

LUT-YLIOPISTO  
LUT School of Energy Systems  
LUT Kone

*Jussi Tossavainen*

**TYPPIHAPPOTEHTAAN JÄTELÄMPÖKATTILAN KAPASITEETIN NOSTON  
EDELLYTTÄMÄT RAKENNUMUUTOKSET**

Tarkastajat: Dosentti Harri Eskelinen  
TkT Katriina Mielonen

## **TIIVISTELMÄ**

LUT-Yliopisto  
LUT Energiajärjestelmät  
LUT Kone

Jussi Tossavainen

### **TYPPIHAPPOTEHTAAN JÄTELÄMPÖKATTILAN KAPASITEETIN NOSTON EDELLYTTÄMÄT RAKENNEMUUTOKSET**

Diplomityö

2021

71 sivua, 27 kuvaa, 27 taulukkoa ja 7 liitettä

Tarkastajat: Dosentti Harri Eskelinen  
TkT Katriina Mielonen

Hakusanat: jätelämpökattila, lämpöpinta, typpihappo

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää typpihappotehtaan jätelämpökattilan nykyinen kapasiteetti ja kapasiteetin noston edellyttämät rakennemuutokset ja niiden toteutettavuus. Lisäksi tutkittiin mahdollisuutta korvata nykyinen jätelämpökattila uudella jätelämpökattilalla. Tutkimusongelman ratkaisemiseksi käytettiin kolmea toisistaan riippumatonta tutkimussuuntaa, jotka ovat seurantatieto, kirjallisuuskatsaus ja laskenta.

Tutkimuksessa määritettiin jätelämpökattilan rakenne, materiaalit ja vesihöyry- piirin kierto. Tutkimuksessa määritettiin kapasiteetin noston edellyttämät lämpöpintojen pinta- alat ja tutkittiin niiden vaatimien rakennemuutosten toteutettavuus. Tutkimustulosten perusteella kapasiteetin noston edellyttämät lämpöpintojen pinta- alojen lisääminen on mahdollista tehdä nykyiseen jätelämpökattilaan. Muutostyö vaatii jätelämpökattilan siirtämisen typpihappotehtaalta konepajalle muutostöiden suorittamiseksi ja asentamisen takaisin.

Uudella jätelämpökattilalla saadaan kapasiteetin noston lisäksi pienennettyä päästöjä ja tehostettua typpihappoprosessin imeytymisvaihetta. Uuden jätelämpökattilan asennus vaatii ajallisesti puolet lyhyemmän huoltoseisokin typpihappotehtaalle verrattuna muutostöiden toteuttamisen nykyiselle jätelämpökattilalle.

## **ABSTRACT**

LUT University  
LUT School of Energy Systems  
LUT Mechanical Engineering

Jussi Tossavainen

### **THE STRUCTURAL MODIFICATION REQUIRED TO INCREASE THE CAPACITY OF THE NITRIC ACID PLANT'S WASTE HEAT BOILER**

Master's thesis

2021

71 pages, 27 figures, 27 tables and 7 appendices

Examiner: Docent Harri Eskelinen  
D.Sc (Tech.). Katriina Mielonen

Keywords: waste heat boiler, heat surface, nitric acid

The objective of this study was to find out the current capacity of the nitric acid plant's waste heat boiler and the structural modification required to increase the capacity. Possibility to renew the whole waste heat boiler was also study. To solve the research problem three independent research directions were used. These are study of the waste heat boiler documentation, literature review and calculation.

The study determined the structure and materials of the waste heat boiler and the circulation of the water- steam circuit. The study determined the areas of heating surfaces needed to increase the capacity and examined the feasibility of structural changes. Based on the research results, it is possible to increase the area of heating surfaces required for the increase capacity to the existing waste heat boiler. The modification work requires transfer of the waste heat boiler from the nitric acid plant to the workshop to carry out the modification work and re-installation.

In addition to increasing capacity, the new waste heat boiler will reduce emissions and increase the absorption phase of the nitric acid process. The installation of a new waste heat boiler requires a half-shorter maintenance downtime for the nitric acid plant compared to the implementation of modifications to the existing waste heat boiler.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Yara Suomi Oy Siilinjärven tehtaille. Tutkimusongelman ratkaiseminen lisäsi allekirjoittaneen tietämystä ja ymmärrystä liittyen typpihappoprosessiin ja jätelämpökattilaan.

Haluan kiittää työnantajaani Yara Suomi Oy: tä mielenkiintoisesta diplomityön aiheesta ja tuesta opintojen aikana. Haluan kiittää myös työn tarkastajia dosentti Harri Eskelistä ja TkT Katriina Mielosta.

Tämä diplomityö tehtiin työ- ja arkikiireiden keskellä. Erityiskiitos kuuluu perheelleni tuesta ja jaksamisesta opintojeni aikana.

Jussi Tossavainen  
Kuopiossa 7.6.2021

## SISÄLLYSLUETTELO

### TIIVISTELMÄ

### ABSTRACT

### ALKUSANAT

## SISÄLLYSLUETTELO

### SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b> .....	<b>10</b>
	1.1 Tutkimuksen tausta ja tutkimusongelma .....	10
	1.2 Tavoitteet ja tutkimuskysymykset .....	11
	1.3 Tutkimusmenetelmät.....	11
	1.4 Rajaukset.....	12
<b>2</b>	<b>TUTKIMUSMENETELMÄT</b> .....	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>TYYPPIHAPPOPROSESSI</b> .....	<b>15</b>
	3.1 Katalyyttinen poltto .....	16
	3.2 Hapettuminen .....	20
	3.3 Imeytyminen .....	20
<b>4</b>	<b>JÄTELÄMPÖKATTILA</b> .....	<b>22</b>
	4.1 Vesiputkikattila.....	24
	4.2 Lämpöpinnat .....	29
	4.2.1 Ekonomaiseri .....	30
	4.2.2 Höyrystin .....	30
	4.2.3 Tulistin.....	30
<b>5</b>	<b>KATTILAN LÄMPÖPINTOJEN MITOITUS</b> .....	<b>31</b>
<b>6</b>	<b>KATTILAN LÄMPÖPINTOJEN MATERIAALIT</b> .....	<b>35</b>
	6.1 Viruminen .....	35
	6.2 Hiiliteräkset.....	36
	6.3 Seostetut teräkset .....	36
	6.3.1 Ruostumattomat teräkset.....	38
	6.3.2 Austeniittiset ruostumattomat teräkset.....	38
	6.3.3 Ferriittinen ruostumaton teräs .....	41
	6.3.4 Martensiittinen ruostumaton teräs .....	41

6.3.5	Erkautuskarkenevat ruostumattomat teräkset .....	42
6.3.6	Duplex- ruostumattomat teräkset.....	43
6.3.7	Superseostetut teräkset.....	43
<b>7</b>	<b>TYYPPIHAPPOTEHTAAN JÄTELÄMPÖKATTILA .....</b>	<b>45</b>
7.1	Jätelämpökattilan historia .....	45
7.2	Jätelämpökattila rakenne.....	45
7.2.1	1. Höyrystin .....	47
7.2.2	Tulistin.....	49
7.2.3	2. Höyrystin .....	49
7.2.4	Seinäputket.....	50
7.2.5	Vaippa.....	51
<b>8</b>	<b>INVESTOINNIN LASKELMAT .....</b>	<b>52</b>
<b>9</b>	<b>LASKENTA JA MUUTOSTYÖT.....</b>	<b>55</b>
9.1	Nykyinen kapasiteetti .....	55
9.2	Kapasiteetin nosto.....	59
9.3	Rakennemuutokset.....	61
9.4	Materiaalitarkastelu .....	61
9.5	Uusi jätelämpökattila .....	64
<b>10</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET.....</b>	<b>65</b>
<b>11</b>	<b>POHDINTA.....</b>	<b>67</b>
11.1	Reliabiliteetti ja validiteetti.....	67
11.2	Herkkyystarkastelu .....	67
11.3	Avaintulokset.....	67
11.4	Tulosten uutuusarvo.....	68
11.5	Tulosten yleistettävyys ja hyödynnettävyys .....	68
11.6	Jatkotutkimusaiheet .....	68
<b>12</b>	<b>YHTEENVETO .....</b>	<b>69</b>
	<b>LÄHTEET .....</b>	<b>70</b>
	<b>LIITTEET</b>	
	LIITE I: <i>h- s-</i> kuvaaja vedelle ja höyrylle.	
	LIITE II: La Mont- suutin.	
	LIITE III: Kuumalujat seostamattomat ja seostetut teräsputket.	
	LIITE IV: Laskentasovellus.	

LIITE V: Laskentaosuuden yhtälöt.

LIITE VI: Virumismurtoraja- arvot.

LIITE VII: Venymisrajan  $R_{p0,2}$  vähimmäisarvot.

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

<i>A</i>	Pinta- ala [m <sup>2</sup> ]
<i>Al</i>	Alumiinin kemiallinen merkki
<i>B</i>	Boorin kemiallinen merkki
<i>bar</i>	Paineen yksikkö
<i>C</i>	Hiilen kemiallinen merkki
<i>Co</i>	Koboltin kemiallinen merkki
<i>c<sub>p</sub></i>	Ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]
<i>Cr</i>	Kromin kemiallinen merkki
<i>Cu</i>	Kuparin kemiallinen merkki
<i>h</i>	Ominaisentalpia [kJ/kg]
<i>HNO<sub>3</sub></i>	Typpihapon kemiallinen kaava
<i>Mn</i>	Mangaanin kemiallinen merkki
<i>Mo</i>	Molybdeenin kemiallinen merkki
<i><math>\dot{m}</math></i>	Massavirta [kg/s]
<i><math>\dot{m}_{EKO}</math></i>	Syöttöveden massavirta ekonomaiseriin [kg/s]
<i><math>\dot{m}_{TUL}</math></i>	Kylläisen höyryn massavirta tulistimeen [kg/s]
<i><math>\dot{m}_{UP}</math></i>	Höyrylieriön ulospuhalluksen massavirta [kg/s]
<i>N</i>	Typen kemiallinen kaava
<i>Nb</i>	Niobin kemiallinen merkki
<i>NH<sub>3</sub></i>	Ammoniakin kemiallinen kaava
<i>Ni</i>	Nikkelin kemiallinen merkki
<i>NO</i>	Typpioksidi
<i>NO<sub>x</sub></i>	Typpioksidit
<i>NO<sub>2</sub></i>	Typpidioksidi
<i>N<sub>2</sub>O</i>	Dityppioksidi
<i>N<sub>2</sub></i>	Typpi
<i>h<sub>EKO1</sub></i>	Syöttöveden ominaisentalpia ennen ekonomaiseria [kJ/kg]
<i>h<sub>EKO2</sub></i>	Syöttöveden ominaisentalpia ekonomaiserin jälkeen [kJ/kg]
<i>h<sub>TUL</sub></i>	Tulistetun höyryn ominaisentalpia [kJ/kg]

$h'$	Kylläisen höyryn ominaisentalpia höyrylieriön paineessa [kJ/kg]
$h''$	Kylläisen veden ominaisentalpia höyrylieriön paineessa [kJ/kg]
$H_2O$	Veden kemiallinen kaava
$k$	Kokonaislämmönsiirtokerroin
$K$	Lämpötilan yksikkö
$ODS$	Oxide dispersion strengthened
$O_2$	Happi
$P$	Paine [bar]
$Pt$	Platina
$Rh$	Rodium
$R_{p0,2}$	Venymismurtoraja [MPa]
$s$	Entropia [kJ/kgK]
$SAP$	Toiminnanohjausjärjestelmä
$Si$	Piin kemiallinen merkki
$\Delta H$	Entalpian muutos [kJ/mol]
$T$	Lämpötila [°C]
$Ti$	Titaanin kemiallinen merkki
$V$	Vanadiinin kemiallinen merkki
°C	Lämpötilan yksikkö
$\Phi$	Lämpövirta [kW]
$\emptyset$	Halkaisijan merkki
$\Phi_{EKO}$	Ekonomaiserin lämpövirta [kW]
$\Phi_{HÖY}$	Höyrystimen lämpövirta [kW]
$\Phi_{TUL}$	Tulistimen lämpövirta [kW]
$\Delta T$	Keskimääräinen logaritminen lämpötilaero [K]
$\Delta T_1$	Lämpötilaero sisääntulossa [K]
$\Delta T_2$	Lämpötilaero ulostulossa [K]
$T_{ku,s}$	Kuuman aineen sisääntulo [K]
$T_{ku,u}$	Kuuman aineen ulostulo [K]
$T_{ky,s}$	Kylmän aineen sisääntulo [K]
$T_{ky,u}$	Kylmän aineen ulostulo [K]
$W$	Volframin kemiallinen merkki
$Y_2O_3$	Yttriumoksidi

## 1 JOHDANTO

Tässä tutkimuksessa selvitetään typpihappotehtaan jätelämpökattilan nykyinen kapasiteetti ja kapasiteetin nostoon vaadittavat rakennemuutokset. Tutkimustulosten perusteella saadaan selville kapasiteetin nostoon vaadittavien muutosten toteutettavuus. Kuvassa 1 on esitetty tämän tutkimuksen päävaiheet aikajärjestyksessä.



**Kuva 1.** Tutkimuksen päävaiheet aikajärjestyksessä.

### 1.1 Tutkimuksen tausta ja tutkimusongelma

Yara Suomi Oy Siilinjärven toimipaikan lannoitetehtaan raaka- aineena käytetään typpihappoa, jota saadaan toimipaikan typpihappotehtaalta, jonka tuotanto kattaa 60 % lannoitetehtaan vaatimasta määrästä. Loppuosa vaaditusta määrästä tuodaan junalla Siilinjärven toimipaikalle toiselta Yara Suomi Oy: n toimipaikalta. Typpihapon tuonti

aiheuttaa merkittäviä kustannuksia. Typpihappotehtaan kapasiteetin nosto vähentää tuontityyppihapon tarvetta, jolloin kustannukset pienentyvät.

Typpihapon valmistukseen tarvitaan typen oksideja eli  $\text{NO}_x$ - kaasua, jota saadaan polttamalla ammoniakki- ilmaseosta. Polton jälkeen  $\text{NO}_x$ - kaasu jäädytetään jätelämpökattilassa ennen seuraavaa prosessivaihetta. Typpihappotehtaan kapasiteetin noston yksi pullonkauloista on jätelämpökattila. Typpihappotehtaan kapasiteetin nosto edellyttää korkeampaa ammoniakki- ilmaseoksen määrää polttoon, jolloin jätelämpökattilalta vaaditaan tehokkaampaa lämmönsiirtymistä  $\text{NO}_x$ - kaasusta vesihöyrypiiriin, jotta  $\text{NO}_x$ - kaasun lämpötila jätelämpökattilan jälkeen pysyy vaaditulla tasolla.

Tutkimuksessa selvitetään mahdollisuutta nostaa poltettavan ammoniakki- ilmaseoksen määrää 10 % määrittämällä jätelämpökattilan lämmönsiirtopinta- alat ja rakenteelliset muutokset. Lisäksi selvitetään nykyisen jätelämpökattilan korvaamista uudella jätelämpökattilalla. Tutkimusongelman ratkaisemiseksi vaaditaan kone- ja energiatekniikan tietämystä, joten tutkimuksessa sovelletaan poikkitieteellistä näkökulmaa.

## 1.2 Tavoitteet ja tutkimuskysymykset

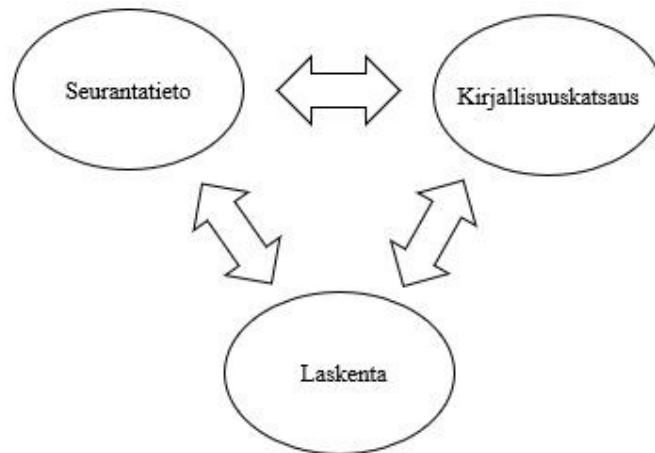
Tutkimuksen tavoitteina on selvittää jätelämpökattilan nykyinen kapasiteetti ja rajoittavat tekijät kapasiteetin nostolle. Lisäksi selvitetään vaadittavat rakennetekniset muutokset kapasiteetin nostolle ja tarkastellaan muutosten toteutettavuutta.

Tämän tutkimuksen tutkimuskysymyksinä ovat

- Mikä on jätelämpökattilan kapasiteetti ja rajoittavat tekijät kapasiteetin nostolle?
- Mitä muutoksia kapasiteetin nosto vaatii jätelämpökattilalle?
- Onko muutokset mahdollista toteuttaa?

## 1.3 Tutkimusmenetelmät

Tämä tutkimus on kvantitatiivinen eli määrällinen tutkimus. Tutkimusmenetelmänä käytetään triangulaatiota, jossa yhdistetään kolme toisistaan riippumatonta asiaa, jotta voidaan ratkaista tutkimusongelma. Kuvassa 1 on esitetty tämän tutkimuksen kolme tutkimussuuntaa, jotka ovat seurantatieto, kirjallisuuskatsaus ja laskenta. Nämä kolme osiota varmistavat tutkimuksen luottavuuden.



**Kuva 2.** Tutkimuksen triangulaatio (mukaiillen Eskelinen & Karsikas 2014, s. 71).

Seurantatieto- osuudessa syvennyttään jätelämpökattilan aikaisempiin kapasiteetin nostoihin, joita on tehty vuosikymmenten aikana. Tämän lisäksi selvitetään jätelämpökattilan rakenne, materiaalit, vesi- höyrypiirin kierto jätelämpökattilassa ja tarkastellaan olemassa olevia piirustuksia. Kirjallisuuskatsauksessa selvitetään typpihappoprosessin, jätelämpökattilan laskennan ja materiaalien sekä investointien kannattavuuden teoriaa. Laskentaosuudessa määritetään jätelämpökattilan kapasiteetti ja tarvittavat muutokset.

#### 1.4 Rajaukset

Tässä tutkimuksessa ei tarkastella kapasiteetin noston vaateita koko typpihappoprosessiin. Jätelämpökattilan osalta ei tarkastella  $\text{NO}_x$ - kaasun paine- eroa, virtausnopeutta eikä päästöjä. Laskennassa ei käytetä mallinnus- ja laskentaohjelmistoja.

## 2 TUTKIMUSMETODIT

Tutkimuksen seurantatieto- osiossa kerätään typpihappotehtaan jätelämpökattilan dokumentteja vuodesta 1972 lähtien, jolloin jätelämpökattila on otettu käyttöön. Sähköiset dokumentit saadaan Yara Suomi Oy Siilinjärven toimipaikan SAP-toiminnanohjausjärjestelmästä ja paperidokumentit toimipaikan arkistosta. Dokumentteihin sisältyy jätelämpökattilan piirustukset, suunnitteluvarvot sekä korjaus- ja muutostyöt. Dokumenteista selvitetään jätelämpökattilan rakenne, vesi- höyrypiirin kierto, lämpöpintojen pinta- alat, korjaus- ja muutostyöhistoria sekä jätelämpökattilan nykyinen kunto.

Tutkimuksen kirjallisuuskatsausosiossa käsitellään yleisesti typpihappoprosessi, jätelämpökattilan toimintaperiaatteet, jätelämpökattilan lämpöpintojen mitoitus, jätelämpökattilan materiaalit ja kannattavuuslaskenta. Lisäksi käsitellään tarkemmin tutkimuksen kohteena olevaa typpihappotehtaan jätelämpökattilaa. Tutkimuksessa käytetään kuvan 3 mukaista tiedonhankintaprosessia.



**Kuva 3.** Tiedonhankintaprosessi (Aalto- yliopisto 2021).

Tutkimusongelman määrittämisen jälkeen tiedonhaun suunnittelussa määritetään tiedonlähteet ja hakusanat, jonka jälkeen toteutetaan suunnitelma. Tietolähteinä käytetään pääsääntöisesti LUT- yliopiston kautta saatavana olevia tietokantoja kuten ACS Publications

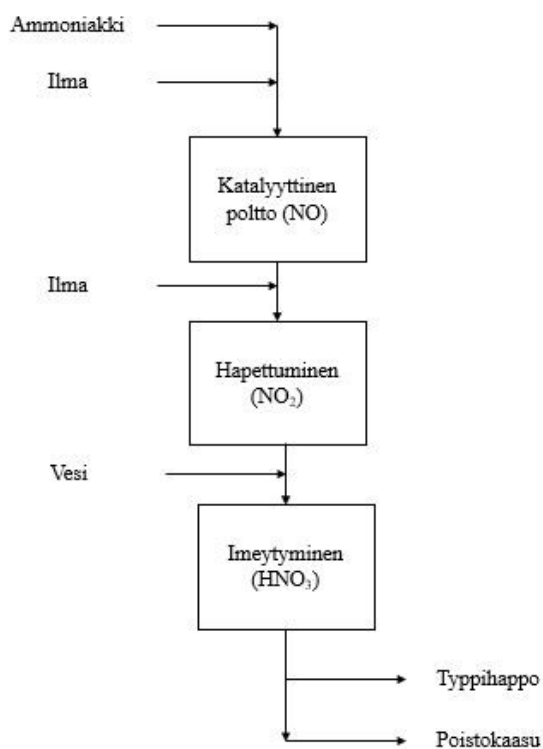
ja Knovel. Myös kirjallisuutta hyödynnetään. Tiedonhaku suoritetaan LUT Primo- palvelun kautta. Tiedonhaku tehdään myös julkisesti saatavilla olevilla hakusovelluksilla, joiden kautta hyödynnetään verkkodokumentteja. Hakusanoina käytetään typpihappoprosessiin ja höyrykattilatekniikkaan liittyvää sanastoa. Hakutulosta arvioidaan ja tarvittaessa muutetaan suunnitelmaa ja toteutetaan uudestaan. Hakutuloksena saatuja tietolähteitä arvioidaan esimerkiksi tekijän ja tuottajan mukaan. Tieteellisestä julkaisusta pitää löytyä vertaisarviointi, jotta sitä voidaan pitää luotettavana. Samasta aihealueesta pyritään löytämään vähintään kaksi eri lähdettä, jotta voidaan varmistaa tiedon luotettavuus. Tietolähteinä käytetään 2000- luvun tuotoksia.

Tutkimuksen laskentaosiossa määritetään typpihappotehtaan jätelämpökattilan nykyinen kapasiteetti ja kapasiteetin noston edellyttämät lämpöpintojen pinta- alat. Lämpöpintojen pinta- alat määritetään puhtaalle ja likaiselle pinnoille. Laskennassa hyödynnetään valmiiksi johdettuja laskentakaavoja, jotka saadaan kirjallisuuskatsauksesta. Lähtötiedot laskentaan saadaan typpihappotehtaan automaatiojärjestelmästä ja seurantatieto- osiosta saaduista tiedoista. Nykyisen kapasiteetin laskentaan otetaan automaatiojärjestelmästä vuorokauden keskiarvotulokset typpihapon valmistuksen tuotantoennätyspäivältä. Kapasiteetin noston laskentaan käytetään 10 % suurempaa polttoon virtaavaa ammoniakki- ilmaseoksen määrää.

Kapasiteetin noston edellyttämien rakennemuutosten toteutus selvitetään seurantatieto- osiosta saatujen piirustusten avulla. Selvityksessä tarkastellaan lämpöpintojen lisäämistä olemassa olevaan rakenteeseen. Lämpöpintojen nykyisten materiaalien sopivuus tarkastellaan. Lisäksi tarkastellaan jätelämpökattilan uusimista kapasiteetin noston vaatimilla lämpöpinnoilla.

### 3 TYPPIHAPPOPROSESSI

Teollisen typpihapon valmistuksessa käytetään Ostwaldin prosessia. Kuvassa 4 on esitetty typpihapon valmistusprosessin päävaiheet, jotka ovat katalyyttinen poltto, hapettuminen ja imeytyminen. Katalyyttisessä poltossa muodostuu NO- eli typpioksidikaasua ja hapettumisen johdosta NO<sub>2</sub>- eli typpidioksidikaasua. Imeytymisessä muodostuu typpihappoa, jonka kemiallinen kaava on HNO<sub>3</sub>. (Thiemann, Scheibler & Wiegand 2000, s. 179.)



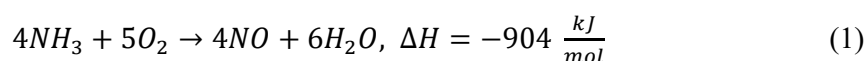
**Kuva 4.** Typpihapon valmistusprosessin päävaiheet (mukaiillen Thiemann, Scheibler & Wiegand 2000, s. 179).

Typpihappotehtaat luokitellaan yksi- tai kaksipaineiseksi. Yksipaineisessa prosessissa prosessin päävaiheet toimivat samassa paineessa. Kaksipaineisessa prosessissa imeytymisreaktio tapahtuu polttoreaktiota korkeammassa paineessa. Yksi- ja kaksipaineiset prosessit voidaan edelleen luokitella prosessipaineen tason mukaan matala-, keski- ja korkeapaineisiin. Matalapaineiseksi luokitellaan, kun prosessin paine on alle 1,7 bar. Keskipaineisessa prosessissa prosessin paine on yli 1,7 bar, mutta alle 6,5 bar.

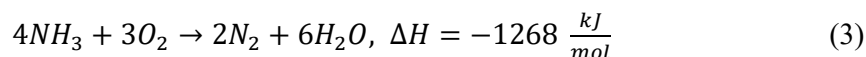
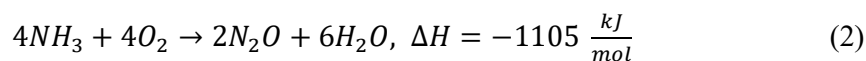
Korkeapaineisessa prosessissa prosessin paine on yli 6,5 bar. (Fertilizers Europe 2000, s. 7–8.)

### 3.1 Katalyyttinen poltto

Ammoniakin  $\text{NH}_3$  katalyyttinen poltto eli hapettuminen hapen  $\text{O}_2$  kanssa typpioksidiksi  $\text{NO}$  ja vedeksi  $\text{H}_2\text{O}$  tapahtuu reaktioyhtälön 1 mukaisesti. Reaktio on eksoterminen eli se vapauttaa lämpöä.  $\Delta H$  on reaktion entalpiamuutos. (Thiemann, Scheibler & Wiegand 2000, s. 180.)



Katalyytin avulla 93–98 % ammoniakista muuttuu typpioksidiksi. Loppuosa muuttuu ei-toivotuiksi dityppioksidiksi  $\text{N}_2\text{O}$  reaktioyhtälö 2 mukaan ja typeksi  $\text{N}_2$  reaktioyhtälö 3 mukaan. Reaktiot 2 ja 3 ovat eksotermisiä. (Thiemann, Scheibler & Wiegand 2000, s. 180.)



Typpioksidin saantoon vaikuttavat lämpötila ja paine, joiden vaikutus on esitetty taulukossa 1. Poltossa katalyyttina käytetään verkkoja, jotka ovat valmistettu platinasta  $\text{Pt}$  ja rhodiumista  $\text{Rh}$ . Polttoon syötettävän ilman epäpuhtaudet voivat myrkyttää katalyyttiverkot, jolloin huonon ammoniakki-ilmaseoksen ja epätasaisen kaasun jakautumisen yhteisvaikutuksesta saanto voi vähentyä 10 %. (Fertilizers Europe 2000, s. 9.)

*Taulukko 1. Paineen ja lämpötilan vaikutus typpioksidin saantoon (mukailen Fertilizers Europe 2000, s. 9).*

Paine, $P$ [bar]	Lämpötila, $T$ [°C]	$\text{NO}$ Saanto [%]
<1,7	810–850	97
1,7–6,5	850–900	96
>6,5	900–940	95

Typpihappotehtaan ajojakson alussa uusien katalyyttiverkkojen pinnat ovat sileät, jolloin kaasu virtaa vapaammin niiden läpi ja typpioksidin saanti on aluksi heikompaa. Lyhyen ajojakson jälkeen katalyyttiverkkojen pinta-ala kasvaa mikrorakenteellisten muutosten ja haittuvien katalyyttiaineisoiden takia. Katalyytin kasvun vuoksi kaasun virtaus rajoittuu ja typpioksidin saanti nousee. (Thiemann, Scheibler & Wiegand 2000, s. 181.)

Ajojakson aikana katalyyttiverkkojen platina irtaana höyrystymisen ja mekaanisen kulumisen takia, jonka seurauksena polton hyötysuhde laskee. Höyrystymisestä aiheutuva platinahäviö liitetään usein platinadioksidin  $PtO_2$  muodostumiseen reaktioyhtälö 4 mukaan. Ammoniakki-ilmaseoksen epäpuhtaudet kiihdyttävät mekaanista kulumista. (Thiemann, Scheibler & Wiegand 2000, s. 183.)



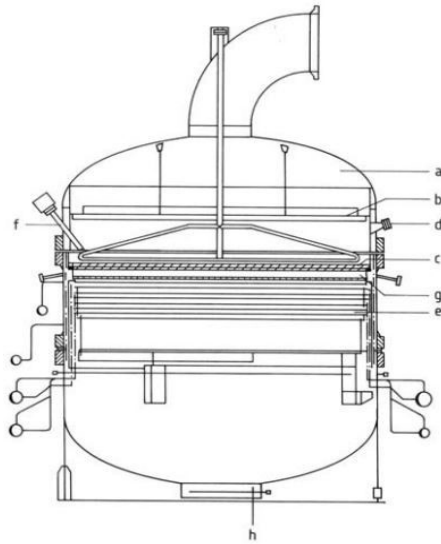
Katalyyttiverkkojen häviöillä on merkittävä vaikutus typpihappotehtaan käyttökustannuksiin. Häviöihin vaikuttaa lämpötila ja kuormitus. Tasainen kaasun virtaus aiheuttaa vähemmän katalyyttiverkkojen liikkumista toisiinsa nähden ja näin ollen pienentää mekaanista kulumista. Typpihappotehtaat ovat usein varustettu platinan talteenottojärjestelmillä, jolloin osa häviöistä saadaan talteen. Taulukossa 2 on esitetty tyypilliset suunnitteluarvot poltolle, jotka ovat prosessin paine ja lämpötila, katalyyttiverkkojen määrä, kaasun nopeus ja katalyyttiverkkojen häviöt grammoina tuotettua typpihappotonna kohden. (Thiemann, Scheibler & Wiegand 2000, s. 183.)

*Taulukko 2. Polton tyypilliset suunnitteluarvot (mukaillen Thiemann, Scheibler & Wiegand 2000, s. 183).*

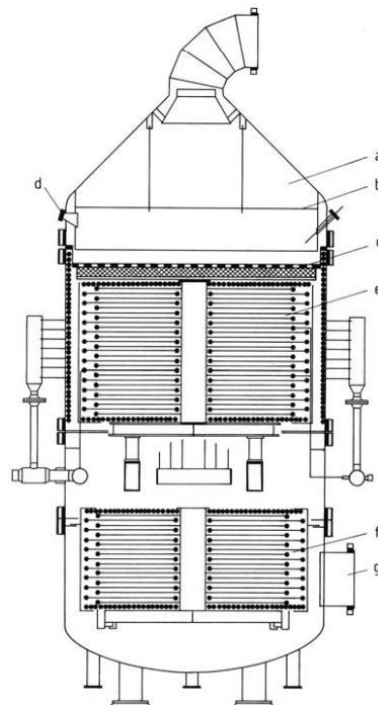
Paine, $P$ [bar]	Katalyyttiverkkojen määrä	Kaasun nopeus, $v$ [m/s]	Lämpötila, $T$ [°C]	Katalyyttiverkkojen häviö [g/t $HNO_3$ ]
1–2	3–5	0,4–1,0	840–850	0,05–0,10
3–7	6–10	1–3	880–900	0,15–0,20
8–12	20–50	2–4	900–950	0,25–0,50

Reaktioyhtälö 1 stoikiometrian mukaan polttoon tulevan ammoniakki- ilmaseoksen ammoniakkipitoisuus pitäisi olla 14,38 %. Todellisuudessa käytetään pienempää seossuhdetta, koska liian korkea seossuhde laskee saantoa ja muodostaa räjähtävän seoksen. Yleensä käytetään turvamarginaalia räjähtävän seossuhteen ja käytettävän seossuhteen välillä, koska ammoniakkin ja ilman sekoittuminen on epätäydellistä, jolloin paikallisesti voi esiintyä korkeampia seossuhteita. Räjähtävän seossuhteen alaraja riippuu käytettävästä paineesta. Korkeapaineisessa prosessissa voidaan käyttää ammoniakki- ilmaseosta, joka sisältää 11 % ammoniakkaa ja matalapaineisessa prosessissa voidaan käyttää ammoniakki- ilmaseosta, joka sisältää 13,5 % ammoniakkaa. (Thiemann, Scheibler & Wiegand 2000, s. 181.)

Reaktioyhtälöiden 1, 2 ja 3 luovuttama lämpö siirretään höyryn tuottamiseen ja poistokaasun lämmittämiseen. Höyry tuotetaan jätelämpökattilassa, joka sijaitsee poltto- osan alapuolella. Kuvassa 5 on esitetty ammoniakkin hapettamisen reaktori ja jätelämpökattila. Poltinosassa on verkkokori, jossa ovat katalyyttiverkot, täytekappaleet ja talteenottoverkot. Täytekappaleet varmistavat yhtenäisen kaasun virtauksen. Talteenottoverkot keräävät katalyyttiverkoista irronneet materiaalit. Reaktori ja jätelämpökattilan on kiinnitetty toisiinsa laippaliitoksella katalyyttiverkkojen vaihdon takia. Reaktorin yläosassa on kaasun ohjauslevy, joka jakaa ammoniakki- ilmaseoksen tasaisesti poltinosaan. Jätelämpökattilan esihöyrystin sijaitsee verkkokorin alapuolella ja se suojelee tulistinta liialliselta kuumuudelta. Tulistimen alapuolella on pähöyrystin. Jätelämpökattilassa on jäähdytetyt seinäputket, jotka toimivat höyrystimenä ja suojaavat jätelämpökattilan vaippaa liialliselta kuumuudelta. Kuvan 5 mukaista jätelämpökattilaa käytetään keskipaineisessa prosessissa. Kuvassa 6 on esitetty ammoniakkin hapettamisen reaktori ja jätelämpökattila, johon on yhdistetty syöttöveden esilämmitin eli ekonomaiseri. (Thiemann, Scheibler & Wiegand 2000, s. 192–193.)



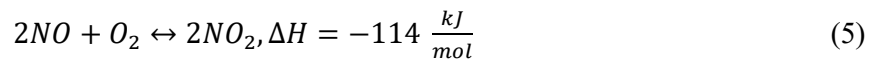
**Kuva 5.** Ammoniakkihapetuksen reaktori ja jätelämpökattila. a. Polttimen kansi, b. Ohjauslevy, c. Katalyytti- ja talteenottoverkot, d. Näkölasit, e. Tulistin ja höyrystin, f. Vetytytyn, g. Tiiviste, h. Typpikaasun ulostulo (Thiemann, Scheibler & Wiegand 2000, s. 193).



**Kuva 6.** Ammoniakkihapetuksen reaktori ja jätelämpökattila. a. Polttimen kansi, b. Ohjauslevy, c. Katalyytti- ja talteenottoverkot, d. Näkölasit, e. Tulistin ja höyrystin, f. Syöttöveden esilämmitin, h. Typpikaasun ulostulo (Thiemann, Scheibler & Wiegand 2000, s. 195).

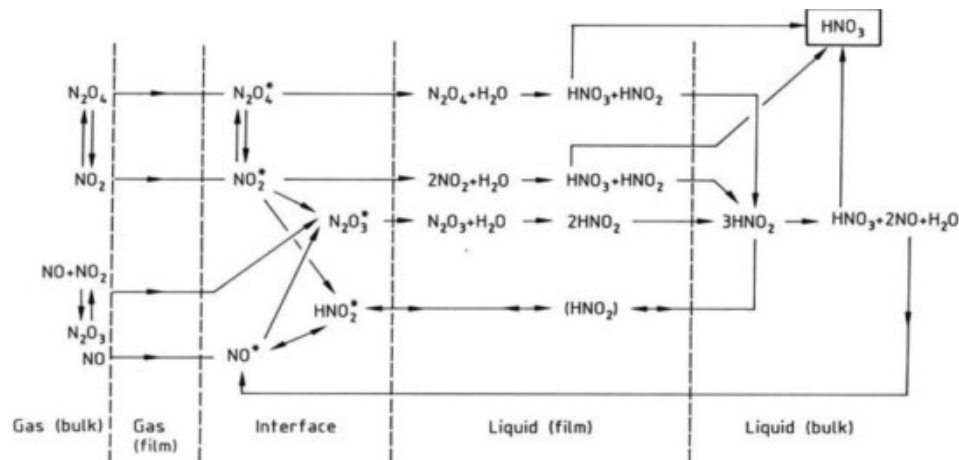
### 3.2 Hapettuminen

Typpioksidi hapettuu typpidioksidiksi reaktioyhtälö 5 mukaisesti. Hapettuminen tapahtuu kahden menetelmän yhdistelmällä. Kaasun jäähtyminen siirtää reaktion tasapainon kohti typpidioksidia. Kaasu jäähdytetään jätelämpökattilan ja lämmönsiirtimien avulla. Lisäksi tarvitaan riittävä viipymisaika, jotta homogeeninen hapetusreaktio tapahtuu loppuun asti. Hapettuminen tapahtuu reaktioyhtälön 5 mukaisesti. (Andreassen et al. 2018, s. 1.)



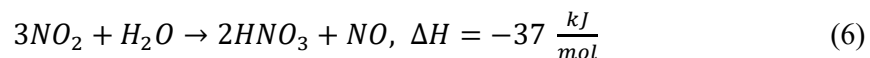
### 3.3 Imeytyminen

Imeytyminen on monimutkainen prosessi, koska kaasussa on suuri määrä reaktiivisia komponentteja. Kuvassa 7 on esitetty malli typpioksidien imeytymisestä veteen. (Thiemann, Scheibler & Wiegand 2000, s. 185.)



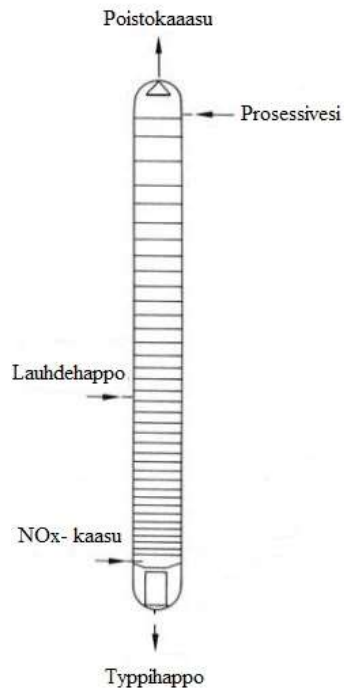
**Kuva 7.** Typpioksidien imeytyminen veteen (Thiemann, Scheibler & Wiegand 2000, s. 186).

Imeytymisen kokonaisreaktio tapahtuu reaktioyhtälön 6 mukaan (Makkee, Moulijn & Van Diepen A 2013, s. 261). Reaktio on eksoterminen, jonka vuoksi imeytystornin tasoilla on jäähdytyskierukat, joissa kiertää jäähdytysvesi. Imeytyminen ja hapettuminen on tehokkaampaa alhaisella lämpötilalla. (Fertilizers Europe 2000, s. 9–10.)



Reaktio ei tuota pelkästään typpihappoa vaan osa reagenssista muodostuu takaisin. Reaktio 6 tapahtuu nestefaasissa ja reaktio 5 kaasufaasissa, jolloin neste- ja kaasufaasien välisellä massansiirtonopeudella on merkittävä vaikutus. (Makkee, Moulijn & Van Diepen A 2013, s. 262.)

Kuvassa 8 on esitetty imeytystornin toimintaperiaate. Imeytyminen tapahtuu imeytystornin tasoilla, jotka ovat tehty seulalevyistä.  $\text{NO}_x$ -kaasu virtaa imeytystornissa alhaalta ylöspäin ja prosessivesi ylhäältä alaspäin. Imeytystornin tasojen välinen etäisyys kasvaa ylöspäin mentäessä, koska hapettuminen on hitaampaa  $\text{NO}_x$ -pitoisuuden laskiessa. Typpihapon muodostuminen tapahtuu pääasiassa imeytystornin alimmassa kolmanneksessa  $\text{NO}_x$ -pitoisuuden laskiessa ylemmässä osaa imeytystornia.  $\text{NO}_x$ -kaasu jäädytetään ennen imeytystornia lauhduttimessa alle kastepisteen, jolloin muodostuu lauhdehappoa, joka pumpataan imeytystorniin tasolle, jonka happoväkevyys on lähellä samaa, kuin lauhdehapon väkevyys. (Thiemann, Scheibler & Wiegand 2000, s. 184, 197, 203.)



**Kuva 8.** Imeytystornin toimintaperiaate (mukaillen Thiemann, Scheibler & Wiegand 2000, s. 198).

#### 4 JÄTELÄMPÖKATTILA

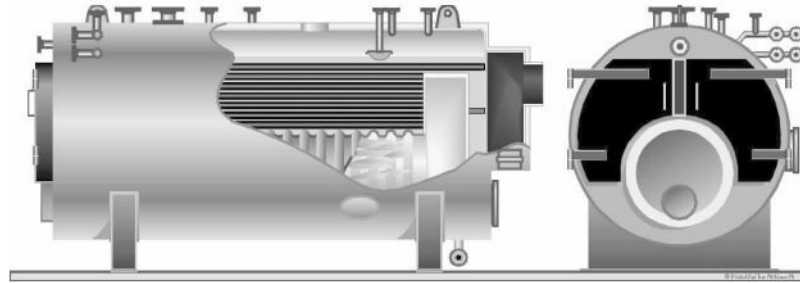
Prosessiteollisuudessa jätelämpökattilalla tuotetaan höyryä siirtämällä prosessikaasujen lämpöenergiaa vesi- höyrypiiriin. Jätelämpökattilat ovat välttämättömiä prosessilaitteita eksotermisissä prosesseissa, joissa vaaditaan jäähdytystä prosessin luotettavuuden ja turvallisuuden takia. Yleisesti jätelämpökattilasysteemiin kuuluvat kattilan lisäksi höyrylieriö ja höyryturbiini putkistoineen. Kuvassa 9 on esitetty jätelämpökattilaan rakenteeseen vaikuttavat tekijät. (Oakey 2011, s. 606–607.)



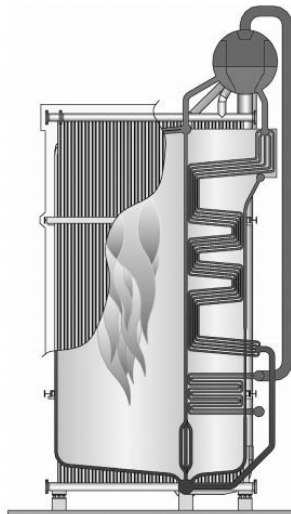
**Kuva 9.** Jätelämpökattilan rakenteeseen vaikuttavat tekijät (mukaillen Oakey 2011, s. 607).

Kemianteollisuudessa jätelämpökattiloita käytetään esimerkiksi rikki- ja typpihappotehtaiden prosesseissa jäähdyttämään prosessikaasua tiettyyn lämpötilaan

seuraavia prosessivaiheita varten. Jätelämpökattila voidaan varustaa ohivirtausjärjestelmällä, jos prosessikaasu ei saa laskea liian alhaiseksi, kun käytetään matalaa tuotantotehoa, mutta esimerkiksi kaasuturbiinisovelluksissa pyritään hyödyntämään prosessikaasun energiaa mahdollisimman paljon ottaen huomioon kustannukset ja matalan lämpötilan aiheuttama korrosio. Käytettävän prosessikaasun analyysillä on merkittävä vaikutus jätelämpökattilan toimintaan. Jos prosessikaasu sisältää esimerkiksi rikkiä niin riskinä on matalan ja korkean lämpötilan korrosio. Jätelämpökattila voi olla tyypiltään tulitorvi- tuliputki- tai vesiputkikattila. Kuvassa 10 on esitetty tulitorvi- tuliputkikattila. Tulitorvi- tuliputkikattilassa prosessikaasu virtaa putkien sisällä ja vesi höyrystyy putkien ulko- eli vaippapuolella. Kuvassa 11 on esitetty vesiputkikattila. Vesiputkikattilassa vesi höyrystyy putkien sisällä ja prosessikaasu virtaa vaippapuolella. (Oakey 2011, s. 607–608.)



**Kuva 10.** Tulitorvi- tuliputkikattila (Aho et al. 2003, s. 23).

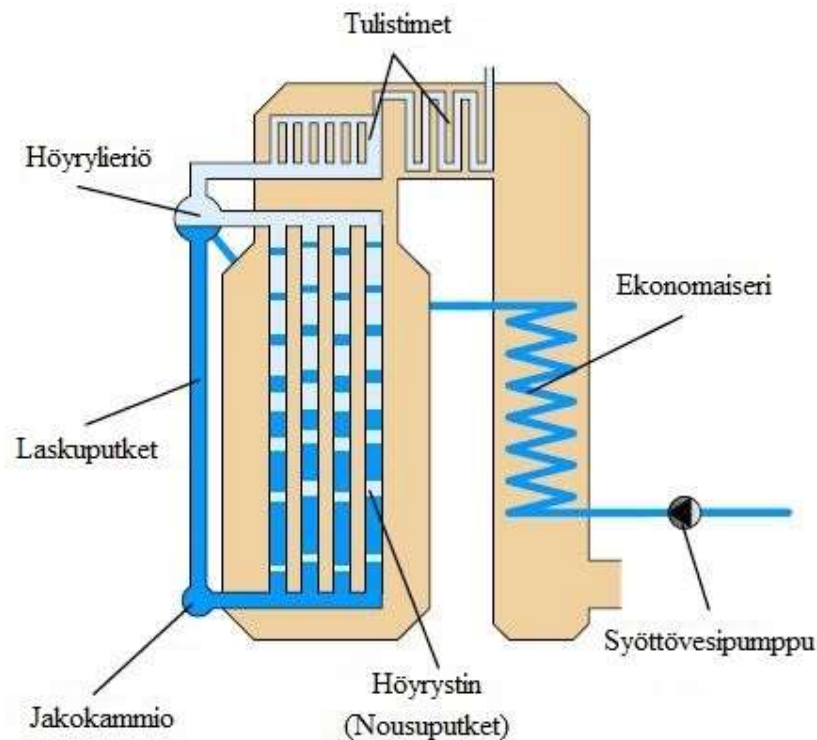


**Kuva 11.** Vesiputkikattila (Aho et al. 2003, s. 23).

Vesiputkikattilaa käytetään, kun vaaditaan korkeaa höyryn painetta ja lämpötilaa prosessikaasun määrään ollessa suuri. Jos prosessikaasun paine on korkea niin vesiputkikattilan vaipan pitää olla lieriön muotoinen. Tulitorvi- tuliputkikattilassa prosessikaasun paine voi olla 150 bar, koska se virtaa putken sisällä. Vesiputkikattilassa on vähemmän vettä verrattuna tulitorvi- tuliputkikattilaan, jolloin reagointi on nopeampaa prosessikaasun virtauksen vaihteluun. Tulitorvi- tuliputkikattilan tulistin voidaan sijoittaa vain alku- tai loppupäähän, kun vesiputkikattilassa tulistin on optimaalisimmalla kohdalla. (Oakey 2011, s. 609–609.)

#### 4.1 Vesiputkikattila

Vesiputkikattilat voidaan jakaa vesi- höyrypiirin kierron mukaan kolmeen ryhmään, jotka ovat luonnonkierto-, pakkokierto- ja läpivirtauskattilat (Huhtinen et al. 2004, s. 111). Kuvassa 12 on esitetty luonnonkiertokattilan rakenne. Luonnonkiertokattila on periaatteeltaan yksi vanhimmista ja sen käyttö on vähentynyt viime vuosikymmenten aikana. Luonnonkiertoa käytetään yleensä pienissä ja keskisuurissa kattiloissa. (Teir 2003, s. 54.)



**Kuva 12.** Luonnonkiertokattilan rakenne (mukaiillen Teir 2003, s. 54).

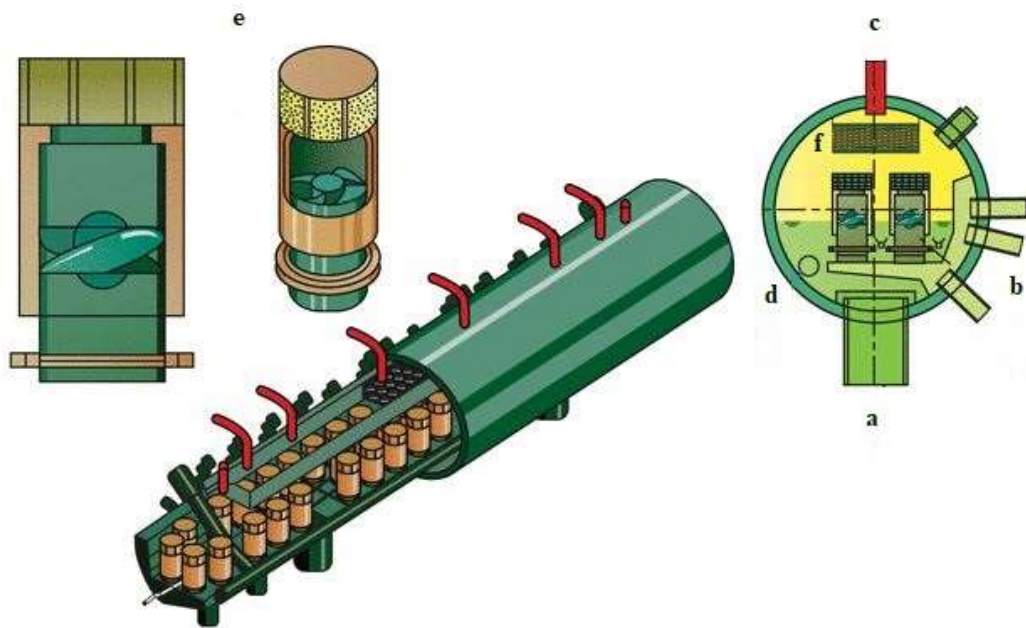
Vesi- höyrypiiri alkaa syöttövesitankista, josta syöttövesi pumpataan kattilaan määrättyllä paineella. Syöttövesi lämmitetään lähelle kylläistä lämpötilaa syöttöveden esilämmittimessä, jonka jälkeen syöttövesi virtaa höyrylieriöön, jossa se sekoittuu olemassa olevan veden kanssa. Höyrylieriöstä syöttövesi johdetaan laskuputkia pitkin jakokammioon ja edelleen nousuputkiin eli höyrystimeen. Höyrystimessä osa vedestä höyrystyy. Muodostunut kylläinen vesi- höyryseos johdetaan takaisin höyrylieriöön. Luonnonkierto höyrylieriön ja höyrystimen välillä perustuu tiheyseroon veden ja höyryn välillä. Laskuputkissa virtaava vesi on tiheämpää kuin höyrystimessä virtaava kylläinen vesi- höyryseos, jolloin vesi painaa vesi- höyryseosta ylöspäin höyrylieriöön. Höyrylieriössä höyry nousee yläosaan, josta se virtaa tulistimille. Tulistimissa kylläinen höyry lämmitetään yli kyllästymispisteen ja johdetaan höyryturbiinille. Kylläinen vesi sekoittuu höyrylieriössä tulevan syöttöveden kanssa ja päätyy jälleen laskuputkia pitkin höyrystimeen. Taulukossa 3 on esitetty luonnonkiertokattilan edut ja haitat verrattuna muihin kiertotyyppeihin. (Teir 2003, s. 54–55.)

*Taulukko 3. Luonnonkiertokattilan edut ja haitat verrattuina muihin kiertotyyppeihin (Teir 2003, s. 55–55).*

<b>Edut</b>	<b>Haitat</b>
Alhaisempi syöttöveden epäpuhtauksien vaikutus.	Iso kiertoluku (veden ja höyryn suhde)5–100, jonka seurauksena höyrystimen pitää olla iso.
Pienempi sähkönkulutus.	Vesihöyryseoksen putket pitää olla halkaisijaltaan suuria pienen paine-eron takia.
Yksinkertainen rakenne.	Vaatii tarkempaa suunnittelua.
Laaja osakuormitusalue.	Herkkä painevaihteluille, jolloin höyrylieriön pinta nousee.
Yksinkertainen prosessinohjaus.	Vaatii höyrylieriön.

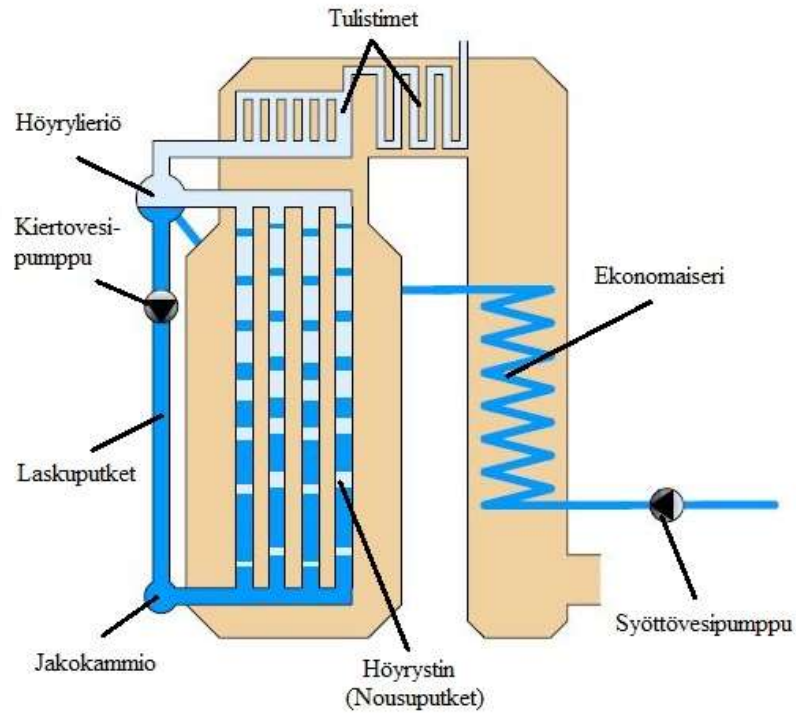
Kuvassa 13 on esitetty höyrylieriön rakenne. Syöttöveden esilämmittimeltä johdettu syöttövesi virtaa jakotukin läpi höyrylieriön pohjalle. Kylläisen veden ja höyryn erotus höyrylieriössä perustuu tiheyseroon. Tiheydeltään pienempi höyry nousee höyrylieriön yläosaan ja vesi painuu alaosaan. Vesi- höyryseos johdetaan höyrylieriöön tasaisella

virtauksella, jotta erotusprosessi olisi mahdollisimman tehokasta. Erotusprosessiin vaikuttaa myös aika eli kuinka kauan vesi- höyryseos viipyy höyrylieriössä. Höyrylieriössä on ohjauslevyjä, jotka estävät höyryn pääsyn suoraan tulistimille. Ohjauspeltien aiheuttamat suunnanmuutokset höyryn virtauksessa erottaa painavimmat pisarat. Höyrylieriöissä käytetään myös sykloneja ja pisaranerotimia vesi- höyryseoksen erotusprosessissa. Vesi- höyrypiiristä poistetaan epäpuhtaudet jatkuvalla ulospuhalluksella höyrylieriön pohjasta. (Teir 2003, s. 74–76.)



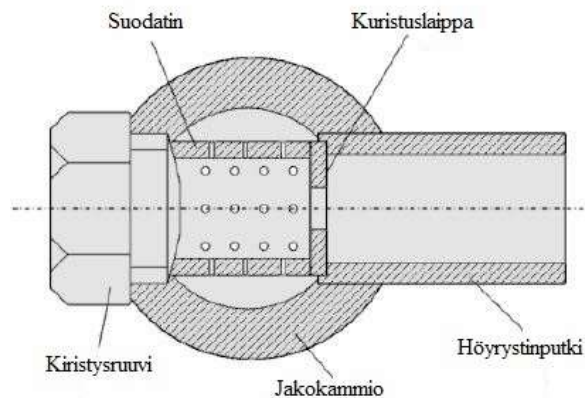
**Kuva 13.** Höyrylieriön rakenne. a. Laskuputket, b. Nousuputket, c. Höyry tulistimille, d. Syöttöveden sisääntulo, e. Pisaranerotin, f. Demisteri (mukaillen Vakkilainen 2017, s. 102).

Kuvassa 14 on esitetty pakkokiertoakattila, jossa vesi siirretään höyrylieriöstä höyrystimeen pumpun avulla. Höyrylieriö on rakenteeltaan ja toiminnaltaan samanlainen, kuin luonnonkiertoakattilassa. Pumpun vuoksi pakkokiertoakattilan paine voi olla korkeampi, kuin luonnonkiertoakattilan. Käytännössä paine voi olla maksimissaan 190 bar paine-eron ollessa 2–3 bar. Pakkokiertoakattilan höyrystimen sijoitus on vapaampaa ja höyrystinputkien koko voi olla halkaisijaltaan pienempiä, kuin luonnonkiertoakattilassa, koska paine-erolla ei ole niin suurta merkitystä. (Teir 2003, s. 62–63.)



**Kuva 14.** Pakkokiertokattilan rakenne (mukaiillen Teir 2003, s. 62).

Tasainen virtaus jakotukilta höyrystimen putkiin on välttämätöntä ylikuumenemisen estämiseksi. Vesi syötetään pumpun tuottamalla paineella, jolloin painehäviön perusteella vesi jakautuu rinnakkain oleviin putkiin. Putket, joissa on suurin virtausvastus saavat vähiten vettä, jolloin ne ylikuumenevat. Tämän vuoksi jokaisessa höyrystimen putkissa on kuristin tai suutin, joilla tasataan putkien suhteelliset erot. Kuvassa 15 on esitetty jakokammion kuristimen rakenne. (Teir 2003, s. 62–63.)



**Kuva 15.** Jakokammion kuristimen rakenne (mukaiillen Teir 2003, s. 63).

Tyypillisin pakkokierto-kattila on La Mont, jota käytetään räätälöidyissä sovelluksissa, joissa kattilan ulkomitat määrittää esimerkiksi kattilarakennuksen koko. La Mont- kattilan tyypillisin käyttökohde on toimia jätelämpökattilana erillisen poltinosan kanssa. Taulukossa 4 on esitetty pakkokierto-kattilan edut ja haitat verrattuna muihin kierto-tyyppeihin. (Teir 2003, s. 63–64.)

*Taulukko 4. Pakkokierto-kattilan edut ja haitat verrattuina muihin kierto-tyyppeihin (Teir 2003, s. 64).*

<b>Edut</b>	<b>Haitat</b>
Pienet putkien halkaisijat.	Pumppu sijoitettava lieriön alle, joka aiheuttaa rajoituksia sijoitteluun.
Laaja kokoalue.	Korkeampi energiankulutus.
Lämmönsiirtopintojen vapaa sijoittelu.	Korkeampi syöttöveden laatu.
Alhainen kierto-luku (veden ja höyrynsuhde) 3–10.	Pumppu aiheuttaa lisäkustannuksia.
Vesi- höyrypiiri ei ole riippuvainen tiheyserosta.	Luotettavuus heikompi kuristimien tukkeentumisen tai pumppu-ongelmien takia.

Läpivirtauskattila voidaan ajatella yhdeksi pitkäksi putkeksi, jota lämmitetään ulkoapäin. Läpivirtauskattilassa ei ole sisäistä vesi- höyrykiertoa ja näin ollen ei myöskään höyrylieriötä. Tällöin kierto-luku on 1. Läpivirtauskattilan päätyypit ovat Benson, Sulzer ja Ramzin. Taulukossa 5 on esitetty läpivirtauskattilan edut ja haitat verrattuina muihin kierto-tyyppeihin. (Teir 2003, s. 64–65.)

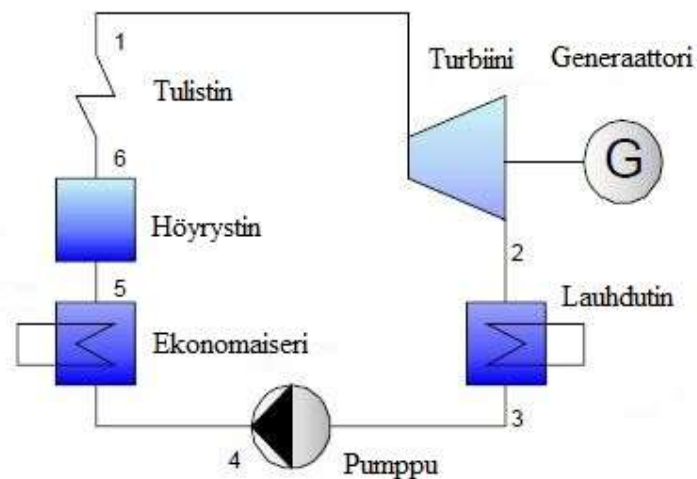
Taulukko 5. Läpivirtauskattilan edut ja haitat verrattuna muihin kiertotyyppeihin (Teir 2003, s. 67).

Edut	Haitat
Halkaisijaltaan pienemmät putket.	Monimutkainen säätö vähäisen vesi-höyryseoksen tilavuuden takia.
Soveltuvat ylikriittisiin paineisiin.	Korkea syöttöveden laatu, koska ei ole erillistä ulospuhallusta.
Ei tarvitse höyrylieriötä.	Putkien sisäpintojen spiraalirakenteen vuoksi kalliita valmistaa.
Kiertoluku 1.	Vaatii suuren veden massavirran seinäputkiin.

#### 4.2 Lämpöpinnat

Kuvassa 16 on esitetty tyypillinen höyryvoimalaitoksen vesi- höyrypiirin kierto, joka koostuu kuudesta prosessivaiheesta. (Teir 2003, s. 119.)

- 1) 1–2: Korkeapainehöyryn paisunta turbiinissa.
- 2) 2–3: Matalapainehöyryn lauhdutus lauhdeksi.
- 3) 3–4: Veden puristuminen syöttövesipumpussa.
- 4) 4–5: Veden lämmitys ekonomaiserissa.
- 5) 5–6: Veden höyrystyminen höyrystimessä.
- 6) 6–1: Höyryn tulistus tulistimessa.



Kuva 16. Tyypillinen vesi- höyrypiirin kierto (mukaillen Teir 2003, s. 119).

Kattilan vesi- höyrypiirin lämpöpinnat voidaan jaa kolmeen ryhmään, jotka ovat syöttöveden esilämmitin eli ekonomaiseri, höyrystin ja tulistin. Lämpöpinnat siirtävät osan poltossa syntyneen lämpöenergian vesi- höyrypiiriin. (Teir 2003, s. 119.)

#### 4.2.1 Ekonomaiseri

Syöttövesi lämmitetään poltossa syntyneellä kaasulla eli savukaasulla ekonomaiseriä ennen höyrystintä. Savukaasun lämpötila laskee ekonomaiserin jälkeen ja parantaa energian talteenottoa. Syöttövesi lämmitetään lähelle painetta vastaavaan höyrystymislämpötilaan. Höyrystymislämpötilaan asti lämmitettäessä syöttövesi höyrystyisi jo ekonomaiseriä, jolloin se aiheuttaisi kuormanmuutostilanteissa kiehumisvaaran. (Vakkilainen 2017, s. 64–65.)

#### 4.2.2 Höyrystin

Höyrystimessä vesi höyrystyy painetta vastaavaan kylläiseksi vesi- höyryseokseksi, jolloin entalpia nousee merkittävästi. Höyrystimen paine määräytyy tulistimen paineen mukaan. Höyrystimen paine on suurempi paine-eron takia. Höyrystimeen kuuluu tulipesän seinäputket ja joissakin sovelluksissa myös erillinen höyrystin. (Huhtinen et al. 2004, s. 187.)

#### 4.2.3 Tulistin

Tulistimessa kylläisen höyryn lämpötila nostetaan yli painetta vastaavaan höyrystymislämpötilan. Tällöin höyry on tulistettu ja se voidaan johtaa höyryturbiinille. Tulistimet voidaan jakaa säteily- ja konvektiotulistimiin. (Teir 2003, s. 107–108.)

## 5 KATTILAN LÄMPÖPINTOJEN MITOITUS

Kattilan lämpöpintojen lämpötekniiseen mitoitukseen tarvitaan lähtötietoina siirrettävä lämpöteho lämmittävän kaasun tai jäähdyttävän vesi- höyrypiirin osalta. Lisäksi tarvitaan molempien piirien lämpötilat ennen ja jälkeen kattilan. Kattilan lämpöpintojen lämmönsiirtymiseen vaikuttaa lämpöpintojen pinta- alat, lämmönsiirtokerroin ja lämpötilaero piirien välillä. (Huhtinen et al. 2004, s. 201.) Lämpöpintojen mitoitusta varten tarvitaan vesi- höyrypiirin ominaisentalpiat, jotka määritetään liitteen I  $h$ - $s$ - kuvaajasta, kun tiedetään paine ja lämpötila. (Engineering ToolBox 2001.)

Höyrylieriöön syötettävän veden tulisi olla kylläistä vettä, mutta kiehumisen estämiseksi siirtoputkissa veden lämpötila pidetään 10– 30 °C kyllästymislämpötilaa alhaisempana, jolloin vesi on alijäähtynyttä. Tätä lämpötilaeroa kutsutaan lähestymislämpötilaksi. Veden lämpötila ekonomaiserin jälkeen voidaan määrittää, kun tiedetään höyrylieriön lämpötila ja lähestymislämpötila. Veden paine ekonomaiserissa voidaan olettaa olevan sama, kuin höyrylieriössä, jolloin veden ominaisentalpia ekomaiserin jälkeen voidaan määrittää  $h$ - $s$ - kuvaajasta. Tarvittavan syöttöveden määrä on höyrylieriön ulospuhalluksen ja kylläisen höyryn yhteenlaskettu massavirta. Höyrylieriön ulospuhalluksen määrä on 1–3 % veden kokonaismäärästä. (Teir 2003, s. 122–123.)

Ekonomaiserin aiheuttama paine- ero on yleensä 5–10 % veden paineesta. Luonnonkierto- ja pakkokierto-kattiloiden höyrystimen paine- erolla ei ole merkitystä vesi- höyrypiirin kokonaiskiertoon, koska höyrylieriöön syötettävän veden paine on sama, kuin höyrylieriöstä lähtevän kylläisen höyryn paine. Höyrystimen paine- ero mitätöidään luonnonkiertokattilassa käyttövoimalla ja pakkokierto-kattilassa kiertovesipumpulla. Tulistimen paine- ero on alle 10 % tulistetun höyryn paineesta. (Teir 2003, s. 122.)

Yleisesti lämmönsiirtimen lämpöteho  $\Phi$  voidaan laskea seuraavasti (Huhtinen et al. 2004, s. 202):

$$\Phi = \dot{m}c_p(T_2 - T_1) = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (1)$$

Yhtälössä 1  $\dot{m}$  on massavirta,  $c_p$  ominaislämpökapasiteetti,  $T_2$  on lämpötila lämmönsiirtimen jälkeen,  $T_1$  on lämpötila ennen lämmönsiirintä,  $h_2$  on ominaisentalpia lämmönsiirtimen jälkeen ja  $h_1$  on ominaisentalpia ennen lämmönsiirintä. (Huhtinen et al. 2004, s. 202.)

Ekonomaiserin lämpöteho  $\Phi_{EKO}$  voidaan laskea seuraavasti (Teir 2003, s. 126):

$$\Phi_{EKO} = \dot{m}_{EKO}(h_{EKO2} - h_{EKO1}) \quad (2)$$

Yhtälössä 2  $\dot{m}_{EKO}$  on syöttöveden massavirta ekonomaiseriin,  $h_{EKO2}$  on syöttöveden ominaisentalpia ekonomaiserin jälkeen ja  $h_{EKO1}$  on syöttöveden ominaisentalpia ennen ekonomaiseria. Höyrystimen lämpöteho  $\Phi_{HÖY}$  voidaan laskea seuraavasti (Teir 2003, s. 125):

$$\Phi_{HÖY} = \dot{m}_{TUL}(h'' - h_{EKO2}) + \dot{m}_{UP}(h' - h_{EKO2}) \quad (3)$$

Yhtälössä 3  $\dot{m}_{TUL}$  on kylläisen höyryn massavirta ennen tulistinta,  $h''$  on kylläisen höyryn ominaisentalpia höyrylieriön paineessa,  $h_{EKO2}$  on syöttöveden ominaisentalpia ekonomaiserin jälkeen,  $\dot{m}_{UP}$  on höyrylieriön ulospuhalluksen massavirta ja  $h'$  on kylläisen veden ominaisentalpia höyrylieriön paineessa. Tulistimen lämpöteho  $\Phi_{TUL}$  voidaan laskea seuraavasti (Teir 2003, s. 125):

$$\Phi_{TUL} = \dot{m}_{TUL}(h_{TUL} - h'') \quad (4)$$

Yhtälössä 4  $\dot{m}_{TUL}$  on höyryn massavirta ennen tulistinta,  $h_{TUL}$  on tulistetun höyryn ominaisentalpia ja  $h''$  on kylläisen höyryn ominaisentalpia höyrylieriön paineessa. Lämpöpinnan pinta-ala  $A$  voidaan laskea seuraavasti (Teir 2003, s. 125, 136):

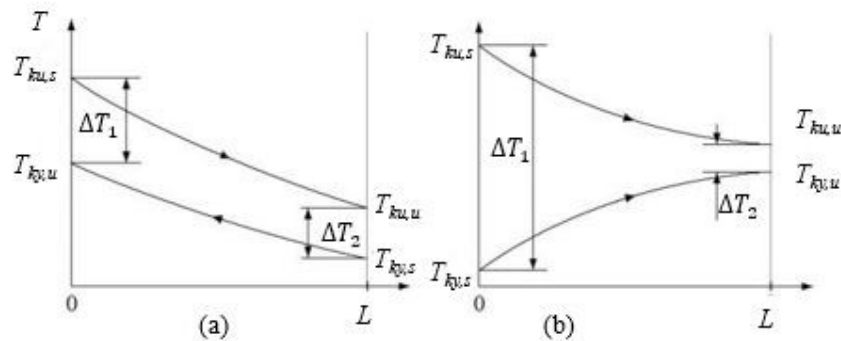
$$A = \frac{\Phi}{k\Delta T} \quad (5)$$

Yhtälössä 5  $\Phi$  on lämpöteho,  $k$  on kokonaislämmönsiirtokerroin ja  $\Delta T$  keskimääräinen logaritminen lämpötilaero. (Teir 2003, s. 136.)

Lämpötilaero lämmönsiirtopinnoilla kahden virtaavan aineen välillä on erilainen jokaisessa kohdassa, jolloin lämpötilaeron määrittämiseen käytetään keskimääräistä logaritmista lämpötilaeroa  $\Delta T_{lm}$  seuraavasti (Saari 2009, s. 35):

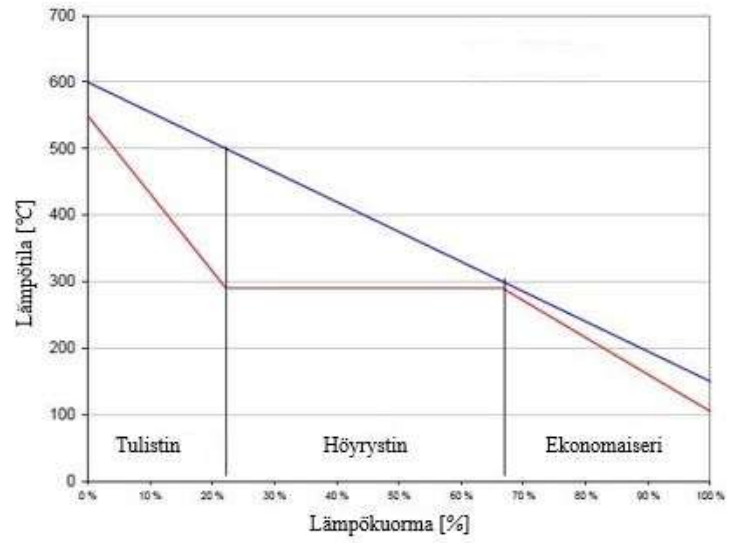
$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (6)$$

Yhtälössä 6  $\Delta T_1$  ja  $\Delta T_2$  ovat lämpötilaerot sisään- ja ulostulossa. Kuvassa 17 on esitetty lämpötilaerot  $\Delta T_1$  ja  $\Delta T_2$  vasta- ja myötävirtasovelluksissa. Kuvassa 17  $T_{ku,s}$  on kuuman aineen sisääntulo,  $T_{ku,u}$  on kuuman aineen ulostulos,  $T_{ky,s}$  on kylmän aineen sisääntulo ja  $T_{ky,u}$  on kylmän aineen ulostulos. (Saari 2009, s. 35.)



**Kuva 17.** Lämpötilaerot  $\Delta T_1$  ja  $\Delta T_2$ . a. vastavirta, b. myötävirta (mukailten Saari 2009, s. 35).

Kuvassa 18 on esitetty lämmöntalteenottokattilan lämpökuorman kuvaaja, jossa sininen viiva kuvaa savukaasua ja punainen viiva vesi- höyrypiiriä. Savukaasun ja vesi- höyrypiirin pienin lämpötilaero on höyrystimen alussa. Tämä lämpötilaero pyritään pitämään mahdollisimman alhaisena, koska se vaikuttaa suoraan kattilan höyrystystehoon. Lämpötilaero on yleensä 10– 30 °C. Pieni lämpötilaero tarvitsee kuitenkin suuremman lämpöpinta- alan, jolloin investointikustannukset ovat suuremmat. (Huhtinen et al. 2004, s. 172.)



**Kuva 18.** Lämmöntalteenottokattilan lämpökuorma (mukaiillen Teir 2003, s. 145).

## 6 KATTILAN LÄMPÖPINTOJEN MATERIAALIT

Kattilan lämpöpintojen materiaalin valintaa vaikuttaa operointiolosuhteet, mekaaniset ominaisuudet, valmistettavuus, hinta ja toimitusaika. Operointiolosuhteen tärkeimmät suureet ovat lämpötila, paine ja korroosion vaikutus. Mekaanisiin ominaisuuksiin sisältyy esimerkiksi lujuus ja sitkeys. Valmistettavuuden osalta tärkein ominaisuus on hitsattavuus. (Vakkilainen 2017, s. 174.)

Kattilan lämpöpinnat voidaan jakaa kahteen kategoriaan seinämän vahvuuden mukaan, jotka ovat paksu- ja ohutseinäputket. Paksuseinäputkiin kuuluvat jako- ja kokoojakammiot sekä höyryputki. Ohutseinäputkiin kuuluvat seinäputket, tulistimen ja ekonomaiserin putket. Kattilan lämpöpintojen vaatimukset ovat (Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 87-88) :

- 1) Hyvä virumislujuus korkeissa lämpötiloissa.
- 2) Hyvä väsymislujuus.
- 3) Pieni lämpölaajenemiskerroin lämpöjännityksien minimoimiseksi.
- 4) Hyvä lämmönjohtavuus lämmönsiirtämiseksi.
- 5) Hyvä hapettumisen ja korroosion kestävyys.
- 6) Hyvä mikrorakennemuutoskestävyys.
- 7) Hyvä valmistettavuus.

Edellä lueteltujen vaatimusten perusteella lämpöpinoissa voidaan käyttää monenlaisia teräksiä, kuten hiiliterästä, matalaseosteista terästä tai korkeaseosteista terästä. (Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 87- 88.)

### 6.1 Viruminen

Viruminen on ajasta riippuvainen korotetussa lämpötilassa ja vakiojännityksessä tapahtuvaa plastista muodonmuutosta. Korotetulla lämpötilalla tarkoitetaan 50 prosenttia teräksen sulamispisteestä. (Kassner 2009, s. 3.)

Korkean lämpötilan virumisessa teräkseen ilmaantuu ennen aikaisia vikoja, kun lämpötila ja jännitykset ylittävät suunnitteluarvot. Tähän ilmiöön voi riittää vain lievä lämpötilan tai jännityksen suunnitteluarvojen ylitys. Virumisesta aiheutuvan putken repeytymiskohdassa

putken seinämän paksuus on ohentunut vain vähäisesti tai ei ollenkaan. Virumisesta aiheutuvan putken repeämiskohta on leveä, ammottava ja se muistuttaa kalan suuta. (Dhua 2010, s. 1572.)

## 6.2 Hiiliteräkset

Hiiliteräkset voidaan jakaa kolmeen luokkaan hiilipitoisuuden perusteella. Niukkahiilisen teräksen hiilipitoisuus on alle 0,3 %. Niukkahiilinen teräs on yleisin käytetty teräs ja edullisimpia teräslaatuja. Niukkahiilinen teräs on sitkeää ja sitä on helppo hitsata ja koneistaa. Niukkahiilisen teräksen lujuteen ei voi vaikuttaa lämpökäsittelyllä, koska ne eivät ole alttiita martensiittiselle muutokselle. Keskihiilisen teräksen hiilipitoisuus on 0,3–0,6 %. Keskihiilistä teräksen ominaisuuksia voidaan parantaa lämpökäsittelyllä. Korkeahiilisen teräksen hiilipitoisuus on 0,6–1,2 %. Korkeahiilinen teräs on hiiliteräksistä kovinta ja lujinta, mutta ne ovat myös hauraita. Hiiliterästen rajoitteet ovat (Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 47–48):

- 1) Lujuuden kasvaessa sitkeys heikkenee.
- 2) Kovuus laskee lämpökäsittelyssä.
- 3) Matala korroosion ja hapettumisen kesto.
- 4) Matala virumislujuus korotetussa lämpötilassa.

## 6.3 Seostetut teräkset

Edellä lueteltujen hiiliterästen rajoitteita voidaan parantaa seostamalla, jolloin lisätään yksi tai useampi seosaine. Yleisimmät seosaineet ovat kromi (Cr), nikkeli (Ni), pii (Si), mangaani (Mn), molybdeeni (Mo), vanadiini (V), titaani (Ti), niobi (Nb), alumiini (Al), kupari (Cu) ja boori (B). Seostuksen hyödyt ovat (Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 48):

- 1) Kovuuden lisäys.
- 2) Vähentää kovuuden laskua lämpökäsittelyssä.
- 3) Lisää hapettumisen ja korroosion kestoja.
- 4) Lisää korkean lämpötilan ominaisuuksia, kuten virumislujuutta.
- 5) Lisää kulutuskestävyyttä.

Matalaseostetussa teräksessä on yleensä 3–4 % seosaineita. Matalaseostetulla teräksellä on hiiliterästä paremmat mekaaniset ominaisuudet. Niillä on samanlainen mikrorakenne ja niille voidaan tehdä samanlaisia lämpökäsittelyjä, kuin hiiliteräkselle. Matalaseostettu teräs

voidaan luokitella pääseosaineen tai -aineiden mukaan kromi-, nikkeli-, nikkeli- kromi-, molybdeeni-, kromi- molybdeeni-, tai kromi- molybdeeni- vanadiiniteräkseksi. Lämpökäsittely koostuu austenitoinnista 900- 950 °C lämpötilassa, jonka jälkeen jäähdytys tapahtuu ilmaan tai uunissa. Ilmajäähdytetty teräs karkaistaan 650- 730 °C lämpötilassa. Riippuen lämpökäsittelystä lopullinen mikrorakenne on ferriitti- perliitti, ferriitti- bainiitti, tai bainiitti. (Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 35.)

Matalaseosteisia teräksiä käytetään seinäputkissa, kammioissa ja tulistimissa. Matalaseosteisen teräs kestää virumista jopa 550 °C lämpötilassa. Tavallisen hiiliteräksen vastaava lämpötila on 350 °C. Matalaseosteisessa teräksessä kromi suojaa hapettumiselta ja molybdeeni lisää lujuutta. Hiili muodostaa liukenemattomia karbideja kromin, molybdeenin titaanin ja niobin kanssa, jolloin ne vahvistavat matriisia myös korotetuissa lämpötiloissa. Yhdessä typen (N) kanssa muodostuu nitridejä ja karbonitridejä, jolloin materiaali erkautuskarkenee ja lujuus kasvaa. Taulukossa 6 on esitetty matalaseosteisten terästen kemiallinen koostumus. Liitteessä III on esitetty laajempi listaus seostamattomista ja seostetuista kuumalujista teräksistä. Taulukon 6 alkuaineet ovat hiili (C), pii (Si), mangaani (Mn), kromi (Cr), molybdeeni (Mo), volframi (W), koboltti (Co), vanadiini (V), niobi (Nb), boori (B), typpi (N), alumiini (Al) ja titaani (Ti). (Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 89.)

*Taulukko 6. Matalaseosteisten terästen kemiallinen koostumus (mukaihen Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 90).*

Teräslaatu	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	Co	V	Nb	B	N	Muut
ASME T11/1/ 2Mo	0.1-0.2	0.1-0.5	0.3-0.8	...	0.44-0.65	...	...	...	...	...	...	...
ASME T11/ 13CrMo 4.4	0.15	0.5	0.45	1.25	0.5	...	...	...	...	...	...	...
ASME T12	0.05-0.15	0.5	0.3-0.61	0.8-1.25	0.44-0.65	...	...	...	...	...	...	...
ASME T22/ 10CrMo 9.10	0.12	0.3	0.45	2.25	1.0	...	...	...	...	...	...	...
ASME T24/ 7CrMoVTiB10-10	0.05-0.1	0.15- 0.45	0.3-0.7	2.2-2.6	0.9-1.1	...	...	0.2-0.3	...	...	0.012	0.02 Al, 0.05-0.1Ti

Lämpöpinnoissa, joissa seinämän vahvuutta halutaan pienentää, käytetään korkeaseostettuja ferriittisiä teräksiä, joilla on suuri lujuus korkeissa lämpötiloissa. Niillä on myös erinomainen hapettumisen, korroosion ja lämpöväsymisen kesto sekä virumislujuus. Korkeaseostetuilla ferriittisillä teräksillä on hyvät lujuusominaisuudet 620- 650 °C lämpötiloissa, joten niitä käytetään esimerkiksi tulistimissa. Taulukossa 7 on esitetty

korkeaseostettujen ferriittisten terästen kemiallinen koostumus. (Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 90- 91.)

*Taulukko 7. Korkeaseostettujen ferriittisten terästen kemiallinen koostumus (mukailten Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 9).*

Teräslaatu	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	Co	V	Nb	B	Muut
P/T9	0.12	0.6	0.45	9.0	1.0	...	...	...	...	...	...
P/T91/ X10CrMoVNb9 1	0.08-0.12	0.2-0.5	0.30-0.60	8.0-9.5	0.85-1.05	...	...	0.18- 0.25	0.06-0.1	...	<0.4 Ni, 0.03-0.07 N
P/T92/ NF616 / X10CrMoWVNb 9 2	0.07-0.13	<0.5	0.30-0.80	8.5-9.5	0.3-0.6	1.5-2.0	...	0.15- 0.25	0.04-0.09	0.001- 0.006	...
E911/ X10CrMoWVNb 9 1 1	0.12	0.2	0.51	9.00	0.94	0.9	...	0.20	0.06	...	0.25Ni
HCM9M	0.07	0.3	0.45	9.0	2.0	...	...	...	...	...	...
HT91/X20 CrMoV 12 1	0.20	0.4	0.60	12.0	1.0	...	...	0.25	...	...	0.5Ni
HT9/X20 CrMoWV121	0.20	0.4	0.60	12.0	1.0	0.5	...	0.25	...	...	0.5Ni
HCM12	0.10	0.3	0.55	12.0	1.0	1.0	...	0.25	0.05	...	0.03N
P/T122/HCM12A	0.11	0.1	0.60	12.0	0.4	2.0	...	0.20	0.05	0.003	0.06N, 1.0Cu
NF12	0.08	0.2	0.50	11.0	0.2	2.6	2.5	0.20	0.07	0.004	...
SAVE 12	0.10	0.3	0.20	11.0	...	3.0	3.0	0.20	0.07	...	0.07Ta, 0.04Nd, 0.04N

### 6.3.1 Ruostumattomat teräkset

Korkeaseosteisten terästen pääryhmät ovat ruostumattomat ja kuumankestävät teräkset. Ruostumattomalla teräksellä on hyvä hapettumisen ja korroosionkesto. Ruostumattoman teräksen kromipitoisuus on yleensä noin 12 %, jolloin teräksen pintaan muodostuu suojaava kromioksidikerros, joka pystyy uusiutumaan rikkoontuessaan. Ruostumattomat teräkset voidaan jakaa viiteen pääryhmään mikrorakenteen perusteella (Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 53- 55):

- 1) Austeniittiset ruostumattomat teräkset.
- 2) Ferriittiset ruostumattomat teräkset.
- 3) Martensiittiset ruostumattomat teräkset.
- 4) Erkkautuskarkenevat ruostumattomat teräkset.
- 5) Austenittis- ferriittiset- eli Duplex- ruostumattomat teräkset.

### 6.3.2 Austeniittiset ruostumattomat teräkset

Austeniittinen ruostumaton teräs on yleisin käytetty ryhmä ruostumattomista teräksistä. Austeniittinen ruostumaton teräs sisältää 16- 26 % kromia ja 8- 22 % nikkeliä. Hiilipitoisuus on alle 0, 15 %. Austeniittinen mikrorakenne saadaan nikkelillä. Austeniittisen ruostumattoman teräksen korroosion kesto on parempi, kuin ferriittisen tai martensiittisen ruostumattoman teräksen. Austeniittinen ruostumaton teräs ei ole magneettinen ja sillä on

hyvä hitsattavuus ja muovattavuus. Taulukossa 8 on esitetty austeniittisten ruostumattomien terästen kemiallinen koostumus. (Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 55- 56.)

*Taulukko 8. Austeniittisten ruostumattomien terästen kemiallinen koostumus (mukailten Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 56).*

Teräslaatu	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	Muut
AISI 201	0.15	1.00	5.5–7.5	16.00–18.00	3.50–5.50	...	0.030	0.060	0.25N
AISI 202	0.15	1.00	7.5–10.0	17.00–19.00	4.00–6.00	...	0.030	0.060	0.25N
AISI 302	0.15	1.00	2.00	17.00–19.00	8.00–10.00	...	0.030	0.045	...
AISI 304	0.08	1.00	2.00	18.00–20.00	8.00–10.50	...	0.030	0.045	...
AISI 304L	0.03	1.00	2.00	18.00–20.00	8.00–12.00	...	0.030	0.045	...
AISI 309	0.20	1.00	2.00	22.00–24.00	12.00–15.00	...	0.030	0.045	...
AISI 310	0.25	1.50	2.00	24.00–26.00	19.00–22.00	...	0.030	0.045	...
AISI 316	0.08	1.00	2.00	16.00–18.00	10.00–14.00	2.0–3.0	0.030	0.045	...
AISI 316L	0.03	1.00	2.00	16.00–18.00	10.00–14.00	2.0–3.0	0.030	0.045	...
AISI 316N	0.08	1.00	2.00	16.00–18.00	10.00–14.00	2.0–3.0	0.030	0.045	0.10–0.16N
AISI 321	0.08	1.00	2.00	17.00–19.00	9.00–12.00	...	0.030	0.045	5x%C min Ti
AISI 347	0.08	1.00	2.00	17.00–19.00	9.00–13.00	...	0.030	0.045	10x%C min Nb
AISI 348	0.08	1.00	2.00	17.00–19.00	9.00–13.00	...	0.030	0.045	0.20Co, 8x%C min Nb, 0.1Ta

Lämpöpinnoissa, jotka altistuvat virumiselle, tulipesän ja höyrypuolen hapettumiselle sekä lämpöväsymiselle, käytetään austeniittisiä ruostumattomia teräksiä, koska niillä on parempi hapettumisen ja korroosionkesto, kuin ferriittisellä tai martensiittisellä teräksellä. Yleinen austeniittinen ruostumaton teräs on AISI 304, joka sisältää 18 % kromia ja 8 % nikkeliä. Tämän materiaalin virumislujuutta voidaan parantaa stabiloimalla tai lisäämällä niobiumia ja kuparia. AISI- teräslaadut 304, 310, 316, 321 ja 347 sekä niiden modifikaatioita voidaan käyttää 760 °C lämpötilaan asti. Fossiilisten polttoaineiden kattiloiden lämpöpinnoissa käytetään TP304H, TP321H, TP316H ja TP347H materiaaleja. TP347H- materiaalista on kehitetty TP347HFG- materiaali, jolla on parempi hapettumisen ja korroosion kesto. Lämpöpintojen putkissa käytettävien austeniittisten ruostumattomien terästen kemiallinen koostumus on esitetty taulukossa 9. (Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 92- 93.)

*Taulukko 9. Lämpöpintojen putkissa käytettävien austeniittisten ruostumattomien terästen kemiallinen koostumus (mukaillen Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 93).*

<b>Teräslaatu</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>V</b>	<b>Nb</b>	<b>N</b>	<b>Muut</b>
AISI 304	0,08	1,0	2,0	18,0	8,0	...	...	...	...	...
Super 304H	0,10	0,2	0,8	18,0	9,0	...	...	0,4	0,10N	3,0Cu
AISI 310	0,25	1,5	2,0	24,0	19,0	...	...	...	...	...
AISI 316	0,08	1,0	2,0	17,0	12,0	2,5	...	...	...	...
TP316H	0,08	0,6	1,6	16,0	12,0	2,5	...	...	...	...
AISI 321	0,09	1,0	2,0	17,0	11,0	...	...	...	...	0,15Ti
TP321H	0,08	0,6	1,6	18,0	10,0	...	...	...	...	0,5Ti
TP347H	0,08	0,6	1,6	18,0	10,0	...	...	0,8	...	...
TP347 HFG	0,08	0,6	1,6	18,0	10,0	...	...	0,8	...	...
Tempaloy A-1	0,12	0,6	1,6	18,0	10,0	...	...	0,1	...	0,08Ti
Esshete 1250	0,12	0,5	6,0	15,0	10,0	1,0	1,0	...	...	0,2W, 0,06Ti
Tempaloy A-2	0,12	0,6	1,6	18,0	14,0	1,6	...	0,24	...	0,1Ti

Austeniittisiä kuumankestäviä teräksiä käytetään olosuhteissa, joissa lämpötila nousee 815 °C asti. Austeniittisellä kuumankestäväällä teräksellä on suurempi kromi- ja nikkelpitoisuus, kuin taulukon 9 austeniittisillä teräksillä. Suuren kromi- ja nikkelpitoisuuden vuoksi austeniittisillä kuumankestävillä teräksillä on hyvä lujuus, korroosio- ja hapettumiskestävyys korkeissa lämpötiloissa. Taulukossa 10 on esitetty austeniittisten kuumankestävien teräksien kemiallinen koostumus. (Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 93.)

*Taulukko 10. Austeniittisten kuumankestävien teräksien kemiallinen koostumus (mukaillen Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 94).*

<b>Teräslaatu</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>Ti</b>	<b>Nb</b>	<b>Muut</b>
TP310	0,08	0,6	1,6	25,0	20,0	...	...	...	...
TP310NbN	0,06	0,4	1,2	25,0	20,0	...	...	0,45	0,2N
NF 707	0,08	0,5	1,0	21,0	35,0	1,5	0,1	0,2	...
NF 709	0,15	0,5	1,0	20,0	25,0	1,5	0,1	0,2	...
HR3C	0,06	0,4	1,2	25,0	20,0	...	...	0,45	0,2N
SAVE 25	0,1	0,1	1,0	23,0	18,0	...	...	0,45	1,5W, 3,0Cu, 0,2N
Tempaloy A-3	0,05	0,4	1,5	22,0	15,0	...	...	0,7	0,15N, 0,002B
Incoloy 800H	0,08	0,5	1,2	21,0	32,0	...	0,5	...	0,4Al

Yleisesti austeniittiset ruostumattomat teräkset ovat kalliimpia, kuin ferriittiset teräkset johtuen korkeasta kromi- ja nikkelpitoisuudesta. Austeniittisellä ruostumattomalla

teräksellä on taipumusta hapettua höyryssä ja se on ferriittistä terästä herkempi jännityskorroosiolle. Lisäksi austeniittisella ruostumattomalla teräksellä on suurempi lämpölaajeneminen ja huonompi lämmönjohtavuus, kuin ferriittisellä teräksellä. (Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 93.)

### 6.3.3 Ferriittinen ruostumaton teräs

Ferriittinen ruostumaton teräs sisältää 11- 27 % kromia. Muita seosaineita ovat molybdeeni, alumiini, niobi, tai titaani. Nikkeliä on vähäinen määrä tai ei ollenkaan riippuen teräslaadusta. Taulukossa 11 on esitetty ferriittisten ruostumattomien terästen kemiallinen koostumus. Ferriittinen mikrorakenne säilyy kaikissa lämpötiloissa, joten niiden kovuutta ei voi muuttaa lämpökäsittelyllä. Ferriittinen ruostumaton teräs on magneettinen ja sen muovattavuus on rajoitettua, mutta niitä voidaan hitsata ohuilla vahvuuksilla. Ferriittiset ruostumattomat teräkset kestävät hyvin korkean lämpötilan hapettumista ja korroosiota, joten niitä käytetään höyryturbiinin osissa ja uuneissa. (Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 57- 58.)

*Taulukko 11. Ferriittisten ruostumattomien terästen kemiallinen koostumus (mukailten (Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 57).*

Teräslaatu	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	Muut
AISI 405	0.08	1.00	1.00	11.50–14.50	0.60	...	0.030	0.040	0.10–0.30Al
AISI 409	0.08	1.00	1.00	10.50–11.75	0.50	...	0.045	0.045	6x%C–0.75 max Ti
AISI 430	0.12	1.00	1.00	16.00–18.00	0.75	...	0.030	0.040	...
AISI 436	0.12	1.00	1.00	16.00–18.00	...	0.75–1.25	0.030	0.040	5x%C–0.70 max Nb + Ta
AISI 442	0.20	1.00	1.00	18.00–23.00	0.60	...	0.030	0.040	...
AISI 446	0.20	1.50	1.00	23.00–27.00	0.75	...	0.030	0.040	0.25N

### 6.3.4 Martensiittinen ruostumaton teräs

Martensiittisen ruostumattoman teräksen koostumus on samanlainen, kuin ferriittisen, mutta martensiittisellä on korkeampia hiilipitoisuus ja alhaisempi kromipitoisuus. Taulukossa 12 on esitetty martensiittisten ruostumattomien terästen kemiallinen koostumus. Martensiittisiä ruostumattomia teräksiä voidaan lämpökäsittellä kovuus- ja lujuusominaisuuksien muuttamiseksi. Martensiittinen ruostumaton teräs on magneettinen ja ne ovat lujempia, kuin austeniittinen tai ferriittinen ruostumaton teräs korkeamman hiilipitoisuuden takia ja

martensiittisen mikrorakenteen vuoksi. Suuren hiilipitoisuuden vuoksi niillä on huonot hitsaus- ja muovattavuusominaisuudet. Martensiittisiä ruostumattomia teräksiä käytetään höyryturbiinin roottorisiivissä ja korkean lämpötilan osissa. (Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 58- 60.)

*Taulukko 12. Martensiittisten ruostumattomien terästen kemiallinen koostumus (mukaillen (Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 59).*

Teräslaatu	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	Muut
AISI 403	0.15	0.50	1.00	11.50–13.00	...	...	0.030	0.040	...
AISI 410	0.15	1.00	1.00	11.50–13.50	...	...	0.030	0.040	...
AISI 416	0.15	1.00	1.25	12.00–14.00	...	0.60	0.15 min.	0.060	...
AISI 420	0.15 min	1.00	1.00	12.00–14.00	...	...	0.030	0.040	...
AISI 422	0.20–0.25	0.75	1.00	11.50–13.50	0.50–1.00	0.75–1.25	0.030	0.040	0.15–0.30V, 0.75–1.25W
AISI 431	0.20	1.00	1.00	15.00–17.00	1.25–2.50	...	0.030	0.040	...
AISI 440A	0.60–0.75	1.00	1.00	16.00–18.00	0.75	...	0.030	0.040	...
AISI 440B	0.75–0.95	1.00	1.00	16.30–18.00	0.75	...	0.030	0.040	...
AISI 440C	0.95–1.20	1.00	1.00	16.30–18.00	0.75	...	0.030	0.040	...

### 6.3.5 Erkautuskarkenevat ruostumattomat teräkset

Erkautuskarkenevat ruostumattomat teräkset ovat rauta- nikkeli- kromi- seosteisia, joiden kolme päätyyppiä ovat martensiittinen, semi- austeniittinen ja austeniittinen. Lämpökäsittelyllä voidaan parantaa lujuusominaisuuksia. Taulukossa 13 on esitetty erkautuskarkenevien ruostumattomien terästen kemiallinen koostumus. (Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 60.)

*Taulukko 13. Erkautuskarkenevien ruostumattomien terästen kemiallinen koostumus (mukaillen Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 60).*

Teräslaatu	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	Muut
<b>Martensiittinen</b>									
PH13-8Mo	0.05	0.10	0.10	12.25–13.25	7.5–8.5	2.0–2.5	0.008	0.01	0.90–1.35Al, 0.01N
15-5PH	0.07	1.00	1.00	14.00–15.5	3.5– 5.5	...	0.03	0.04	2.5–4.5Cu, 0.15–0.45Nb
17-4PH	0.07	1.00	1.00	15.0–17.5	3.0–5.0	...	0.03	0.04	3.0–5.0Cu, 0.15–0.45Nb
<b>Semi- austeniittinen</b>									
PH15-7Mo	0.09	1.00	1.00	14.5–16.0	6.5–7.75	2.0–3.0	0.04	0.04	0.75–1.5Al
17-7PH	0.09	1.00	1.00	16.0–18.0	6.5–7.75	...	0.04	0.04	0.75–1.5Al
<b>Austeniittinen</b>									
A-286	0.08	1.00	2.00	13.5–16.0	24.0–27.0	1.0–1.5	0.025	0.025	1.90–2.35Ti, 0.35max. Al, 0.10–0.50V, 0.003–0.010B

### 6.3.6 Duplex- ruostumattomat teräkset

Duplex- ruostumattomissa teräksissä yhdistyy ferriittisen ja austeniittisen teräksen ominaisuudet. Ne sisältävät 20- 25 % kromia ja 6- 8 % nikkeliä. Duplex- ruostumattomilla teräksillä on hyvä korroosionkesto ja erinomaiset mekaaniset ominaisuudet. Taulukossa 14 on esitetty Duplex- ruostumattomien teräksien kemiallinen koostumus. (Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 60.)

*Taulukko 14. Duplex- ruostumattomien terästen kemiallinen koostumus (mukailten Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 60).*

Teräslaatu	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	Muut
44LN	0.03	1.00	2.00	24.0-26.0	5.50-6.50	1.20-2.00	0.03	0.045	0.14-0.20N
SAF 2304	0.03	1.00	2.50	21.5-24.0	3.03-5.5	0.05-0.6	0.04	0.04	0.05-0.20N
2205	0.03	1.00	2.00	21.0-23.0	4.50-6.50	2.5-3.5	0.02	0.03	0.08-0.20N
2507	0.03	0.80	2.00	24.0-26.0	6.0-8.0	3.0-5.0	0.02	0.03	0.24-0.32N
Ferrallium 255	0.04	1.00	1.50	24.0-27.0	4.50-6.50	2.0-4.0	0.02	0.03	1.5-2.5Cu, 0.1-0.25N
DP-3	0.03	0.75	1.00	24.0-26.0	5.50-7.50	2.50-3.50	0.03	0.03	0.2-0.8Cu, 0.10-0.30N, 0.1-0.5W

### 6.3.7 Superseostetut teräkset

Kattilassa, jonka höyryn lämpötila on 700 °C, käytetään lämpöpintojen materiaaleina superseostettuja teräksiä. Niillä on korkea kromi- ja nikkelipitoisuus. Muita seosaineita ovat molybdeeni, volframi ja koboltti. Nikkelipohjaisilla superseostetuilla teräksillä on taulukon 10 austeniittisiä kuumankestäviä teräksiä suurempi kromipitoisuus, jolloin niillä on parempi korroosionkesto. Niillä on myös korkeampi lujuus korkeissa lämpötiloissa. Superseostetun teräksen lujuutta voidaan parantaa erkautuskarkaisulla ja ikääntymisprosessilla käyttämällä alumiinia, titaania ja niobiumia. Taulukossa 15 on esitetty superseostettujen terästen kemiallinen koostumus. (Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 94.)

Taulukko 15. Superseostettujen terästen kemiallinen koostumus (mukaillen Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 95).

Teräslaatu	C	Si	Mn	Cr	Ni	Co	Mo	Nb	Fe	Muut
HR6W	0.08	0.4	1.2	23.0	43.0	...	...	0.18	bal	6.0W, 0.08 Ti, 0.003 B
CR30A	0.06	0.3	0.2	30.0	50.0	...	2.0	...	bal	0.2 Ti, 0.03 Zr
Inconel 617	0.07	0.4	0.4	22.0	54.0	12.5	8.5	...	1.5	1.2 Al, 0.3Ti, 0.2Cu
Inconel 671	0.05	...	...	48.0	51.5	...	...	...	...	Ti 0.35
Inconel 718	0.04	...	...	18.0	bal	...	3.0	...	18.5	Cb 5.1
Inconel 740	0.03	0.5	0.3	25.0	bal	20.0	0.5	...	...	0.9Al, 0.7Fe, 2.0Nb/Ta
Incoloy 800H	0.08	0.5	1.2	21.0	32.0	...	...	0.3	bal	0.5Ti, 0.4Al
Haynes 230	0.1	0.4	0.5	22.0	bal	5.0	2.0	...	3.0	14.0W, 0.3Al, 0.005B, 0.02La
Sanicro 25	0.08	0.2	0.5	22.0	25.0	...	...	0.3	bal	3.0W, 3.0Cu, 0.2N
Nimonic 263	0.06	0.4	0.6	20.0	bal	20.0	5.9	...	7.0	2.2Ti, 2.6Al, 0.005B, 0.2Cu

Inconel 617-, Inconel 671-, Inconel 718- ja HR6W- materiaalit ovat tyypillisiä kattilassa käytettävistä materiaaleista. Haynes 230-, Inconel 740- ja CCA 617- materiaaleja käytetään kammioissa, putkissa ja tulistimissa. Höyryn lämpötilan ylittäessä 700 °C superseostettujen ja muiden kuumankestävien terästen lujuusominaisuudet eivät ole riittävät, jolloin käytetään oksididispersiovahvisteisia (ODS) seostettuja teräksiä, joilla on hyvä virumiskestävyys 1000 °C lämpötilaan asti. Taulukossa 16 on esitetty ODS- terästen kemiallinen koostumus, jossa Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on yttriumoksidi ja Fe on rauta. (Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 94.)

Taulukko 16. ODS- materiaalien kemiallinen koostumus (mukaillen Haribhakti, Joshi & Kumar 2018, s. 95).

Teräslaatu	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	Ti	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe/Ni
ODS 10CrTiY <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.065–0.12	...	...	9–13	...	2	0.12–0.22	0.8–0.35	bal
ODS 12CrTiY <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.05	...	...	12.3	...	0–3	0.0–0.39	0.24–0.25	bal

## 7 TYYPPIHAPPOTEHTAAN JÄTELÄMPÖKATTILA

Yara Siilinjärven typpihappotehtaan kattila on otettu käyttöön vuonna 1972. Kattila on tyypiltään pystymallinen La Mont- jätelämpökattila, jonka vesi- höyrypiiri on pakkokiertoineen. Jätelämpökattila jäähdyttää NO<sub>x</sub>- kaasua siirtäen lämpöä vesi- höyrypiiriin, jolloin muodostuu korkeapainehöyryä, joka muunnetaan sähköksi voimalaitoksen höyryturbiineilla.

### 7.1 Jätelämpökattilan historia

Taulukossa 17 on esitetty jätelämpökattilan alkuperäiset suunnittelu- ja nykyiset käyttöarvot typpihappotehtaan maksimituotannolla. Vuosikymmenten aikana on tehty monia muutoksia typpihappoprosessiin ja jätelämpökattilaan. Polttoon syötettävän ammoniakki- ilmaseoksen määrää on kasvatettu lisäämällä kaksi lisäilmakompressoria ja nostamalla pääkompressorin kapasiteettia. Jätelämpökattilan tulistimeen ja 2.höyrytimeen on lisätty lämmönsiirtopinta- alaa. Lisäksi on lisätty erillinen ekonomaiseri lämmittämään syöttövertä ennen höyrylieriötä.

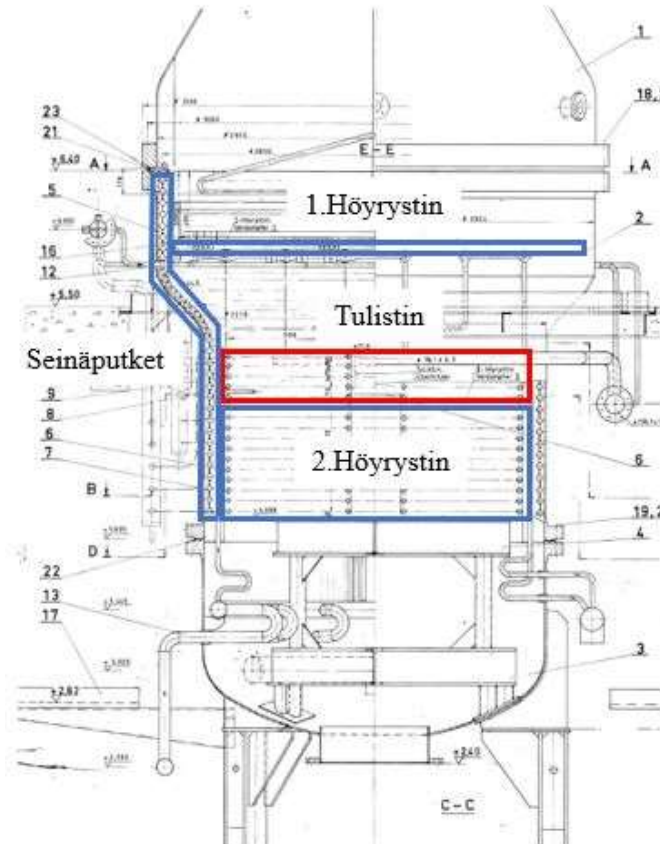
*Taulukko 17. Jätelämpökattilan alkuperäiset suunnittelu- ja nykyiset käyttöarvot maksimituotannolla.*

Prosessiarvot	Polttoon syötettävän ammoniakki-ilmaseoksen määrä [Nm <sup>3</sup> /h]	NO <sub>x</sub> - kaasun lämpötila ennen jätelämpökattilaa [°C]	NO <sub>x</sub> - kaasun lämpötila jätelämpökattilan jälkeen [°C]	Korkeapainehöyryn kehitys [t/h]
Alkuperäiset suunnittelu- arvot	37840	880	410	9,1
Nykyiset käyttöarvot	62300	892	462	17,9

### 7.2 Jätelämpökattila rakenne

Kuvassa 19 on esitetty jätelämpökattilan rakenne. Ylhäältä alaspäin virtaa ammoniakki-ilmaseos, joka poltetaan katalyytin avulla 1. höyrytimeen yläpuolella. Katalyyttisessä

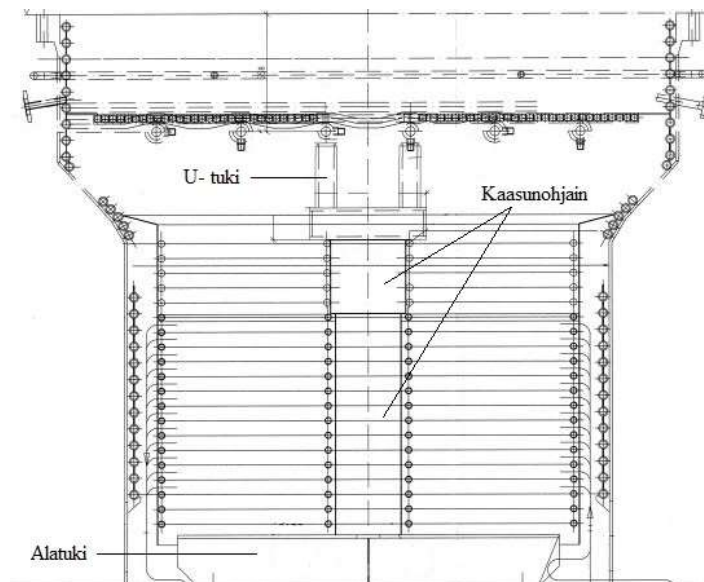
poltossa muodostunut  $\text{NO}_x$ - kaasu virtaa alaspäin läpi jätelämpökattilan luovuttaen lämpöenergiaa vesi- höyrypiiriin.



**Kuva 19.** Jätelämpökattilan rakenne.

Jätelämpökattilan yläosan muodostaa poltinosan kansi, jonka sisällä on virtauspellit, jotka ohjaavat ammoniakki- ilmaseoksen tasaisesti polttoon. Kansi on kiinnitetty laippaliitoksella jätelämpökattilan vaipan laippaan, jolloin se on helppo poistaa huoltotöitä varten. Kannen alapuolella ja 1. höyrystimen välissä sijaitsee poltinosan eli verkkokori. Verkkokori koostuu kaasun ohjauspelleistä, platinaverkoista, ilokaasukatalyytistä ja talteenottoverkoista. Verkkokorin laippa on kannen ja jätelämpökattilan laippaliitoksen välissä. Lisäksi 1. höyrystin tukee sitä alhaalta päin. Verkkokorin materiaali on austeniittinen superseostettu 1.4876H (Incoloy 800H), jonka kemiallinen koostumus on esitetty taulukossa 15. 1.höyrystimen alapuolella on tulistin ja sen jälkeen 2. höyrystin. Jätelämpökattilan lieriön muotoisen vaipan sisäpuolella kiertää seinäputket, jotka toimivat höyrystimenä.

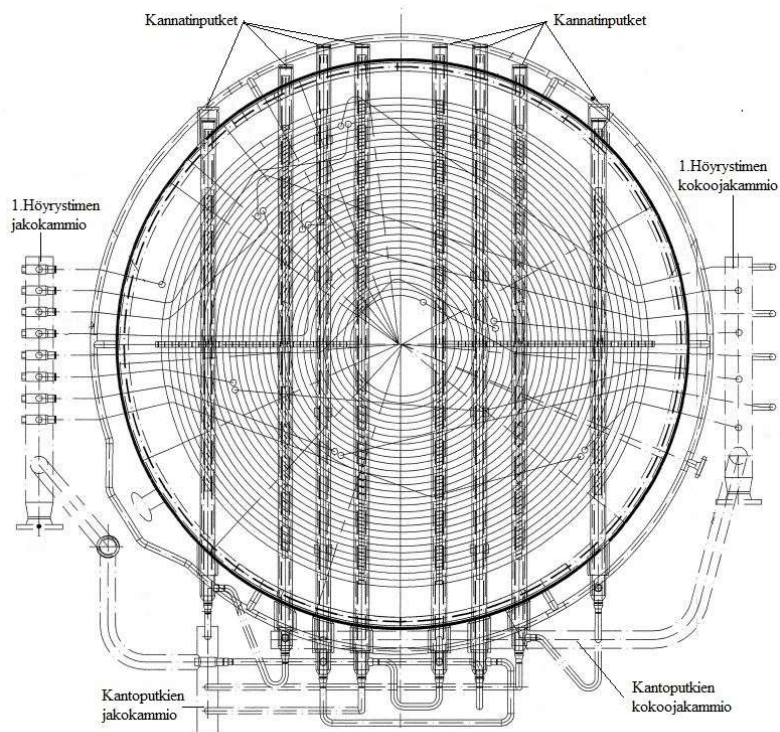
Jätelämpökattila on tuettu alhaalta neljällä pystysuuntaisella tukijalalla (kuva 19). Kuvassa 20 on esitetty jätelämpökattilan sisäpuoliset tuet. Jätelämpökattilan sisäpuolella on tukirakenne, joka kantaa 2. höyrystimen ja tulistimen massat. 2. höyrystimen ja tulistimen lämmönsiirtopintojen keskellä on lieriön muotoinen kaasunohjain, joka on myös tuettu jätelämpökattilan alaosassa olevaan tukirakenteeseen. Kaasunohjain tukee sen yläpuolella olevaa U- tukea, joka tukee keskimmäisiä kannatuspalkkeja ja 1. höyrystintä.



**Kuva 20.** Jätelämpökattilan sisäpuoliset tuet.

### 7.2.1.1. Höyrystin

Kuvassa 21 on esitetty 1.höyrystin ja kannatinputket jako- ja kokoojakammioineen. 1.höyrystin on yhdessä tasossa sijaitseva spiraalimainen lämmönsiirtopinta. Jako- ja kokoojakammiot ovat jätelämpökattilan ulkopuolella. 1.höyrystin jäähdyttää NO<sub>x</sub>- kaasua ennen tulistinta. Lisäksi se tukee verkkokorin pohjaa. 1.höyrystimen alapuolella on kahdeksan jäähdytettyä kannatinputkea, jotka kantavat 1.höyrystimen ja verkkokorin massat. Kannatinputket toimivat myös höyrystimenä. 1. höyrystimen lämmönsiirtopinta- ala on 14 m<sup>2</sup> ja kannatusputkien 4, 5 m<sup>2</sup>.



**Kuva 21.** Jätelämpökattilan 1. höyrystin ja kannatinputket sekä jako- ja kokoojakammiot.

Kylläinen vesi virtaa höyrylieriöstä kiertovesipumpun tuottamalla paineella 1. höyrystimen jakokammioon, josta se virtaa edelleen 1. höyrystimeen kahdeksan rinnakkaisen putken kautta eli 1. höyrystimessä on kahdeksan erillistä kiertoa. Tasainen virtaus rinnakkaisiin putkiin varmistetaan La Mont- suuttimien avulla, jotka kuristavat virtauksen sopivaksi jokaiseen putkeen. Mikäli vesi virtaa johonkin putkeen vähemmän niin putki voi rikkoontua ylikuumentumisen seurauksena. La Mont- suuttimen rakenne on esitetty liitteessä II. Kylläinen vesi höyrystyy osittain 1. höyrystimessä ja muodostunut vesi- höyryseos virtaa kokoojakammioon ja edelleen höyrylieriöön. 1. höyrystimen jakokammioista johdetaan kyläinen vesi myös kannatusputkien jakokammioon ja edelleen kannatusputkiin La Mont- suuttimien kautta. Kannatusputkissa muodostunut vesi- höyryseos johdetaan kannatusputkien kokoojakammioon ja edelleen 1. höyrystimen kokoojakammioon.

1. höyrystimen jakokammion halkaisija on 114,3 mm ja seinämän paksuus 14 mm ( $\text{Ø}114,3 \times 14$  mm). Materiaali on seostamaton kuumankestävä P235GH, jonka kemiallinen koostumus on esitetty liitteessä III. Kokoojakammion koko on  $\text{Ø}139,7 \times 11$  mm ja materiaali on P235GH. 1. höyrystimen putkien koko on  $\text{Ø}31 \times 4$  mm ja materiaali on matalaseosteinen

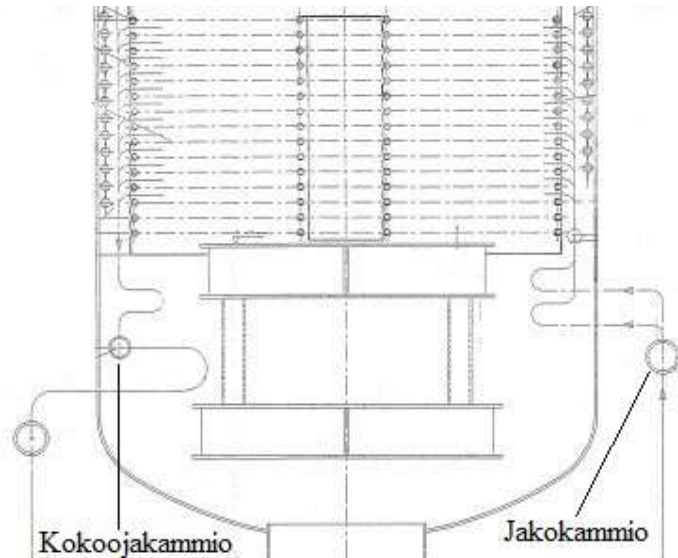
kuumankestävä 16Mo3, jonka kemiallinen koostumus on esitetty liitteessä III. Kannatusputkien koko on Ø76,1 x 8 ja materiaali on 16Mo3. Kannatusputkien jakokammion koko on Ø108 x 14,2 mm ja materiaali on P265GH, jonka kemiallinen koostumus on esitetty liitteessä III. Kokoojakammion koko on Ø76,1 x 6,3 mm ja materiaali on P265GH. Jäähdyttämättömien osien kuten side- ja tukirakenteiden materiaalia on ferriittinen ruostumaton terästä 1.4724 (AISI 405), jonka kemiallinen koostumus on esitetty taulukossa 11.

### 7.2.2 Tulistin

Tulistin koostuu viidestä päällekkäisistä spiraalimaisista lämmönsiirtopinnoista. Tulistimen jako- ja kokoojakammiot ovat jätelämpökattilan sisällä. Kylläinen höyry virtaa höyrylieriöstä jakokammioon, josta se jakautuu 14 erillisen putken kautta lämmönsiirtopinnoille, joissa kylläinen höyry tulistuu. Tulistettu höyry voidaan johtaa suoraan voimalaitokselle tai höyrylieriössä olevan välijäähdyttäjän kautta voimalaitokselle. Jakokammion koko on Ø101,6 x 8 mm ja materiaali on matalaseosteinen kuumankestävä 16Mo3. Tulistimen putkien koko on Ø31,8 x 3,8 ja materiaali on matalaseosteinen kuumankestävä 10CrMo9-10 teräs, jonka kemiallinen koostumus on esitetty taulukossa 6. Kokoojakammion koko on Ø108 x 12,5 mm ja materiaali on 10CrMo9-10. Putkien sidepalojen materiaali on matalaseosteinen kuumankestävä 13CrMo44, jonka kemiallinen koostumus on esitetty taulukossa 6. Tulistimen lämmönsiirtopinta-ala on 45 m<sup>2</sup>.

### 7.2.3.2. Höyrystin

Kuvassa 22 on esitetty 2. höyrystin, joka koostuu 15 päällekkäisestä spiraalimaisista lämmönsiirtopinnoista. 2. höyrystimen jakokammio sijaitsee jätelämpökattilan ulkopuolella ja kokoojakammio sisäpuolella. Kylläinen vesi virtaa höyrylieriöstä kiertovesipumpun tuottamalla paineella 2. höyrystimen jakokammioon, josta se virtaa edelleen 2. höyrystimeen 63 rinnakkaisen putken kautta. Kolme ylintä lämmönsiirtotasoa on kukin toteutettu viidellä kierrolla ja loput 12 lämmönsiirtotasoa on kukin toteutettu neljällä kierrolla. Tasainen virtaus rinnakkaisiin putkiin varmistetaan kuristimilla, jotka kuristavat virtauksen sopivaksi jokaiseen putkeen. Kylläinen vesi höyrystyy osittain 2. höyrystimessä ja muodostunut vesi-höyryseos virtaa kokoojakammioon ja edelleen höyrylieriöön.

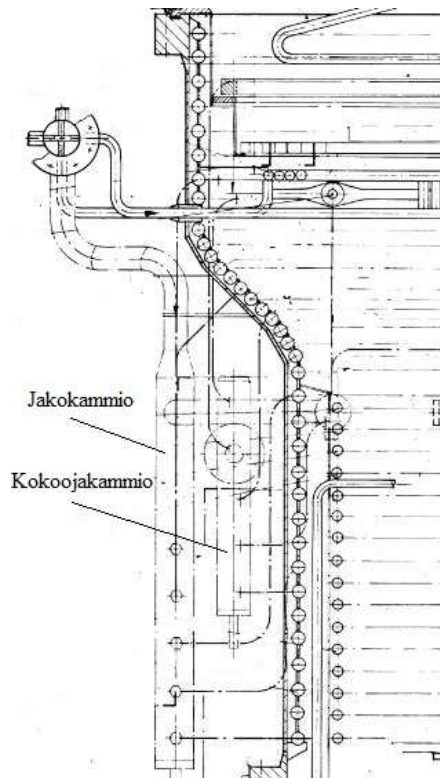


**Kuva 22.** Jätelämpökattilan 2. höyrystin jako- ja kokoojakammioineen.

2. höyrystimen jakokammion koko on  $\text{Ø}159 \times 12,5$  mm ja materiaali on P265GH. 2. höyrystimen putkien koko on  $\text{Ø}31,8 \times 3,2$  ja materiaali on P235GH. Kokoojakammion koko on  $\text{Ø}101,6 \times 8$  ja materiaali on 16Mo3. 2. höyrystimen lämmönsiirtopinta-ala on  $145 \text{ m}^2$ . 2. höyrystimen side- ja tukirakenteiden materiaalit ovat 1.4724, 13CrMo44 ja 1.4828 (AISI 309), joka on lämmönkestävä austeniittinen ruostumaton teräs. 1.4828- materiaalin kemiallinen koostumus on esitetty taulukossa 8.

#### 7.2.4 Seinäputket

Kuvassa 23 on esitetty jätelämpökattilan seinäputket, jotka kiertävät vaipan sisäpinnalla. Seinäputkia on 36 kierrosta. Seinäputkien väliin on hitsattu teräslevyt, jolloin ne yhdessä muodostavat kaasutiiviin seinän. Seinäputket suojaavat vaippaa ja samalla toimivat höyrystimenä. Seinäputkien jako- ja kokoojakammiot ovat jätelämpökattilan ulkopuolella. Kylläinen vesi virtaa höyrylieriöstä kiertovesipumpun tuottamalla paineella seinäputkien jakokammioon, josta se virtaa edelleen seinäputkiin viiden rinnakkaisen putken kautta. Tasainen virtaus rinnakkaisiin putkiin varmistetaan La Mont- suuttimien avulla, jotka kuristavat virtauksen sopivaksi jokaiseen putkeen. Kylläinen vesi höyrystyy osittain seinäputkissa ja muodostunut vesi- höyryseos virtaa kokoojakammioon ja edelleen höyrylieriöön.



**Kuva 23.** Jätelämpökattilan seinäputket jako- ja kokoojakammioineen.

Seinäputkien jakokammion koko on  $\text{Ø}108 \times 14,2$  mm ja materiaali on P265GH. Seinäputkien koko on  $\text{Ø}44 \times 3,2$  mm ja materiaali on P265GH. Kokoojakammion koko on  $\text{Ø}101,6 \times 8,8$  mm ja materiaali on P235GH. Seinäputkien väliset teräslevyjien materiaali on 1.4724. Seinäputkien lämmönsiirtopinta- ala on  $18 \text{ m}^2$ .

### 7.2.5 Vaippa

Jätelämpökattilan yläosan vaipan halkaisija on 2943 mm. Vaipan halkaisija pienenee kartiosan avulla ennen tulistinta ja jatkuu saman kokoisena alas asti. Vaipan halkaisija tässä osassa on 2300 mm. Seinäputkien kohdalla vaipan materiaali on 16Mo3 ja paksuus 12 mm. Jätelämpökattilan alaosassa, jossa ei ole jäähdyttäviä lämpöpintoja, vaipan materiaali on austeniittinen kuumankestävä ruostumaton teräs 1.4550 (AISI 347), jonka kemiallinen koostumus on esitetty taulukossa 8. Vaipan paksuus on 12 mm.

## 8 INVESTOINNIN LASKELMAT

Investoinnit voidaan jakaa reaali- ja rahoitusinvestoinniksi. Reaali- investointi voi olla uusintainvestointi, jolla hankitaan koneita ja laitteita tai pakollinen investointi, jotta täytetään esimerkiksi lakien vaateet. Rahoitusinvestoinnissa sijoitetaan arvopapereihin. (Neilimo & Uusi- Rauva 2007, s. 207, 210.)

Investoinnin laskelmilla selvitetään investoinnin edullisuus pitoajalla, jolloin ne ohjaavat investoinnin kannattavuuden parantamiseen. Pitoajalla tarkoitetaan investoinnin käyttöaika. Pitoaika on esimerkiksi laitteen ajanjakso, jolla se on käyttökelpoinen minkä jälkeen markkinoille tulee mahdollisesti parempi laite. Pitoajat ovat yleensä erilaisia eri hyödykkeillä. Laskelmiin tarvitaan lähtötiedot perushankintakustannuksista, jatkuvasti syntyvistä tuotoista ja kustannuksista, laskentakorkokannasta, pitoajasta ja jäännösarvosta. (Neilimo & Uusi- Rauva 2007, s. 213- 214, 217.)

Perushankintakustannus koostuu käyttöpääomainvestoinnista tai käyttöomaisuusinvestoinnista. Käyttöpääomainvestoinnissa sidotaan pääomaa lyhytaikaisiin tuotantotekijöihin kuten varastoihin. Käyttöomaisuusinvestoinnissa lasketaan kaikki kustannukset kuten suunnittelu- ja tuotekehityskustannukset. Jatkuvasti syntyviä tuottoja ja kustannuksia tarkastellaan vuositasolla yhdessä. Nettotuotto eli käyttökate on jatkuvasti syntyvien tuottojen ja kustannusten erotus. Tuottojen arviointi on yleensä vaikeampaa kuin kustannusten. Laskelmissa tuotot ja kustannukset oletetaan tapahtuvan vuoden lopussa laskennan yksinkertaistamiseksi. Investoinnin rahoitus voidaan hoitaa esimerkiksi osakepääoman korotuksella tai tulorahoituksella. Näiden kannattavuusvertailussa käytetään laskentakorkokantaa, jolloin se on myös minimituottovaatimus, joka pitää saavuttaa. Investoinnin tuotot ja kustannukset ajoittuvat useille vuosille, jolloin laskentakorolla saadaan eri aikoina tapahtuvat suoritukset vertailukelpoisiksi. Jäännösarvolla tarkoitetaan investoinnin myyntituloa pitoajan jälkeen. Jäännösarvo on yleensä nolla, koska myyntitulon arvoa on vaikea ennustaa pitkän ajan päähän. Jäännösarvo voi olla myös negatiivinen, jolloin joudutaan maksamaan esimerkiksi investoinnilla hankitun laitteen hävityksestä. (Neilimo & Uusi- Rauva 2007, s. 214- 218.)

Yleisimmät laskentamenetelmät ovat (Neilimo & Uusi- Rauva 2007, s. 213):

- 1) Investoinnin tuottoaste
- 2) Takaisinmaksuajan menetelmä
- 3) Sisäisen korkokannan menetelmä
- 4) Annuiteettimenetelmä
- 5) Nykyarvomenetelmä

Yksinkertaisiin laskentamenetelmiin kuuluvat investoinnin tuottoaste ja takaisinmaksuajan menetelmä. Peruslaskentamenetelmiin kuuluvat sisäisen korkokannan menetelmä, annuiteettimenetelmä ja nykyarvomenetelmä. Investoinnin tuottoaste saadaan jakamalla keskimääräinen nettotuotto keskimääräisellä investoinnilla. Suoritusten eriaikaisuus jätetään pois, jonka tilalle otetaan investoinnin poistot, jotka voidaan laskea vähentämällä perushankintakustannuksesta jäännösarvo ja jakamalla pitoajalla. Keskimääräinen investointi saadaan jakamalla kahdella perushankintakustannuksen ja jäännösarvon summa. Tällä menetelmällä saa riittävän tarkat tulokset varsinkin jos lähtötiedot ovat puutteelliset. (Neilimo & Uusi- Rauva 2007, s. 214, 222.)

Takaisinmaksuajan menetelmässä investoinnin hankintameno jaetaan vuosituotolla, jolloin saadaan takaisinmaksuaika. Vuosituoton vaihdelleessa lasketaan vuosituotot yhteen siihen asti, että saavutetaan hankintamenot. Tämä ei ota huomioon laskentakorkoa. Mikäli laskentakorko halutaan huomioida käytetään diskonttaustekijää, jolloin vuosituotot ovat ensin diskontattava investointiajankohtaan, jonka jälkeen selvitetään kuinka monen vuoden diskontatut vuosituotot tarvitaan hankintamenojen kattamiseksi. Diskonttauksella tarkoitetaan korkolaskennan käänteistä tapahtumaa. Tämä menetelmä sopii investoinneille, joissa hankintamenot saadaan nopeasti takaisin. (Neilimo & Uusi- Rauva 2007, s. 218, 223.)

Sisäisen korkokannan menetelmällä selvitetään investoinnin korkokanta, jonka arvolla laskettuna investoinnin nettotuottojen nykyarvo on nolla. Edullisimmalla investointivaihtoehdolla sisäinen korkokanta on suurin. Sisäisen korkokannan ratkaiseminen on yleensä vaikeata, joten helpompi vaihtoehto selvittää korkokanta on kokeilemalla. (Neilimo & Uusi- Rauva 2007, s. 221.)

Annuiteettimenetelmässä hankintamenot jaetaan samansuuruisiksi pääomakustannuksiksi pitoajan mukaan. Annuiteettimenetelmän mukaan investointi on edullinen, jos nettotuotot ovat vähintään yhtä suuret kuin pääomakustannukset. Annuiteetti on hankintamenon ja annuiteettitekijän tulo. Nykyarvomenetelmä on käänteinen annuiteettimenetelmälle, jossa tuotot ja kulut diskontataan nykyhetkeen korkokannalla laskettuna. Nykyarvomenetelmällä investointi on kannattava mikäli nettotuotto on suurempi kuin perusinvestointi. Nykyarvomenetelmän mukaan edullisimmalla investointivaihtoehdolla netto nykyarvo on suurin. (Neilimo & Uusi-Rauva 2007, s. 218- 220.)

Investointilaskelmiin liittyy epävarmuutta, koska ne perustuvat arvioon tulevaisuudesta. Epävarmuuden selvittämiseksi investointilaskelma voidaan analysoida herkkyysoanalyysillä, jossa seurataan kannattavuutta muuttamalla yhtä tai useampaa muuttujaa. Jokaisen muutoksen jälkeen tutkitaan sen vaikutus kannattavuuteen. Kun jokaista muuttujaa on muutettu saadaan selville niiden vaikutus investoinnin kannattavuuteen, jonka jälkeen keskitytään vain eniten vaikuttaviin. (Neilimo & Uusi-Rauva 2007, s. 224- 225.)

## 9 LASKENTA JA MUUTOSTYÖT

Jätelämpökattilan kapasiteetin laskentaan luotiin laskentasovellus Excel- laskentataulukko-ohjelmistolla. Liitteessä IV on esitetty laskentasovelluksen etusivu. Liitteessä V on esitetty laskennan yhtälöt. Taulukossa 18 on esitetty arvot, joita on käytetty jätelämpökattilan nykyisen kapasiteetin määrittämiseen. Entalpiat on määritetty X Steam Tables-sovelluksella, joka pohjautuu veden ja höyryn  $h-s$ - kuvaajaan. Lämmönsiirtokerroimien,  $\text{NO}_x$ - kaasun tiheyden ja ominaislämpökapasiteetin arvot on saatu seurantatieto- osiosta. Taulukon 18 muut arvot ovat keskiarvoja automaatiojärjestelmän mittauksista typpihappotehtaan päivätuotantoennätyksen ajalta. Laskentaa varten selvitettiin jätelämpökattilan rakenne ja lämpöpinta- alat, jotka ovat esitetty luvussa 7.

Taulukko 18. Lähtötiedot laskentaosioon.

Lähtötieto	Arvo
Kiertoveden paine höyrystimeen [bar (a)]	77,0
Syöttöveden lämpötila ennen kattilaa [°C]	286,0
Kylläisen höyryn paine [bar (a)]	71,8
Kylläisen höyryn lämpötila [°C]	286,0
Tulistetun höyryn paine [bar (a)]	61,8
Tulistetun höyryn lämpötila [°C]	477,0
Ilman virtaus [ $\text{Nm}^3/\text{h}$ ]	55230,0
Ammoniakkikaasun virtaus [ $\text{Nm}^3/\text{h}$ ]	7072,0
$\text{NO}_x$ - kaasun tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	1,21
Kaasun massavirta [ $\text{kg}/\text{s}$ ]	20,9
Kaasun lämpötila ennen kattilaa [°C]	892,0
Kaasun lämpötila kattilan jälkeen [°C]	462,0
Lämmönsiirtokerroin höyrystimet [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]	193,0
Lämmönsiirtokerroin tulistin [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]	168,0
$\text{NO}_x$ - kaasun ominaislämpökapasiteetti [ $\text{kJ}/\text{kgK}$ ]	1,33
Tulistetun höyryn virtaus [ $\text{kg}/\text{s}$ ]	4,96
Syöttöveden entalpia [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ]	940
Kylläinen veden entalpia [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ]	1268
Kylläisen höyryn entalpia [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ]	2722
Tulistetun höyryn entalpia [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ]	3366

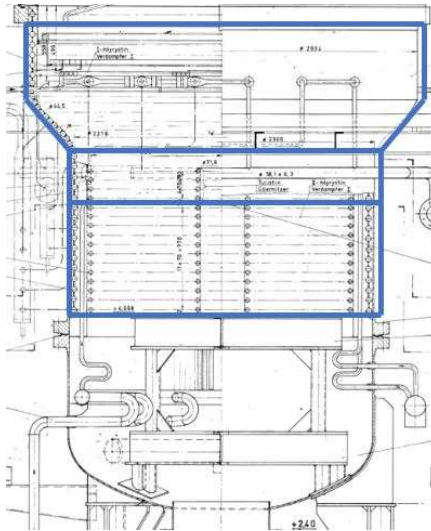
### 9.1 Nykyinen kapasiteetti

Ensimmäiseksi laskettiin vesi- höyrypiirin perusteella jätelämpökattilan höyrystys-, tulistus- ja kokonaisteho yhtälöillä 3 ja 4. Tulokset on esitetty taulukossa 19.

*Taulukko 19. Jätelämpökattilan höyrystys-, tulistus- ja kokonaisteho.*

Höyrystysteho [kW]	8846
Tulistusteho [kW]	3195
Kokonaisteho [kW]	12041

Jätelämpökattilan lämpöpinnat jaettiin kolmeen ryhmään, jotta saatiin selvitetty tarkemmat tehot eri lämpöpinnoille, joita tarvitaan  $\text{NO}_x$ - kaasun lämpötilan määrittämiseen lämpöpintojen välillä. Kuvassa 24 on esitetty lämpöpintojen jako laskentaa varten. Jätelämpökattilan ylimpään ryhmään kuuluvat 1. höyrystin, kannatusputket ja seinäputkien 20 ylintä kerrosta. Seuraavaan ryhmään kuuluvat tulistin ja tulistimen kohdalla olevat viisi kerrosta seinäputkia. Alimpaan ryhmään kuuluvat 2. höyrystin ja 11 kerrosta seinäputkia.



**Kuva 24.** Jätelämpökattilan lämpöpintojen kolme laskentaryhmää.

Laskentaa varten piirustuksista määritettiin lämpöpintojen pinta- alat ryhmittäin. Lämpöpintojen pinta- alat ovat esitetty taulukossa 20. Seinäputkien pinta- alasta huomioitiin vain  $\text{NO}_x$ - kaasun kanssa suoraan kosketuksessa oleva pinta- ala eli puolet putkien kokonaispinta- alasta. Taulukossa 20 on esitetty myös höyrystimenä toimivien lämpöpintojen suhteellinen osuus jätelämpökattilan kokonaishöyrystyspinta- alasta.

Taulukko 20. Lämpöpintojen pinta- alat ja höyrystyspinta- alojen suhteellinen osuus kokonaishöyrystyspinta- alasta.

Lämpöpinta	Pinta- ala [m <sup>2</sup> ]	Suhteellinen osuus höyrystyspinta- alasta
1.höyrystin	14	0,077
Kannatusputket	4,5	0,025
Seinäputket 1-20	11,1	0,059
Tulistin	45	
Seinäputket 21-25	2,3	0,012
2.höyrystin	145	0,799
Seinäputket 26-36	5,2	0,027

1. höyrystimen, kannatusputkien ja seinäputkien 1- 20 suhteelliset osuudet höyrystyspinta-aloista summattiin ja kerrottiin taulukon 19 höyrystysteholla, jolloin saatiin niiden höyrystysteho. Edellä mainitulla periaatteella ratkaistiin myös tulistimen kohdalla olevien seinäputkien 21-25 ja seinäputkien 26- 36 sekä 2. höyrystimen höyrystystehot. Jätelämpökattilassa on vain yksi tulistin, joten sen tehoa ei tarvitse laskea erikseen. Taulukossa 21 on esitetty lämpöpintojen tehot ryhmittäin.

Taulukko 21. Lämpöpintaryhmien tehot.

Lämpöpintaryhmät	Teho [kW]
1. höyrystin, kannatusputket ja seinäputket 1- 20	1425
Tulistin ja seinäputket 21- 25	3306
2. höyrystin ja seinäputket 26- 36	7310

NO<sub>x</sub>- kaasun lämpötila lämpöpintojen välillä ratkaistiin yhtälöllä 1. Ensin ratkaistiin 1.höyrystimen, kannatusputkien ja seinäputkien 1- 20 jälkeinen lämpötila. Edellä mainitulla periaatteella laskettiin myös lämpötilat muiden lämmönsiirtopintojen välillä, jotka ovat esitetty taulukossa 22. Tämän jälkeen ratkaistiin yhtälöllä 6 lämpöpintaryhmien logaritmiset lämpötilaerot. Logaritmiset lämpötilaerot ovat esitetty taulukossa 23.

*Taulukko 22. Lämpötilat lämmönsiirtopintojen välillä.*

<b>Sijainti</b>	<b>Lämpötila [°C]</b>
1.höyrystimen, kannatusputkien ja seinäputkien 1- 20 jälkeen	841
Tulistimen ja seinäputkien 21- 25 jälkeen	722
2. höyrystimen ja seinäputkien 26- 36 jälkeen	459

*Taulukko 23. Lämpöpintaryhmien logaritmiset lämpötilaerot.*

<b>Lämpöpintaryhmät</b>	<b>Logaritminen lämpötilaero</b>
1. höyrystin, kannatusputket ja seinäputket 1- 20	580
Tulistin ja seinäputket 21- 25	399
2. höyrystin ja seinäputket 26- 36	284

Yhtälöllä 5 ratkaistiin lämpöpintaryhmien laskennalliset pinta- alat, jotka ovat esitetty taulukossa 24. Seinäputket 21- 25 jätettiin laskennasta pois niiden vähäisen merkityksen vuoksi. Yhtälöllä 5 ratkaistiin lämpöpintaryhmien laskennallinen kokonaislämmönsiirtokerroin, jotka ovat esitetty taulukossa 25. Laskennassa on käytetty taulukon 20 pinta- aloja. Laskennallinen kokonaislämmönsiirtokerroin kuvaa sillä hetkellä olevaa arvoa, johon eniten vaikuttaa lämpöpintojen likaisuus ja taulukossa 18 esitetyt kokonaislämmönsiirtokerroinien arvot kuvaavat puhtaiden lämpöpintojen arvoa.

*Taulukko 24. Lämpöpintaryhmien laskennalliset pinta- alat*

<b>Lämpöpintaryhmät</b>	<b>Laskennallinen pinta- ala [m<sup>2</sup>]</b>
1. höyrystin, kannatusputket ja seinäputket 1- 20	13
Tulistin	48
2.höyrystin ja seinäputket	133

Taulukko 25. Lämpöpintaryhmien laskennalliset kokonaislämmönsiirtokerroimet.

Lämpöpintaryhmät	Laskennallinen kokonaislämmönsiirtokerroin [W/m <sup>2</sup> K]
1. höyrystin, kannatusputket ja seinäputket 1- 20	83
Tulistin	178
2.höyrystin ja seinäputket	171

## 9.2 Kapasiteetin nosto

Kapasiteetin noston laskelmat toteutettiin jätelämpökattilan kaasupuolen avulla. Kapasiteetin nosto toteutetaan nostamalla polttoon tulevan kaasun massavirtaan 10 prosenttia. Tämän lisäksi kaasun lämpötilaksi jätelämpökattilan jälkeen valitaan taulukon 17 alkuperäinen suunnitteluarvo, joka on pienempi kuin nykyinen arvo, jotta lämpöä saadaan siirrettyä enemmän vesi- höyrypiiriin, jolloin tuotetun höyryn määrä lisääntyy. Taulukossa 26 on esitetty kapasiteetin noston laskelmien muuttuneet lähtöarvot verrattuna taulukon 17 arvoihin.

Taulukko 26. Kapasiteetin noston lähtöarvot.

Lähtötieto	Arvo
Kaasun massavirta [kg/s]	23
Kaasun lämpötila kattilan jälkeen [°C]	410

Yhtälöllä 1 ratkaistiin jätelämpökattilan kokonaisteho, jonka jälkeen ratkaistiin höyrystysteho jakamalla kylläisen höyryn ja syöttöveden entalpioiden erotus jätelämpökattilan kokonaisentalpian muutoksella ja kertomalla saatu osamäärä kokonaisteholla. Tulistusteho ratkaistiin jakamalla tulistetun ja kylläisen höyryn entalpiamuutos jätelämpökattilan kokonaisentalpian muutoksella ja kertomalla saatu osamäärä kokonaisteholla. Höyryn massavirta ratkaistiin yhtälöllä 1. Lämpöpintaryhmien tehot, lämpötilat niiden välillä, logaritmiset lämpötila erot sekä laskennalliset pinta- alat ratkaistiin luvussa 9.1 esitetyllä tavalla. Laskennalliset pinta- alat määritettiin taulukoiden 18 ja 25 kokonaislämmönsiirtokerroimien avulla, jolloin saatiin pinta- alat puhtaille ja likaisille lämpöpinnoille. Taulukossa 27 on esitetty jätelämpökattilan arvot kapasiteetin noston jälkeen.

Taulukko 27. Jätelämpökattilan arvot kapasiteetin noston jälkeen.

Tieto	Arvo
Kokonaisteho [kW]	14742
Höyrystysteho [kW]	10830
Tulistusteho [kW]	3912
Höyryn massavirta [kg/s]	6,08
1. höyrystimen, kannatusputkien ja seinäputkien 1- 20 teho [kW]	1745
Tulistimen ja seinäputkien 21- 25 teho [kW]	4047
2. höyrystimen ja seinäputkien 26- 36 teho [kW]	8950
Lämpötila 1.höyrystimen, kannatusputkien ja seinäputkien 1- 20 jälkeen [°C]	835
Lämpötila tulistimen ja seinäputkien 21- 25 jälkeen [°C]	703
Lämpötila 2. höyrystimen ja seinäputkien 26- 36 jälkeen [°C]	410
1. höyrystimen, kannatusputkien ja seinäputkien 1- 20 logaritminen lämpötilaero	241
Tulistimen ja seinäputkien 21- 25 logaritmien lämpötilaero	387
2. höyrystimen ja seinäputkien 26- 36 logaritminen lämpötilaero	577
1. höyrystimen, kannatusputkien ja seinäputkien 1- 20 laskennallinen pinta-ala [m <sup>2</sup> ]	16 (puhdas), 37 (likainen)
Tulistimen laskennallinen pinta- ala [m <sup>2</sup> ]	58 (puhdas), 60 (likainen)
2. höyrystimen ja seinäputkien 26- 36 laskennallinen pinta- ala [m <sup>2</sup> ]	192 (puhdas), 241 (likainen)

### 9.3 Rakennemuutokset

1. höyrystimen, kannatusputkien ja seinäputkien 1- 20 pinta- ala on yhteensä 29, 6 m<sup>2</sup>. Laskennassa pinta- alaksi saatiin puhtaalla lämpöpinnalla 16 m<sup>2</sup>, jolloin jätelämpökattilan yläosaan ennen tulistinta ei tarvitse lisätä lämpöpintojen pinta- alaa.

Tulistimen pinta- ala on 45 m<sup>2</sup>. Laskennassa pinta- alaksi saatiin puhtaalla lämpöpinnalla 58 m<sup>2</sup>. Tulistimessa on viisi kierukkaa, jolloin yhden kierukan pinta- ala on 9 m<sup>2</sup>. Tulistimen päälle mahtuu lisäämään yhden kierukan lisää, jolloin tulistimen pinta- ala on 54 m<sup>2</sup>. Muutostyön toteutus vaatii jätelämpökattilan irrottamisen ja siirtämisen konepajalle, koska jätelämpökattilan vaippa pitää poistaa, jotta pääsee tekemään muutokset tulistimen kiertoihin. Lisäksi 1. höyrystin ja kannatusputket pitää irrottaa muutostyön ajaksi.

2. höyrystimen ja seinäputkien 26- 36 pinta- ala on yhteensä 150, 2 m<sup>2</sup>. Laskennassa pinta- alaksi saatiin puhtaalla lämpöpinnalla 192 m<sup>2</sup>. Seinäputkiin ei mahdu lisäpinta- alaa. 2. höyrystimessä on 15 kierukkaa, jolloin yhden kierukan pinta- ala on 9,7 m<sup>2</sup>. 2. höyrystimen alapuolelle mahtuu lisäämään viisi kierukkaa, jolloin 2 höyrystimen ja seinäputkien 26- 36 pinta- ala on yhteensä 198,7 m<sup>2</sup>. Muutostyön toteutus vaatii jätelämpökattilan irrottamisen ja siirtämisen konepajalle, koska jätelämpökattilan vaippa pitää poistaa. 1. höyrystin, kannatusputket ja tulistin pitää poistaa yläpuolelta. 2. höyrystimen alatuokea, 2. höyrystimen ja tulistimen sisäpuolisia jako- sekä kokoojakammioita pitää siirtää alaspäin.

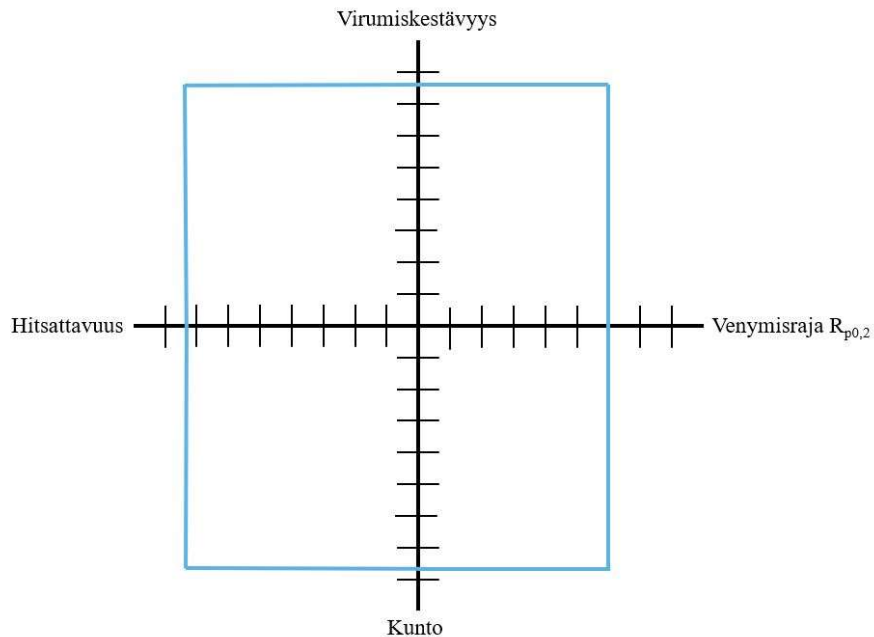
Edellä mainituilla muutoksilla päästään vaadittuihin pinta- aloihin lukuun ottamatta tulistinta, joka jää 4 m<sup>2</sup> liian pieneksi. Muutostöiden toteutus vaatii jätelämpökattilan irrottamisen typpihappotehtaalta ja siirtämisen konepajalle, jossa tehdään tarvittavat muutokset, jonka jälkeen se asennetaan takaisin.

### 9.4 Materiaalitarkastelu

Materiaalitarkastelussa suoritettiin nelikenttäänalyysi jätelämpökattilan lämpöpinnoissa käytetyille materiaaleille. Nelikenttäänalyysissä materiaalin soveltuvuutta arvioidaan pinta- alalla, joka muodostuu materiaalin ominaisuuksien perusteella. Nelikenttäänalyysissä materiaaleja arvioitiin hitsattavuuden, virumiskestävyyden, venymisrajan ja kunnan perusteella. Hitsattavuutta arvioitiin luvun 6 perusteella. Virumiskestävyyttä arvioitiin luvun

6 ja liitteen VI perusteella. Venymisraja- arvoa arvioitiin liitteen VII perusteella. Nykyisten materiaalien kuntoa arvioitiin kunnonvalvontaraporttien ja korjaushistorian perusteella.

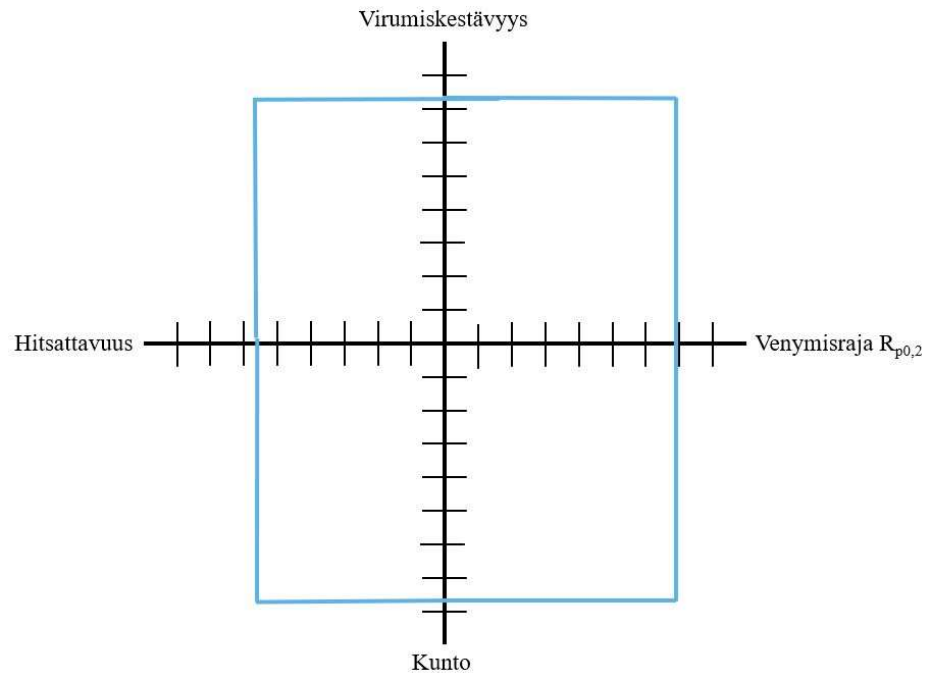
1.höyrystimen putkien materiaali on 16Mo3 ja alkuperäinen suunnittelulämpötila on 293 °C. Liitteen VI mukaan materiaalin 16Mo3 virumismurtoraja on määritetty yli 450 °C lämpötiloihin. Liitteen VII mukaan materiaalin 16Mo3 venymismurtoraja- arvo 300 °C lämpötilassa on 173 MPa. 16Mo3- materiaalin hitsattavuus on hyvä. Jätelämpökattilan kunnonvalvontaraporttien ja korjaushistorian mukaan 16Mo3 materiaalissa ei ole havaittu virumista tai muuta korroosiota, joten ei ole tarvetta materiaalimuutoksille. Kuvassa 25 on esitetty 16Mo3- materiaalin nelikenttäanalyysi.



**Kuva 25.** 16Mo3- materiaalin nelikenttäanalyysi.

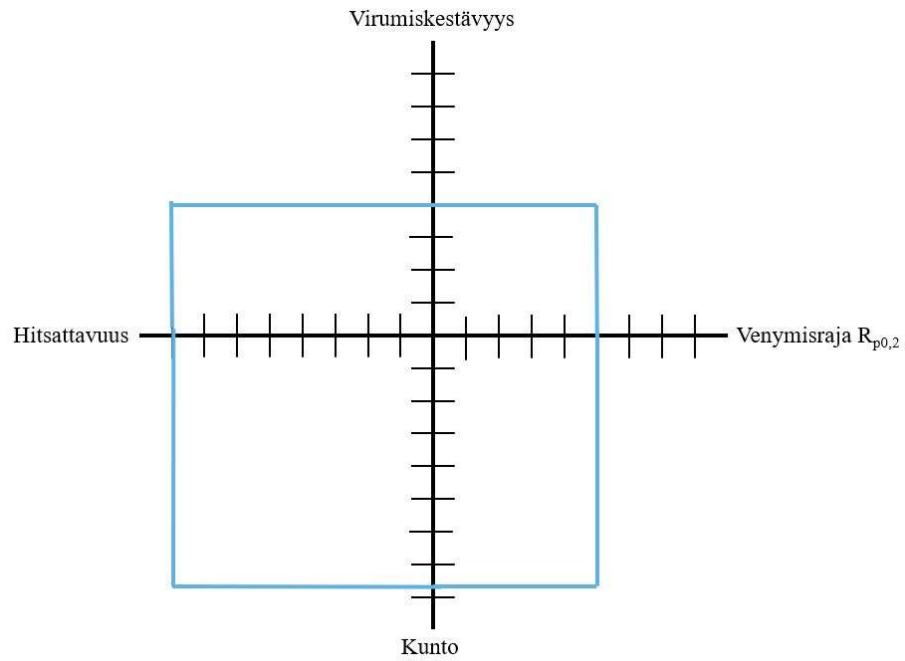
Tulistimen putkien materiaali on 10CrMo9-10 ja alkuperäinen suunnitteluarvo on 293 °C. Tulistetun höyryn lämpötila on 477 °C tulistimen ulostulossa. Liitteen VI mukaan materiaalin 10CrMo9-10 virumismurtoraja on määritetty yli 450 °C lämpötiloihin. 200 000 tunnin käyttöjakson virumismurtoraja on 156 MPa lämpötilan ollessa 480 °C. Liitteen VII mukaan materiaalin 10CrMo9-10- materiaalin venymismurtoraja- arvo 500 °C lämpötilassa on 180 MPa. 10CrMo9-10- materiaalin hitsattavuus on rajoitettua seostuksen vuoksi. Jätelämpökattilan kunnonvalvontaraporttien ja korjaushistorian mukaan 10CrMo9-10

materiaalissa ei ole havaittu nopeaa virumista tai muuta korroosiota, joten ei ole tarvetta materiaalimuutoksille. Kuvassa 26 on esitetty 10CrMo9-10- materiaalin nelikenttäanalyysi.



**Kuva 26.** 10CrMo9-10- materiaalin nelikenttäanalyysi.

2. höyrystimen putkien materiaali on P235GH ja alkuperäinen suunnitteluarvo 293 °C. Liitteen VI mukaan materiaalin P235GH virumismurtoraja on määritetty yli 400 °C lämpötiloihin. Liitteen VII mukaan materiaalin P235GH venymismurtoraja- arvo 300 °C lämpötilassa on 132 MPa. P235GH- materiaalin hitsattavuus on hyvä. Jätelämpökattilan kunnonvalvontaraporttien ja korjaushistorian mukaan P235GH materiaalissa ei ole havaittu virumista tai muuta korroosiota, joten ei ole tarvetta materiaalimuutoksille. Kuvassa 27 on esitetty P235GH- materiaalin nelikenttäanalyysi.



**Kuva 27.** P235GH- materiaalin nelikenttäanalyysi.

### 9.5 Uusi jätelämpökattila

Tässä tutkimuksessa tutkittiin myös mahdollisuutta uusien jätelämpökattiloiden sijainti typpihappotehtaalla mahdollistaa uuden kapasiteetiltaan ja ulkomitoiltaan isomman jätelämpökattilan asennuksen nykyisen tilalle.

## 10 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen seurantaosiossa havaittiin, että jätelämpökattilan kapasiteettia on tarkasteltu ja nostettu useita kertoja sen 49 vuoden käyttöjakson aikana. Lisäksi jätelämpökattilaan ja sen oheislaitteisiin on tehty lukuisia korjaus- ja muutostöitä. Polttoon syötettävän ammoniakki-ilmaseoksen määrää on kasvatettu 1,6- kertaiseksi verrattuna alkuperäiseen arvoon. Typpihappotehtaan maksimituotannolla NO<sub>x</sub>- kaasun lämpötila jätelämpökattilan jälkeen on 53 °C alkuperäistä arvoa suurempi, joka johtuu riittämättömästä lämmönsiirrosta vesihöyrypiiriin. Jätelämpökattilan höyryntuotanto on kaksinkertaistunut alkuperäiseen arvoon nähden. Lämpöpinnoista seinäputket ovat alkuperäiset. 1. höyrystin on uusittu viimeksi vuonna 2021 ja 2. höyrystin vuonna 1999, jolloin siihen on lisätty kaksi kierukkaa. Tulistin on uusittu vuonna 1984, jolloin siihen on lisätty yksi kierukka. Jätelämpökattilan vaippaa on uusittu useista kohdista.

Laskentaosiossa määritettiin nykyinen kapasiteetti ja kapasiteetin noston edellyttämät lämpöpintojen pinta- alat. Jätelämpökattilan nykyiset lämpöpintojen pinta- alat määritettiin seurantaosiossa piirustuksista. Lämpöpintojen pinta- alat määritettiin myös laskennallisesti, jolloin niissä havaittiin eroavaisuuksia piirustuksista määritettyihin pinta- aloihin. Laskennalliset pinta- alat ovat pienempiä verrattuna piirustuksista saatuihin. Laskennallisten pinta- alojen määrittämisessä käytettiin kokonaislämmönsiirtokertoimia, joita oli käytetty aiemmissa kapasiteetin määrittelyissä ja jotka ovat määritetty puhtaille lämpöpinnoille. Lämpöpintojen likaisuus aiheuttaa eroavaisuuden todellisten ja laskennallisten lämpöpintojen pinta- aloissa. Lämpöpintaryhmien laskennalliset kokonaislämmönsiirtokertoimet määritettiin, jotta saatiin arvot likaisille lämmönsiirtopinnoille. Taulukossa 27 on esitetty lämmönsiirtopintojen pinta- alat puhtaille ja likaisille pinnoille. Likaisuus vaikuttaa suhteellisesti eniten 1. höyrytimeen, kannatusputkiin ja seinäputkiin 1- 20. Likaisuuden aiheuttaa 1. höyrystimen päällä olevat ilokaasukatalyytit ja platinaverkot, joista irtoaa metallipohjaisia pölyhiukkasia. Pölyhiukkaset tarttuvat enimmäkseen jätelämpökattilan yläosaan.

Kapasiteetin noston edellyttämät lämpöpintojen pinta- alojen suurentaminen on mahdollista tehdä jätelämpökattilan sisäpuolisen tilan puolesta. Muutostyö vaatii jätelämpökattilan

irrottamisen typpihappotehtaalta ja siirtämisen konepajalle, jossa vaippa irrotetaan, jotta lämpöpintojen muutokset voidaan tehdä. Jätelämpökattilan vuosittain suoritettavassa kunnonvalvonnassa tarkastetaan tulistimen ja 2. höyrytimen osalta vain tulistimen ylin kierukka ja 2. höyrytimen alin kierukka ahtaan rakenteen vuoksi. Tämän seurauksena tulistimen ja 2. höyrytimen kuntoa ei tiedetä tarkkaan. Jätelämpökattilan tulistin ja 2. höyrystin on kannattavaa uusita kokonaan muutostöiden yhteydessä, jotta niihin ei jää vanhoja osakokonaisuuksia. 1. höyrystin ja kannatusputket joudutaan irrottamaan muutostöiden yhteydessä, jolloin ne uusitaan samassa yhteydessä luotettavuuden lisäämiseksi. Jätelämpökattilan seinäputkia ei uusita työn laajuuden takia. Kun 1. höyrystin, tulistin ja 2. höyrystin ovat irrotettu voidaan seinäputket tarkastaa ja tarvittaessa uusita heikot kohdat. Muutostöiden suorittaminen vaatii typpihappotehtaalle 14 vuorokauden huoltoseisokin.

Uuden jätelämpökattilan asentaminen nykyisen tilalle vaatii 7 vuorokauden mittaisen huoltoseisokin. Uuden jätelämpökattilan poikkipinta- alaa voidaan suurentaa verrattuna nykyiseen, jolloin verkkokorin tilavuus kasvaa ja siihen mahtuu enemmän ilokaasukatalyyttia päästöjen vähentämiseksi. Suurempi poikkipinta- ala pienentää jätelämpökattilan aiheuttamaa paine- eroa  $\text{NO}_x$ - kaasuun, jolloin typpihappoprosessin imetysvaiheeseen saadaan suurempi paine, joka tehostaa  $\text{NO}_x$ - kaasun imeytymistä typpihapoksi. Uuteen jätelämpökattilaan voidaan lisätä lämpöpintojen pinta- alaa myös niiden likaantumisen varalta. Uusimalla koko jätelämpökattila prosessin luotettavuus paranee merkittävästi.

## 11 POHDINTA

Typpihappotehtaan ja jätelämpökattilan kapasiteetin nostoa on tarkasteltu ja toteutettu useita kertoja typpihappotehtaan alkuperäisen suunnitteluyrityksen ja Yaran toimesta. Typpihappotehtaan kapasiteetin noston suunnittelu on monimutkainen prosessi ja jätelämpökattila on vain yksi osa kokonaisuutta..

### 11.1 Reliabiliteetti ja validiteetti

Tämän tutkimuksen tutkimusmetodeilla saatiin riittävä tarkkuus jätelämpökattilan kapasiteettien ja muutostöiden määrittämiseksi, jolloin saatiin vastaukset tutkimuskysymyksiin. Tässä tutkimuksessa on hyödynnetty luotettavia lähteitä ja aikaisempia tutkimuksia. Näiden perusteella on suoritettu tutkimuksen käytännön osuus. Tutkimus on toistettavissa kokonaisuudessaan.

### 11.2 Herkkyystarkastelu

Laskentaosiossa luodun laskentasovelluksen lähtöarvoja voidaan muuttaa yksi kerrallaan, jolloin nähdään niiden vaikutus kokonaisuuteen, joka puolestaan vaikuttaa muutostöiden laajuuteen ja edelleen päätöksentekoon. Tämän tutkimuksen kannalta merkittävimmät arvot, joita muutetaan ovat ammoniakki- ilmaseoksen massavirta polttoon ja NO<sub>x</sub>- kaasun lämpötila jätelämpökattilan jälkeen.

### 11.3 Avaintulokset

Tämän tutkimuksen tuloksena saatiin määritettyä jätelämpökattilan kapasiteetti ja kapasiteetin noston edellyttämät rakennemuutokset. Tutkimuksen perusteella rakennemuutokset ovat tehtävissä, mutta ne vaativat ison muutostyön jätelämpökattilaan ja 14 vuorokauden huoltoseisokin typpihappotehtaalalle. Toisena vaihtoehtona tarkasteltiin uuden jätelämpökattilan hankintaa. Tällöin typpihappoprosessin luotettavuus paranee ja päästöt vähenevät. Tässä tapauksessa huoltoseisokin pituus on 7 vuorokautta. Molemmissa tapauksissa saadaan lisättyä höyryn tuotantoa, jolloin saadaan tuotettua enemmän sähköä.

#### 11.4 Tulosten uutuusarvo

Tässä tutkimuksessa ei keksitty uutta teoriaa tai menetelmää jätelämpökattilan kapasiteetin määrittämiseen. Verrattuna aikaisimpiin jätelämpökattilan kapasiteetin tarkasteluihin tässä tutkimuksessa otetaan kantaa myös rakenneteknisiin muutoksiin ja uuden jätelämpökattilan tuomiin etuisuuksiin.

#### 11.5 Tulosten yleistettävyys ja hyödynnettävyys

Tämän tutkimuksen tuloksia voidaan hyödyntää jätelämpökattilan kapasiteetin noston esisuunnitteluvaiheessa. Tulosten perusteella voidaan lähteä viemään eteenpäin kahta vaihtoehtoa, jotka ovat nykyisen jätelämpökattilan muokkaaminen tai uuden jätelämpökattilan hankinta. Tässä tutkimuksessa selvitettiin jätelämpökattilan rakenne, käytetyt materiaalit ja vesi- höyrypiirin kierto, joita voidaan käyttää esimerkiksi nykyisten ja uusien työntekijöiden perehdytyksessä.

#### 11.6 Jatkotutkimusaiheet

Jätelämpökattilan lämpöpinnat on pesty edellisen kerran vuonna 2009. Seuraava pesu suoritetaan vuonna 2021, jonka jälkeen tämän tutkimuksen laskentaosuus toistetaan pesun jälkeisillä prosessiarvoilla, jotta nähdään todellinen kapasiteetti puhtailla lämpöpinnoilla.

Tehdään tarkempi selvitys uuden jätelämpökattilan vaikutuksista päästöihin ja imeytymiseen, jotta nähdään vaikutukset ympäristöön ja tuotantoon. Lisäksi selvitettävä nykyisen jätelämpökattilan muutostöiden ja uuden jätelämpökattilan kustannukset kannattavuuslaskentaa varten. Kannattavuuslaskelma toteutetaan takaisinmaksu- ja annuiteettimenetelmillä.

## 12 YHTEENVETO

Yara Siilinjärven tehtailla tuotetaan lannoitteita, joiden yksi raaka- aine on typpihappo, jota tuotetaan tehdasalueella sijaitsevassa typpihappotehtaassa. Typpihappotehtaan kapasiteetti ei ole riittävä kattamaan lannoitetehtaan tarvitsemaa määrää, joten typpihappoa tuodaan Yaran toiselta toimipaikalta rautateitse, joka aiheuttaa kustannuksia. Tässä tutkimuksessa selvitetään typpihappotehtaan jätelämpökattilan nykyinen kapasiteetti ja kapasiteetin nostamista 10 prosentilla, jolloin typpihappotuotantoa on mahdollista lisätä ja rautateitse tuodun typpihapon määrää voidaan vähentää. Lisäksi selvitettiin nykyisen jätelämpökattilan uusimista. Tutkimus koostuu kolmesta osiosta, jotka ovat seurantatieto, kirjallisuuskatsaus ja laskenta.

Tutkimuksen perusteella jätelämpökattilaan on mahdollista lisätä lämpöpintojen pinta- alaa, jotta polttoon tulevan ammoniakki- ilmaseoksen massavirtaa voidaan lisätä 10 prosenttia. Lämpöpintojen pinta- alat on määritetty puhtaille pinnoille. Toisena vaihtoehtona tutkimuksessa esitetään uuden jätelämpökattilan hankintaa, jolloin kapasiteetin noston lisäksi päästöt vähenevät ja typpihappoprosessin imeytysvaihe tehostuu.

Tähän tutkimukseen liittyviä jatkotutkimuksia ovat jätelämpökattilan uudelleen laskenta lämpöpintojen pesun jälkeen ja uuden jätelämpökattilan vaikutukset ympäristöön sekä tuotantoon. Lisäksi selvitettävä molempien vaihtoehtojen kustannukset, jotta voidaan tehdä kannattavuuslaskelma.

## LÄHTEET

- Aalto- yliopisto. 2021. Tiedonhankinnan opas. [Aalto- yliopiston www- sivuilla]. Päivitetty 17.2.2021. [Viitattu 5.5.2021]. Saatavissa: <https://libguides.aalto.fi/c.php?g=410658&p=2797683>
- Aho, J., Hietamäki, E., Hyytiä, H. & Jalovaara, J. 2003. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5–50 MW polttolaitoksissa Suomessa. Suomen ympäristökeskus. Helsinki.
- Andreassen, K., A., Cavka, J., H., Garcia, S., Grande, C., A., Lorentsen, O- A. Modeshia, D., Poulston, S., Waller, D., Zander, H- J & Øien, H. 2018. Process Intensification in Nitric Acid Plants by Catalytic Oxidation of Nitric Oxide. ACS Publications. Industrial & Engineering Chemistry Research.
- Dhua, S. 2010. Metallurgical investigation of failed boiler water- wall tubes received from a thermal power station. Engineering Failure Analysis. s. 1572- 1579.
- Engineering ToolBox. 2001. Mollier Diagram for Water-Steam. [Viitattu 29.4.2021]. Saatavissa: [https://www.engineeringtoolbox.com/mollier-diagram-water-d\\_308.html](https://www.engineeringtoolbox.com/mollier-diagram-water-d_308.html)
- Eskelinen, H. & Karsikas, S. 2014. Tutkimusmetodiikan perusteet. Tampere: Amk- kustannus Oy Tammertekniikka. 224 s.
- Haribhakti, P, Joshi, P. B. & Kumar, R. 2018. Failure Investigation of Boiler Tubes- A Comprehensive Approach. ASM International. 436 s.
- Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2004. Höyrykattilatekniikka. 6. painos. Helsinki. Opetushallitus. EDITA. 379 s.
- Kassner, M. 2009. Fundamentals of Creep in Metals and Alloys. 2. painos. Elsevier.
- Neilimo, K & Uusi- Rauva, E. 2007. Johdon laskentatoimi. 6.- 8. painos. Helsinki: Edita Prima Oy. 366 s.
- Makkee, M., Moulijn, J., A. & Van Diepen A., E. 2013. Chemical Process Technology. Catalyst Engineering, Department of Chemical Engineering, Delft University of Technology. John Wiley & Sons Ltd. 529 s.
- Oakey, J. E. 2011. Power Plant Life Management and Performance Improvement. Woodhead Publishing. 665 s.
- Production of nitric acid. 2000. [verkkodokumentti]. [viitattu 19.4.2021]. 36 s. Saatavissa PDF- tiedostona: [https://www.fertilizerseurope.com/wp-content/uploads/2019/08/Booklet\\_2\\_final.pdf](https://www.fertilizerseurope.com/wp-content/uploads/2019/08/Booklet_2_final.pdf)
- Saari, J. 2009. Heat Exchanger Dimensioning. Faculty of Technology. Lappeenranta University of Technology. 101 s.

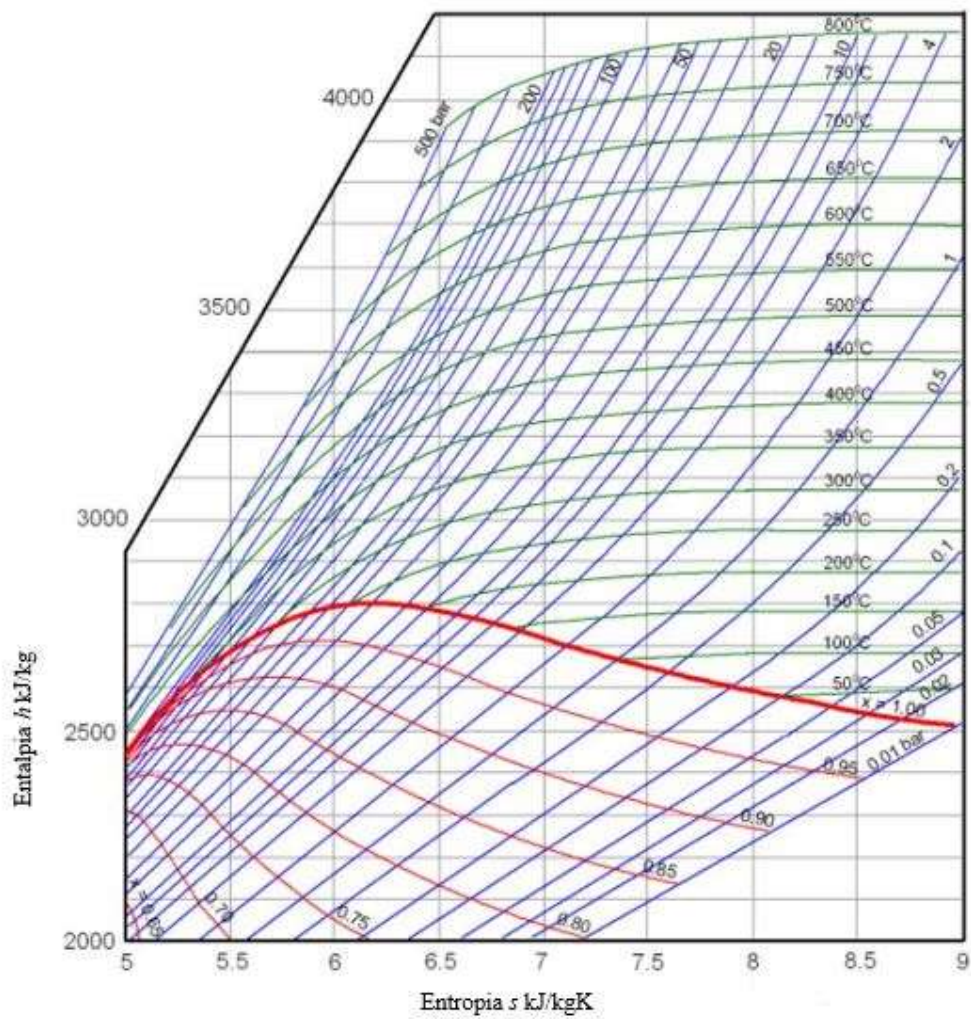
SFS- EN 10216- 2. 2014. Saumattomat painelaiteteräsputket. Tekniset toimitusehdot. Osa 2: Kuumalujat seostamattomat ja seostetut teräsputket. 4. painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Vahvistettu englanninkielisenä.

Teir, S. 2003. Steam Boiler Technology. Energy Engineering and Environmental Protection Publications. Helsinki University of Technology. Department of Mechanical Engineering. Espoo. 215 s.

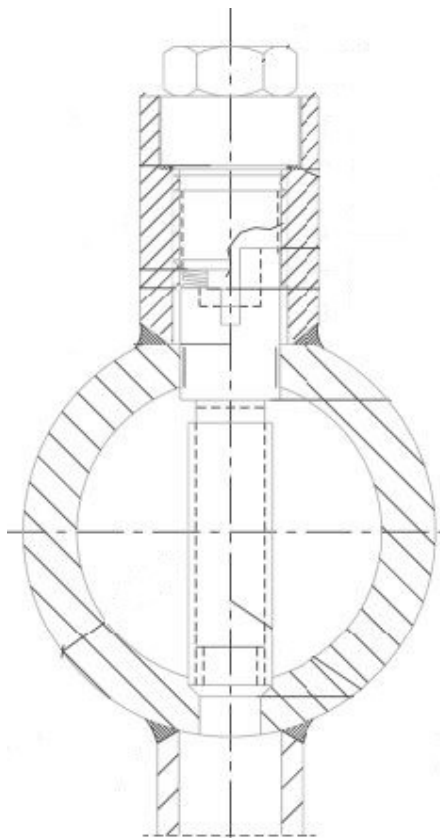
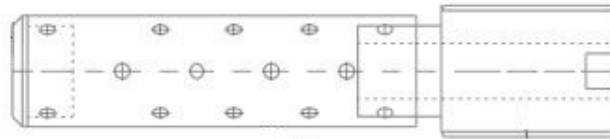
Thiemann, M., Scheibler, E. & Wiegand, K. 2000. Nitric acid, Nitrous Acid and Nitrogen Oxides. Teoksessa: Ullmann' s Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley- VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. s. 177- 225.

Vakkilainen, E., K. 2017. Steam Generation from Biomass- Construction and Design of Large Boilers. Elsevier. 302 s.

$h$ -  $s$ - kuvaaja vedelle ja höyrylle. (Engineering ToolBox 2001.)



La Mont- suutin.



Kuumalujat seostamattomat ja seostetut teräsputket. (SFS- EN 10216- 2. 2014.)

Teräslaji		C	Si	Mn	P max	S max	Cr	Mo	Ni	Al <sub>tot</sub>	Cu	Nb	Ti max	V	Cr+Cu +Mo+Ni	Muut
Nimike	Numero-tunnus															
P195GH	1.0348	≤ 0,13	≤ 0,35	≤ 0,70	0,025	0,010	≤ 0,30	≤ 0,08	≤ 0,30	≥ 0,020 <sup>b</sup>	≤ 0,30 <sup>c</sup>	≤ 0,010 <sup>d</sup>	0,040 <sup>d</sup>	≤ 0,02 <sup>d</sup>	≤ 0,70	-
P235GH	1.0345	≤ 0,16	≤ 0,35	≤ 1,20	0,025	0,010	≤ 0,30	≤ 0,08	≤ 0,30	≥ 0,020 <sup>b</sup>	≤ 0,30 <sup>c</sup>	≤ 0,020 <sup>d</sup>	0,040 <sup>d</sup>	≤ 0,02 <sup>d</sup>	≤ 0,70	-
P265GH	1.0425	≤ 0,20	≤ 0,40	≤ 1,40	0,025	0,010	≤ 0,30	≤ 0,08	≤ 0,30	≥ 0,020 <sup>b</sup>	≤ 0,30 <sup>c</sup>	≤ 0,020 <sup>d</sup>	0,040 <sup>d</sup>	≤ 0,02 <sup>d</sup>	≤ 0,70	-
20MnNb6	1.0471	≤ 0,22	0,15 ... 0,35	1,00 ... 1,50	0,025	0,010	-	-	-	≤ 0,060	≤ 0,30 <sup>c</sup>	0,015 ... 0,10	-	-	-	-
16Mo3	1.5415	0,12 ... 0,20 <sup>e</sup>	≤ 0,35	0,40 ... 0,90	0,025	0,010	≤ 0,30	0,25 ... 0,35	≤ 0,30	≤ 0,040	≤ 0,30 <sup>c</sup>	-	-	-	-	-
8MoB5-4	1.5450	0,06 ... 0,10	0,10 ... 0,35	0,60 ... 0,80	0,025	0,010	≤ 0,20	0,40 ... 0,50	-	≤ 0,060	≤ 0,30 <sup>c</sup>	-	0,060	-	-	B = 0,002 ... 0,006
14MoV6-3	1.7715	0,10 ... 0,15	0,15 ... 0,35	0,40 ... 0,70	0,025	0,010	0,30 ... 0,60	0,50 ... 0,70	≤ 0,30	≤ 0,040	≤ 0,30 <sup>c</sup>	-	-	0,22 ... 0,28	-	-
10CrMo5-5	1.7338	≤ 0,15	0,50 ... 1,00	0,30 ... 0,60	0,025	0,010	1,00 ... 1,50	0,45 ... 0,65	≤ 0,30	≤ 0,040	≤ 0,30 <sup>c</sup>	-	-	-	-	-
13CrMo4-5	1.7335	0,10 to 0,17 <sup>e</sup>	≤ 0,35	0,40 ... 0,70	0,025	0,010	0,70 ... 1,15	0,40 ... 0,60	≤ 0,30	≤ 0,040	≤ 0,30 <sup>c</sup>	-	-	-	-	-
10CrMo9-10	1.7380	0,08 ... 0,14	≤ 0,50	0,30 ... 0,70	0,020	0,010	2,00 ... 2,50	0,90 ... 1,10	≤ 0,30	≤ 0,040	≤ 0,30 <sup>c</sup>	-	-	-	-	-
11CrMo9-10	1.7383	0,08 ... 0,15	≤ 0,50	0,40 ... 0,80	0,025	0,010	2,00 ... 2,50	0,90 ... 1,10	≤ 0,30	≤ 0,040	≤ 0,30 <sup>c</sup>	-	-	-	-	-
25CrMo4	1.7218	0,22 ... 0,29	≤ 0,40	0,60 ... 0,90	0,025	0,010	0,90 ... 1,20	0,15 ... 0,30	≤ 0,3	≤ 0,040	≤ 0,30 <sup>c</sup>	-	-	-	-	-
20CrMoV13-5-5	1.7779	0,17 ... 0,23	0,15 ... 0,35	0,30 ... 0,50	0,025	0,010	3,00 ... 3,30	0,50 ... 0,60	≤ 0,3	≤ 0,040	≤ 0,30 <sup>c</sup>	-	-	0,45 ... 0,55	-	-
15NiCu-MoNb5-6-4	1.6368	≤ 0,17	0,25 ... 0,50	0,80 ... 1,20	0,025	0,010	≤ 0,30	0,25 ... 0,50	1,00 ... 1,30	≤ 0,050	0,50 ... 0,80	0,015 ... 0,045	-	-	-	-
7CrWV-MoNb9-6	1.8201	0,04...0,10	≤ 0,50	0,10...0,60	0,030	0,010	1,90...2,60	0,05...0,30	-	≤ 0,030	-	0,02...0,08	0,005 to 0,060	0,20...0,30	-	N ≤ 0,015 B = 0,0010...0,006 W = 1,45...1,75 Ti/N ≥ 3,5 <sup>h</sup>
7CrMoV-TiB10-10	1.7378	0,05...0,10	0,15...0,45	0,30...0,70	0,020	0,010	2,20...2,60	0,90...1,10	-	≤ 0,020	-	-	0,05...0,10	0,20...0,30	-	N ≤ 0,010 B = 0,0015...0,0070
X11CrMo5+I X11CrMo5+NT1 X11CrMo5+NT2	1.7362+I 1.7362+NT1 1.7362+NT2	0,08 ... 0,15	0,15 ... 0,50	0,30 ... 0,60	0,025	0,010	4,0 ... 6,0	0,45 ... 0,65	-	≤ 0,040	≤ 0,30 <sup>c</sup>	-	-	-	-	-
X11CrMo9-1+I X11CrMo9-1+NT	1.7386+I 1.7386+NT	0,08 ... 0,15	0,25 ... 1,00	0,30 ... 0,60	0,025	0,010	8,0 ... 10,0	0,90 ... 1,10	-	≤ 0,040	≤ 0,30 <sup>c</sup>	-	-	-	-	-
X10CrMo-VNb9-1	1.4903	0,08 ... 0,12	0,20 ... 0,50	0,30 ... 0,60	0,020	0,005	8,0 ... 9,5	0,85 ... 1,05	≤ 0,40	≤ 0,02	≤ 0,30 <sup>c</sup>	0,06 ... 0,10	0,01 max	0,18 ... 0,25	-	N = 0,030 ... 0,070 Zr = 0,01 max
X10CrWMo-VNb9-2	1.4901	0,07...0,13	≤ 0,50	0,30...0,60	0,020	0,010	8,5 ... 9,5	0,30...0,60	≤ 0,40	≤ 0,02	-	0,04...0,09	0,01 max	0,15 ... 0,25	-	N = 0,030...0,070 B = 0,001...0,006 W = 1,50...2,00 Zr = 0,01 max
X11CrMoW-VNb9-1-1	1.4905	0,09...0,13	0,10...0,50	0,30...0,60	0,020	0,010	8,5 ... 9,5	0,90...1,10	0,10...0,40	≤ 0,02	-	0,06 ... 0,10	0,01 max	0,18 ... 0,25	-	N = 0,050...0,090 B = 0,0005...0,005 W = 0,90...1,10 Zr = 0,01 max
X20CrMoV11-1	1.4922	0,17 to 0,23 <sup>f</sup>	0,15 ... 0,50	≤ 1,00	0,025	0,010	10,0 ... 12,5	0,80 ... 1,20	0,30 ... 0,80	≤ 0,040	≤ 0,30 <sup>c</sup>	-	-	0,25 ... 0,35	-	-



Laskentaosuuden yhtälöt

Nykyinen kapasiteetti:

Kokonaisteho

$$\Phi = \dot{m}(h_2 - h_1) = 4,96 \frac{kg}{s} \times (3366 - 940) \frac{kJ}{kg} = 12041 kW$$

Höyrystysteho

$$\Phi = \dot{m}(h_2 - h_1) = 4,96 \frac{kg}{s} \times (2722 - 940) \frac{kJ}{kg} = 8846 kW$$

Tulistusteho

$$\Phi = \dot{m}(h_2 - h_1) = 4,96 \frac{kg}{s} \times (3366 - 2722) \frac{kJ}{kg} = 3195 kW$$

1.höyrystimen, kantoputkien ja seinäputkien 1- 20 teho

$$\Phi = 8846 kW \times (0,077 + 0,025 + 0,059) = 1425 kW$$

Seinäputkien 21- 25 teho

$$\Phi = 8846 kW \times 0,012 = 111 kW$$

2.höyrystimen ja seinäputkien 26- 36 teho

$$\Phi = 8846 kW \times (0,799 + 0,027) = 7310 kW$$

Lämpötila ennen tulistinta

$$T_2 = \frac{(-1425 kW + 20,9 \frac{kg}{s} \times 1,33 \frac{kJ}{kgK} \times 892^\circ C)}{20,9 \frac{kg}{s} \times 1,33 \frac{kJ}{kgK}} = 841^\circ C$$

Lämpötila ennen 2.höyrystintä

$$T_2 = \frac{(-3195 kW - 111 kW + 20,9 \frac{kg}{s} \times 1,33 \frac{kJ}{kgK} \times 841^\circ C)}{20,9 \frac{kg}{s} \times 1,33 \frac{kJ}{kgK}} = 722^\circ C$$

Lämpötila 2.höyrystimen jälkeen

$$T_2 = \frac{(-7310 kW + 20,9 \frac{kg}{s} \times 1,33 \frac{kJ}{kgK} \times 722^\circ C)}{20,9 \frac{kg}{s} \times 1,33 \frac{kJ}{kgK}} = 459^\circ C$$

1. höyrystimen, kantoputkien ja seinäputkien 1- 20 logaritminen lämpötilaero

$$T_{lm} = \frac{(892 - 286) - (841 - 286)}{\ln \frac{(892 - 286)}{(841 - 286)}} \text{°C} = 580 \text{ °C}$$

Tulistimen logaritminen lämpötilaero

$$T_{lm} = \frac{(841 - 477) - (722 - 286)}{\ln \frac{(841 - 477)}{(722 - 286)}} \text{°C} = 399 \text{ °C}$$

2. höyrystimen ja seinäputkien 26- 36 logaritminen lämpötilaero

$$T_{lm} = \frac{(722 - 286) - (459 - 286)}{\ln \frac{(722 - 286)}{(459 - 286)}} \text{°C} = 284 \text{ °C}$$

1. höyrystimen, kantoputkien ja seinäputkien 1- 20 laskennallinen pinta- ala

$$A = \frac{1425000 \text{ W}}{580 \text{ °C} \times 193 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{°C}}} = 13 \text{ m}^2$$

Tulistimen laskennallinen pinta- ala

$$A = \frac{3195000 \text{ W}}{399 \text{ °C} \times 168 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{°C}}} = 48 \text{ m}^2$$

2. höyrystimen ja seinäputkien 26- 36 laskennallinen pinta- ala

$$A = \frac{7310000 \text{ W}}{284 \text{ °C} \times 193 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{°C}}} = 133 \text{ m}^2$$

1. höyrystimen, kantoputkien ja seinäputkien 1- 20 laskennallinen kokonaislämmönsiirtokerroin

$$k = \frac{1425000 \text{ W}}{580 \text{ °C} \times 29,6 \text{ m}^2} = 83 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{°C}}$$

Tulistimen laskennallinen kokonaislämmönsiirtokerroin

$$k = \frac{3195000 \text{ W}}{399 \text{ °C} \times 45 \text{ m}^2} = 48 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{°C}}$$

2. höyrystimen ja seinäputkien 26- 36 laskennallinen kokonaislämmönsiirtokerroin

$$A = \frac{7310000 \text{ W}}{284 \text{ °C} \times 150,2 \text{ m}^2} = 133 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{°C}}$$

Kapasiteetin nosto:

Kokonaisteho

$$\Phi = \dot{m}c_p(T_2 - T_1) = 23 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1,33 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times (892 - 410)^\circ\text{C} = 14742 \text{ kW}$$

Höyrystysteho

$$\Phi = \frac{(2722 - 940) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{(3366 - 940) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \times 14742 \text{ kW} = 10830 \text{ kW}$$

Tulistusteho

$$\Phi = \frac{(3366 - 2722) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{(3366 - 940) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \times 14742 \text{ kW} = 3912 \text{ kW}$$

Höyryn massavirta

$$\dot{m} = \frac{14742 \text{ kW}}{(3366 - 940) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 6,06 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

1.höyrystimen, kantoputkien ja seinäputkien 1- 20 teho

$$\Phi = 10830 \text{ kW} \times (0,077 + 0,025 + 0,059) = 1745 \text{ kW}$$

Seinäputkien 21- 25 teho

$$\Phi = 10830 \text{ kW} \times 0,012 = 135 \text{ kW}$$

2.höyrystimen ja seinäputkien 26- 36 teho

$$\Phi = 10830 \text{ kW} \times (0,799 + 0,027) = 8950 \text{ kW}$$

Lämpötila ennen tulistinta

$$T_2 = \frac{(-1745 \text{ kW} + 23 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1,33 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times 892^\circ\text{C})}{23 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1,33 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}} = 835 \text{ }^\circ\text{C}$$

Lämpötila ennen 2.höyrystintä

$$T_2 = \frac{(-3912 \text{ kW} - 135 \text{ kW} + 23 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1,33 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times 835^\circ\text{C})}{23 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1,33 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}} = 703 \text{ }^\circ\text{C}$$

Lämpötila 2.höyrystimen jälkeen

$$T_2 = \frac{(-8950 \text{ kW} + 23 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1,33 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times 703^\circ\text{C})}{23 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1,33 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}} = 410^\circ\text{C}$$

1. höyrystimen, kantoputkien ja seinäputkien 1- 20 logaritminen lämpötilaero

$$T_{lm} = \frac{(892 - 286) - (835 - 286)}{\ln \frac{(892 - 286)}{(835 - 286)}}^\circ\text{C} = 577^\circ\text{C}$$

Tulistimen logaritminen lämpötilaero

$$T_{lm} = \frac{(835 - 477) - (703 - 286)}{\ln \frac{(835 - 477)}{(703 - 286)}}^\circ\text{C} = 387^\circ\text{C}$$

2. höyrystimen ja seinäputkien 26- 36 logaritminen lämpötilaero

$$T_{lm} = \frac{(703 - 286) - (410 - 286)}{\ln \frac{(703 - 286)}{(410 - 286)}}^\circ\text{C} = 241^\circ\text{C}$$

1. höyrystimen, kantoputkien ja seinäputkien 1- 20 laskennallinen pinta- ala

$$A = \frac{1745000 \text{ W}}{577^\circ\text{C} \times 193 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}} = 16 \text{ m}^2$$

Tulistimen laskennallinen pinta- ala

$$A = \frac{3912000 \text{ W}}{399^\circ\text{C} \times 168 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}} = 60 \text{ m}^2$$

2. höyrystimen ja seinäputkien 26- 36 laskennallinen pinta- ala

$$A = \frac{8950000 \text{ W}}{241^\circ\text{C} \times 193 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}} = 192 \text{ m}^2$$

## Virumismurtorajan arvot. (SFS- EN 10216- 2. 2014.)

Teräslaji		Lämpötila °C	Virumismurtorajan arvot (MPa) <sup>a b c d</sup>			
Nimike	Numerotunnus		10 000 h	100 000 h	200 000 h	250 000 h
P235GH P265GH	1.0345 1.0425	400	182	141	128	122
		410	166	128	115	109
		420	151	114	102	97
		430	138	100	89	86
		440	125	88	77	74
		450	112	77	66	64
		460	100	66	56	54
		470	88	56	46	44
		480	77	47	33	30
		490	67	39	26	—
		500	58	32	24	—
20MnNb6	1.0471	400	243	179	157*	150*
		410	221	157	135*	128*
		420	200	136	115*	108*
		430	180	117	97*	91*
		440	161	100	82*	77*
		450	143	85	70*	66*
		460	126	73	60*	56*
		470	110	63	52*	48*
		480	96	55	44*	41*
		490	84	47	37*	32*
500	74	41	—	—		
16Mo3	1.5415	450	298	236	218	210
		460	273	205	188	179
		470	247	176	158	148
		480	221	149	129	122
		490	196	124	105	98
		500	171	102	84	78
		510	148	83	67	63
		520	125	65	53	50
		530	104	51	42	38
		540	84	40	34	—
550	64	32	25	—		
14MoV6-3	1.7715	450	377	305	282	275
		460	349	276	255	247
		470	324	249	226	220
		480	298	224	202	195
		490	274	200	179	171
		500	249	177	158	150
		510	225	155	136	129
		520	203	135	117	110
		530	181	117	101	95
		540	162	102	86	82
		550	143	87	74	70
		560	126	75	63	59
		570	112	65	54	50
		580	97	58	47	43
590	85	48	40	37		
600	74	41	34	32		

## Virumismurtorajan arvot. (SFS- EN 10216- 2. 2014.)

Teräslaji		Lämpötila °C	Virumismurtorajan arvot (MPa) <sup>a b c d</sup>			
Nimike	Numerotunnus		10 000 h	100 000 h	200 000 h	250 000 h
10CrMo5-5 13CrMo4-5	1.7338 1.7335	450	377	290	264	257
		460	347	258	233	225
		470	319	227	203	193
		480	292	198	175	164
		490	264	170	148	138
		500	238	145	123	114
		510	209	121	102	92
		520	181	100	82	73
		530	155	80	66	58
		540	131	65	51	46
		550	109	53	41	37
		560	90	44	35	31
		570	74	38	30	--
		580	60	31	25	--
		590	50	26	--	--
		600	41	20	--	--
10CrMo9-10	1.7380	450	308	229	204	196
		460	284	212	188	180
		470	261	194	172	165
		480	238	177	156	150
		490	216	160	140	134
		500	195	141	124	118
		510	176	124	108	103
		520	158	105	94	88
		530	142	95	80	76
		540	126	81	68	64
		550	111	70	57	54
		560	99	61	49	46
		570	88	53	43	40
		580	78	46	38	34
590	69	40	33	30		
600	60	35	28	26		
11CrMo9-10	1.7383	400	382	313		
		410	355	289		
		420	333	272		
		430	312	255		
		440	294	238		
		450	276	221		
		460	259	204		
		470	242	187		
		480	225	170		
		490	208	153		
		500	191	137		
		510	174	122		
520	157	107				
20CrMoV13-5-5	1.7779	420	470	420		
		430	440	370		
		440	410	310		
		450	360	260		
		460	310	220		
		470	270	190		
		480	240	165		
		490	210	145		
		500	186	127		
		510	169	114		
		520	152	101		
		530	134	87		
		540	117	74		
550	98	59				

## Liite VII

Venymisrajan  $R_{p0,2}$  vähimmäisarvot. (SFS- EN 10216- 2. 2014.)

Teräslaji		Seinämän- paksuus mm	Venymisrajan $R_{p0,2}$ vähimmäisarvot, MPa <sup>a</sup> lämpötilassa °C										
Nimike	Numero- tunnus		100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
P195GH	1.0348	≤16	175	165	150	130	113	102	94	-	-	-	-
P235GH	1.0345	≤ 60	198	187	170	150	132	120	112	108	-	-	-
P265GH	1.0425	≤ 60	226	213	192	171	154	141	134	128	-	-	-
20MnNb6	1.0471	≤ 60	312	292	264	241	219	200	186	174	-	-	-
16Mo3	1.5415	≤ 60	243	237	224	205	173	159	156	150	146	-	-
8MoB5-4	1.5450	≤ 16	368	368	368	368	368	368	368	-	-	-	-
14MoV6-3	1.7715	≤ 60	282	276	267	241	225	216	209	203	200	197	-
10CrMo5-5	1.7338	≤ 60	240	228	219	208	165	156	148	144	143	-	-
13CrMo4-5	1.7335	≤ 60	264	253	245	236	192	182	174	168	166	-	-
10CrMo9-10	1.7380	≤ 60	249	241	234	224	219	212	207	193	180	-	-
11CrMo9-10	1.7383	≤ 60	323	312	304	296	289	280	275	257	239	-	-
25CrMo4	1.7218	≤ 60	-	315	305	295	285	265	225	185	-	-	-
20CrMoV13-5-5	1.7779	≤ 60	-	575	570	560	550	510	470	420	370	-	-
15NiCuMoNb5-6-4	1.6368	≤ 80	422	412	402	392	382	373	343	304	-	-	-
7CrWVMoNb9-6	1.8201	≤ 60	379	370	363	361	359	351	345	338	330	299	266
7CrMoVTiB10-10	1.7378	$R_p \leq 60$ (3)	397	383	373	366	359	352	345	336	324	301	248
X11CrMo5+I	1.7362+I	≤ 100	156	150	148	147	145	142	137	129	116	-	-
X11CrMo5+NT1	1.7362+NT1	≤ 100	245	237	230	223	216	206	196	181	167	-	-
X11CrMo5+NT2	1.7362+NT2	≤ 100	366	350	334	332	309	299	289	280	265	-	-
X11CrMo9-1+I	1.7386+I	≤ 60	187	186	178	177	175	171	164	153	142	120	-
X11CrMo9-1+NT	1.7386+NT	≤ 60	363	348	334	330	326	322	316	311	290	235	-
X10CrMoVNB9-1	1.4903	≤ 100	410	395	380	370	360	350	340	320	300	270	215
X10CrWMoVNB9-2	1.4901	≤ 100	420	412	405	400	392	382	372	360	340	300	248
X11CrMoWVNB9-1-1	1.4905	≤ 100	412	401	390	383	376	367	356	342	319	287	231
X20CrMoV11-1	1.4922	≤ 100	-	-	430	415	390	380	360	330	290	250	-

<sup>a</sup> 1 MPa = 1 N/mm<sup>2</sup>.