta tärkeimmät vaiheet läpikäyden. Jätteenpolttolaitoksen toiminnan perustana käytettiin alan kirjallisuutta ja toimivien jätteenpolttolaitosten tietoja. Merkittävimmät jätteenpolttoprosessit esiteltiin, mutta pääpaino teoriaosassa oli arinapolttoon perustuva tekniikka, joka valikoitui myös tässä työssä esitetyn voimalaitoksen tekniikaksi.

Polttotekniikalle suoritettiin kattava tarkastelu, jossa kaikki merkittävät tekniikat otettiin huomioon. Jätteenpolton polttotekniikka valittiin teknisen toteutettavuuden, prosessin yksinkertaisuuden ja taloudellisen kannattavuuden perusteella. Arinapolttoon perustuvat tekniikat todettiin parhaaksi vaihtoehdoksi ja niitä tutkittiin tarkemmin. Lopulta prosessin polttotekniikaksi valikoitui mekaaniseen myötäsytöarinaan ja tulipesämuodoltaan keskivirtausperiaatteeseen perustuva polttotekniikka.

Jätteenpolton päästörajoitukset ovat merkittävästi tiukemmat kuin perinteisten fossiilisten polttoaineiden päästörajat. Työssä selvitettiin EU-lainsäädäntöön tukeutuen jätteenpolton päästörajoja ja vaatimuksia voimalaitoksen toiminnalle. Merkittävimpänä suunnittelun rajoitteena toimi päästörajoituksissa asetettu määräys savukaasujen viipymäajasta. Savukaasuille on varmistettava vähintään 2 sekunnin viipymäaika yli 850 °C lämpötilassa.

Työn laskentaosa ja varsinainen voimalaitoksen suunnittelu toteutettiin arinapolttoprosessille. Suunnittelun lähtökohtana toimi energiatas tarkastelu kaikille voimalaitoksen osille. Energiatas tarkastelu alkoi tulipesän energiavirroista ja eteni polttokammion mitoituksen kautta säteilykammion ja lämmöntalteenottokattilan energiatasteiden kautta aina sähkön ja lämmöntuotantoon. Polttokammio suunniteltiin eristetyksi, jotta riittävä lämpötila pysyisi yllä prosessin toimivuus ja päästörajoitukset huomioiden. Säteilykanava mitoitettiin säteilyn ja konvektion yhtälöillä. Lämmöntalteenottokattilalle suoritettiin virtaustekniikkaan ja konvektiiviseen lämmönsiirtoon perustuva mitoitus. Koko savukaasukanavalle ja savukaasujenpuhdistuslaitteiston painehäviö selvitettiin, minkä

perusteella saatiin mitoitus savukaasupuhaltimelle. Prosessin energiantuotantomenetelmäksi valikoitui sähkön ja lämmön yhteistuotanto. Yhteistuotannon ansiosta jätteenpolttoprosessilla voidaan tuottaa sähkön lisäksi myytävää puhdasta vettä ja lämpöä.

Jätteenpolttolaitoksen laskennan perustana oli modulaarinen toteutus. Työn tuloksena esitettiin ehdotelma voimalaitoksen modulaarisesta toteutuksesta. Toteutuksessa voimalaitos jaettiin konteittain toteutettaviin moduuleihin, jotka voidaan yhdistää voimalaitoksen sijoituskohteessa. Modulaarisella toteutuksella taataan helppo ja turvallinen kuljetus voimalaitoksen sijoituskohteeseen ja myös minimoidaan rakentamiseen käytettävät resurssit kohteessa.

Voimalaitokselle toteutettiin taloudellinen kannattavuuslaskenta. Taloudellinen tarkastelu suoritettiin takaisinmaksuaikaperiaatteella. Takaisinmaksuperiaatteessa selvitettiin ensin voimalaitoksen investointikustannus, jonka jälkeen arvioitiin voimalaitoksen vuotuisia tuottoja ja kuluja. Tulevaisuuden tuotot ja kulut diskontattiin nykyarvoonsa ja selvitettiin, kuinka monen vuoden kuluttua voimalaitoksen kokonaistuotot kattaisivat investointikustannuksen.

Työ tuotti odotettuja tuloksia. Laskennan ja teoreettisen tarkastelun perusteella voimalaitos on teknisesti toteutettavissa. Voimalaitos on mahdollista jakaa helposti kuljetettaviin osakokonaisuuksiin ja se täyttää tekniset vaatimukset toiminnan kannalta. Taloudellisen tarkastelun perusteella voimalaitos ei ollut kannattava, koska laskennan tuloksena saatiin liian pitkä takaisinmaksuaika optimistisimmankin arvion mukaan.

LÄHTEET

- [1] Eschenroeder, Alan. "Greenhouse gas dynamics of municipal solid waste alternatives." *Journal of the Air & Waste Management Association* 51.10 (2001): 1423-1427.
- [2] Niessen, Walter R. *Combustion and incineration processes: applications in environmental engineering*. CRC Press, 2010.
- [3] Jätelaitosyhdistys, Energiahyödyntäminen, Jätelaitosyhdistys ry, Saatavissa 10.11.2015: <http://www.jly.fi/energia1.php?treeviewid=tree3&nodeid=1>.
- [4] Tilastokeskus, Tietoa tilastoista / Käsitteet ja määritelmät / Uusiutuvat energialähteet, Saatavissa 10.11.2015: http://www.stat.fi/meta/kas/uusiutuvat_ener.html.
- [5] Chandler, A. John, et al. *Municipal solid waste incinerator residues*. Elsevier, 1997.
- [6] Buekens, Alfons. *Incineration technologies*. Springer, 2013.
- [7] Vesanto, Petri. Ruonala, Seppo. Nuutila, Matti. *Jätteenpolton parhaan käytettävissä olevan tekniikan (BAT) vertailuasiakirjan käyttö suomalaisessa toimintaympäristössä*. Suomen ympäristökeskus *Jätteenpolton BREF*. 2006. Saatavissa 11.11.2015: http://energia.fi/sites/default/files/sy27_pdf1.pdf
- [8] Sadowski, R.S. *Recent Developments in Wood Fired Spreader Stoker Technology*. Saatavissa 11.11.2015: <http://www.babcockpower.com/pdf/RPI-TP-0006.pdf>
- [9] World Bank. *Municipal solid waste incineration*. 1999. Saatavissa 11.11.2015: http://www.worldbank.org/urban/solid_wm/erm/CWG%20folder/Waste%20Incineration.pdf
- [10] English, J.A. *Design Aspects of a Low Emission Two-Stage Incinerator*. Saatavissa 12.11.2015: <http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/nawtec/1974-National-Incinerator-Conference/1974-National-Incinerator-Conference-28.pdf>
- [11] Consutech Systems, *CONSUMAT® Controlled-Air Incinerator*. 2004. Saatavissa 12.11.2015: <http://www.consutech.com/inciner.htm>
- [12] Teirasvuori, Nina. *Syntypaikkalajitellun sekajätteen koostumuksen sekä palamisteknisten ominaisuuksien selvitys Etelä-Karjalan alueella*. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2011. Saatavissa 13.11.2015: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/69663/nbnfi-fe201104291476.pdf?sequence=3>

- [13] Tilastokeskus. Polttoaineluokitus 2015. Tilastokeskus 2015. Saatavissa 13.11.2015: http://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html
- [14] Energy Information Administration. Methodology for Allocating Municipal Solid Waste to Biogenic and Non-Biogenic Energy. U.S. Department of Energy 2007. Saatavissa 13.11.2015: <http://www.eia.gov/to-talenergy/data/monthly/pdf/historical/msw.pdf>
- [15] Sastry, D.B.S.S.R. Composition of Municipal Solid Waste- need for thermal treatment in present Indian context. Ramky Energy & Environment Ltd. Saatavissa 13.11.2015: http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/DBSSRS_Article_-_WTE_INDIA_BRIEF_Revised.pdf
- [16] Myllymaa, Tuuli. Tohka, Antti. Dahlbo Helena. Tenhunen Jyrki. Ympäristönäkökulmat jätteen hyödyntämisessä energiana ja materiaalina. Suomen ympäristökeskus, Helsinki 2006. Saatavissa 13.11.2015: <http://www.ymp.fi/download/noname/%7B0D218FEA-B97A-41E5-AEDD-CF3B11E8E443%7D/30372>
- [17] Raiko, Risto, et al. "Poltto ja palaminen, toinen täydennetty painos." Jyväskylä, Gummerus Kirjapaino Oy. International Flame Research Foundation-Suomen kansallinen osasto (2002).
- [18] Kokko, Sami. Jätteiden energiakäytön näkymät Euroopassa leijukerrospolton kannalta. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. 2002. Saatavissa 16.11.2015: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/34788/nbnfi-fe20021205.pdf>
- [19] Klinghoffer, Naomi B., and Marco J. Castaldi, eds. Waste to energy conversion technology. Elsevier, 2013.
- [20] Westenergy Oy Ab:n verkkosivut. Jätteenpolttolaitoksen toimintaperiaate. Saatavissa 17.11.2015: <http://www.westenergy.fi/?l=fi&p=3&text=Toimintaperiaate>
- [21] Martin Biopower. Feeder. www.martinbiopower.com.
- [22] Babcock & Wilcox Vølund A/S verkkosivut. Boiler technologies –osio. Saatavissa 24.11.2015: http://www.volund.dk/Waste_to_Energy/Technologies/Boiler_technologies
- [23] Raiko, Risto. Saarenpää, Ilkka. Höyrytekniikka, luentomoniste 2013. Tampereen teknillinen yliopisto, Voimalaitos- ja polttotekniikka.
- [24] Lee, Shang-Hsiu, Nickolas J. Themelis, and Marco J. Castaldi. "High-temperature corrosion in waste-to-energy boilers." *Journal of thermal spray technology* 16.1 (2007): 104-110.

- [25] Astrup, Thomas. Management of APC residues from WtE plants. An overview of management options and treatment methods. ISWA General Secretariat, 2008.
- [26] Prevention, Integrated Pollution. "Control Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration." European Commission, Brussels, August 2006 (2006).
- [27] Fobil, Julius N., Derick Carboo, and Nathaniel A. Armah. "Evaluation of municipal solid wastes (MSW) for utilisation in energy production in developing countries." *International journal of environmental technology and management* 5.1 (2005): 76-86.
- [28] Ogwueleka, T. Ch, and F. N. Ogwueleka. "Modelling energy content of municipal solid waste using artificial neural network." *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering* 7.3 (2010): 259-266.
- [29] Hoornweg, Daniel, and Perinaz Bhada-Tata. "What a waste: a global review of solid waste management". Worldbank (2012).
- [30] Chang, Yih-Feng, et al. "Multiple regression models for the lower heating value of municipal solid waste in Taiwan." *Journal of environmental management* 85.4 (2007): 891-899.
- [31] Tabasová, Andrea, et al. "Waste-to-energy technologies: Impact on environment." *Energy* 44.1 (2012): 146-155.
- [32] Directive, EC Waste Incineration. "Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council on Incineration of Waste." European Commission, Brussels (2000).
- [33] Koskelainen, Lasse, Rauli Saarela, and Kari Sipilä. *Kaukolämmön käsikirja. Energiatallisuus*, 2006.
- [34] Markku, Huhtinen. *Höyrykattilatekniikka*. 6. painos. Helsinki: Oy Edita Ab. 379 s. ISBN 951-37-3360-2, 2004.
- [35] Jenkins, Barrie. Mullinger. *Industrial and process furnaces: principles, design and operation*. Butterworth-Heinemann, 2011.
- [36] Weber R. *Combustion Fundamentals with Elements of Chemical Thermodynamics*. Clausthal-Zellerfeld. Papierflieger 2008.
- [37] VDI Gesellschaft. *VDI Heat Atlas*. Ed. VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen. Springer Science & Business Media, 2010.

- [38] Mills, Anthony F. Basic heat and mass transfer 2nd edition. University of California. 1999.
- [39] Raiko, Risto. Kirvelä, Katariina. Energiatekniikan perusteet, luentomoniste 2010. Tampereen teknillinen yliopisto, Energia- ja prosessitekniikka.
- [40] Huhtinen, Markku. Korhonen, Risto. Pimiä, Tuomo. Urpalainen, Samu. Voimalaitostekniikka. Opetushallitus, 2013.
- [41] Bergman, Theodore L., Frank P. Incropera, and Adrienne S. Lavine. Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley & Sons, 2011.
- [42] Christopher M. Fellows. Ali Al-Hamzah. Thermal Desalination: Current Challenges. Mineral Scales and Deposits. 2015.
- [43] Maxim Watermakers LLC. Single Effect Flash Evaporators. Heat Recovery Technology. 2016.
- [44] Karvinen, Reijo. Virtausoppi, luentomoniste. Tampereen teknillinen Yliopisto.
- [45] Yhteistyökumppanimme toimineen savukaasunpuhdistuslaittevalmistajan mitoitus savukaasunpuhdistusjärjestelmälle ja savukaasupuhaltimelle.
- [46] U.S Energy Information Administration. Updated Capital Cost Estimates for Electricity Generating Plants. U.S Department of Energy. 2013.