

BIOKÄYTTÖISEN MATALAPAINEHÖYRYJÄR- JESTELMÄN TIETOPERUSTAN JA TEKNIIKAN ESISELVITYS

Albert Lehtoaho

Opinnäytetyö
Toukokuu 2014

Energiatekniikan koulutusohjelma
Tekniikan ja liikenteen ala



Tekijä(t) Lehtoaho, Albert	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 22.05.2014
	Sivumäärä 85	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty (X)
Työn nimi BIOKÄYTTÖISEN MATALAPAINEHÖYRYJÄRJESTELMÄN TIETOPERUSTAN JA TEKNIIKAN ESISELVITYS		
Koulutusohjelma Energiatekniikan koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) Isometsä, Juha		
Toimeksiantaja(t) Ariterm Oy		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyö tehtiin Ariterm Oy:lle, joka on kotimainen energiaratkaisuja toimittava yritys. Ensimmäisenä tavoitteena oli koota tietoperusta höyryjärjestelmän ymmärtämiseksi teoreettisten ja teknisten vaatimusten osalta. Toinen tavoite oli kartoittaa kotimaisten matalapainehöyryjärjestelmätoimittajien toimintakenttää. Kolmantena tavoitteena oli vielä selvittää ja mitoittaa matalapainehöyryjärjestelmän toteuttamisen mahdollisuutta sekä kannattavuutta nykyisiin Aritermin kuumavesikattiloihin perustuen. Neljäntenä tavoitteena oli selvittää mahdollista kehitettävää höyryjärjestelmää vastaavaa kysyntää.</p> <p>Tietoperustaa lähdettiin selvittämään kirjallisuudesta ja komponenttivalmistajilta saatavien tietojen avulla. Nykyisiä kotimaisia höyryjärjestelmätoimittajia lähestyttiin sähköisellä kyselykaavakkeella. Tietoperustaan perustuvia yhtälöitä ja laitevalmistajien tietoja käyttämällä tehtiin laskelmia sekä simulaatio mahdollisen tuotteen mitoittamiseksi ja kilpailukyvyyn arvioimiseksi. Mahdollista tuotetta vastaavaa kysyntää ei selvitetty, mutta tietoperustaan listattiin teollisuuden toimintoja, joissa höyry on osallisena.</p> <p>Opinnäytteen merkittävin tulos on tietoperustaosio, jonka tarkoitus on auttaa toimeksiantajan, Ariterm Oy:n nykyisiä työntekijöitä ymmärtämään höyryjärjestelmän toimintaa ja sen vaatimien teknisten ratkaisujen laajuutta. Nykyisille höyryjärjestelmien toimittajille tehdyn kyselyn vastauksista ilmeni, että matalissa teho- ja paineluokissa voisi olla tilaa uudelle toimijalle. Alustavaa höyryjärjestelmän mitoittamista varten tehty laskentapohja sisältää jalostettuna potentiaalin jatkokäyttöä varten. Kilpailukykyä varten tehtyjen laskelmien ja simulaation tulokset kärsivät epätarkoista taustatiedoista ja ovat siksi epäluotettavia. Taloudellisuusarvion laskentapohjaa voidaan kuitenkin hyödyntää jatkossa, kun tarkempia tietoja on saatavilla.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Bioenergia, esiselvitys, höyrykattila, höyryvesikiertojärjestelmä, lämmönsiirto, matalapainehöyry		
Muut tiedot		



Author(s) Lehtoaho, Albert	Type of publication Bachelor's Thesis	Date 22052014
	Pages 85	Language Finnish
		Permission for web publication (X)
Title PRESURVEY ON THE TECHNICAL DETAILS AND FRAMEWORK OF THE BIOFUEL BASED LOW PRESSURE STEAM SYSTEM		
Degree Programme Degree Programme in Energy Technology		
Tutor(s) Isometsä, Juha		
Assigned by Ariterm Oy		
Abstract <p>The thesis was assigned by Ariterm Oy which is a supplier of energy systems. The first goal of the thesis was to gather information to gain understanding of the technical and theoretic matters of low pressured steam systems. The second goal was to make a survey of the companies that supply steam systems in Finland and sort out the operating values of the companies systems. The third goal was to sort out the possibilities to take utilize the current hot water boiler production when designing new steam system products and estimate the economic performance of the hot water boiler based steam systems. The fourth goal was to assess if there was a call for steam systems with the estimated operating values.</p> <p>Information of the technical and theoretical matters of the steam systems was studied through literature and the component suppliers. The survey for the suppliers that are already operating with low pressured steam systems was made using an electronic question form. The economic values of the possible steam systems were calculated and simulated by using mathematical formulas and other information that was found in literature and through the component suppliers. The possible call for the future steam systems was not estimates but unit processes that use steam were listed in the thesis.</p> <p>The most remarkable result of the thesis was the theoretical framework of the thesis itself. It can help the present employees at Ariterm to understand the nature and the scope of technical requirements of the steam systems. The results of the survey for the present low pressured steam suppliers in Finland showed that there might be room for a supplier that is willing to supply a steam system operating in low pressures and capacities. The calculating form that was made for sizing the hot water boiler based steam system includes some potential value if it is developed further. The results on calculating the economy of the different steam systems were highly unreliable because of defective background information. However, the financial parts of the calculations can be updated when getting the more reliable information of the steam systems.</p>		
Keywords Bioenergy, presurvey, steam boiler, steam, water and gas circuits, heat transfer, low pressure steam		
Miscellaneous		

Sisältö

Sisältö.....	1
1 Opinnäytetyön tausta ja tavoitteet	6
2 Höyry lämmönsiirrossa	7
2.1. Jatkuvuustilaprosessi	7
2.2 Faasimuutosprosessi	8
2.3 Tilapiirrokset	9
2.4 Ominaisuustaulukot	11
2.5 Lämmönsiirtomekanismit	14
2.6 Kiehuminen.....	19
2.7 Lauhtuminen	28
3 Höyryjärjestelmiin liittyvät standardit ja säädökset.....	29
4 Höyryjärjestelmien komponentit ja laitteet	34
4.1 Höyrykattilat	34
4.2 Lieriö.....	36
4.3 Lauhteenpoistimet.....	37
4.4 Venttiilit	38
4.5 Syöttövesisäiliö	39
4.6 Syöttöveden esilämmittimet	41
4.7 Pumput	41
4.8 Lämmönvaihtimet.....	44
5 Höyryjärjestelmän käyttö ja prosessit	46
5.1 Vedenkäsittely	46
5.2 Pääsädöt.....	48
5.3 Höyryä käyttävät yksikköprosessit	48
6 Matalapainehöyry teoriassa ja tekniikassa	50
6.1 Tietoperustan kartoitus höyryn ymmärtämiseksi	50

6.2 Höyryn tietoperustan havainnollistaminen	51
7 Toimeksiantajan tuotteiden tekninen valmius	52
7.1 Mitoituslaskelmat nykyisen tekniikan valmiuksista	52
7.2 Nykyisten teknisten valmiuksien tulokset	55
8 Kotimaisen höyryjärjestelmäliiketoiminnan kenttä	57
8.1 Kysely höyryjärjestelmätoimittajille	57
8.2 Höyrytoimittaja-kyselyn vastaukset	58
9 Matalapainehöyryjärjestelmien vertailu	59
9.1 Järjestelmien tekninen vertailu	59
9.2 Hyötysuhdevertailu vaihdin- ja tulitorvijärjestelmille	62
9.3 Hyötysuhdevertailun tulokset	65
9.3 Höyryjärjestelmien taloudellisuusvertailun laskelmat	67
9.4 Höyryjärjestelmien taloudellisuusvertailun tulokset	70
10 Opinnäytteen tulosten pohdintaosuus	74
10.1 Tavoitteiden saavuttaminen ja luotettavuus	74
10.2 Jatkoselvitykset ja -toimenpiteet	75
Lähteet	77
Liitteet	79
Liite 1. Kyselylomake kotimaisille höyrytoimittajille	79
Liite 2. Investointihinnat ja energian kulutus eri järjestelmille	82
Liite 3. Veden ominaisentalpia paineen ja lämpötilan mukaan	83
Liite 4. Kylläisen matalapainehöyryn ominaisentalpia	84
Liite 5. Järjestelmien kumuloituneet tuotot oletusarvoilla ja hintojen nousulla	85

Kuviot

Kuvio 1. Höyryn T-v -kuvaaja	10
Kuvio 2. Höyryn P-v -kuvaaja	11
Kuvio 3. Lämmön johtuminen	15
Kuvio 4. Säteilylämmönsiirron mekanismeja	18
Kuvio 5. Yhdistetty lämmönsiirtyminen	19
Kuvio 6. Kiehumistyyppien vertailu	20
Kuvio 7. Seisovan kiehumisen vaiheet	21
Kuvio 8. Seisovan kiehumisen kehittyminen	21
Kuvio 9. Virtaavan kiehumisen virtaustyyppejä	26
Kuvio 10. Virtaustyyppin yhteys kaasun ja nesteen virtausnopeuksiin	27
Kuvio 11. Sisäpuolisen virtaavan kiehumisen kehittyminen pystyputkessa ...	28
Kuvio 12. Höyryn tai ylikuumennetun veden tuotantoon tarkoitettujen laitteistojen luokittelu paineen ja tilavuuden mukaan	31
Kuvio 13. Standardointijärjestöjen sijoittuminen kansainvälisillä, eurooppalaisilla ja kansallisilla tasoilla.....	33
Kuvio 14. Tulitorvikattilan toimintaperiaate	35
Kuvio 15. Syöttövesisäiliölle tulevat virtaukset	40
Kuvio 16. Syöttövesipumpun mitoitus.....	42
Kuvio 17. Vasta- ja myötälämmönvaihtimien toiminta ja lämpötilaerot	44
Kuvio 18. Ristilämmönvaihtimen toiminta ja lämpötilaerot.....	45
Kuvio 19. Lämmönvaihtimen mitoitus ja laskenta	45
Kuvio 20. Veden teoreettinen tehopotentiaali suhteessa painetta vastaavaan 4 °C:seen veteen.....	51
Kuvio 21. Vaihdinjärjestelmän mitoituksen tulokset PI -kaaviossa	56
Kuvio 22. Vaihdinjärjestelmän yksinkertaistettu PI -kaavio.....	60
Kuvio 23. Tulitorvikattilan yksinkertaistettu PI -kaavio	60
Kuvio 24. CFD -mallin geometria ja virtaukset.....	63
Kuvio 25. Materiaalin Stainless Steel 321 lämmönjohtuvuus SolidWorks Flow Simulation 2012 ohjelmakirjastossa	64
Kuvio 26. CFD -simulaation mukaiset lämpötilajakaumat ja poistuvien vesien lämpötilat	66
Kuvio 27. Järjestelmien kumuloituneet tuotot verrattuna vastaavan vanhaan öljykattilaan 15 vuoden ajanjaksolla	71

Kuvio 28. Järjestelmien kumuloituneet tuotot verrattuna vastaavan vanhaan öljykattilaan 5 vuoden ajanjaksolla	72
---	----

Taulukot

Taulukko 1. Kylläisen veden ja höyryn ominaisuudet paineen mukaan.....	12
Taulukko 2. Kylläisen veden ja höyryn ominaisuudet lämpötilan mukaan	13
Taulukko 3. Konvektion lämmönsiirtokertoimien suuruusluokkia.....	16
Taulukko 4. Seisovan kiehumisen kokeellisia kertoimia eri pinnoille ja fluideille	24
Taulukko 5. Seisovan kiehumisen geometrian kokeellisia vakioita.....	24
Taulukko 6. Painelaitteiden luokittelun kuvaviitenumerot painelaitelaissa	30
Taulukko 7. Painelaiteluokkien vaatimat moduulit ja niiden kuvaukset.....	32
Taulukko 8. Hapen ja typen liukoisuus eri lämpötiloissa normaali-ilmanpaineessa.....	47
Taulukko 9. Mitoituksen keskeisimmät lähtöarvot	53
Taulukko 10. Vaihdinjärjestelmän arvojen mitoitus eri höyrynpaineilla	55
Taulukko 11. Keskeisimmät tulokset 5 baarin höyryllä	57
Taulukko 12. Höyryjärjestelmien vertailu	61
Taulukko 13. Energiankulutuksessa huomioitavat tekijät	68
Taulukko 14. Hintojen ja rahoituksen lähtötiedot	68
Taulukko 15. Järjestelmien kannattavuusmittareiden vertailu 15 vuoden ajan ajanjaksolla.....	72
Taulukko 16. Vaihdinjärjestelmien kannattavuuden herkkyys	73

Käsitteet

CFD	Computational Fluid Dynamics, numeerinen virtausdynamikka
Entalpia	Sisäenergian, paineen ja tilavuuden yhdistävä termodynaaminen suure. Yksikkö kJ
Fluidi	Yleisnimitys väliaineille, joissa rakenneosat pääsevät liikkumaan vapaasti toistensa suhteen
Homogeeninen seos	Tasalaatuinen seos, ei selkeää faasirajaa komponenttien välillä
Isobaari	Vakiopaine
Isotermi	Vakiolämpötila
Lämmönjohtavuus	Aineen tai materiaalin lämmönjohtumisen nopeus. Yksikkö m^2/s
Lämpökapasiteetti	Aineen tai materiaalin kyky varastoida lämpöä tilavuutta kohden. Yksikkö $\text{kJ}/(\text{m}^3 \text{K})$
Ominaisentalpia	Entalpian energia jaettuna massayksikköä kohden. Yksikkö kJ/kg
Ominaissisäenergia	Sisäenergia jaettuna massayksikköä kohden. Yksikkö kJ/kg
Sisäenergia	Molekyylitasolla sitoutunut energia. Yksikkö kJ
Systeemi	Tutkittavaksi valittu väliaineen määrä tai avaruuden alue

1 Opinnäytetyön tausta ja tavoitteet

Kansallisena ja eurooppalaisena tavoitteena on parantaa alueellista energiaomavaraisuutta ja samalla vähentää globaaleja kasvihuonekaasupäästöjä. Kehittyvien maiden kasvava energiantarve on luonut hinnankorotuspaineita perinteisille fossiilisille polttoaineille kuten öljylle ja kaasulle. Lisäksi vaatimukset polttoaineiden rikkipitoisuuksille ovat estämässä monissa sovelluksissa raskaanpolttoöljyn käytön, mikä heikentää öljyn käytön kannattavuutta. Siksi uudessa tilanteessa biopohjaisille energiaratkaisuille on avautumassa uusia liiketoimintamahdollisuuksia.

Opinnäytetyön toimeksiantaja, Ariterm Oy on kehittänyt biopohjaisiin energialähteisiin perustuvia tuotteita omakotitalojen pienistä lämmityskattiloista aina muutamien megawattien kaukolämpökeskuksiin asti. Yritys toimii pääasiassa pohjoismaissa, mutta markkinat Eurooppaan ja Venäjälle ovat avautumassa. Yrityksen tuotevalikoimiin kuuluu kattiloiden lisäksi mm. polttimet, projektitoimitukset sekä integroidut lämmityskontit.

Aritermin kohtaama tiukka kilpailu lämmityskattilaliiketoiminnan kentällä sekä halu kehittää ja hajauttaa liiketoimintaa ovat luoneet yrityksessä kiinnostusta biokäyttöisen matalapainehöyryjärjestelmien liiketoimintaa kohtaan. Lisäksi eurooppalaisen lämmitysinfrastruktuurin eroavaisuudet kotimaisesta eivät mahdollista lämmityskattilaliiketoiminnalle vastaavia markkinoita kuin höyryjärjestelmäliiketoiminnalle.

Opinnäytetyön keskeisenä tavoitteena oli kartoittaa kotimaisen höyryliiketoiminnan kenttää. Tärkeätä oli löytää kotimaiset höyrytoimijat ja heidän tuotteidensa lokerot höyryjärjestelmäliiketoiminnan kentällä. Toimijoita aiottiin etsiä yleisesti sähköisten välineiden avulla, ja potentiaalisia toimijoita oli tarkoitus lähestyä kyselyllä.

Koska höyryn käyttö teollisuudessa eroaa nykyisten tuotteiden tuottamasta kuumasta vedestä, oli tavoitteena myös vahvistaa nykyisten työntekijöiden tietopohjaa höyryn osalta. Tietämystä oli tarkoitus lisätä höyryn teorian, sää-

dösten ja standardien, komponenttien sekä käytön osalta. Tietopohjan rakentamiseksi ajateltiin käyttää kirjallisuutta sekä laitevalmistajien tietoja. Tietopohjasta oli tarkoitus jalostaa havainnollista esitysmateriaalia tiedon omaksumisen tueksi.

Toimeksiantajan nykyisten tuotteiden tekninen soveltuvuus mahdollista höyryliiketoimintaa varten täytyi selvittää, koska kokonaan uuden tuotteen tekeminen koettiin haastavaksi. Soveltuvuutta varten oli tarkoitus käyttää tietoperustaa pohjana laskennalle. Laskennan tavoitteena oli lähteä haarukoimaan teknistä ylärajaa nykyisille tuotteille sekä avustaa höyryjärjestelmään tarvittavien lisäkomponenttien mitoituksessa.

Aritermin teknisenvalmiuden lisäksi oli verrattava, olisiko nykyisillä tuotteilla toteutettava matalapainehöyryliiketoiminta kilpailukykyistä ja olisiko tuotteille kysyntää. Kilpailukyvyn mittaamisessa oli tarkoitus käyttää teorian ja laskentapohjan tietoja sekä koota reunaehdoja höytysuhteen määrittämiseksi simuloimalla. Taloudellista kilpailukykyä varten oli tarvetta etsiä vaadittaville lisäkomponenteille hintoja eri laitetoimittajilta. Kysynnän selvittämiseksi oli tarkoitus tehdä kysely toimeksiantajan valikoimille toimijoille.

2 Höyry lämmönsiirrossa

2.1. Jatkuvuustilaprosessi

Jatkuvuustilaprosessin ymmärtäminen toimii perustana höyryprosessin ymmärtämiselle, koska tätä periaatetta käyttäen tapahtuu mm. massa- ja energiataseiden määrittäminen, joiden avulla mitoitus, säädöt ja hyötysuhdelaskelmat tehdään.

Jatkuvuustilaprosessissa termillä jatkuvuus tarkoitetaan sitä, että ajan kuluessa ei tapahdu muutosta. Monet laitteet toimivat suuren osan ajasta samassa tilassa, jolloin niitä voidaan ajatella jatkuvuustilaprosessin kautta. Eri kohdissa

prosessin kontrollitilaa fluidin ominaisuudet voivat poiketa, mutta tietyn kohdan ominaisuudet eivät muutu ajan kuluessa. Laitteita joissa voidaan approksimoida jatkuvuustilan periaatteita, ovat esimerkiksi turbiinit, pumput, kattilat, lauhduttimet ja lämmönvaihtimet sekä voimalaitos- ja jäähdytysprosessit. (Boles & Çengel 2011, 17.)

2.2 Faasimuutosprosessi

Veden faasimuutosprosessia voidaan kuvata seuraavan esimerkin mukaisesti - 20 °C:sta 200 °C:seen normaali-ilmanpaineessa. Prosessi voidaan jakaa viiteen osa-alueeseen seuraavasti:

1. Kiinteäfaasin alue, kestää lämmitettäessä aina 0 °C:seen asti. Tällöin lämpötilan nousua seuraa tilavuuden kasvu.
2. Kylläisen kiinteän ja nesteen alue saavutetaan, kun lämpötila on noussut 0 °C:seen. Tällöin on saavutettu sulamispiste eli kylläinen kiinteä alue. Tämän jälkeen lämpötila ei nouse ja vedelle ominaisesti tilavuus pienenee, kunnes lämpöä on siirretty sulamislämmön verran ja saavutetaan kylläisen nesteen alue.
3. Nestefaasin alue ulottuu lämmitettäessä 100 °C:seen asti. Lämmitettäessä tilavuus kasvaa, paitsi 0 – 4 °C:n alueella veden tilavuus käyttäytyy poikkeavasti.
4. Kylläisen nesteen ja kaasun alue saavutetaan, kun lämpötila on noussut 100 °C:seen. Tällöin on saavutettu kiehumispiste, toinen kylläisen nesteen alue. Kylläisen nesteen alueita on siis kaksi riippuen faasimuutoksen suunnasta. Kun kylläiseen nesteeseen viedään lämpöä, sen tilavuus kasvaa huomattavasti, kun lämpöä on siirretty kaasuuntumislämmön verran, saavutetaan kylläisen kaasun alue.
5. Kaasufaasin alue saavutetaan, kun kaasua lämmitetään yli 100 °C:seen.

Saman tyyppisiä faasimuutoksia voidaan todentaa myös muissa paineissa. (Singh 2009, 166.)

Merkittävin lämmitysenergian vienti tapahtuu, kun siirrytään faasialueelta toiselle: kiinteästä nesteeksi ja nesteestä kaasuksi. Vedellä faasimuutoksen vaatimat energiamäärät ovat 334 kJ/kg kiinteän sulamiselle ja 2257 kJ/kg nesteen höyrystymiselle (Valtanen 2010, 336, 338). Vedestä puhuttaessa käytetään faasimuutosprosessissa termejä kylläinen vesi (juuri kiehumassa olevasta nesteestä) ja kylläinen höyry (juuri lauhtumassa olevasta kaasusta). Kun kaasun lämpötila on noussut kiehumispisteen yläpuolelle, puhutaan tulistetusta höyrystä. (Boles & Çengel 2011, 114–115.)

Kylläinen vesi-höyryseos on olomuoto, joka esiintyy kylläisen veden ja höyryn välissä. Seosta voidaan kuvata höyrypitoisuuden mukaan seuraavalla yhtälöllä 1:

$$x = \frac{m_v}{m_v + m_l} \quad (1)$$

missä

x on höyrypitoisuus

m_v on kylläisen höyryn massa

m_l on kylläisen veden massa. (Singh 2009, 174.)

Höyrypitoisuudesta voidaan puhua myös höyryn laatuna. Laadulla on merkitystä ainoastaan kylläisestä seoksesta puhuttaessa. Höyrypitoisuus saa arvoja 0: n ja 1: n väliltä. Kylläisen veden ja höyryn ominaisuudet eivät riipu siitä, esiintyvätkö ne yksinään vai yhdessä. Koska yleensä massasuhdetta ei ole tiedossa, on mahdollista ajatella seosta hyvin sekoittuneena ja homogeenisenä seoksena. (Boles & Çengel 2011, 127.)

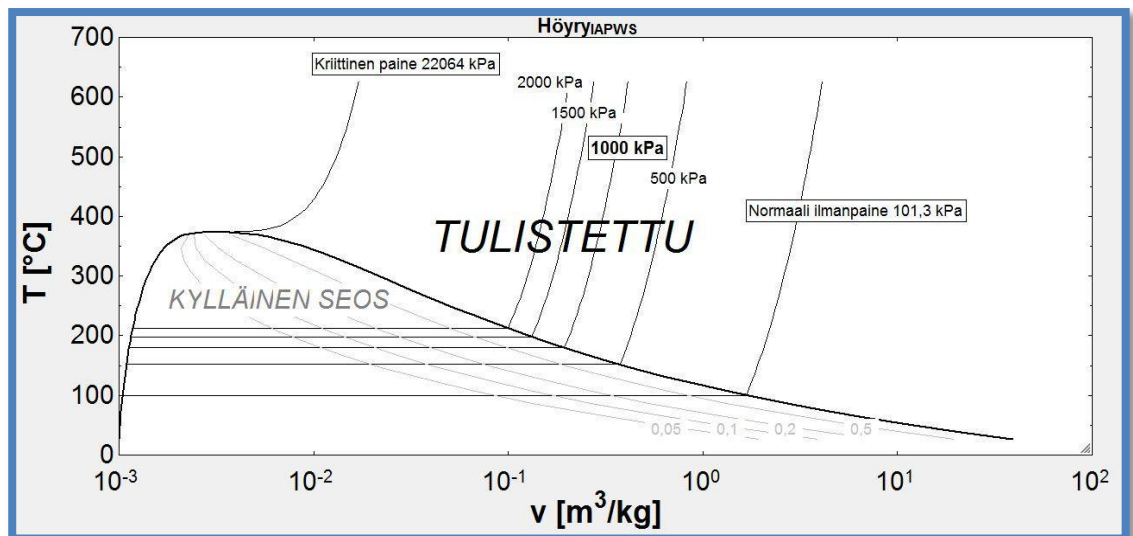
2.3 Tilapiirrokset

Ominaisuuksien muutokset ja faasimuutokset käyvät parhaiten esille tilapiirroksista. Kylläisen veden tiloja piirroksissa yhdistävää käyrää kutsutaan kylläisen veden käyräksi ja vastaavasti kylläisen höyryn tiloja yhdistävää käyrää kutsutaan kylläisen höyryn käyräksi. (Boles & Çengel 2011, 119.)

T-v -kuvaaja

Veden faasimuutosprosessia kuvaamaan voidaan piirtää T-v -diagrammi, jossa muutos näkyy useissa eri paineissa. Esimerkiksi normaali-ilmanpainetta korkeammassa paineessa veden ominaistilavuus pienenee ja kiehuminen alkaa korkeammassa lämpötilassa.

22,06 MPa:n kohdalla saavutetaan kriittinen paine, jolloin kylläisen veden ja höyryn tilat ovat identtiset. Tilaa vastaava kriittinen lämpötila on 373,95 °C. Kriittinen paine ja lämpötila muodostavat kriittisen pisteen. Kriittistä pistettä korkeammassa paineissa ei ole selkeää faasimuutosprosessia, mutta koko ajan läsnä on vain yksi faasi, vaikka ei voidakaan tarkkaan määrittää, missä kohdassa muutos tapahtuu. (Boles & Çengel 2011, 118-119.)



Kuvio 1. Höyryn T-v -kuvaaja

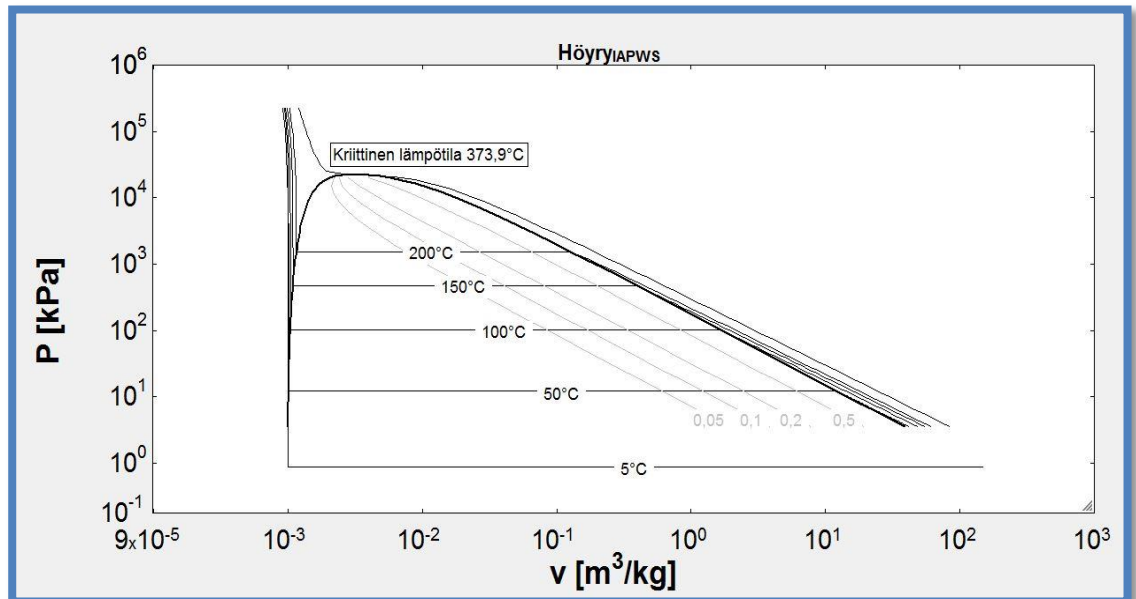
Kuviossa 1 on piirrettyä Engineering Equation Solver (EES) -ohjelmalla IAPWS -standardin mukainen vesihöyryn T-v -kuvaaja, johon on valittu opinäytetyön kannalta oleellisiksi katsottuja isobaareja.

P-v -kuvaaja

P-v -kuvaaja on hyvin samankaltainen kuin T-v -kuvaaja, mutta isotermit kulkevat ylhäältä alas. Kun isotermin painetta lasketaan riittävästi, alkaa kylläisen

käyrän kohdalla faasimuutos. Faasimuutosprosessin aikana lämpötila ja paine pysyvät vakioina, mutta ominaistilavuus kasvaa. (Boles & Çengel 2011, 120.)

Kuviossa 2 on piirrettyä Engineering Equation Solver (EES) -ohjelmalla IAPWS -standardin mukainen vesihöyryn P-v kuvaaja, johon on valittu opinnäytetyön kannalta oleellisiksi katsottuja isotermejä.



Kuvio 2. Höyryn P-v -kuvaaja

2.4 Ominaisuustaulukot

Useimmille aineille eri muuttujien väliset yhteneväisyydet on liian vaikeaa kuvata yksinkertaisesti yhtälöillä. Siksi ominaisuudet esitetään yleisesti taulukoissa. Kullekin aineelle esitetään useampia taulukoita tilan mukaan. Taulukoita on nesteelle, kylläiselle seokselle ja kaasulle erikseen.

Taulukot 1–2 laadittiin Excel -ohjelman liitännäisen X Steam versiolla 2.6, joka käyttää pohjana IAPWS IF97 -standardin määritelmiä. Taulukoihin on valittu opinnäytetyön kannalta oleellisiksi arvioituja arvojoukkoja.

Taulukko 1. Kylläisen veden ja höyryn ominaisuudet paineen mukaan

Paine [bar a]	Höyrystymis- lämpötila [°C]	Ominaislaavuus [m ³ /kg]		Ominaisenergia [kJ/kg]			Ominaisentalpia [kJ/kg]		
		Kylläinen vesi	Kylläinen höyry	Kylläinen vesi	Höyrysty- minen	Kylläinen höyry	Kylläinen vesi	Höyrysty- minen	Kylläinen höyry
P	T _{sat}	v _f	v _g	u _f	u _{rg}	u _g	h _f	h _{rg}	h _g
1,0	99,61	0,001043	1,69402	417,33	2088,22	2505,55	417,44	2257,51	2674,95
1,01325	99,97	0,001043	1,67330	418,88	2087,10	2505,98	418,99	2256,54	2675,53
1,5	111,35	0,001053	1,15936	466,92	2052,29	2519,21	467,08	2226,03	2693,11
2	120,21	0,001061	0,88574	504,47	2024,62	2529,09	504,68	2201,56	2706,24
2,5	127,41	0,001067	0,71870	535,08	2001,74	2536,83	535,35	2181,15	2716,50
3	133,53	0,001073	0,60579	561,13	1982,02	2543,16	561,46	2163,44	2724,89
3,5	138,86	0,001079	0,52420	583,93	1964,56	2548,50	584,31	2147,65	2731,97
4	143,61	0,001084	0,46239	604,29	1948,81	2553,10	604,72	2133,33	2738,06
4,5	147,91	0,001088	0,41390	622,73	1934,40	2557,13	623,22	2120,16	2743,39
5	151,84	0,001093	0,37480	639,64	1921,07	2560,71	640,19	2107,92	2748,11
5,5	155,46	0,001097	0,34259	655,27	1908,63	2563,91	655,88	2096,45	2752,33
6	158,83	0,001101	0,31558	669,84	1896,95	2566,79	670,50	2085,64	2756,14
6,5	161,99	0,001104	0,29258	683,50	1885,92	2569,42	684,22	2075,38	2759,60
7	164,95	0,001108	0,27276	696,37	1875,45	2571,81	697,14	2065,61	2762,75
7,5	167,76	0,001111	0,25550	708,55	1865,46	2574,01	709,38	2056,26	2765,64
8	170,41	0,001115	0,24033	720,13	1855,91	2576,04	721,02	2047,28	2768,30
8,5	172,94	0,001118	0,22688	731,16	1846,75	2577,91	732,11	2038,65	2770,76
9	175,36	0,001121	0,21487	741,72	1837,94	2579,65	742,72	2030,31	2773,04
9,5	177,67	0,001124	0,20409	751,83	1829,43	2581,27	752,90	2022,25	2775,15
10	179,89	0,001127	0,19435	761,56	1821,22	2582,77	762,68	2014,44	2777,12
10,5	182,02	0,001130	0,18550	770,92	1813,26	2584,17	772,10	2006,85	2778,95
11	184,07	0,001133	0,17744	779,95	1805,54	2585,49	781,20	1999,47	2780,67
11,5	186,05	0,001136	0,17005	788,68	1798,04	2586,72	789,99	1992,28	2782,27
12	187,96	0,001139	0,16325	797,13	1790,74	2587,87	798,50	1985,27	2783,77
12,5	189,82	0,001141	0,15698	805,32	1783,63	2588,95	806,75	1978,42	2785,17
13	191,61	0,001144	0,15117	813,28	1776,69	2589,97	814,76	1971,73	2786,49
13,5	193,35	0,001146	0,14579	821,00	1769,92	2590,92	822,55	1965,18	2787,73
14	195,05	0,001149	0,14077	828,52	1763,29	2591,82	830,13	1958,76	2788,89
14,5	196,69	0,001151	0,13608	835,85	1756,82	2592,66	837,52	1952,47	2789,98
15	198,30	0,001154	0,13170	842,99	1750,47	2593,46	844,72	1946,29	2791,01
15,5	199,86	0,001156	0,12759	849,95	1744,25	2594,20	851,74	1940,23	2791,97
16	201,38	0,001159	0,12373	856,76	1738,15	2594,91	858,61	1934,27	2792,88
16,5	202,86	0,001161	0,12010	863,41	1732,17	2595,57	865,32	1928,41	2793,73
17	204,31	0,001163	0,11667	869,91	1726,29	2596,20	871,89	1922,64	2794,53
17,5	205,73	0,001166	0,11343	876,28	1720,51	2596,78	878,32	1916,96	2795,28
18	207,12	0,001168	0,11036	882,51	1714,82	2597,33	884,61	1911,37	2795,99
18,5	208,48	0,001170	0,10746	888,62	1709,23	2597,85	890,79	1905,86	2796,65
19	209,81	0,001172	0,10470	894,62	1703,72	2598,34	896,84	1900,42	2797,26
19,5	211,11	0,001175	0,10208	900,50	1698,30	2598,80	902,79	1895,06	2797,84
20	212,38	0,001177	0,09958	906,27	1692,95	2599,22	908,62	1889,76	2798,38

Taulukko 2. Kylläisen veden ja höyryn ominaisuudet lämpötilan mukaan

Lämpötila [°C]	Höyrystymis- paine [bar a]	Ominaisilavuus [m ³ /kg]		Ominaisenergia [kJ/kg]			Ominaisentalpia [kJ/kg]		
		Kylläinen vesi	Kylläinen höyry	Kylläinen vesi	Höyrysty- minen	Kylläinen höyry	Kylläinen vesi	Höyrysty- minen	Kylläinen höyry
		v_f	v_g	u_f	u_{fg}	u_g	h_f	h_{fg}	h_g
1	0,0066	0,001000	192,44475	4,18	2372,10	2376,28	4,18	2498,55	2502,73
5	0,01	0,001000	147,01686	21,02	2360,77	2381,79	21,02	2489,05	2510,07
10	0,01	0,001000	106,30870	42,02	2346,64	2388,66	42,02	2477,21	2519,23
15	0,02	0,001001	77,88074	62,98	2332,54	2395,52	62,98	2465,38	2528,36
20	0,02	0,001002	57,76148	83,92	2318,44	2402,35	83,92	2453,55	2537,47
25	0,03	0,001003	43,34139	104,84	2304,33	2409,16	104,84	2441,71	2546,54
30	0,04	0,001004	32,88159	125,74	2290,20	2415,95	125,75	2429,84	2555,58
35	0,06	0,001006	25,20782	146,64	2276,06	2422,70	146,64	2417,94	2564,58
40	0,07	0,001008	19,51704	167,53	2261,89	2429,42	167,54	2406,00	2573,54
45	0,10	0,001010	15,25344	188,43	2247,68	2436,11	188,44	2394,02	2582,45
50	0,12	0,001012	12,02786	209,32	2233,43	2442,75	209,34	2381,97	2591,31
55	0,16	0,001015	9,56492	230,23	2219,13	2449,35	230,24	2369,87	2600,11
60	0,20	0,001017	7,66766	251,13	2204,77	2455,91	251,15	2357,69	2608,85
65	0,25	0,001020	6,19383	272,05	2190,36	2462,41	272,08	2345,43	2617,51
70	0,31	0,001023	5,03973	292,99	2175,87	2468,86	293,02	2333,03	2626,10
75	0,39	0,001026	4,12908	313,93	2161,31	2475,24	313,97	2320,68	2634,60
80	0,47	0,001029	3,40527	334,90	2146,65	2481,55	334,95	2308,07	2643,01
85	0,58	0,001032	2,82593	355,89	2131,91	2487,80	355,95	2295,38	2651,33
90	0,70	0,001036	2,35915	376,90	2117,06	2493,96	376,97	2282,56	2659,53
95	0,85	0,001040	1,98065	397,93	2102,10	2500,03	398,02	2269,60	2667,61
100	1,01	0,001043	1,67186	418,99	2087,02	2506,02	419,10	2256,47	2675,57
105	1,21	0,001047	1,41848	440,09	2071,81	2511,90	440,21	2243,18	2683,39
110	1,43	0,001052	1,20939	461,21	2056,46	2517,67	461,36	2229,70	2691,07
115	1,69	0,001056	1,03594	482,37	2040,95	2523,33	482,55	2216,03	2698,58
120	1,99	0,001060	0,89130	503,57	2025,29	2528,86	503,78	2202,15	2705,93
125	2,32	0,001065	0,77011	524,81	2009,45	2534,27	525,06	2188,04	2713,11
130	2,70	0,001070	0,66808	546,10	1993,43	2539,53	546,39	2173,70	2720,09
135	3,13	0,001075	0,58180	567,43	1977,22	2544,65	567,77	2159,10	2726,87
140	3,62	0,001080	0,50852	588,81	1960,80	2549,61	589,20	2144,24	2733,44
145	4,16	0,001085	0,44602	610,24	1944,17	2554,42	610,69	2129,10	2739,80
150	4,76	0,001091	0,39250	631,73	1927,32	2559,05	632,25	2113,67	2745,92
155	5,43	0,001096	0,34650	653,28	1910,22	2563,50	653,88	2097,92	2751,80
160	6,18	0,001102	0,30682	674,89	1892,88	2567,77	675,57	2081,86	2757,43
165	7,01	0,001108	0,27246	696,57	1875,28	2571,85	697,35	2065,45	2762,80
170	7,92	0,001114	0,24262	718,32	1857,41	2575,73	719,21	2048,69	2767,89
175	8,92	0,001121	0,21660	740,15	1839,25	2579,40	741,15	2031,55	2772,70
180	10,03	0,001127	0,19386	762,06	1820,79	2582,85	763,19	2014,03	2777,22
185	11,23	0,001134	0,17392	784,05	1802,02	2586,07	785,32	1996,10	2781,43
190	12,55	0,001141	0,15638	806,13	1782,92	2589,06	807,57	1977,74	2785,31
195	13,99	0,001149	0,14091	828,31	1763,48	2591,79	829,92	1958,94	2788,86
200	15,55	0,001157	0,12722	850,60	1743,68	2594,27	852,39	1939,67	2792,06
205	17,24	0,001164	0,11509	872,99	1723,50	2596,48	874,99	1919,90	2794,90
210	19,07	0,001173	0,10430	895,49	1702,92	2598,41	897,73	1899,62	2797,35
215	21,06	0,001181	0,09469	918,12	1681,92	2600,04	920,61	1878,80	2799,41
220	23,19	0,001190	0,08610	940,88	1660,48	2601,36	943,64	1857,41	2801,05

2.5 Lämmönsiirtomekanismit

Lämpö voi siirtyä systeemistä toiseen lämpötilaeron vaikutuksesta. Lämmön siirtyminen tapahtuu aina suuremmasta lämpötilasta pienempään, ja siirtymisen loppuu, kun systeemit saavuttavat saman lämpötilan. Lämmönsiirtomekanismeja on kolme: johtuminen, konvektio ja säteily.

Johtuminen

Johtumalla tapahtuva lämmönsiirto etenee korkeaenergisistä partikkeleista matalaenergisempiin partikkeleiden keskinäisen vuorovaikutuksen takia. Konvektio tapahtuu kiinteillä, nestemäisillä ja kaasumaisilla aineilla. Lämmönsiirron nopeus väliaineen läpi riippuu lämpötilaeron lisäksi aineen geometriasta, paksuudesta sekä materiaalista itsessään. Lämmön johtumisen tehoa voidaan kuvata yhtälöllä 2.

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \quad (2)$$

missä

\dot{Q}_{cond} on johtumisen lämmönsiirtoteho, W

k on materiaalin johtumiskerroin, $\frac{W}{mK}$

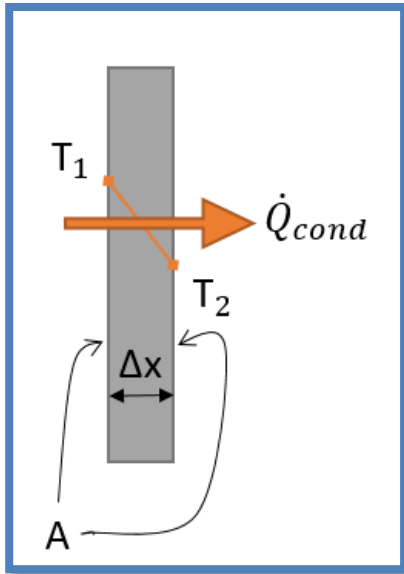
A on väliaineen pinta-ala, m^2

T_1 on korkeampi lämpötila, K tai °C

T_2 on matalampi lämpötila, K tai °C

Δx on väliaineen paksuus, m.

Yhtälö kuvaa lämmönsiirron tehoa annettuun suuntaan. Kuviossa 3 on esitetty yhtälön 2 kuvaama tilanne.



Kuvio 3. Lämmön johtuminen (Çengel & Ghajar 2011, muokattu)

Materiaalien johtumiskerroin k saa yleensä suurimman arvon kiinteillä ja pienimmän arvon kaasumaisilla olomuodoilla. Muutokset ovat yhteydessä lämmön johtavuuteen sekä ominaislämpöön (ks. Çengel & Ghajar 2011, 17–18, 21 – 23).

Konvektio

Kiinteän pinnan ja liikkuvan fluidin välistä lämmönsiirtoa kuvaa konvektio, joka yhdistää johtumisen ja fluidin liikkeen vaikutuksen. Mitä suurempaa fluidin liike on, sitä enemmän lämpöä siirtyy. Fluidin liike parantaa lämmönsiirtoa, mutta monimutkaistaa siirtyvän lämmön määrittystä. Konvektio voidaan jakaa kahteen ryhmään: vapaaseen ja pakotettuun konvektioon. Pakotetussa konvektiossa fluidi pakotetaan liikkeelle pintaa vasten, kun taas vapaa konvektio aiheutuu lämpötilojen aiheuttamista tiheyseroista fluidissa. Konvektion aiheuttama lämmönsiirto voidaan esittää yhtälöllä 3.

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad (3)$$

missä

\dot{Q}_{conv} on konvektion lämmönsiirtoteho, W

h on konvektion lämmönsiirtokerroin, $\frac{W}{m^2K}$

A on pinnan pinta-ala, m^2

T_s on pinnan lämpötila, K tai $^{\circ}C$

T_{∞} on fluidin lämpötila kaukana pinnasta, K tai $^{\circ}C$.

Pinnan lähellä fluidin ja pinnan lämpötilat ovat yhteneväiset. Konvektion lämmönsiirtokerroin h ei ole fluidin ominaisuus vaan kokeellisesti määritetty kerroin, joka riippuu kaikista muuttujista, esimerkiksi johtumiskertoimesta, pinnan geometriasta sekä fluidin virtaustyyppistä, ominaisuuksista ja nopeudesta. (Çengel & Ghajar 2011, 25 – 26.) Taulukossa 3 on esitetty tyypillisiä konvektion lämmönsiirtokertoimia konvektiotyypin mukaan.

Taulukko 3. Konvektion lämmönsiirtokertoimien suuruusluokkia (Çengel & Ghajar 2011, muokattu)

Konvektion tyyppi	h -kertoimen suuruusluokka [W/m^2K]
Vapaa kaasut	2 – 25
Vapaa nesteet	12 – 1000
Pakotettu kaasut	25 – 250
Pakotettu nesteet	50 – 20000
Kiehumisen ja lauhtuminen	2500 – 100000

Lämpösäteily

Säteily ei tarvitse johtumisen ja konvektion tavoin väliainetta lämmönsiirtoon, vaan energia siirtyy elektromagneettisina aaltoina, kuten valona. Säteily on lämmönsiirtotavoista nopein ja aiheutuu kappaleen lämpötilan vaikutuksesta. Kaikki kappaleet, kaasumaiset, nestemäiset ja kiinteät lämpösäteilevät, jos niiden lämpötila on yli absoluuttisen nollapisteen. Ilmiö on tilavuusriippuvainen, mutta kiinteillä, läpinäkymättömillä kappaleilla sitä voidaan ajatella pinta-riippuvaisena. Siirtyvän lämpösäteilyn teho voidaan laskea yhtälöllä 4.

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{surr}^4) \quad (4)$$

missä

\dot{Q}_{rad} on lämpösäteilyn teho, W

ε on kappaleen emissiivisyyskerroin, 0–1

σ on Stefan Boltzmannin vakio, $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$

A_s on kappaleen pinnan pinta-ala, m^2

T_s on pinnan lämpötila, K

T_{surr}^4 on ympäristön tai ympäröivän pinnan lämpötila, K.

Täydellisen säteilijän kykyä lämpösäteilyyn kuvaa Boltzmannin vakio, mutta todellisilla kappaleilla käytetään emissiivisyyskerrointa, joka ei koskaan saavuta ääriarvojaan 1 tai 0. (Çengel & Ghajar 2011, 27–29.)

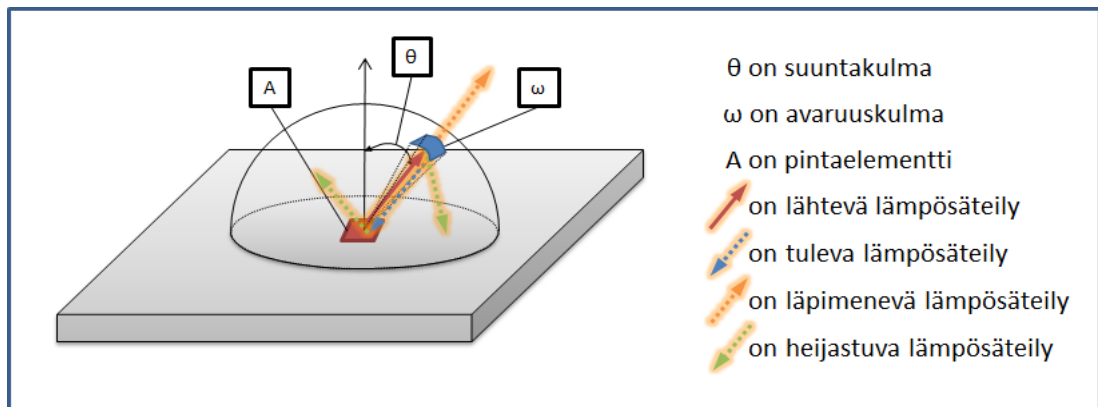
Säteilyn eli emittoinnin lisäksi aineet kuitenkin myös vastaanottavat eli absorboivat lämpösäteilyä. Yksi- ja kaksiatomiset symmetriset kaasut kuten H_2 , N_2 ja O_2 tyhjiön tavoin ovat lämpösäteilyä täysin läpäiseviä, mutta esimerkiksi CO_2 , CO , SO_2 ja vesihöyry, H_2O emittoivat ja absorboivat lämpösäteilyä. Kaasujen vaikutus on otettava huomioon, jos kaasuilla on suuri osuus tai ne muodostavat paksuja kerroksia. Energian siirrossa lämpösäteilyssä $0,1\text{--}100 \mu\text{m}$ ovat merkittävimmät aallonpituudet. Aineiden tai kappaleiden lämpötila laskee, jos ne emittoivat enemmän kuin absorboivat, ja nousee, jos ne absorboivat enemmän kuin emittoivat.

Polttoprosesseissa paloalueella, kuten tulipesässä, on lämpösäteily dominoiva energiansiirtomuoto seinämän ja savukaasujen välillä. Nettoemittoinnin tai absorboinnin määrään vaikuttaa vielä lisäksi heijastus, eli tarvitaan kolme suurta säteilyn määrittämiseksi: absorptiosuhde α , heijastussuhde ρ ja läpäisysuhde τ . Näille on voimassa yhtälön 5 mukainen suhde.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (5)$$

Näihin ominaisuuksiin vaikuttavat materiaalin lisäksi pinnan lämpötila ja sileyys sekä säteilyn aallonpituus ja kulma pintaan nähden. Yhtälön suureiden tarkka määrittäminen on kuitenkin hankalaa, ja siksi käytössä onkin integroituja keskiarvoja.

Lämpösäteilyn siirtymistä pinta-elementin (punainen) ja avaruuskulman kokoisena materiaalikerroksen (sininen) välillä on kuvattu kuviossa 4.



Kuvio 4. Säteilylämmönsiirron mekanismeja (Poltto ja palaminen 2002, muokattu)

Mitä kuumempi materiaali on, sitä suurempi osa emittoidusta lämpösäteilystä siirtyy lyhyemmällä aallonpituuksilla. Emissiivisyys- (ϵ) ja absorptiosuhteet (α) ovat yhtä suuret materiaalin ja olosuhteiden (T , λ ja θ) ollessa samat.

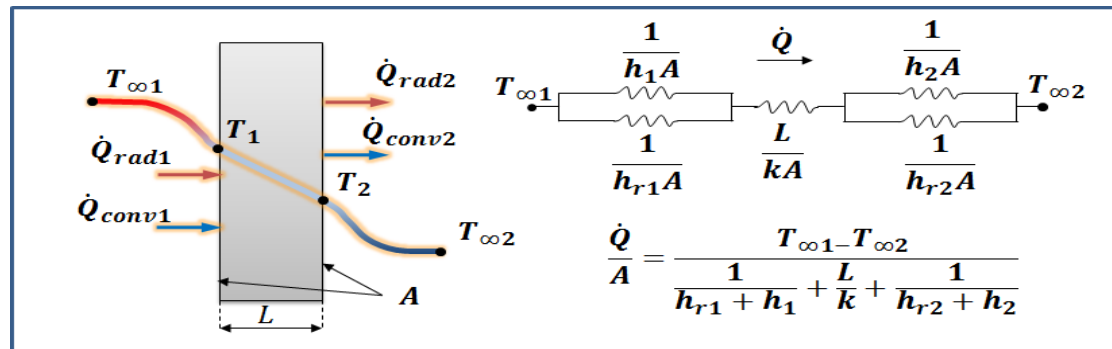
Palamisessa savukaasujen vesihöyry (H_2O), hiilidioksidi (CO_2) ja nokihiukkaset vaikuttavat säteilylämmönsiirtoon. Kaasujen merkitys esimerkiksi savukaasuseoksessa kasvaa osapaineen mukaan ja hiukkasten partikkelien tiheyden, laadun (noki, tuhka...) sekä kokojakauman mukaan. Tulipesässä kaasusta seinämiin tapahtuvan lämmönsiirron tarkka laskeminen on monimutkaista, sillä lämmönsiirtoa tapahtuu savukaasun sisällä sekä kaasusta seiniin. Tämä johtuu kaasussa olevista paikallisista lämpötilaeroista, joiden ennustamista monimutkaistaa virtauksen luonne. Tietokoneella on mahdollista tehdä kohtuullisen tarkkoja laskelmia jakamalla palotila tilaelementteihin, mutta yhtälössä 6 on esitetty likimääräinen laskentamalli, jossa tila oletetaan yhdeksi elementiksi ja lämpötilat tasaisiksi.

$$\dot{Q}_{gw} = \frac{\sigma A(\epsilon_g T_g^4 - \alpha_g T_w^4)}{1 + \frac{\alpha_g}{\epsilon_w} - \alpha_g} \quad (6)$$

Tässä alaindeksi g viittaa kaasuun ja w seinämään. (ks. Poltto ja palaminen 2002, 99–114.)

Yhdistetty lämmönsiirto

Todellisuudessa kuitenkin lämmönsiirrossa kaikki kolme mekanismia ovat yhtä aikaa voimassa. Kuvion 5 vasemmassa puoliskossa on esitetty yhdistetyn lämmönsiirron periaate ympäristöstä toiseen seinämän läpi. Oikealla kuviossa 5 on niin ikään esitetty yhdistetylle lämmönsiirrolle sähköverkkoanalogian periaatekuvaus sekä yhtälö.



Kuvio 5. Yhdistetty lämmönsiirtyminen (muokattu: Kothandaraman 2006)

Kuvion 5 säteilyn lämmönsiirtokerroin (h_r) on määritelty yhtälöllä 7.

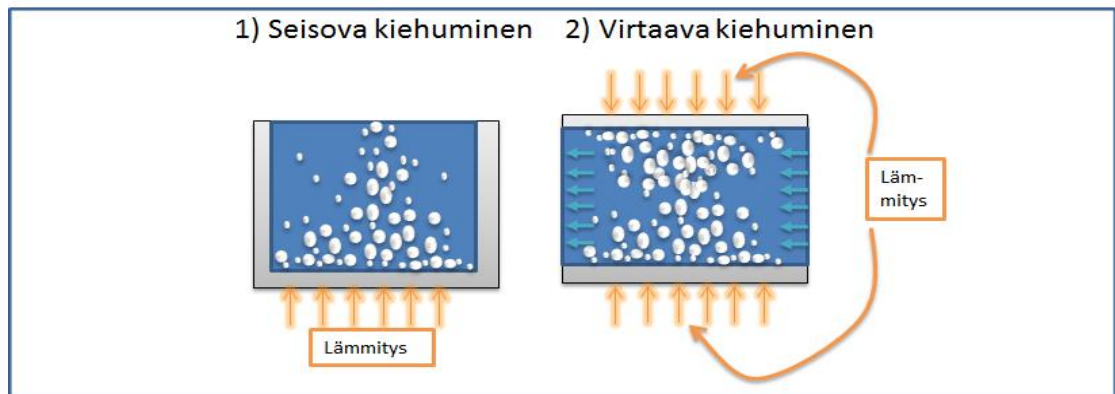
$$h_r = \varepsilon \sigma \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right)^3 \quad (7)$$

Kuviossa säteilyn ja konvektion vaikutuksen on ajateltu olevan rinnan molemmiin puolin seinämää ja niiden yhdistelmien sarjaan kytkettynä johtumisen vaikutuksen kanssa. (Kothandaraman 2006, 7–8.)

2.6 Kiehuminen

Kiehuminen pitää erottaa höyrystymisestä. Vaikka molemmissa tapahtuu faasimuutos nesteestä kaasuksi, höyrystyminen tapahtuu ainoastaan nesteen pinnasta. Kiehumista puolestaan voidaan pitää myös tietyn tyyppisenä konvektiona, koska siinä esiintyy esimerkiksi höyryn liikettä nesteessä. Kiehuminen riippuu tavallisesta konvektiosta poiketen höyrystymislämmöstä sekä nesteen pintajännityksestä, ja sen lämmönsiirtoteho on huomattavasti tehok-

kaampi kuin tavallisen konvektion. Kiehumisen voidaan jakaa seisovaan ja virtaavaan kiehumiseen. Seisovassa nestepatsas on paikallaan luonnollista konvektiota lukuun ottamatta ja ainoastaan höyrykuplat liikkuvat, kun virtaavassa nestepatsas on myös liikkeessä. (Çengel & Ghajar 2011, 581 – 583.) Erot on esitetty kuviossa 6.

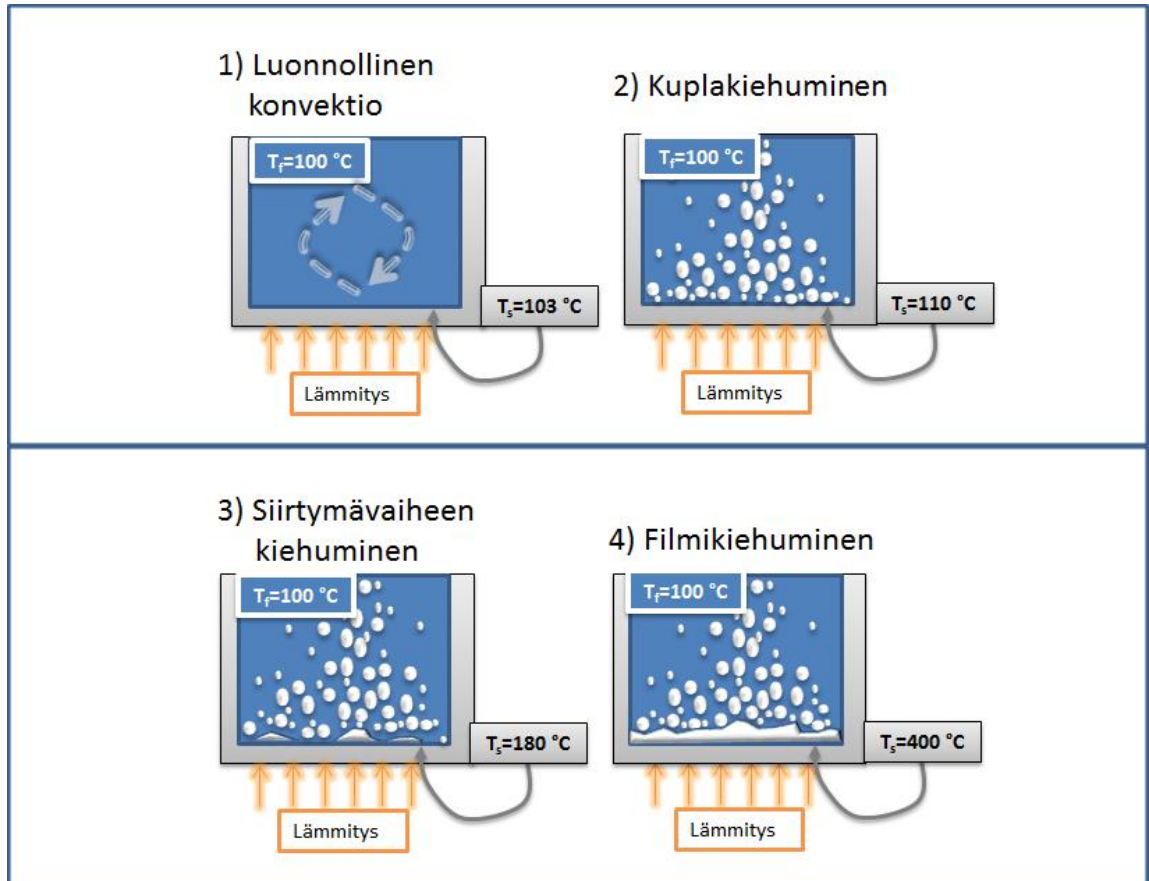


Kuvio 6. Kiehumistyyppien vertailu (Çengel & Ghajar 2011, muokattu)

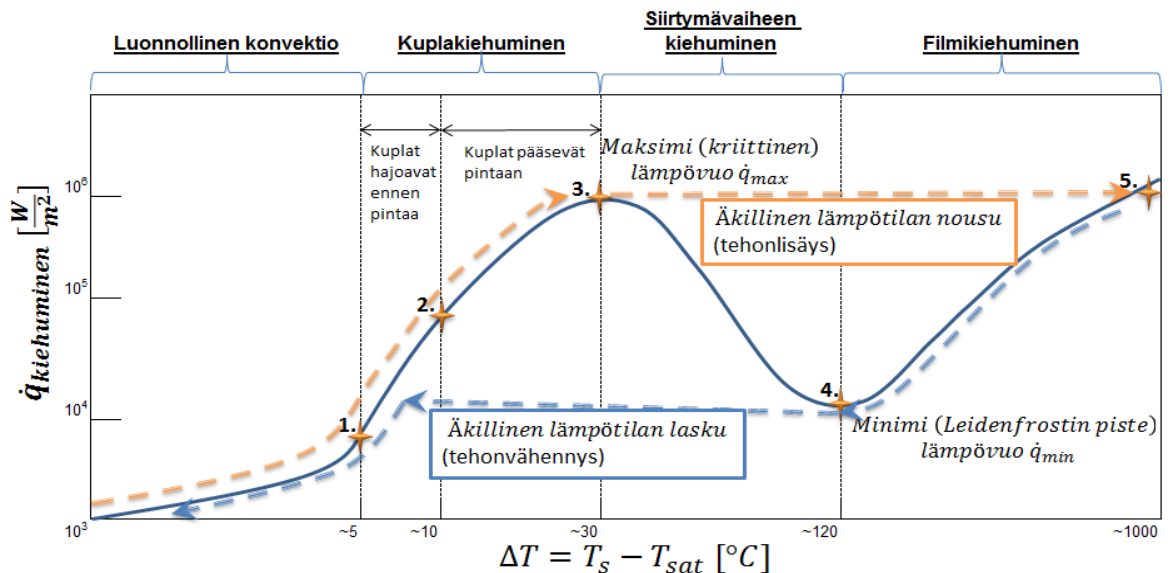
Seisova kiehuminen

Esimerkiksi 15-celsiusasteisen veden kiehuttamisen alkuvaiheessa normaali-ilmanpaineessa on havaittavissa muutamia piirteitä. Aluksi vedestä vapautuu liuennut ilma, mikä näkyy kuplimisena, vaikka kyse ei ole höyrykuplista. Lämpötilan noustessa alkaa lämpöpinnan läheisyydessä muodostua höyrykuplia, mutta ne pienenevät ja lopulta hajoavat kauempana pinnasta kiehumispistettä alemmassa lämpötilassa olevan veden vaikutuksesta. Kun koko vesimassa on saavuttanut kiehumispisteen eli on kylläistä, kiihtyy kuplimistahti ja kuplat saavuttavat pinnan. Vaikka kiehuminen on yksi yleisimmistä lämmönsiirron muodoista, on se vielä heikoiten tunnettu. Kiehumisen käyttäytymistä voidaan kuitenkin kuvata lämpöä siirtävän pinnan ja kiehumispisteen lämpötilaeron mukaan. (Çengel & Ghajar 2011.)

Kuviossa 7 on esitetty graafisesti eri kiehumisalueita ja kuviossa 8 on esitetty lämpötilaeron sekä lämmönsiirron tehokkuuden suhdetta kiehumiskäyrän muodossa. Molemmat kuviot kuvaavat normaali-ilmanpaineisen veden kiehumista.



Kuvio 7. Seisovan kiehumisen vaiheet (Çengel & Ghajar 2011, muokattu)



Kuvio 8. Seisovan kiehumisen kehittyminen (Çengel & Ghajar 2011, muokattu)

Kuvion 8 pisteeseen 1 asti on voimassa luonnollisen konvektion alue, jossa tiheuserojen aiheuttama liike siirtää lämpöä vesipatsaassa ja höyrystyminen tapahtuu nestepinnasta.

Pisteiden 1 ja 3 välissä on kuplakiehumisen alue. Pisteeseen 2 asti kuplat katoavat nopeasti kuumasta pinnasta erottuaan, ja vesi täyttää kuplien tilan. Alueen liike- ja sekoittumistekijät ovat lämmönsiirtoa pääasiassa parantava tekijä. Pisteeseen 2 jälkeen kupliminen lisääntyy ja kuplat pääsevät pintaan, jossa ne vapauttavat höyryn. Tällä alueella sekoittumisen ja liikkeen lisäksi lämmönsiirtoa nostaa faasimuutos. Lähellä pistettä 3 lämmönsiirtotehon nousu suhteessa lämpötilaeron nousuun hidastuu, koska suuri kuplien määrä lämmittäväällä pinnalla heikentää lämmönsiirtoa. Hyvän lämmönsiirtotehon suhde suhteellisen pieneen lämpötilaeroon nähden tekee kuplakiehumisesta tavoitellun alueen. Pisteessä 3 on lämmönsiirron kriittinen piste.

Pisteeseen 3 ja 4 välissä on siirtymävaiheen kiehumisen, jonka aikana lämmönsiirtoteho heikkenee, koska pohjaan muodostuu höyrytaskuja, jotka toimivat eristeenä pinnan ja veden välissä. Siirtymävaiheessa kiehumisessa vaikuttavat kuplakiehumisen ja filmikiehumisen periaatteet.

Pisteeseen 4 jälkeen ollaan filmikiehumisen alueella. Pisteessä 4 kiehumisen saavuttaa minimilämmönsiirtotehon. Lämmönsiirto on heikkoa lämmityspinnan ja veden välissä olevan höyryfilmin takia, mutta lämpötilan noustessa lämpösäteily filmin läpi parantaa lämmönsiirtoa. Tyypillisesti kiehumisen ei noudata kiehumiskäyrää pisteen 3 jälkeen, vaan lämpötila hyppää äkillisesti pisteeseen 5. Jos materiaalin sulamispiste on pisteen 5 alapuolella, saavutetaan materiaalin sulama-alue ja materiaali voi palaa puhki. Materiaalin sulamispisteen ollessa riittävän korkea voidaan saavuttaa kriittistä pistettä korkeampia lämpövuon lukemia. Puhkipalaminen johtuu höyryn huonommasta lämmönsiirtokertoimesta, mikä aiheuttaa lämpötilan nousukierteen, kunnes fluidi pystyy ottamaan kaiken lämpötehon tasaisesti vastaan. Kuitenkin lämpötila on yleisesti niin korkea, etteivät useimmat materiaalit kestä lämmön nousua. Tämän takia useimmissa kiehumissovelluksissa pysytään hieman kriittistä pistettä 3 alemmalla lämpötila-alueella puhkipalamisen välttämiseksi.

Kiehumiselle on hankala esittää teoreettista yhtälöä. Yhtälössä 8 on esitetty kuplakiehumiselle kokeellinen yhtälö ja vastaavasti maksimilämpövuolle yhtälössä 9.

$$\dot{q}_{nucleate} = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left[\frac{c_{pl}(T_s - T_{sat})}{C_{sf} h_{fg} Pr_l^n} \right]^3 \quad (8)$$

missä

$\dot{q}_{nucleate}$ on kuplakiehumisen lämpövuoto, W/m²

μ_l on nesteen viskositeetti, kg/ms

h_{fg} on höyrystymisentalpia, J/kg

g on putoamiskiihtyvyys, m/s²

ρ_l on nesteen tiheys, kg/m³

ρ_v on kaasun tiheys, kg/m³

σ on neste-kaasu -pinnan välinen pintajännitys, N/m

c_{pl} on nesteen ominaislämpökapasiteetti

T_s on lämmityspinnan lämpötila, K tai °C

T_{sat} on fluidin kiehumispiste, K tai °C

C_{sf} on fluidi-lämmityspinta riippuvainen kokeellinen kerroin

Pr on nesteen Prandtin luku

n on fluidi-lämmityspinta riippuvainen kokeellinen kerroin. (Çengel & Ghajar 2011.)

$$\dot{q}_{max} = C_{cr} h_{fg} [\sigma g \rho_v^2 (\rho_l - \rho_v)]^{1/4} \quad (9)$$

missä

C_{cr} on geometriariippuvainen kokeellinen vakio. (Çengel & Ghajar 2011).

Kokeelliset kertoimet on koottu taulukoihin 4 ja 5.

Taulukko 4. Seisovan kiehumisen kokeellisia kertoimia eri pinnoille ja fluideille (Çengel & Ghajar 2011)

Fluidi-lämmityspinta yhdistelmä	C_{sf}	n
Vesi-kupari (hiottu)	0,0130	1,0
Vesi-kupari (karhea)	0,0068	1,0
Vesi-ruostumaton teräs (mekaanisesti hiottu)	0,0130	1,0
Vesi-ruostumaton teräs (hiottu ja pohjamaalattu)	0,0060	1,0
Vesi-ruostumaton teräs (rosoinen teflonpinta)	0,0058	1,0
Vesi-ruostumaton teräs (kemiallisesti käsitelty)	0,0130	1,0
Vesi-messinki	0,0060	1,0
Vesi-nikkeli	0,0060	1,0
Vesi-platina	0,0130	1,0
n-Pentaani-kupari (hiottu)	0,0154	1,7
n-Pentaani-Iromi	0,0150	1,7
Bentseeni-kromi	0,1010	1,7
Etanoli-kromi	0,0027	1,7
Hiilitetraklorodi-kupari	0,0130	1,7
Isopropanoli-kupari	0,0025	1,7

Taulukko 5. Seisovan kiehumisen geometrian kokeellisia vakioita . (Çengel & Ghajar 2011, muokattu)

Lämmitingeometria	C_{cr}	Karakteristinen pituus, L	L^* alue
Iso vaakatasoinen	0,149	leveys tai halkaisija	$L^* > 27$
Pieni vaakatasoinen	$18,9K_1$	leveys tai halkaisija	$9 < L^* < 20$
Iso vaakasyylinteri	0,12	säde	$L^* > 1,2$
Pieni vaakasyylinteri	$0,12L^{*-0,25}$	säde	$0,15 < L^* < 1,2$
Iso pallo	0,11	säde	$L^* > 4,26$
Pieni pallo	$0,227L^{*-0,5}$	säde	$0,15 < L^* < 4,26$

$$L^* = L \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2}, K_1 = \sigma[\rho_l - \rho_v] A_{\text{lämmitin}}$$

Taulukon 5 yhtälön yksiköt ja merkinnät ovat samat kuin yhtälöissä 8 ja 9.

Aiemmissa yhtälöissä ja kuvaajissa kuvattu kiehumiskäyttäytyminen edellyttää sileitä pintoja. Lika ja pinnan rosoisuus muuttavat lämmönsiirron käyttäytymistä. Rosoisuus parantaa kuplimisen lisäyksen takia kiehumista, mutta ajan myötä rosot rapautuvat ja lämmönsiirto putoaa sileitä pintoja vastaavaksi. Maksimi- ja filmikiehumisella rosoisuus on merkityksetön. Nykyisin kuitenkin markkinoilla on pinnoitusmateriaaleja, kuten thermoexcel-E. Tällaiset materi-

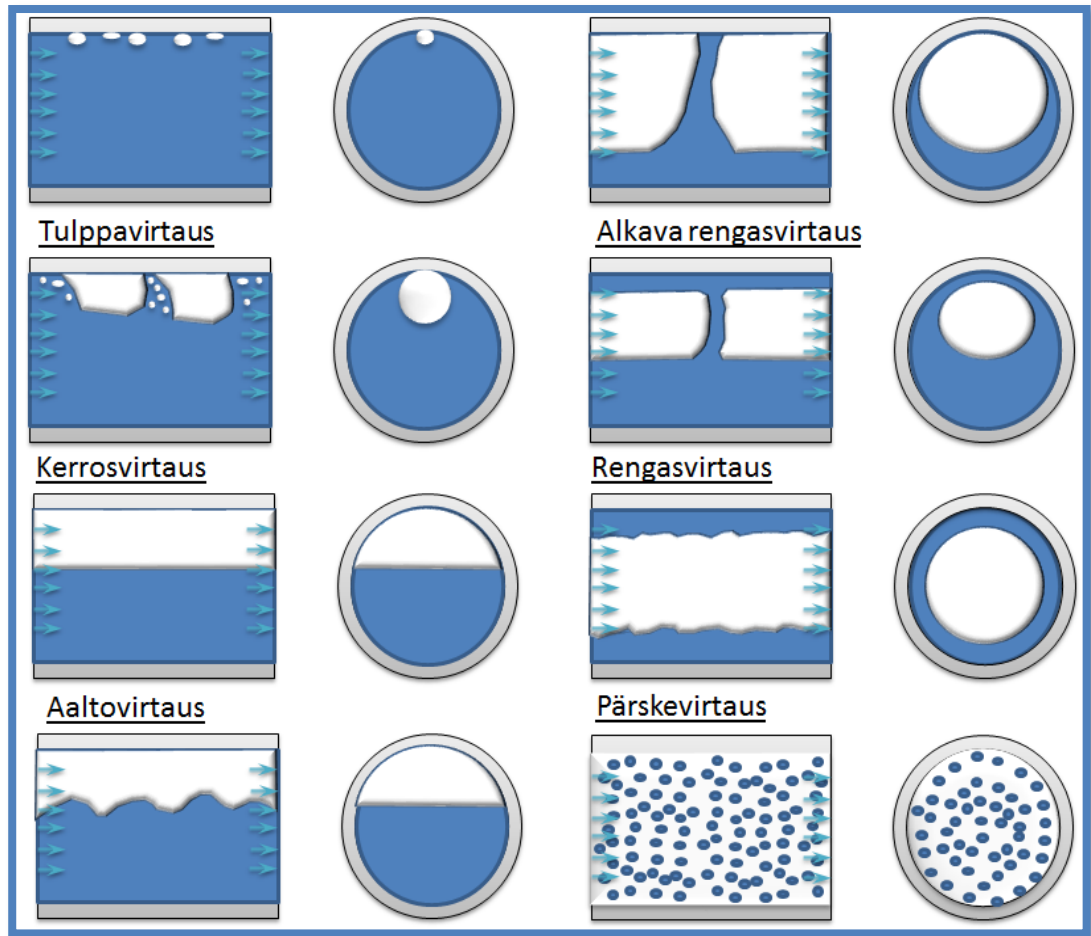
aalit nostavat lämmönsiirtoa pysyvästi. Lisäksi sekoittamalla ja pintaa tärisyttämällä on mahdollista parantaa lämmönsiirtoa. (Çengel & Ghajar 2011, 583–592.)

Virtaava kiehuminen

Kun fluidi on pakotettu liikkeelle ulkopuolisella energialla, kuten pumpulla, puhutaan virtaavasta kiehumisesta. Kiehumisen ominaisuudet muistuttavat tällöin yhdistelmää seisovasta kiehumisesta ja pakotetusta konvektiosta. Kiehuminen voidaan luokitella sisäpuoliseen kiehumiseen, jolloin fluidi virtaa umpinaisessa kanavassa, ja ulkopuoliseen virtaavaan kiehumiseen, jolloin se virtaa pinnan päällä. Ulkopuolisen kiehumisen käyttäytyminen on samankaltainen kuin seisovassa kiehumisessa, mutta nopeus nostaa kiehumiskäyrää. Mitä nopeampi virtaus on, sitä korkeampi lämmönsiirtoteho on kuplakiehumisen alueella sekä kriittisessä pisteessä. Virtaavalla kiehumisella vedellä normaali-ilmanpaineessa voidaan saavuttaa 35 MW:n teho m²:ä kohden, kun seisovassa jäädään noin 1 MW:n suuruusluokkaan. (Çengel & Ghajar 2011, 596 – 597.)

Sisäpuolista kiehumista voidaan verrata kaksifaasivirtaukseen, mutta se on tyypiltään paljon monimutkaisempi, koska höyryltä puuttuu vapaa ulospääsyypinta. (ks. Çengel & Ghajar 2011, 596 – 597.)

Kaksifaasivirtaustyyppit vaihtelevat olosuhteiden mukaan. Kuviossa 9 on esitetty erilaisia virtausmuotoja.

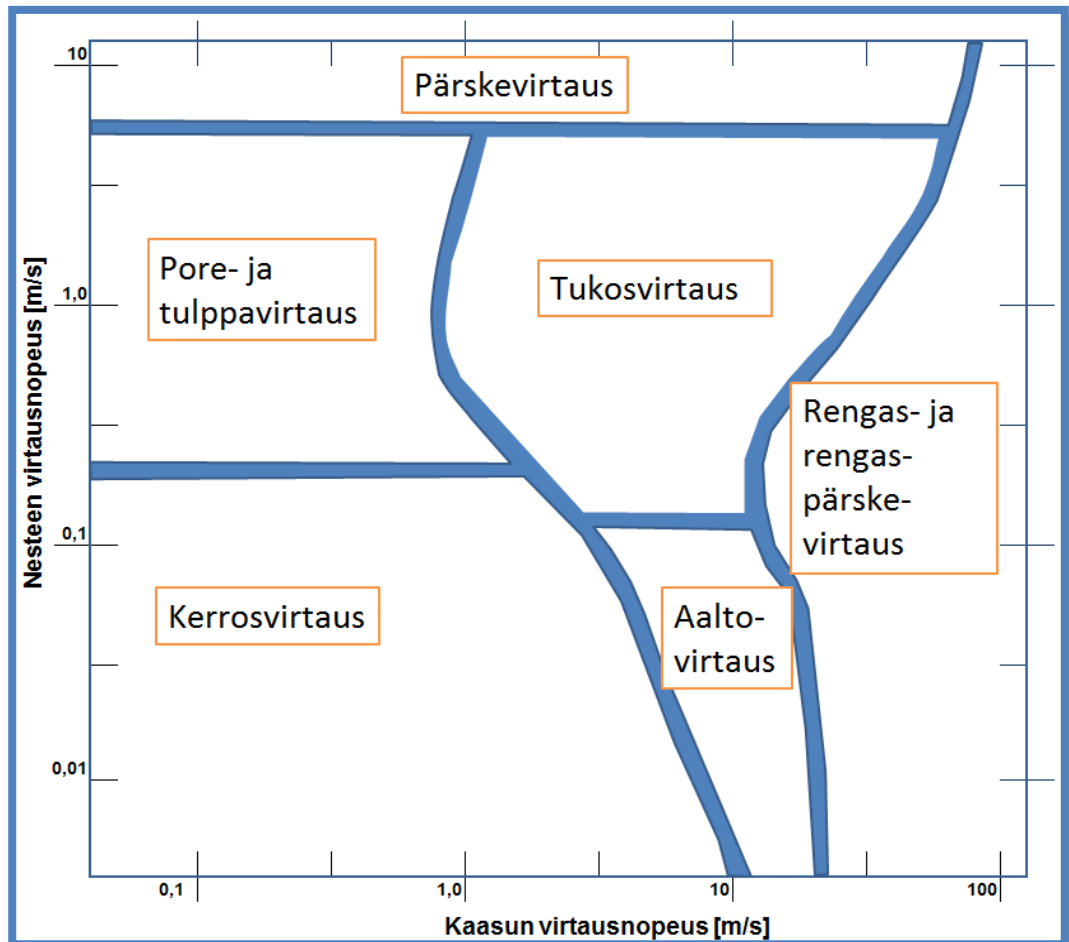


Kuvio 9. Virtaavan kiehumisen virtaustyyppiä (Holmström 1982, muokattu)

Kuvion 9 virtausmuodot, ovat

- porevirtaus: kuplilla on suunnilleen sama nopeus nesteen kanssa
- tulppavirtaus: neste- ja kaasutulpat vaihtelevat
- kerrosvirtaus: neste ja kaasu kulkevat omilla alueillaan, faasiraja on siileä
- aaltovirtaus: kerrosvirtauksen kaltainen, mutta kaasu nopeus aiheuttaa aaltoilua faasirajassa
- tukosvirtaus: vaahtomaiset tukokset liikkuvat nestettä huomattavasti nopeammin
- rengasvirtaus: neste muodostaa kalvon putken seinämille, kaasu virtaa nopeasti kalvorenkaan sisällä
- pärskedirtaus: neste kulkee pisaroina kaasun mukana.

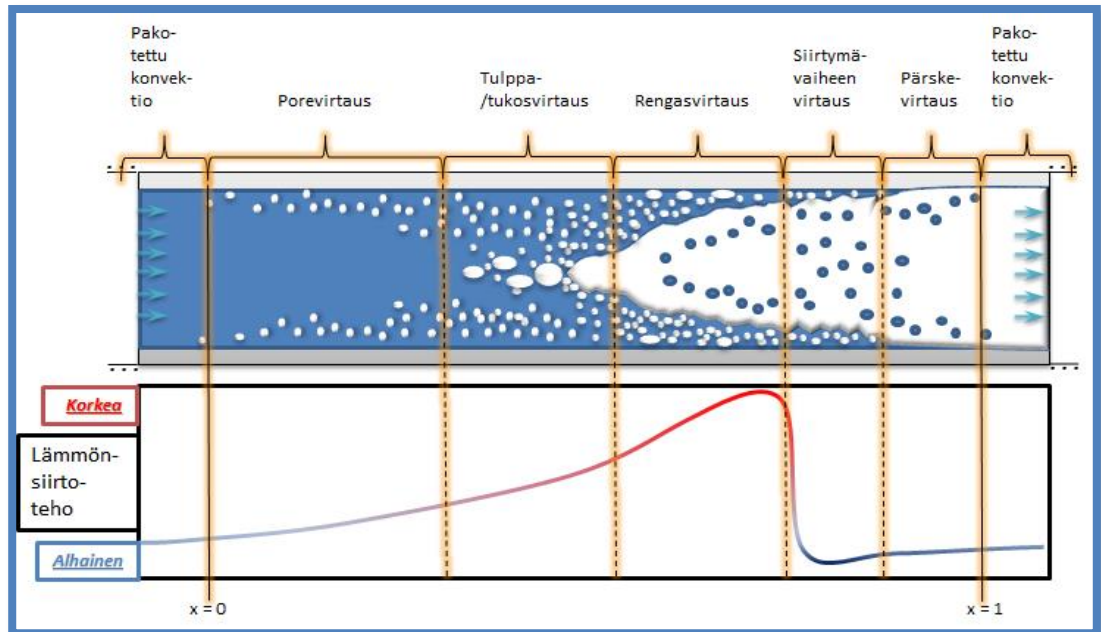
Virtauksen muotoon vaikuttavat nesteen ja kaasun nopeuksien suhde. Näistä voidaan muodostaa virtausmuotokartta, jollainen on esitetty kuviossa 10.



Kuvio 10. Virtaustyyppien yhteys kaasun ja nesteen virtausnopeuksiin (Holmström 1982, muokattu)

Kuvio 10 on määritelty ilman ja veden seokselle, mutta sitä voidaan soveltaa myös höyrylle ja vedelle. Nopeudet on laskettu koko sisäpoikkipinnalle. Lämmönsiirron kannalta merkittävintä on, kuuluuko virtaus kuvion vasemmalle, keskelle vai oikealle. (Holmström 1982, 28–29.)

Sisäpuolisten virtausmuotojen lämmönsiirtotehokkuutta on kuvattu kuviossa 11.



Kuvio 11. Sisäpuolisen virtaavan kiehumisen kehittyminen pystyputkessa (Çengel & Ghajar 2011, muokattu)

Kun kanavassa virtaa vielä pelkästään nestettä, pätevät lämmönsiirrossa pakotetun konvektion periaatteet. Lämmönsiirron tehokkuus nousee aina rengasmaisen kiehumisen alueelle asti, mutta kun nestekalvon sisäpintaan alkaa ilmestyä kuivia kohtia, tippuu lämmönsiirron tehokkuus nopeasti. Kaasu on kylläistä pärskevirtauksen alueella, mutta nestepisaroiden hävittyä kaasu tulistuu ja noudattaa taas pakotetun konvektion lainalaisuuksia. (Çengel & Ghajar 2011, 597–598.)

2.7 Lauhtuminen

Kaasu lauhtuu, kun sen lämpötila tippuu alle kiehumispisteen. Lauhtuminen tapahtuu useimmiten kiinteälle pinnalle, mutta se voi tapahtua nestekalvolle tai jopa kaasun pinnalle, jos lämpötila on alhainen. (Çengel & Ghajar 2011, 598.) Tekniikan kannalta merkittävimmät lauhtumuksmuodot ovat pisara- ja filmilauhtuminen, jotka tapahtuvat kiinteälle pinnalle. Filmilauhtumisessa pinnalle kertyy yhtenäinen nestekalvo, kun pisaralauhtumisessa pinnalle kertyy pintajännityksen takia nestepisaroita. Suurilla höyryn virtausnopeuksilla näiden kahden ero jää epäselväksi. Näistä pisaralauhtuminen on lämmönsiirron kannalta te-

hokkaampaa, mutta sen tekninen hyödyntäminen on hankalampaa. Pisara-lauhtumisen edellytyksenä ovat mm. tietyt pintajännityssuhteet. Kalvolauhtumiseen vaikuttaa painovoima sekä kaasun virtaus. Lauhdekalvon paksuus vaikuttaa lämmönsiirron tehokkuuteen, sillä nestekalvo toimii eristeenä pinnan ja kaasun välillä. Lauhtuminen on siten riippuvaista pintojen asettelusta ja geometriasta. (Holmström 1982, 7–10, 43.) Jos kaasu on tulistettua, täytyy kaasun lämpötilan ja kiehumispisteen lämpötilaeroa vastaava lämpö johtaa myös lämpöpinnan läpi (Çengel & Ghajar 2011, 600).

3 Höyryjärjestelmiin liittyvät standardit ja säädökset

Lain (L27.8.1999/869) mukaan painelaitteella tarkoitetaan "...säiliötä, putkistoa ja muuta teknistä kokonaisuutta, jossa on tai johon voi kehittyä ylipainetta, sekä painelaitteen suojaamiseksi tarkoitettuja teknisiä kokonaisuuksia”.

Kuumavesi- ja höyrykattilat paineenalaisine putkistoineen, säiliöineen sekä lisä- ja varolaitteet ovat kaikki painelaitteita. Näitä laitteita koskee kauppa- ja teollisuusministeriön päätös painelaitteista (938/1999), joka sisältää painelaittedirektiivin (97/23/EY) menettelyt. Näitä sovelletaan suunnittelussa, valmistuksessa ja vaatimuksenmukaisuuden arvioinnissa. Painelaitteissa ja laitekokonaisuuksissa on oltava CE -merkintä ja niistä on laadittava EY-vaatimustenmukaisuusvakuutus. Tästä poikkeuksena ovat laitteet, joihin sovelletaan hyvän konepajakäytännön menettelyä. Vaatimustenmukaisuuden mukaan laitteet luokitellaan hyvän konepajakäytäntöjen ja olennaisten turvallisuusvaatimusten alaisiin. (Painelaitteet 2014, 5–6.)

Taulukossa 6 on esitetty painelaiteluokittelu, missä turvallisuusvaatimukset kasvavat riskin mukaan.

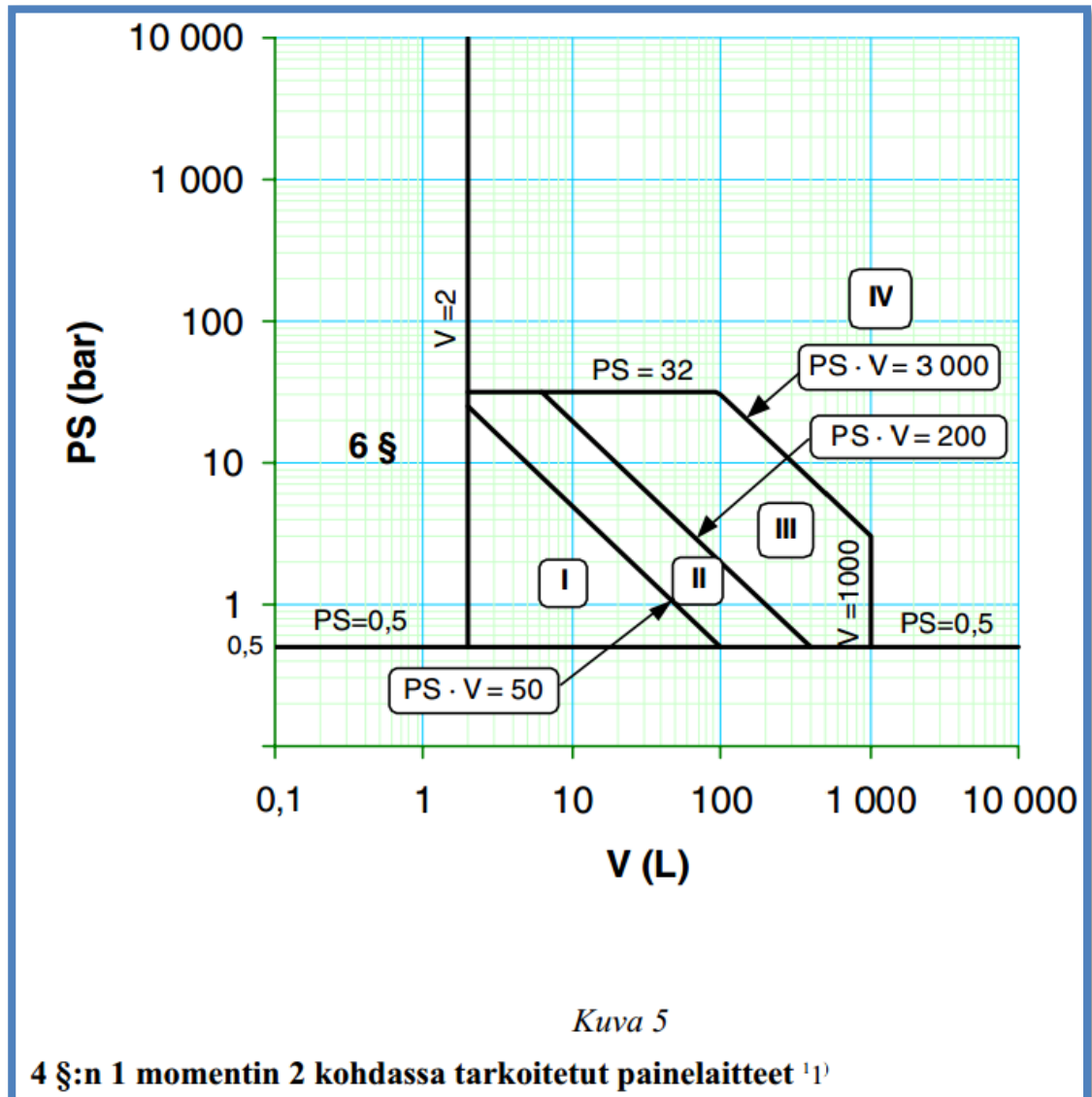
Taulukko 6. Painelaitteiden luokittelun kuvaviitenumerot painelaitelaissa (Painelaitteet, 2014, muokattu)

Painelaitteiden luokittelu

<i>KTMP 938/1999, liitteen II kuvat 1 – 9</i>									
1. Painelaitteen tyyppi	Säiliöt				Höyryn tai yli- kuumennetun veden tuotannon painelaitteet	Putkistot			
2. Luokitusperuste	PS, V				PS, V	PS, DN			
3. Sisältö	Kaasu		Neste		-	Kaasu		Neste	
4. Sisällön ryhmä	1	2	1	2	-	1	2	1	2
5. Kuva	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Taulukossa 6 PS merkitsee suurinta sallittua painetta baareissa, V tilavuutta litroissa ja DN pyöristettyä viitearvoa. Höyryn tai ylikuumennetun veden tuotannon painelaitteilla tarkoitetaan lämmitettävää painelaitetta, jossa vettä kuumennetaan yli 110 °C:seen. Putkisto merkitsee putkiston osia, jotka siirtävät sisältöä ja ovat yhteydessä painejärjestelmään. Näihin kuuluvat putket tai putkiverkot johtoineen, lisäosineen ja tasaimineen tai muut paineenalaiset osat. Varolaitte on laite, joka suojaa sallittujen raja-arvojen ylittymiseltä. Nämä laitteet kuuluvat luokkaan IV, mutta tästä poikkeuksena ovat laitteet, jotka kuuluvat tiettyyn laitteeseen, ja kuuluvat siten samaan luokkaan laitteen kanssa. Paineenalainen lisälaitte on laitetta, jolla on paineenalainen päällys. Nämä luokitellaan joko DN -nimellissuureen tai tilavuuden mukaan. Säiliöitä, joissa on useita kammioita, luokitellaan korkeinta luokitusta vaativan kammion mukaan. (Painelaitteet 2014, 5–6.)

Kuviossa 12 on esitetty höyryntuotantolaitteen luokittelu.



Kuvio 12. Höyryn tai ylikuumennetun veden tuotantoon tarkoitettujen laitteistojen luokittelu paineen ja tilavuuden mukaan

Kuvion 12 luokittelun piiriin kuuluvat "liekillä tai muutoin lämmitettävät painelaitteet, joiden $V > 2$ L ja joissa on ylikuumenemisen vaara ja jotka on tarkoitettu höyryn tai ylikuumennetun veden tuotantoon yli 110 °C lämpötilassa, sekä kaikki painekeitinimet (liite II, kuva 5)" (KTMp 30.9.1999/838).

Taulukossa 7 on esitetty painelaitteiden vaatimuksenmukaiset moduulit tai moduuliyhdistelmien vaatimukset sekä moduulien kuvaukset.

Taulukko 7. Painelaiteluokkien vaatimat moduulit ja niiden kuvaukset
(Painelaitteet, 2014, muokattu)

Vaatimustenmukaisuuden arviointimenettelyt

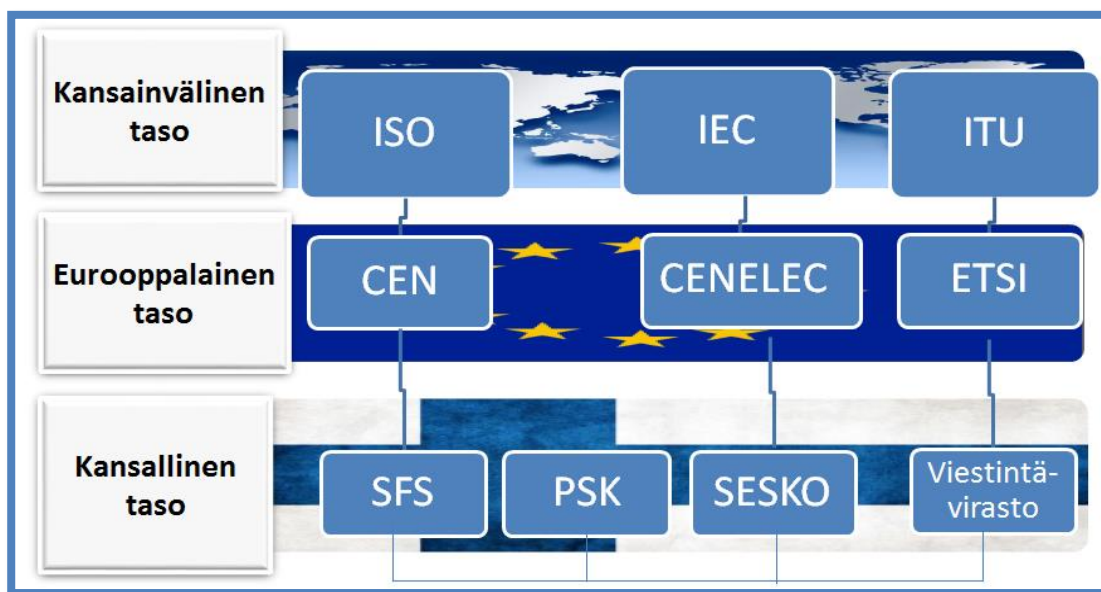
Moduulit

Luokka I	Luokka II	Luokka III	Luokka IV
A	A1	B1+D	B+D
	D1	B1+F	B+F
	E1	B+E	G
		B+C1	H1
		H	
Arviointimenettely (moduuli)		Kuvaus	
A	Valmistuksen sisäinen tarkastus	Valmistaja laatii tekniset asiakirjat ja tekee loppuarvioinnin	
A1	Valmistuksen sisäinen tarkastus ja loppuarvioinnin valvonta	Valmistaja laatii tekniset asiakirjat ja tekee loppuarvioinnin, jota ilmoitettu laitos valvoo.	
B	EY-tyyppitarkastus	Ilmoitettu laitos tarkastaa tyyppin vaatimustenmukaisuuden.	
B1	EY-suunnitelmataarkastus	Ilmoitettu laitos tarkastaa suunnitelman vaatimustenmukaisuuden	
C1	Tyyppimukaisuus	Valmistaja tekee loppuarvioinnin, jota ilmoitettu laitos valvoo.	
D	Tuotannon laadunvarmistus	Valmistaja soveltaa valmistuksessa, testauksessa ja loppuarvioinnissa laatujärjestelmää, jonka hyväksyy ja jonka noudattamista valvoo ilmoitettu laitos.	
D1	Tuotannon laadunvarmistus	Valmistaja laatii tekniset asiakirjat sekä soveltaa valmistuksessa, testauksessa ja loppuarvioinnissa laatujärjestelmää, jonka hyväksyy ja jonka noudattamista valvoo ilmoitettu laitos.	
E	Tuotteiden laadunvarmistus	Valmistaja soveltaa testauksessa ja loppuarvioinnissa laatujärjestelmää, jonka hyväksyy ja jonka noudattamista valvoo ilmoitettu laitos.	
E1	Tuotteiden laadunvarmistus	Valmistaja laatii tekniset asiakirjat sekä soveltaa testauksessa ja loppuarvioinnissa laatujärjestelmää, jonka noudattamista valvoo ilmoitettu laitos.	
F	Tuotekohtainen todennus	Ilmoitettu laitos tekee tuotekohtaisen loppuarvioinnin.	
G	Yksikkökohtainen EY-todennus	Ilmoitettu laitos tekee tuotteen suunnitelma- ja loppuarvioinnin.	
H	Täydellinen laadunvarmistus	Valmistaja soveltaa suunnittelussa, valmistuksessa, testauksessa ja loppuarvioinnissa laatujärjestelmää, jonka hyväksyy ja jonka noudattamista valvoo ilmoitettu laitos.	
H1	Täydellinen laadunvarmistus ja suunnitelmataarkastus sekä loppuarvioinnin erityisvalvonta	Valmistaja soveltaa suunnittelussa, valmistuksessa, testauksessa ja loppuarvioinnissa laatujärjestelmää, jonka hyväksyy ja jonka noudattamista valvoo ilmoitettu laitos. Lisäksi ilmoitettu laitos tekee suunnitelmataarkastuksen ja valvoo loppuarviointia.	

Jos laite kuuluu luokkiin I–IV, täytyy olennaisten turvallisuusvaatimusten täytyminen arvioida ennen markkinoille viemistä. Arviointimenettely (moduulit) valitaan luokan mukaan, mutta valmistaja voi käyttää vaativamman luokan menettelyjä. Painelaitteiden SFS-EN -standardeissa on yksityiskohtaiset ohjeet suunnittelusta ja valmistuksesta. (Painelaitteet 2014, 7 – 8.)

Tulitorvikattiloista on olemassa SFS-käsikirja 44 ja vesiputkikattiloista SFS -käsikirja 43-1 ja 43-2. Nämä käsikirjat sisältävät kattavasti eri standardeja höyrykattiloihin liittyen. PSK, Prosessiteollisuuden Standardoimiskeskus valmistee myös kansallisen tason standardeja.

PSK:n sijoittumista standardoinnin toimintakentällä mm. SFS:n kanssa on esitetty kuviossa 13.



Kuvio 13. Standardointijärjestöjen sijoittuminen kansainvälisillä, eurooppalaisilla ja kansallisilla tasoilla (PSK:n esittelykalvot, muokattu)

Prosessiteollisuuden standardoimiskeskuksella on jäseniä mm. energia-, elintarvike- ja kemianteollisuudessa. PSK:lla ryhmän 42 standardit käsittelevät putkiluokkia ja ryhmän 49 painelaitte- ja kemikaalilain alaisia putkistoja ja säiliöitä. PSK -käsikirjat 7 ja 4 on laadittu putkiluokille ja painelaitteille.

4 Höyryjärjestelmien komponentit ja laitteet

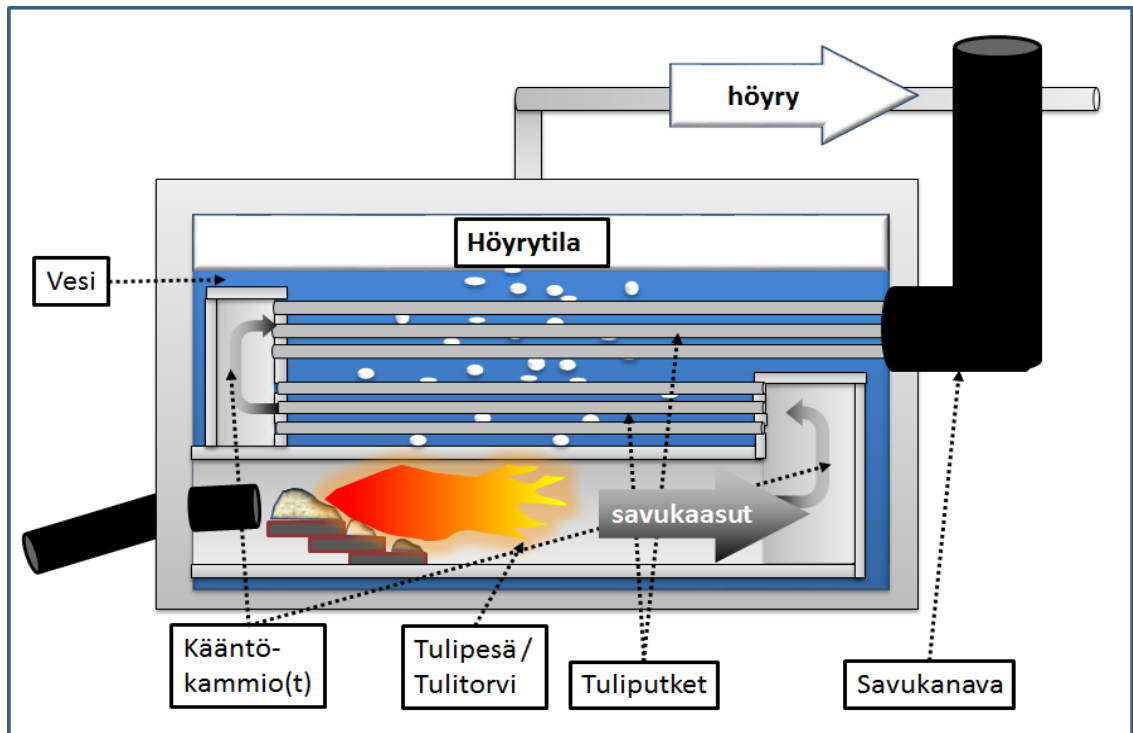
Tulitorvikattiloiden varusteiden vaatimuksista on ohjeistettu SFS-EN 12953-6 -standardissa, joka viittaa direktiiviin 97/27/EC.

4.1 Höyrykattilat

Tulitorvikattilat

Tulitorvikattiloissa polttoaine palaa tulitorvessa, jonka jälkeen on kääntökammio, josta savukaasut johdetaan tuliputkiin. Tulitorven ja -putkien ulkopinnat ovat veden peitossa. Seinämän läpi tuleva lämpö höyrystää veden. Höyry siirtyy yläpuolelle höyrytilaan, josta se siirretään käyttöön. Höyry saadaan kuivempana käyttöön, jos höyrytilan päälle asennetaan höyrykupu. Tulitorvi sijaitsee vesitilan alaosassa ja putket yläosassa. Kattilan rakenteesta johtuen suurissa paineissa ja tehoissa vesiputkikattila on edullisempi ratkaisu. Tämä johtuu materiaalien paksuuksien (suuret paineet) tai tarvittavien pinta-alojen (suuret tehot) aiheuttamista kustannuksista. Raja-arvoina voidaan pitää 20 baarin painetta ja 12 MW:n tehoa. Tulitorvikattiloita käytetäänkin lähinnä matalapaineisen prosessihöyryn tuotantoon. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2004, 111, 112.)

Kuviossa 14 on esitetty tulitorvikattilan perustoimintaperiaate.



Kuvio 14. Tulitorvikattilan toimintaperiaate (The Boiler House, muokattu)

Kuviossa 14 on kolmivetoinen kattila, mutta käytössä on myös kahden ja neljän vedon malleja. Lisäksi on olemassa käänteispaloon perustuvia malleja. Vetojen määrä parantaa kattilan taloudellisuutta, mutta lisää valmistuskustannuksia. Väärin mitoitettuna vetojen lisäys voi johtaa savukaasujen jäähtymisen alle happokastepisteen. Tällöin savukanava ja kattila voivat vaurioitua korroosion takia. Savukaasujen tulisi jäähtyä ennen tulipesän jälkeistä kääntökammiota vähintään 420 °C :seen, jos käytössä on seostamatonta terästä. Seostetulla teräksellä raja on hieman korkeampi, 470 °C . Kuumemmat lämpötilat voivat vaurioittaa kattilan rakenteita. Koska kattilan paineen aiheuttama jännitysvoimien kesto on sidoksissa materiaalin paksuuteen, johon myös lämmön johtuminen on sidoksissa, rajoittaa lämmön tuonnin lisäys kattilan suurinta käyttöpainetta. Hyvä kompromissi saavutetaan tulitorvissa noin 18–20 mm:n materiaalivahvuuksilla. Kolmivetoisen mallin kokonaislämmöstä siirtyä ensimmäisessä vedossa noin $2/3$, toisessa $1/4$ ja kolmannessa $1/10$. (The Boiler House.)

Vesiputkikattilat

Vesiputkikattilat voidaan jakaa kolmeen ryhmään luonnonkiertokattilat, pakko-kiertokattilat ja läpivirtauskattilat, joissa vesi höyrystyy putkissa (Huhtinen ym. 2004, 111).

4.2 Lieriö

Lieriön tehtävänä on erottaa kylläinen vesi ja höyry toisistaan. Tässä käytetään hyväksi olomuotojen tiheyseroja. Asentamalla ohjauslevyjä lieriöön höyryvirran tielle vaihtuvat virtaussuunnat nopeasti ja raskaammat vesipisarot erottuvat höyrystä. Lieriöön on myös mahdollista asentaa pisaraerottimia ja sykloneita faasien erottamisen tehostamiseksi. Lieriö toimii myös pienenä puskurina, jos höyryntarve äkillisesti kasvaa. Tällöin höyrynpaine ja höyrystymislämpötila laskevat, joten osa lieriön varastoimasta kylläisestä vedestä höyrystyy. Lieriön tilavuutta voidaan arvioida kokemuksen mukaan kuormitustarveluvulla, joka on avattu yhtälössä 10.

$$\text{kuormitustarveluku} = \frac{\dot{V}_{\text{tuotehöyry}}}{V_{\text{lieriö}}} \quad (10)$$

missä

$\dot{V}_{\text{tuotehöyry}}$ on tuorehöyryn tarve, m³/h

$V_{\text{lieriö}}$ on lieriön tilavuus, m³.

Luku vaihtelee 200:n ja 800:n välillä ollen pienempi suurissa paineissa, joissa kylläisen höyryn ja veden tiheysero on pienempi. Mitoitukseen vaikuttaa myös lieriön erotusrakenteet ja höyryn syöttönopeus lieriöön (Huhtinen ym. 2004, 117, 118.)

4.3 Lauhteenpoistimet

Lauhteenpoistimilla suojellaan höyrylinjoja ja niiden komponentteja kertyvältä lauhteelta. Kertyvä lauhde voi aiheuttaa häiriöitä ja laitevaurioita esimerkiksi vesi-iskujen takia. Lauhteenpoistimia on usean tyyppisiä, ja ne voidaan luokitella esim. mekaanisiin ja termostaattisiin. (Huhtinen ym. 2004, 238.)

Mekaaniset lauhteenpoistimet

Mekaanisten lauhteenpoistimen toiminta on mahdollista nesteiden ja kaasujen tiheyserojen takia. Tällainen on esimerkiksi uimuri -toiminen lauhteenpoistin. Sen toiminta perustuu uimuripalloon, joka avaa poistoventtiilin, kun lauhdepinta kasvaa liian suureksi. Pinnan laskiessa venttiili sulkeutuu. Uimurirakenteiset poistimet eivät kuitenkaan mahdollista ilman poistamista, joten ne varustetaan tavallisesti termisesti ohjautuvilla ilmanpoistimilla, jatkuvan kaasunpoiston suuttimilla tai manuaalitoimisilla ilmanpoistoventtiileillä. Uimuritoimiset poistimet soveltuvat melkein jokaiseen käyttötarkoitukseen ja laajalle kapasiteetti-alueelle. (Huhtinen ym. 2004, 238–239.)

Termostaattiset lauhteenpoistimet

Termostaattisten lauhteenpoistimien toiminta perustuu lauhteen alijäähtymiseen, jolloin poistin tunnistaa höyryn ja nesteen välisen lämpötilaeron. Tämä estää lauhdeputkien eristämisen, koska eristäminen hidastaisi laitteen toimintaa. Termiset poistimet eivät sovellu jatkuvaan lauhteenpoistoon. Termiset poistimet voivat perustua väliaineen tai bimetallin käyttäytymiseen. (Huhtinen ym. 2004, 238–239; Lauhteenpoisto.)

Pisaraerottimet

Vesi voidaan pisaraerottimissa poistaa joko törmäyslevyihin tai nopeuden muutokseen perustuvalla tekniikalla. Nopeuseroja hyödyntävässä tekniikassa vesi-höyryseos erotetaan kairamaisen osan avulla. (Lauhteenpoisto.)

4.4 Venttiilit

Kattilalaitoksen putkivarusteisiin kuuluvat venttiilit voidaan luokitella sulku-, säätö- ja varoventtiileihin.

Sulkuventtiilit

Höyrykattilan täytyy olla helposti erotettavissa putkistosta sulkuventtiileillä, joiden on sijaittava mahdollisimman lähellä kattilaa. Syöttöputkessa tulee li-säksi olla vastaventtiili, jotta vettä ei pääse virtaamaan pysäytystilanteessa takaisin kattilaan. Kattilasta lähtevässä höyrylinjassa olevaa sulkuventtiiliä ni-mitetään päänhöyryventtiiliksi, joka varustetaan yleensä ohitusventtiilillä paine-eron ollessa suuri. Sulkuventtiilit ovat yleisimmin istukka- tai luistiventtiilejä. Esimerkiksi palloventtiilien käyttö voi olla hankalaa, koska niiden tiivisteiden lämmönkesto ei aina riitä. (Huhtinen ym. 2004, 230, 231.)

Istukkaventtiilit ovat sulkuventtiileinä hyviä tiiveytensä ansiosta. Istukkaventtii-lissä kara painaa lautasen tiukasti istukkaa vasten. Suurilla paineilla voidaan käyttää vastapainetta suljettaessa ja kevennyslautasta avatessa. Luistiventtiili on hyvä sulkuventtiili molempiin suuntiin, ja niitä valmistetaan kaikille nimellis-paineille ja lämpötiloille. Luistiventtiileillä on myös pienemmät painehäviöt, kuin istukkaventtiileillä. (Huhtinen ym. 2004, 231, 232.)

Säätöventtiilit

Säätöventtiileillä säädetään mm. syöttöveden virtausta ja höyryn painetta. Monet sulkuventtiileistäkin sopivat säätöventtiileiksi. Säätöventtiilin painehäviö tulee olla riittävä. Venttiiliä valittaessa tulee huomioida: paine ennen ja jälkeen venttiilin, täysin aukaistun venttiilin jälkeinen paine, massa- tai tilavuusvirta ja fluidin tiheys. (Huhtinen ym. 2004, 232.)

Yhtälöllä 11 voidaan laskea venttiilille k_v -arvo.

$$k_v = V \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}} \quad (11)$$

missä

V on suurin tilavuusvirta, m^3/h

ρ on fluidin tiheys, kg/m^3

Δp on paine-ero suurimmalla tilavuusvirralla, bar.

Laittevalmistajien k_v -arvot on laskettu sillä oletuksella, että vettä virtaa lämpötilassa 5-20 °C:ta yhden baarin paine-erolla, ja että venttiili on täysin auki.

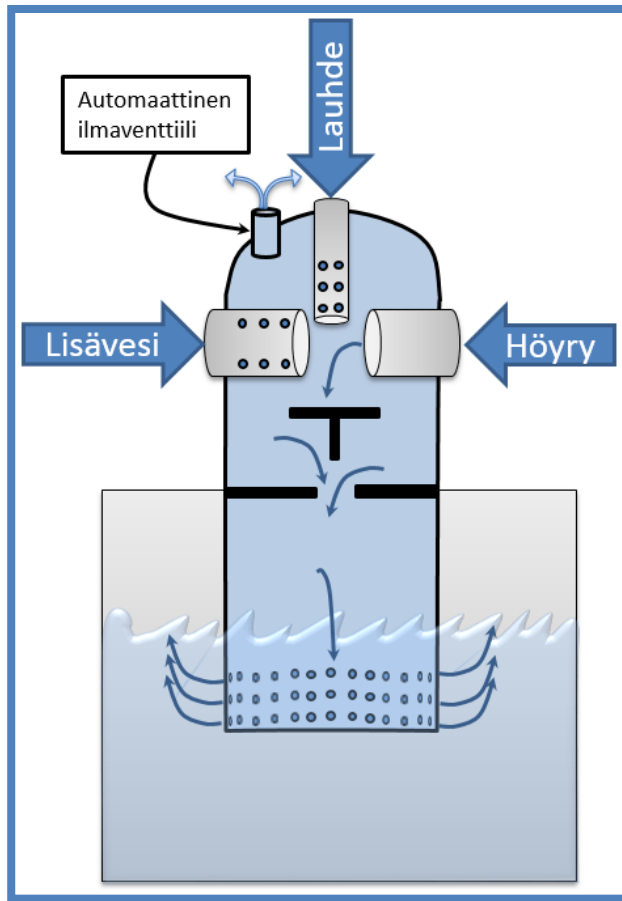
Höyrynpainetta alentavat venttiilit ovat paineenalennusventtiilejä, joita tarvitaan johdettaessa höyryä korkeammasta paineesta matalampaan. (Huhtinen ym. 2004, 233.)

Varoventtiilit

Mitoitusolosuhteita korkeammilta paineilta suojaudutaan varoventtiileillä. Varoventtiilit ovat jousi- ja painokuormitteisia tai apulaitekäyttöisiä. Lämmönsiirtimek, jotka voidaan erottaa kattilasta sulkuventtiileillä pitää varustaa omilla varoventtiileillään. Jousikuormitteisia (korkeanousuisia) varoventtiilejä käytetään höyrylle suurilla paineilla ja ulospuhallusmäärillä, koska ne sopivat painokuormitteisia paremmin näihin olosuhteisiin. Niiden ulospuhalluspaine on säädettävissä tarkasti ja ne ovat luotettavia, eikä lautaskuormaa ole rajoitettu. Painokuormitetut varoventtiilit ovat lautaskuormaltaan rajoitettuja, yksipuoliset 6000 N:iin ja kaksipuoliset 10 000 N:iin. Tästä syystä suurilla höyrykattiloilla on siirrytty jousikuormitteisiin venttiileihin. (Huhtinen ym. 2004, 236–238.)

4.5 Syöttövesisäiliö

Syöttövesisäiliössä säilötään syöttö- ja lisävettä, mutta säiliöön palaavat myös prosessin lauhdevedet. Paras tapa tuoda kondenssi- ja lauhdevedet syöttövesisäiliöön on sumuttaa ne yhdessä höyryn kanssa uppopotkeen, jonka pää on veden pinnan alla (ks. kuvio 15).



Kuvio 15. Syöttövesisäiliölle tulevat virtaukset (The Boiler House, muokattu)

Putket täytyy valmistaa ruostumattomasta teräksestä. Syöttövesisäiliö on usein sylinterimäinen, mutta särmiön mallisella säästetään tilaa. Syöttövesisäiliön materiaali voi olla valurautaa, hiiliterästä, muovia tai ruostumatonta terästä. Valurauta vuotaa usein yhteistään korroosion takia. Päälystämättömänä hiiliteräs on erittäin altis korroosiolle. Päälystämällä hiiliteräksen korroosionkestävyyttä voidaan parantaa, mutta hinta usein nousee liian korkeaksi. Muovinen säiliökin syöttöveden vaatimissa lämpötiloissa on liian kallis ratkaisu, mutta sopii hyvin kylmälle lisävesisäiliölle. Ruostumaton teräs nostaa säiliön käyttöikä, mistä syystä senkin korkea hinta on usein perusteltu. 304L -tyypin ruostumaton teräs on todettu hyväksi materiaaliksi säiliölle. Kun höyryn käyttö on suhteellisen pientä, voidaan syöttövesisäiliö mitoittaa tunnin maksimitehoa vastaavaan kokoon. Säiliön mitoituksessa täytyy varautua äkilliseen lauhdevir-

tauksen kasvuun, jotta vettä ei joudu hukkaan. Eristämällä säiliö voidaan vähentää lämpöhäviöitä. (The Boiler House.)

4.6 Syöttöveden esilämmittimet

Esilämmittimen on tarkoitus parantaa höyryjärjestelmän hyötysuhdetta, sillä savukaasuihin jää paljon lämmityspotentiaalia ellei sitä hyödynnetä jossakin. Esilämmittimet voidaan jakaa kahteen ryhmään toimintaperusteensa avulla: höyrystäviin ja höyrystämättömiin. Höyrystämättömissä lämmittimeltä lähtevän veden tulee olla noin 20 °C alle kiehumispisteensä, jotta kuormitusvaihtelun aikana ei tapahdu höyryn muodostumista missään olosuhteissa. Koska veden lämmönsiirto-ominaisuudet ovat paremmat kuin savukaasujen, täytyy lämmitin rivoittaa riittävän lämmönsiirtopinta-alan saavuttamiseksi. Lämmittimet voidaan jaotella myös materiaalin mukaan valurautalämmittimiin sekä teräslämmittimiin. Valurautainen rakenne kestää paremmin, kun syöttövesi on kohtalaisen kylmää paremman matalalämpötilasyöpymiskestonsa ansiosta. Valurautainen malli on helppo rivoittaa ja se kestää paremmin nuohousta sekä savukaasujen hiukkasia, mutta sen suurin käyttöpaine rajoittuu noin 60 baariin. Rivoitettujen mallien lisäksi voidaan käyttää tavallisia rivoittamattomia hiiliteräsputkia, jotka aiheuttavat pienemmän painehäviön eivätkä ole yhtä alttiita likaantumiselle. (Huhtinen ym. 2004, 194-196.)

4.7 Pumput

Pumpun valinnassa vaikuttavat tärkeimpinä kaksi asiaa: nostokorkeus ja virtaama. Nostokorkeudella tarkoitetaan tarvittavaa paine-eroa muutettuna fluidipatsaan korkeudeksi. Nostokorkeuden ja paine-eron yhtälö 12 on esitetty seuraavana:

$$\Delta p = \rho g H \quad (12)$$

missä

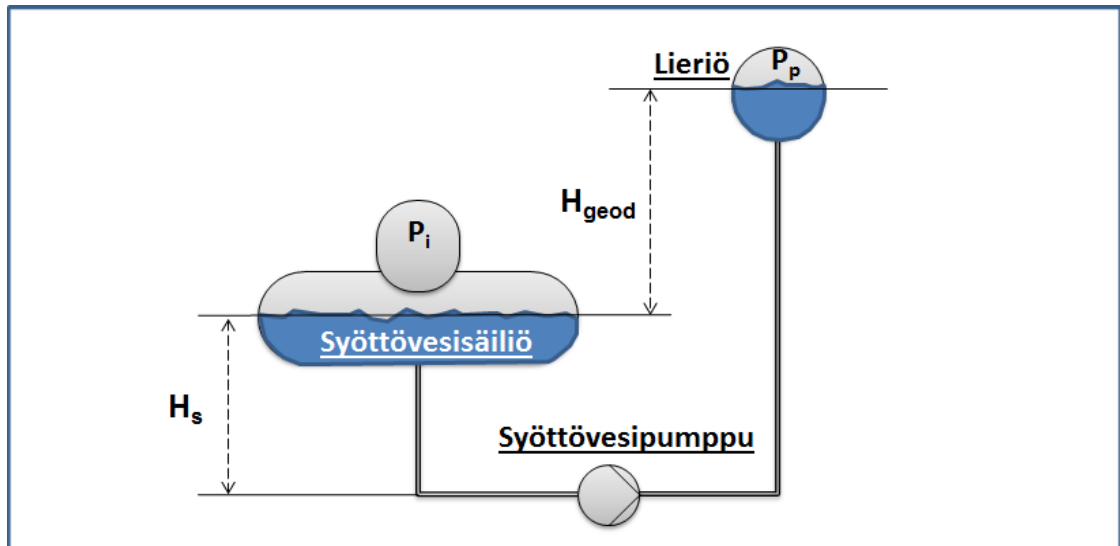
Δp on pumpun tuottama paine-ero, Pa

ρ on nesteen tiheys, kg/m^3

g on putoamiskiihtyvyyys, m/s^2

H on nostokorkeus (nestepatsaan), m. (Huhtinen ym. 2004, 221.)

Kuviossa 16 on esitetty esimerkkitalanne mitoituslaskennasta.



Kuvio 16. Syöttövesipumpun mitoitus (Huhtinen ym. 2004, 221, muokattu)

Nostokorkeuden lisäksi mitoitus riippuu imusäiliön imu- ja painesäiliöiden paine-erosta (kuviossa 16 syöttövesisäiliö ja lieriö) sekä virtausnopeuksien muu- toksista ja virtausvastuksista. Kun em. tekijät otetaan huomioon, saadaan määritetty kokonaisnostokorkeus, H yhtälöllä 13.

$$H = \underbrace{H_{geod} + \frac{P_p - P_i}{\rho g} 10^5}_{H_{stat}} + \underbrace{\frac{w_p^2 - w_i^2}{2g} + H_p + H_i}_{H_{dyn}} \quad (13)$$

missä

H_{geod} on tulo- ja painepuolen nestepintojen korkeusero, m

P_p on paine painepuolen säiliössä, bar

P_i on paine imupuolen säiliössä, bar

ρ on nesteen tiheys, kg/m³

g on putoamiskiihtyvyys, m/s²

w_p on virtausnopeus painepuolen säiliössä, m/s

w_i on virtausnopeus imupuolen säiliössä, m/s

H_p on painepuolen putkien virtausvastus sis. kertavastukset, m

H_i on imupuolen putkien virtausvastus sis. kertavastukset, m

H_{stat} on staattinen nostokorkeus, m

H_{dyn} on dynaaminen nostokorkeus, m. (Huhtinen ym. 2004, 222.)

Virtausvastukset voidaan määrittää yhtälön 14 avulla.

$$H_{i/p} = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{1}{2g} w^2 \quad (14)$$

missä

$H_{i/p}$ on tulo- tai paineputken virtausvastus, m

λ on kitkakerroin

l on putken pituus, m

d on putken halkaisija, m

ζ on kertavastus

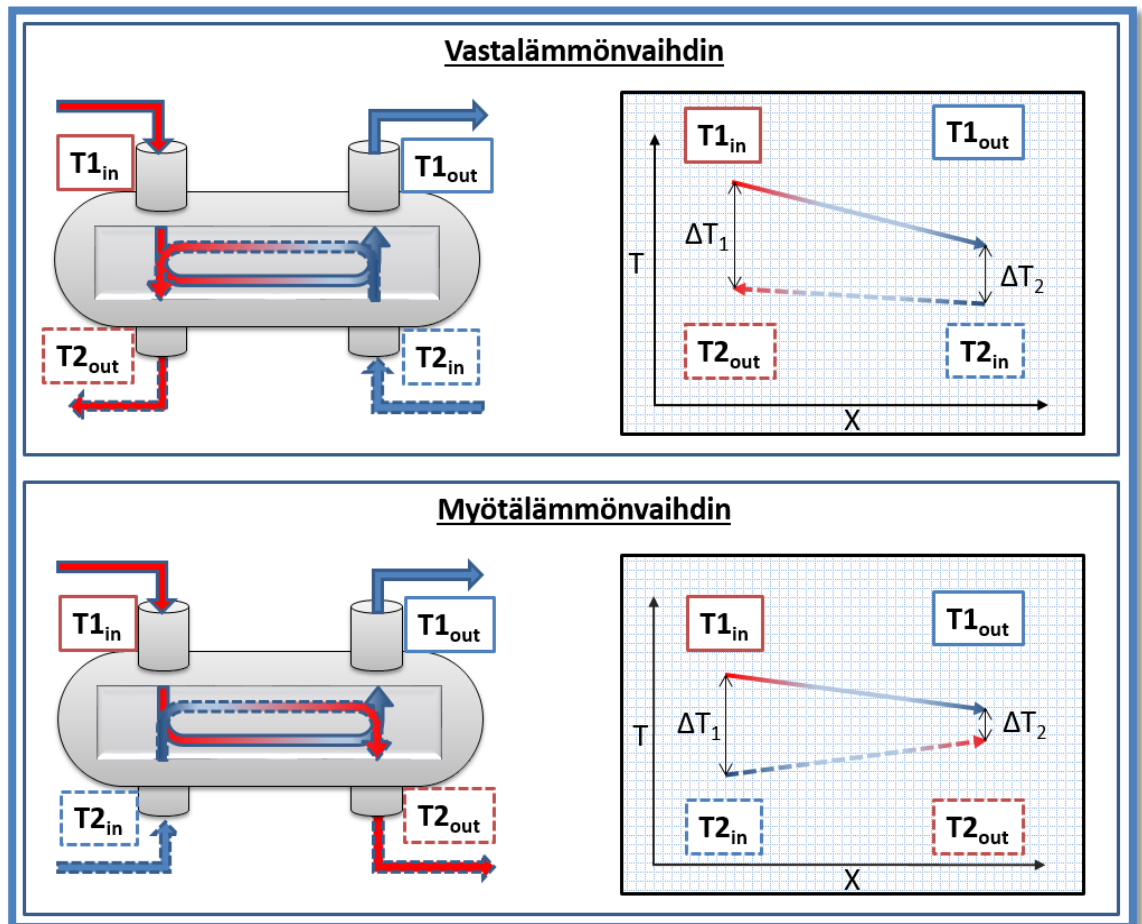
g on putoamiskiihtyvyys, m/s²

w on nesteen virtausnopeus, m/s. (Huhtinen ym. 2004, 222.)

Kertavastuksia aiheuttavat esimerkiksi venttiilit ja putkimutkat. Nostokorkeuden ja tilavuusvirran avulla pumppu voidaan valita valmistajien ominaiskäyrästöjen avulla. Lisäksi pumpun valinnassa täytyy huomioida kavitaation riski, koska jos imupuolen paine pääsee laskemaan kiehumispisteeseen, muodostuu höyrykuplia. Painepuolella ne puristuvat äkisti kokoon ja aiheuttavat pumpun siivistöä rikkovia paineiskuja. Höyrylaitosten yhteydessä tyypillisiä pumppuja ovat syöttövesipumput, lauhdepumput, jäähdytysvesipumput, kaukolämpöpumput sekä syöttöveden käsittelylaitoksen pumput. (Huhtinen ym. 2004, 222- 229.)

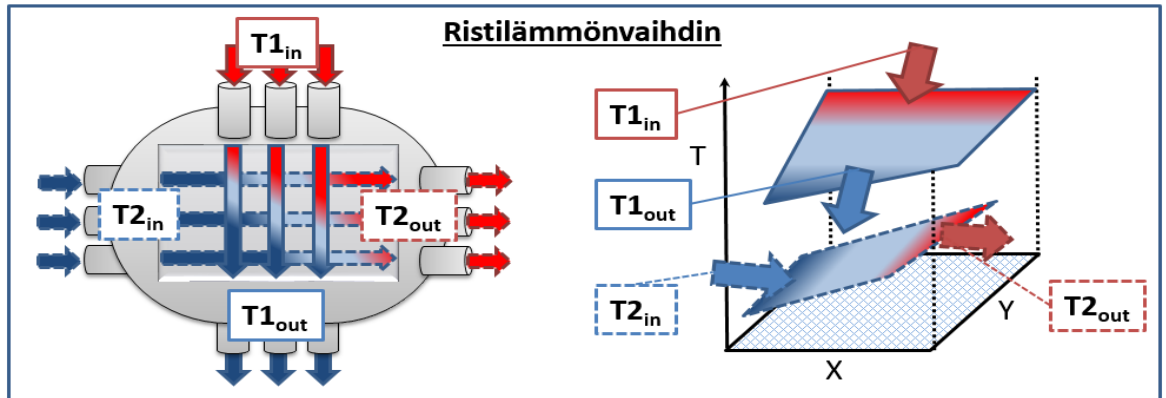
4.8 Lämmönvaihtimet

Lämmönvaihtimet voidaan jaotella toimintaperiaatteensa mukaan vasta-, myötä- ja ristilämmönvaihtimiin. Kuviossa 17 on vertailtu vasta- ja myötävaihtimien lämmön siirtymistä.



Kuvio 17. Vasta- ja myötälämmönvaihtimien toiminta ja lämpötilaerot (Huhtinen ym. 2004, 203, muokattu)

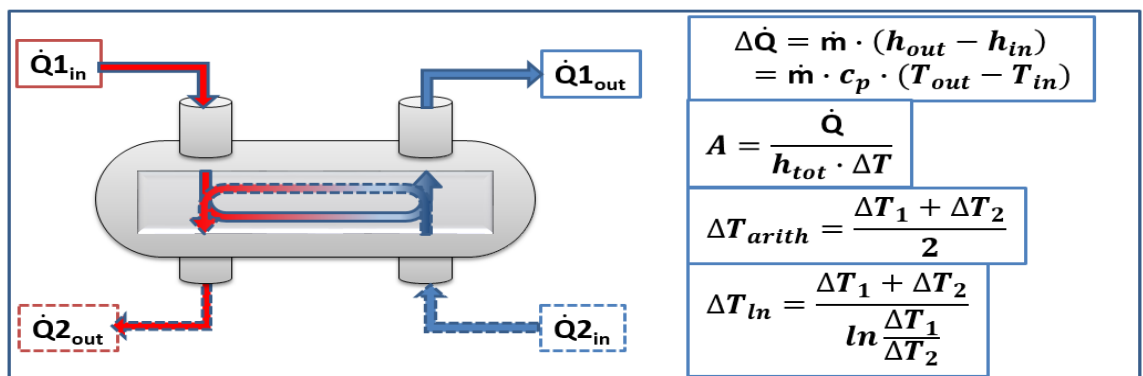
Myötävaihtimilla virtaavien aineiden sisääntulon kohdalla on suurin lämpötilaero, eikä lämmitettävän aineen lämpötila voi ylittää poistuvan lämmittävän aineen lämpötilaa ($T_{2,out} \leq T_{1,out}$). Vastavaihtimella tämä puolestaan on mahdollista. Vastavaihtimet vaativat suhteessa myötävaihtimiin pienemmän lämmönsiirtoalan saman lämpömäärän siirtämiseksi. (Huhtinen ym. 2004, 203.) Usein kuitenkin käytetään kuvion 18 mukaisia ristilämmönvaihtimia.



Kuvio 18. Ristilämmönvaihtimen toiminta ja lämpötilaerot (Huhtinen ym. 2004, 203, muokattu)

Lämmönvaihtimien mitoitus

Vaihtimien mitoituksessa on huomioitava mm. lämmönvaihdon pinta-ala, materiaalin lämpöresistanssi ja lämpötilaero fluidien välillä. Kuviossa 19 on esitetty yhtälöitä mitoituksen tueksi.



Kuvio 19. Lämmönvaihtimen mitoitus ja laskenta (Huhtinen ym. 2004, 202), muokattu

Lämpötehon määrittämisessä h :lla merkitään entalpiaa ja pinta-alan määrittämisessä puolestaan lämmönsiirtokerrointa, jotka on avattu aiemmin. Aiempana on esitetty lämpötilaeron määrittämiselle kaksi yhtälöä, aritmeettinen ja logaritminen. Yhtälöt sopivat myötä- ja vastavaihtimien määrittämiseen, mutta ristivaihtimelle on määritettävä korjauskerroin. Lämpötilaerot 1 ja 2 on esitetty kuvioissa 17. (Huhtinen ym. 2004, 201–204.)

5 Höyryjärjestelmän käyttö ja prosessit

5.1 Vedenkäsittely

Vesi-höyrykiertoprosessissa veden epäpuhtaudet kuten kalsium, magnesium tai piihappo (SiO_2) voi muodostaa kattilakiveä, joka haittaa prosessia. Rauta ja kupari puolestaan reagoidessaan hapen kanssa aiheuttavat korroosiota. Kiintoaine ja orgaaninen aines taas aiheuttavat tukkeumia, kerrostumia ja veden kuohuntaa. Vedenkäsittelyyn kuuluvat lisäveden, lauhteen, ulospuhalluksen, vesikemikaalien ja kaasunpoiston käsittely. (Huhtinen ym. 2004, 297.)

Lisäveden valmistus

Lisäveden valmistus käsittää seuraavia vaiheita:

- karkeiden epäpuhtauksien poisto (hiukkaskoko $>10^{-4}$ mm)
- ilmastus
- humuksen poisto
- kovuuden poisto (jos ei täyssuolan poistoa)
- täyssuolanpoisto.

Karkeat epäpuhtaudet voidaan yksinkertaisesti poistaa välppämällä ja siivilöimällä. Humuksen poisto vaatii mekaanisten menetelmien lisäksi kemikaaleja, joilla humuksesta saadaan flokkia, joka poistetaan selkeyttämällä ja suodattamalla. Poistossa käytetään alumiinisulfaattia, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ja ferrikloridia, FeCl_3 . Humuksen poiston jälkeen vesi varastoidaan puhdasvesisäiliöön. Veden pH -arvoa voidaan säätää natriumaluminaatin, NaAlO_2 ja kalkin $\text{Ca}(\text{OH})_2$ avulla. Kun kattilan käyttöpaine on alle 30–50 baaria, voidaan veden kovuutta alentaa trinatriumfosfaatti, Na_3PO_4 -kemikaalilla. Kemikaali saostaa kalsiumin ja magnesiumin lietteeksi, joka poistetaan ulospuhalluksessa yhdessä kattilaan väkevöityneen jäännöskovuuden kanssa. (Huhtinen ym. 2004, 301–302, 307.)

Kaasunpoisto

Kaasua voidaan poistaa termisesti, sillä kaasujen liukoisuus riippuu lämpötilasta. Kiehumispisteessään kaasujen liukoisuus on nolla. Termisessä poistossa olennaista on saada veden lämpötila kiehumispisteeseen nopeasti ja pysymään kiehumispisteessään poiston ajan. Vesi on hyvä saada myös hajotamaan tasaisiksi pieniksi pisaroiksi. Kaasunpoistin sijaitsee yleisesti syöttövesisäiliön päällä, mutta se on mahdollista rakentaa myös syöttövesisäiliön sisälle (ks. 4.5). Poistoprosessi on tarkoitettu lähinnä hapenpoistoa varten, mutta samalla poistuu muitakin liuenneita kaasuja. Hapetta voidaan poistaa myös kemiallisesti hydratsiini, N_2H_4 -kemikaalin avulla. Se reagoi hapen kanssa muodostaen vettä ja typpeä. (Huhtinen ym. 2004, 305–307.)

Taulukossa 8 on esitetty hapen ja typen liukoisuus veteen normaali-ilmanpaineessa.

Taulukko 8. Hapen ja typen liukoisuus eri lämpötiloissa normaali-ilmanpaineessa (Huhtinen ym. 2004, 306, muokattu)

Hapen ja typen liukoisuus veteen		
Lämpötila [°C]	Hapen liukoisuus [mg/l]	Typen liukoisuus [mg/l]
0	14,6	23,8
10	11,4	18,7
20	9,2	15,4
30	7,7	13,1
40	6,6	11,3
50	5,7	9,8
60	4,9	8,5
70	4,0	6,9
80	3,0	5,3
90	1,7	3,1
100	0,0	0,0

Lämpötilan ollessa yli 200 °C hydratsiini hajoaa ammoniakiksi ja typiksi. Vaikka vapautuvan ammoniakin vaikutuksesta pH-arvon nousulla on edullisia vaikutuksia korroosion kestävyteen, on kemikaali tarkoitettu hapen poistoa varten, joten kemikaalia ei saa syöttää korkeammassa lämpötilassa olevaan veteen. (Huhtinen ym. 2004, 307.)

Tuotettaessa matalapaineista prosessihöyryä, riittää veden elvytyskäsittely, mutta lisäkäsittelyllä voidaan parantaa vedenlaatua ja pienentää ulospuhalluksen tarvetta, mikä tuo säästöjä mm. polttoainekuluihin (Aaltonen 2014).

5.2 Pääsäädot

Höyrykattilan pääsäätoihin kuuluvat tuorehöyryn paineen, syöttöveden syötön, palamisilman syötön ja savukaasujen paineen säädöt. Höyrynpaineen säätötavat voidaan jakaa kiinteään ja liukuvaan paineen säätöön.

Kiinteässä höyryn paine pidetään vakiona joko polttoainevirtaa muuttamalla tai säätöventtiilin avulla. Polttoainevirtaan perustuvassa säätötavassa tuorehöyryn mittaus- ja asetusarvon erosuureella ohjataan polttoaineen syöttöä tai puolestaan säätöventtiiliä. Polttoaineen syötön muuttuessa muuttuu myös palamisilman syöttö. Venttiiliohjatussa (etupaine) säädössä paine pysyy paremmin vakiona.

Liukuva paineen säätö voi puolestaan olla puhdas tai ohjattu. Puhtaan painesäädön tapauksessa järjestelmää säädetään venttiilin asennolla, joka muuttuu lineaarisesti tehontarpeen mukaan ollen maksimissaan täydellä teholla. Etuina ovat pienemmät häviöt ja vakaammat virtausolot, mutta säätö on hidas reagoimaan.

Ohjatulla liukuvalla säädöllä ohjausventtiiliä pidetään oletuksena esim. 10 % kuristettuna. Kun venttiiliä avataan, saadaan nopeampi vaste tehon muutokselle. Säätö on yhteydessä polttoaineen syöttöön, joka pyrkii palauttamaan venttiilin asennon takaisin. (Huhtinen ym. 2004, 262–265.)

5.3 Höyryä käyttävät yksikköprosessit

Höyryä käyttävät yksikköprosessit ovat tyypiltään usein termisiä. Prosesseihin täytyy siis viedä tai poistaa lämpöä. Joissain sovelluksissa höyry on sopiva fluidi lämmönsiirtoon.

Lämpöä voidaan viedä esimerkiksi lämmönvaihtimilla (ks. 4.8). Höyryä tarvitsevat vaihtimet ovat tyypiltään, joko neste-kaasu tai kaasu-kaasu.

Yksikköprosesseja joissa fluidina on höyry:

- Haihdutus
- Kiteytys
- Tislaus
- Kuivaus
- Sekoitus

Haihdutuksessa liuotinta väkevöidään tai siitä kaasuuntuva liuotin voi olla tuotteena. Haihdutuksessa lämmönsiirtofluidina voi höyryn lisäksi olla neste tai savukaasu. Nestettä käytettäessä tarvitaan kuitenkin väliseinä. Haihduttimen taloudellisena mittarina käytetäänkin mm. käytettyä höyrymäärää. Höyry luovuttaa haihduttimessa jäähtymistä ja lauhtumista vastaavan lämpömäärän. Jos liuoksen lämpötila on alle liuottimen kiehumispisteen, tarvitsee prosessiin viedä lisäksi erotusta vastaava lämpömäärä. Lauhduttimet ovat tyypiltään lyhyt- tai pitkäputkisia, pakkokiertoisia tai monivaiheisia.

Kiteytysprosessissa pyritään joko laskemaan lämpötilaa tai haihduttamaan liuotinta, niin että liukenemisraja saavutetaan. Höyryä käytetään jälkimmäisessä tapauksessa.

Tislauksessa kahdesta keskenään liuenneesta nesteestä erotetaan toinen haihduttamalla. Tämä perustuu nesteiden erilaisiin haihtumisominaisuuksiin, jolloin helpommin haihtuva siirtyy kaasufaasiin ja huonommin haihtuva jää nestefaasiin. Taustalla on nesteiden erilaiset kiehumispisteet. Tislauksessa höyryä tarvitaan lämmittämiseen, joka mahdollistaa haihtumisen. Tislausprosessit voidaan jakaa panos- ja jatkuvatoimisiin. Tislauksissa käytetään erilaisia kolonneja kuten pohja-, seula- ja kellopohja- sekä täytekappalekolonneja.

Kuivauksessa on tarkoitus poistaa vettä tai muuta nestettä. Yleensä kuivaus aloitetaan mekaanisilla menetelmillä, mutta haluttuun kosteuteen päästään

usein vasta lämmön avulla haihduttamalla. Höyryä tarvitaan juuri lämmitysvaiheeseen. Esimerkiksi telakuivaajan sylinteriä voidaan lämmittää höyryllä.

Höyryä voidaan käyttää myös sekoituksessa, jolloin höyryä johdetaan nesteeseen. Höyryä voidaan käyttää etenkin, jos nestettä on myös tarkoitus lämmitellä. (Pihkala 2005, 69, 73–104.)

6 Matalapainehöyry teoriassa ja tekniikassa

6.1 Tietoperustan kartoitus höyryn ymmärtämiseksi

Työn yhtenä keskeisimmistä tavoitteista oli tuottaa yrityksen henkilöstölle teorian pohjalta materiaalia, joka auttaisi ymmärtämään nykyisten kuumavesikatiloiden ja matalapainehöyrylaitteistojen eroja teorian ja tekniikan osalta.

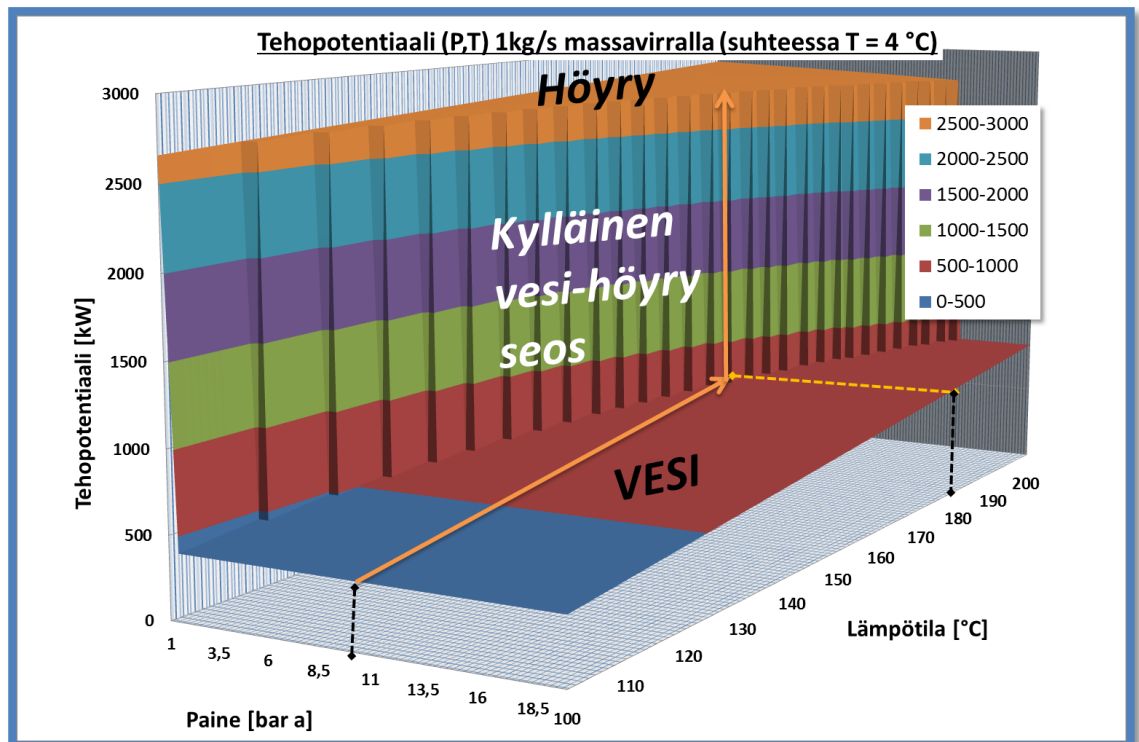
Tietoja lähdettiin keräämään kartoittamalla aineistoa, joka liittyy olennaisesti höyryn ja veden eroavaisuuksien hahmottamiseen sekä höyryyn vaatimiin tekniisiin ratkaisuihin. Tekniikan kartoituksessa höydynnettiin lisäksi laitevalmistajien antamia tietoja. Teknisen tiedon keräämisessä painopiste oli siinä, mikä on uutta yritykselle. Keskeisimmät aiheet oli sovittu etukäteen, mutta tietoa lähdettiin keräämään laaja-alaisesti. Laaja-alaiseen tarkasteluun päädyttiin, jotta mahdollisesti huomiotta jääneillä kriittisillä asioilla oli mahdollisuus nousta esiin. Tietoperustalle asetettiin iso painoarvo, koska keskeisen teorian ja höyryyn liittyvien tekniikoiden on oltava hallussa ennen mahdollista kehitystyötä. Laaja ymmärrys höyryn ympäriltä arvioitiin myös hyväksi perustaksi höyrymarkkinoiden hahmottamiseksi.

Kirjallisuudesta otettiin myös paljon mallia erilaisille graafiselle materiaalille: kuvioille, taulukoille ja kuvaajille. Visuaalisten keinojen arvioitiin olevan tehokkaampia ja havainnollisempia tietoperustan avaamisessa kuin pelkkä teksti. Graafinen materiaali tehtiin PowerPoint ja Excel -ohjelmien avulla kirjallisuus-

den mallien pohjalta uudelleen havainnollisuuden parantamiseksi sekä tekijänoikeussyistä.

6.2 Höyryn tietoperustan havainnollistaminen

Aiemmin toimeksiantajan toiminnassa oli pärjätty pitkälle veden ominaislämpökapasiteetin ymmärtämisellä, koska kuumavesikattiloissa ei tapahdu faasimuutosta. Tällöin muutokset energiantarpeessa on voitu olettaa lineaarisiksi, mutta veden alkaessa höyrystyä ei ajattelumalli enää toimi. Lämpötilan ja paineen ymmärtäminen on kuitenkin ollut henkilöstölle tuttua, joten uudet höyryn ja höyrystymisen ymmärtämiseksi vaadittavat käsitteet, entalpia ja ominaisentalpia haluttiin sitoa näihin. Liitteessä 3 on esitetty ominaisentalpiat laajalla paineen ja lämpötilan alueella. Entalpiain sitominen käytäntöön ja haluttuun kokoluokkaan esitettiin kuvion 20 avulla.



Kuvio 20. Veden teoreettinen tehopotentiaali suhteessa painetta vastaavaan 4 °C:seen veteen

Kuviossa 20 olevan kylläisen seoksen alue avattiin liitteen 4 avulla, jotta ei jäisi käsitystä, että veden kiehumisen tapahtuu hyppäyksenomaisesti. Samalla käsiteltiin höyryn laatua. Suurin haaste ja uutuusarvo oli kiehumisen teorian esittämisessä. Tietoperustan (ks. 2.6) kuviot 8 ja 11 auttoivat hyvin hahmottamaan kiehumisen luonnetta. Kuplakiehumisen yhtälö 8 oheisine taulukoineen havainnollisti, miten hankalasta tapahtumasta teoreettisesti on kyse.

Standardien ja säädösten esittelyssä huomattiin, että keskeisimmät säädökset ja standardit olivat jo tuttuja. Suurin uutuusarvo oli PSK -standardien esittelyllä. Samalla painotettiin, että PSK:n standardien mukaan toimii useita mahdollisen uuden liiketoiminnan potentiaalisia asiakkaita.

Kirjallisuudesta saatiin myös hyödyllistä tietoa erilaisista teknisistä ratkaisuista ja höyryn tuotannon vaatimista komponenteista sekä laitteiston käsittelystä. Koska varsinainen asiakaskartoitus jäi tekemättä, etsittiin teorian pohjalta prosesseja, joissa höyry on keskeisessä osassa. Prosessien listauksen ajateltiin helpottavan mahdollisia jatkoselvityksiä.

7 Toimeksiantajan tuotteiden tekninen valmius

7.1 Mitoituslaskelmat nykyisen tekniikan valmiuksista

Tavoitteena oli kartoittaa yrityksen nykyistä valmiutta valmistaa höyryä tuottava laitteisto hyödyntäen nykyisiä kattiloita, koska kokonaan uuden kattilan valmistaminen arvioitiin hankalaksi. Siksi mitoituksen lähtökohdaksi otettiin suurin valmistuksessa oleva kattila, joka on teholtaan 3 MW ja kattilaveden maksimilämpötila on noin 175 °C 10 baarin paineella. Ratkaisuksi valittiin kuumalla paineistetulla vedellä lämmönvaihtimen kautta tapahtuva höyrystin, missä höyrystettävä vesi on matalammassa paineessa.

Lähtötietojen avulla lähdettiin tekemään Excel -ohjelmalla laskentapohjaa komponenttien mitoittamiseksi. Excelissä oli käytössä lisäksi makropohjaisen

X Steam -apuhjelman 2.6 versio. Ohjelma perustuu IAPWS IF97 höyrystandardiin. Koska todellisen höyrystimen arvoja ei ollut saatavilla, päätettiin poistuvien virtausten lämpötilaeroa arvioida 5 celsiusasteella (höyrystimen asteisuus). Lähtötiedoksi saatiin vielä ulkopuoliselta höyryasiantuntijalta syöttövedenlämpötilaksi 105 °C. Alimitoituksen välttämiseksi mitoitus tehtiin suurimman tehontarpeen alueelle. Siksi mahdollinen höyryä käyttävä prosessi oletettiin täysin ulospuhaltavaksi. Tällöin lauhdetta ei palautuisi ollenkaan takaisin käyttöön, ja lisävettä täytyisi näin valmistaa höyryvirtaa vastaava määrä. Lisäveden lämpötilaksi oletettiin 4 °C ja sen lämmittämiseksi oletettiin käytettävän höyryä.

Koska laskenta tehtiin ideaalisesti teorian pohjalta, lisättiin siihen painehäviöksi molemmille pumpuille 1 baari. Lämpöhäviötä puolestaan approksimoitiin 90 %:in hyötysuhteella. Painehäviö arvioitiin kiertopumpun tapauksessa todennäköisesti yläkanttiin, mutta arvio antaa varmuutta kustannuslaskelmiin. Mitoituksen höyryvesikierron keskeisimmät lähtöarvot on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Mitoituksen keskeisimmät lähtöarvot

Hyöryn ominaisuuksia		
Kylläisenhöyryn paine [bar]	Höyryn tarve [kg/s]	Ulospuhallus [%]
5,000	1,000	100

Järjestelmän ominaisuuksia		
Höyrystimen Asteisuus [°C]	Järjestelmän hyötysuhde [%]	Painehäviöt kierto [bar]
5,000	90	1,000
Lauhteen lämpötila [°C]	Syöttöveden paine [bar]	Syöttöveden lämpötila [°C]
60,000	4,000	105,000

Laskennassa käytettiin Excel apuhjelman seuraavia komentoja ominaisentalpian määrittämiseksi:

- hV_p(p[bar]) kylläinen höyry paineen mukaan
- h_pT(p[bar];T[°C]) vesi/höyry paineen ja lämpötila mukaan

Aluksi mitoitettiin massatase lämmitettävän höyryn ja ulospuhalluksen mukaan jatkuvuustilaprosessin periaatteita käyttäen. Lämmittävän höyryn massatase on esitetty yhtälössä 15

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{m}_3 \cdot h_3 - \dot{m}_4 \cdot h_4}{h_1} \quad (15)$$

missä

\dot{m} on massavirta, kg/s

h on ominaisentalpia, kJ/kg.

Alaindeksi 1 viittaa lämmittävään höyryyn, 2 palaavaan lauhteeseen, 3 lisäveden ja 4 syöttövesisäiliöstä lähtevään virtaan, jonka ominaisuudet ovat edellisten summa. Kokonaishöyryntarve on siten prosessissa tarvittavan ja lämmitykseen kuluvan höyryn summa. Lauhteen ja lisäveden massavirrat on määritetty ulospuhallusprosentin avulla. Kokonaistehon tarve on puolestaan määritetty yhtälöllä 16.

$$\dot{Q} = \frac{(\dot{m}_{tarve} + \dot{m}_{lämmitys}) \cdot (h_{höyry} - h_{syöttövesi})}{hyötysuhde} \quad (16)$$

missä

\dot{Q} on lämmitystehontarve, kW

hyötysuhde on desimaalilukuna, 0–1.

Kattilalta tulevan veden massavirran laskenta on kuvattu yhtälöllä 17.

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{h_{lähtevä} - h_{palaava}} \quad (17)$$

missä

$h_{lähtevä}$ on kattilalta lähtevän veden entalpia, kJ/kg

$h_{palaava}$ on kattilalle palaavan veden entalpia, kJ/kg.

Höyrystimen pinta-alaa arvioitiin soveltamalla tietoperustan kaavoja 8 ja 9.

Excel -soluihin rakennettiin kaava, jossa JOS -funktio vertaili kuplakiehumisen ja maksimilämpövuon arvoja. Funktio asetettiin käyttämään aina pienempää arvoa, koska ajateltiin että kiehumisen tulee tapahtua kuplakiehumisen alueel-

la. Geometriaksi valittiin iso sylinteri ja materiaaliksi mekaanisesti hiottu ruostumaton teräs. Lisäksi taulukkoon asetettiin vastaavasti mahdollisuus valita käytetäänkö aritmeettista vai logaritmista lämpötilaeroa. Höyrystävän pinnan lämpötilaksi arvioitiin kiertoveden keskimääräinen lämpötila, mikä ei vastaa todellisuutta, mutta antaa suuntaa. Todellisuudessa kaikki lämmönsiirtomekanismit (johtuminen, konvektio ja säteily) vaikuttavat pintalämpötilaan.

7.2 Nykyisten teknisten valmiuksien tulokset

Mitoituksessa lähdettiin etsimään vaihdinjärjestelmälle maksimiarvoja. Aluksi kokeiltiin erilaisia höyryvirtoja, joista 1 kg/s vastasi oletusarvoilla annetun kattilan maksimitehoa 3 MW. Tämän jälkeen kokeiltiin erilaisia höyrinpaineita ja katsottiin niiden vaikutusta keskeisimpien komponenttien mitoitusarvoihin. Taulukkoon 10 on koottu eri paineilla tehtyjen laskelmien tulokset.

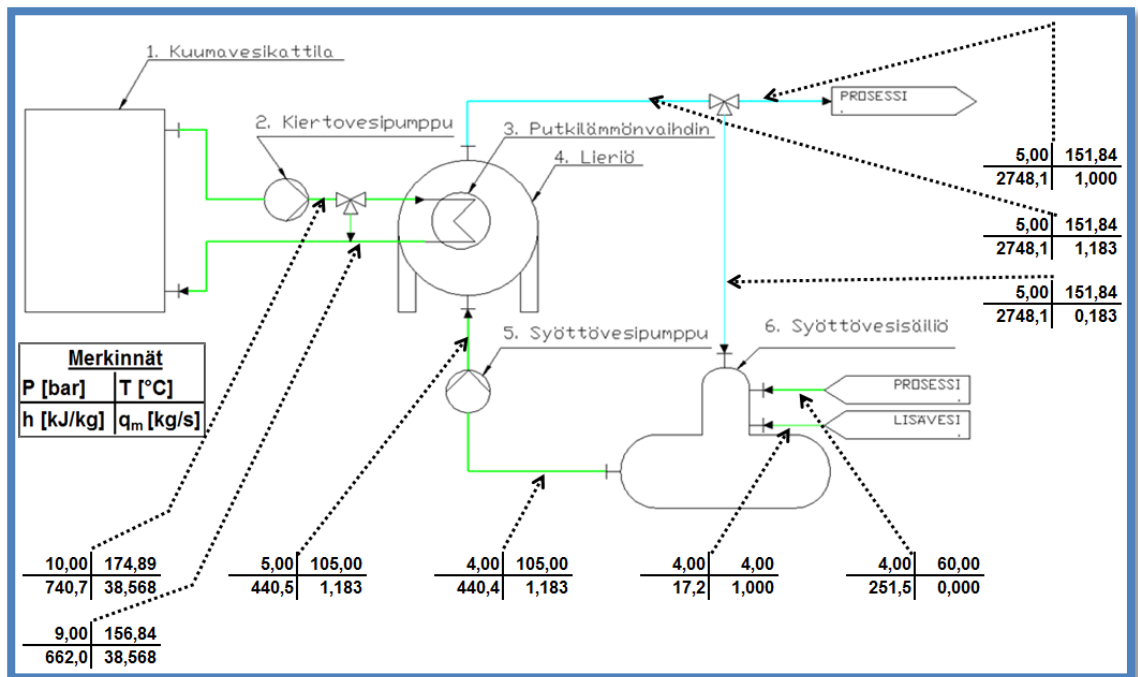
Taulukko 10. Vaihdinjärjestelmän arvojen mitoitus eri höyrinpaineilla

$P_{\text{höyry}}$ [bar a]	\dot{m}_{kierto} [kg/s]	\dot{Q}_{tarve} [kW]	$A_{\text{höyrystin}}$ [m ²]
1	Syöttöveden lämpötila-asetusta alempi lämpötila		
2	13,9	2990	2,24 (max)
3	19,1	3010	1,93 (max)
4	26,5	3020	1,74 (max)
5	38,6	3030	2,53
6	63,0	3040	5,30
7	140,9	3050	13,4
8	Lämpötilaero negatiivinen höyrystimellä		

Taulukossa 9 (ks. 7.1) on esitetty muut tekijät, jotka on pidetty vakioina. Vain höyrinpainetta muutettiin. Yhden baarin höyrinpaineella ei voitu tehdä laskelmia muita oletuksia muuttamatta, sillä syöttöveden asetustemperatura oli kiehumispistettä korkeampi. Siksi laskennassa syöttövesi olisi alkanut lämmittämään kattilaa eikä päinvastoin. 8 baarin paineella taas oletus höyrystimeltä lähtevien virtojen lämpötilaerosta ei toteutunut, vaan oletus teki laskelmasta

mahdottoman. Oletuksen takia viileämpi vesi lämmitti lämpimämpää, mikä on ristiriidassa termodynamiikan sääntöjen kanssa. Vaikka oletuksia olisi muutettu niin, että käytössä on höyrystin, joka kykenee yhden celsiusasteen lämpötileroon poistuvien virtauksien välillä, olisi kiertoveden laskennallinen virtaama ollut 200 kg/s ja höyrystimen lämpöpinta-ala 250 m^2 . Näillä arvoilla toteutettava järjestelmä ei olisi enää taloudellisesti järkevä. Höyrystimen lämmityspinnan pinta-alan laskennassa taulukon 9 laskentakaava palautti 2–4 baarin paineilla maksimilämpövuon kaavalla lasketun arvon. Käytännössä järkeviä mitoitusarvoja saatiin 5 ja 6 baarin höyryllä. Näistä 5 baaria vastaavat arvot valittiin jatkotarkasteluun.

Valitun 5 baarin höyrönpainetta vastaavat höyryprosessin mitoitusarvot prosessin eri kohdissa on esitetty kuviossa 21 ja keskeisimmät laskelmien tulokset taulukossa 11.



Kuvio 21. Vaihdinjärjestelmän mitoituksen tulokset PI-kaaviossa

Taulukko 11. Keskeisimmät tulokset 5 baarin höyryllä

TULOKSET		
Kierron massavirta [kg/s]	Lähtevä tilavuusvirta [l/s]	Tehon tarve [kW]
38.568	43.214	3034.23
Lämmityshöyryn tarve [kg/s]	Lisäveden lämmitys [kW]	Lisäveden tarve [kg/s]
0.183	503.976	1.000

Laskettujen arvojen perusteella lähdettiin etsimään komponenttitoimittajia. Mitoituksessa tehtiin aluksi virhe kiertoveden virtauksen määrittämisessä. Vaikka tehontarve oli määritetty hyötysuhteen avulla, määritti lämpötehoa kuitenkin kiertoveden virtaama eikä päinvastoin. Tästä syystä valmistajilta lähdettiin kysymään pumppua hieman liian pienellä virtaamalla, mutta saadun tarjouksen perusteella pumppu olisi soveltunut myös päivitetyn virtaaman alueelle.

8 Kotimaisen höyryjärjestelmäliiketoiminnan kenttä

8.1 Kysely höyryjärjestelmätoimittajille

Kirjallisuuskartoituksen jälkeen laadittiin kyselylomake (liite 1.) nykyisille kotimaisille toimijoille. Tämän tarkoitus oli hahmottaa lokeroa mahdolliselle uudelle toimijalle. Kyselyssä kysyttiin, millä polttoaineilla sekä paine- ja höyryntuottoalueilla nykyiset toimijat järjestelmiä toimittavat. Tärkeää oli myös hahmottaa ovatko toimijat toimittajia vai valmistajia. Taloudellisuusvertailua varten tiedusteltiin myös hintahaarukkaa esimerkkijärjestelmiä varten. Toimijoilta kysyttiin lupaa laatia lista opinnäytteeseen höyrymarkkinoilla toimivista yrityksistä. Kysely toteutettiin Google Forms verkko-ohjelman avulla ja vastauslinkki lähetettiin 15 yritykselle.

Kysely rakennettiin niin, että mikäli kysely ei koskenut vastaajaa, annettiin mahdollisuus ohittaa kyselyn muut sivut. Myös kyselyn hinnoitteluosio aseteltiin vapaaehtoiseksi, jotta alkuosion kysymyksistä olisi mahdollista saada tietoa, vaikka hinnoittelua koskeviin kohtiin ei olisi haluttu vastata. Tähän päädyttiin koska arveltiin, että yritykset eivät välttämättä halua paljastaa hinnoittelu-

aan tai hinnoittelun arvioiminen nopean kyselyn täyttämässä olisi ollut liian raskasta.

8.2 Höyrytoimittaja-kyselyn vastaukset

Viidestätoista lähetetystä kyselystä vastauksia saatiin yhteensä kuusi kappaletta, jolloin vastausprosentti oli 40. Vastausprosentti ylitti ennako-odotukset, mutta kaksi vastaajaa ilmoitti, ettei kysely koske heitä. Vastaajat olivat kaikki laitevalmistajia ja ilmoittivat myös toimittavansa laitteistoja, joten tietoja pelkistä jälleenmyyjistä ei saatu. Luvan listaukseen antaneet toimijat olivat:

- KPA Unicon Oy
- Livite Oy
- Renewa Oy
- Steamrator Oy

Kolme vastaajista ilmoitti toimittavansa laitteistoja kaikilla kysytyillä polttoaineilla ja yksi ainoastaan erilaisilla kaasuilla toimivia laitteistoja. Kaikkien valmistajien painealue kattoi matalapainehöyryn alueen, mutta yksi valmistajista ilmoitti, ettei tee alle 5 baarin laitteita. Teholuokissa hajontaa oli hieman enemmän, mutta kaikki ilmoittivat toimittavansa reilusti yli 3 MW:n (n. 3600kg/h höyryä) laitteistoja. Yksi valmistajista ilmoitti, että laitteiden tehon alaraja on 7000 kg/h höyryä ja vain yksi ilmoitti tekevänsä alle 500 kg/h höyryntuottoon käyviä laitteistoja. Sama valmistaja ilmoitti kuitenkin, etteivät laitteet ole suoraan hake- tai pellettikäyttöisiä. Siksi kyselyn perusteella näyttää, että varsinkin alemmassa teho- ja paineluokassa voisi olla potentiaalinen markkinalokero uudelle toimijalle.

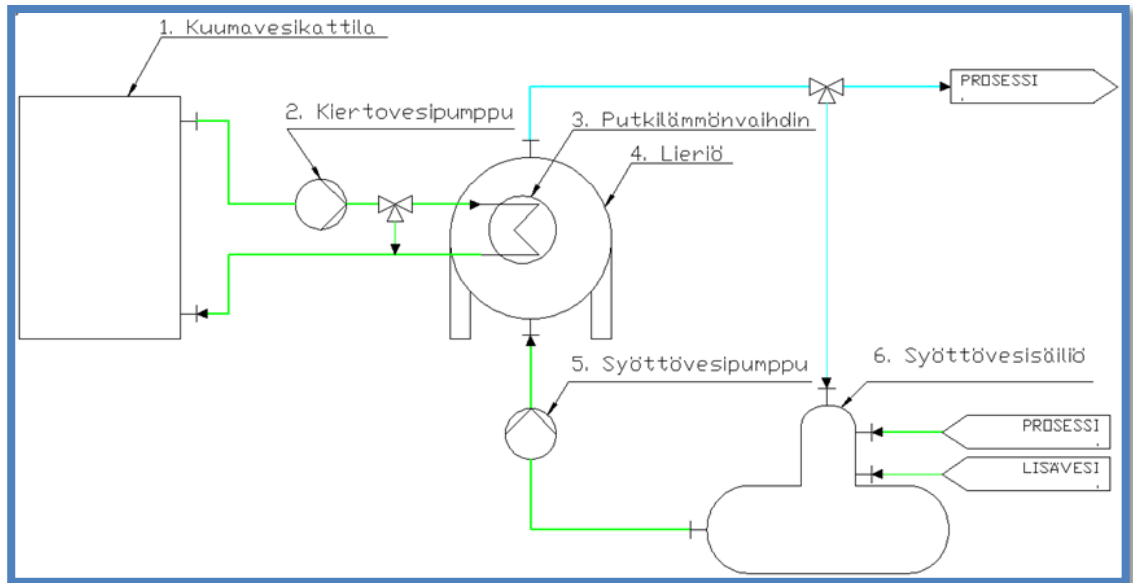
Hinnoitteluosioon saatiin vain yksi vastaus, mutta teholuokka ja polttoaineraukset rajasivat potentiaalisten vastaajien määrän kahteen kyselyn tulosten perusteella. Kyselyn vapaiden palautteiden vastauksista kävi ilmi, että hinnoittelu kyselyssä esitetyillä rajauksilla on hankalaa, koska hinnoitteluun vaikuttavia tekijöitä on lukuisia. Erityisesti valvonnan, varastoinnin ja automaation vaatimuksien kerrottiin vaikuttavan suuresti hinnoitteluun. Epätarkka rajausta myös

heikensi vertailuosion taloudellisuusarvion luotettavuutta, sillä ei voitu olla varmoja verrokkilaitteiden yhdenvertaisuudesta. Kyselyn hinnoitteluosioon olisikin pitänyt laittaa jokin kohta, josta olisi ilmennyt hinnoitteluperusteen tekniikan tyyppi, sillä nyt jäi epäselväksi oliko perusteena tulitorvi- vai vesiputkikattila tai jokin muu tekniikka. Biopolttoaineiden yhdistämisen yhdeksi vaihtoehdoksi ajateltiin keventävän kyselyä, mutta siinä ei ollut osattu huomioida, että pelletti- ja hakelaitteistoilla on merkittävä hintaero. Kaikki kyselyyn vastanneet toimijat sisältyivät myös ulkopuolisen höyryasiantuntijan arvioon kotimaisten matalapainehöyrylaitteistojen valmistajista. Tässä valossa vastausten kattavuuteen voitiin olla tyytyväisiä.

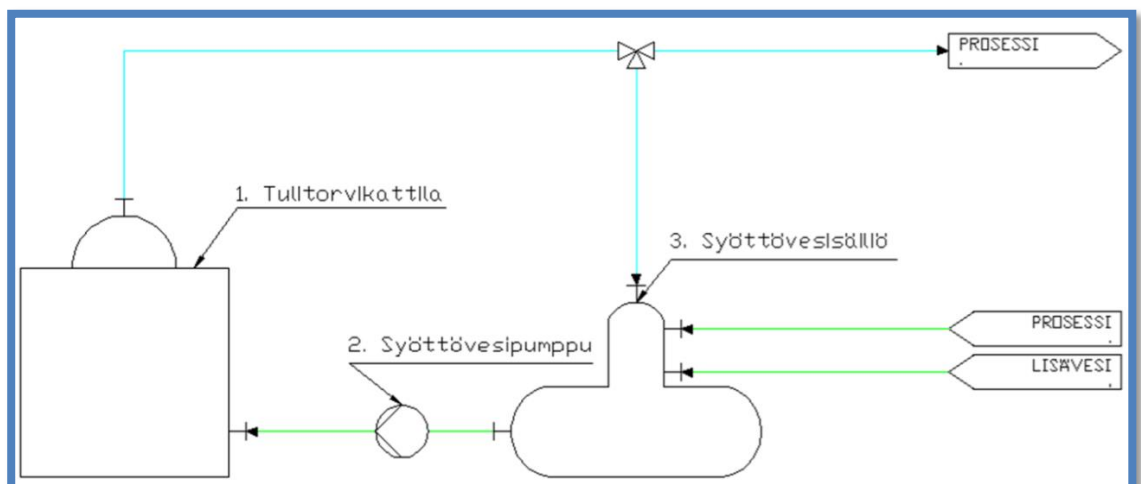
9 Matalapainehöyryjärjestelmien vertailu

9.1 Järjestelmien tekninen vertailu

Mitoitettua järjestelmää oli syytä verrata vaihtoehtoiseen matalapainehöyrytekniikkaan valitun tekniikan kilpailukyvyn hahmottamiseksi. Vertailuun valittiin vaihdinjärjestelmä edustamaan nykyisiä valmiuksia ja tulitorvikattilajärjestelmä edustamaan uuden kattilatyypin kehittämistä sekä nykyisiä tulitorvikattiloiden toimittajia. Tekniikoiden erot näkyvät kuviossa 22 ja 23, joissa on esitetty karkeat PI -kaavioluonnostelmat järjestelmistä.



Kuvio 22. Vaihdinjärjestelmän yksinkertaistettu PI -kaavio



Kuvio 23. Tulitorvikattilan yksinkertaistettu PI -kaavio

Suurin eroavaisuus tekniikoiden välillä on, että vaihdinjärjestelmällä höyrystyminen tapahtuu kattilan ulkopuolella ja tulitorvikattilalla kattilan sisäpuolella. Polttoteknisesti tekniikat ovat hyvin samanlaiset ja lämmönsiirrossa suurin eroavaisuus on kiehumisen vaikutus vesipuolen konvektiolämmönsiirtoon. Tulitorvikattilaan verrattuna vaihdinjärjestelmän vaatimista komponenteista aidosti uusia ovat putkilämmönvaihdin (tai höyrystin) ja kiertovesipumppu, koska lieriötä voidaan verrata tulitorvikattilan päällä olevaan höyrytilaan. Tekniikoiden heikkouksia ja vahvuuksia on vertailtu taulukossa 12.

Taulukko 12. Höyryjärjestelmien vertailu

Tekniikka	Vahvuudet	Heikkoudet
Vaihdinjärjestelmä	<ul style="list-style-type: none"> + Höyrykierron vesi ei kosketuksissa kattilan kanssa + Voidaan hyödyntää vanhaa kuumavesikattilatuo- tanta 	<ul style="list-style-type: none"> – Kalliimpi – Useita komponentteja – Huono hyötysuhde ilman syöttöveden esilämmitystä savukaasuilla – Kiertopumpun sähköntarve – Ei päästä tulitorvikattilaa vastaaviin höyrynpaineisiin höyrystimen vaatiman lämpötilaeron takia
Tulitorvikattila	<ul style="list-style-type: none"> + Rakenne ja poltoteknikka lähellä nykyisiä kattiloita + Helpommin suunniteltavissa asennusvalmiiksi paketiksi + Voidaan asentaa useita kattiloita 	<ul style="list-style-type: none"> – Rakenne vaatii isoilla paineilla suuria materiaalipaksuuksia – Isoilla paineilla kallis ratkaisu – Kattila alttiimpi korroosiolle

Tulitorvikattilalle saatiin taulukkoon listattua enemmän vahvuuksia ja vähemmän heikkouksia. Vaihdinjärjestelmän vahvuus kuitenkin on, että höyrykierron vesi ei pääse kosketuksiin itse kattilan kanssa, mutta suurempi komponenttien määrä vaikuttaa luotettavuuteen ja käytettävyyteen. Esimerkiksi automaation säädöissä täytyy huomioida kiertovesipumppu, joka on lisäksi luotettavuusmielessä uusi mahdollisesti vaurioituva komponentti. Pumppu kuluttaa lisäksi sähköä kohtalaisen paljon, mikä aiheuttaa lisää käyttökustannuksia ja tekee järjestelmästä haavoittuvaisemman sähkökatkantilanteessa.

Vaihdinjärjestelmä listattiin kalliimmaksi, vaikka myöhemmässä kannattavuusarviossa se on arvioitu halvemmaksi. Käytännön tarjouskilpailussa todettiin, että vaihdinjärjestelmä on huomattavasti kalliimpi. Tulitorvikattilan heikkouksiksi luetut suuret materiaalipaksuudet ja niistä aiheutuvat suuret valmistuskustannukset toteutuvat myös vaihdinjärjestelmällä jopa huomattavammin. Heikkoudet on listattu, koska siirtyminen tulitorvikattilatekniikkaan ei vielä

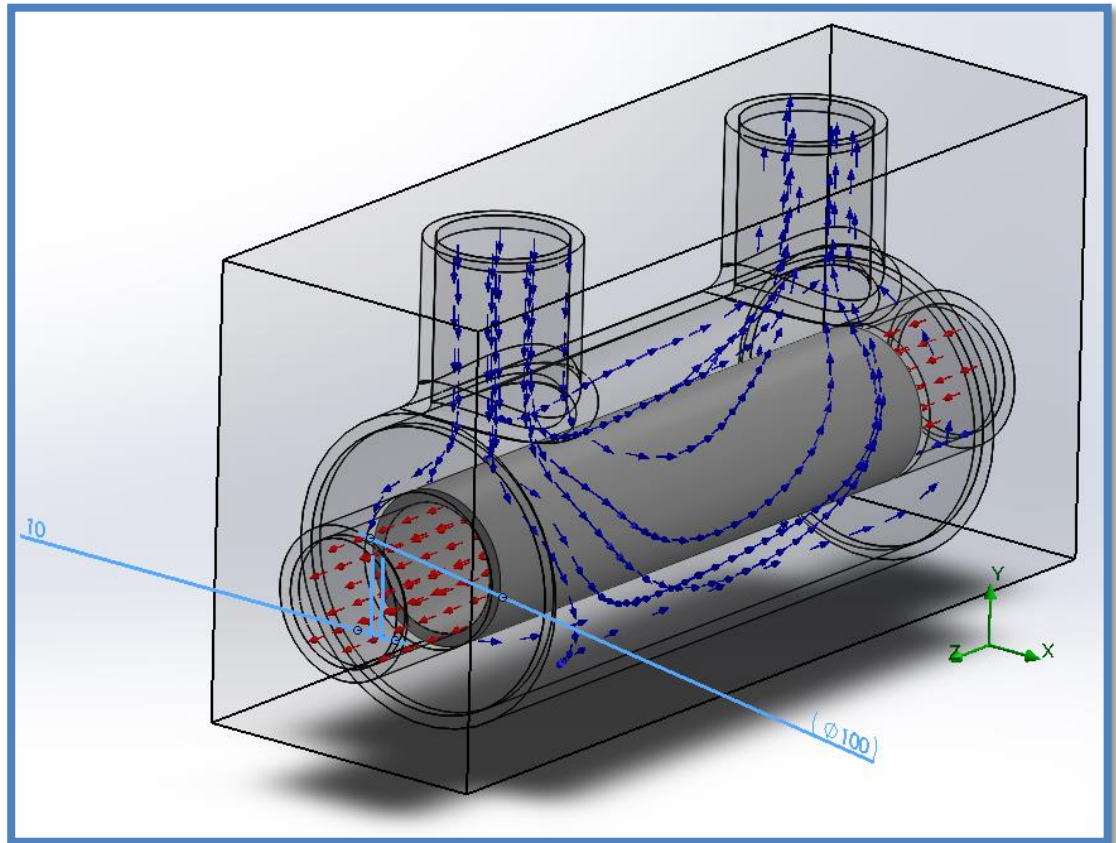
mahdollista huomattavasti suurempiin paineluokkiin soveltuvien laitteistojen taloudellisesti kannattavaa valmistusta. Suurempia paineluokkia ajatellen täytyisi siirtyä vesiputkikattilatekniikkaan. Ulkopuolinen höyryasiantuntija selvensi, että vesiputkikattilat olisivat olleet sopivaa tekniikkaa myös tämän työn tarkastelua varten. Ne jäivät kuitenkin tarkastelematta, koska teorian mukaan suurilla paine- ja teholuokilla on taloudellisempaa käyttää vesiputkikattiloita, mikä tulkittiin virheellisesti tarkoittavan, että vesiputkikattilat eivät sovellu näin alhaisiin teho- ja paineluokkiin.

9.2 Hyötysuhdevertailu vaihdin- ja tulitorvijärjestelmille

Hyötysuhteen laskeminen koettiin tarpeelliseksi verrattaessa vaihdinjärjestelmän kilpailukykyä suhteessa verrokkina olleeseen tulitorvikattilaan. Paine-ero aiheuttaa kohtalaisen suuren lämpötilaeron kiehumispisteiden välille eri paineissa. Vaihdinjärjestelmässä lämpö siirtyy savukaasuista noin 175 °C:seen veteen ja tulitorvikattilassa suoraan 5 baaria vastaavaan kylläisenlämpötilan veteen. Koska teorian mukaan kaikilla lämmönsiirtomekanismeilla ajavana voimana oli lämpötilaero, ajateltiin sillä olevan merkitystä lämmönsiirron tehokkuuteen järjestelmien välillä. Simulaatiota varten nykyistä kattilaa kuvaavan kattilaveden lämpötilaksi arvioitiin 5 °C alle 10 baaria vastaavan kiehumislämpötilan. Vastaavasti tulitorvikattila ajateltiin 5 baarin kuumavesikattilaksi, jonka kattilavesi arvioitiin myös 5 °C haluttua höyrynpainetta vastaavaa kiehumislämpötilaa alemmaksi. Tämä oletus tehtiin, koska käytössä ei ollut menetelmää faasimuutoksen arvioimiseksi.

Lämmönsiirron tehokkuutta arvioitiin edellisillä oletuksilla CFD -mallin avulla. Koska kiehumisen vaikuttaa oleellisesti lämmönsiirron tehokkuuteen, tehtiin mallia varten oletus, että käytössä on molemmissa tapauksissa sama geometria ja paine oletetuissa lämpötiloissa yli kylläisen pisteen. Tähän päädyttiin koska käytössä oleva ohjelmistolla, SolidWorks Flow Simulation 2012, ei pystytty mallintamaan faasimuutosta. Geometria käytettiin valmista mallia Jyväskylän ammattikorkeakoulun kevään 2014 FEM- ja CFD -mallinnus -

kurssilta. Malli edustaa koesimulaatiossa savukaasukanavaa. Geometria ja virtaukset on esitetty kuviossa 24.

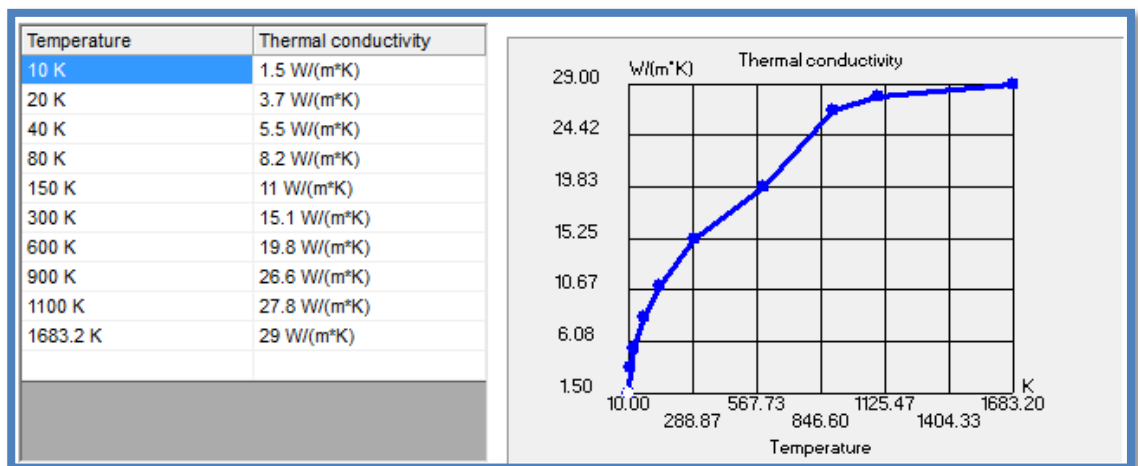


Kuvio 24. CFD -mallin geometria ja virtaukset

Mallissa seinämien pinnat on oletettu ideaalisen sileiksi ja lämmönsiirtoon vaikuttaa ainoastaan johtuminen ja konvektio. Lämmönsiirron kannalta oleelliset mitat eli savukaasukanavan halkaisija ja ainevahvuus on nostettu esiin. Mitat on esitetty millimetreinä. Savukaasut on esitetty kuviossa punaisina ja vesi sinisinä nuolina, jotka esittävät virtauksen suuntaa.

Muut simulaation lähtöoletukset on listattu seuraavasti:

- Vesi:
 - Paine 10 bar
 - Lämpötila:
 - T1 sisään 175 °C (448 K)
 - T2 sisään 147 °C (420 K)
 - Sisääntulovirtaus 0,02 kg/s
- Savukaasut
 - Paine 1,0325 bar
 - Lämpötila sisään 350 °C (623 K)
 - Koostumus
 - N₂ 76 V-%
 - CO₂ 13 V-%
 - H₂O 11 V-%
 - Sisääntulovirtaus 10 m/s
- Materiaali ohjelmassa Stainless Steel 321 (ks. kuvio 25)



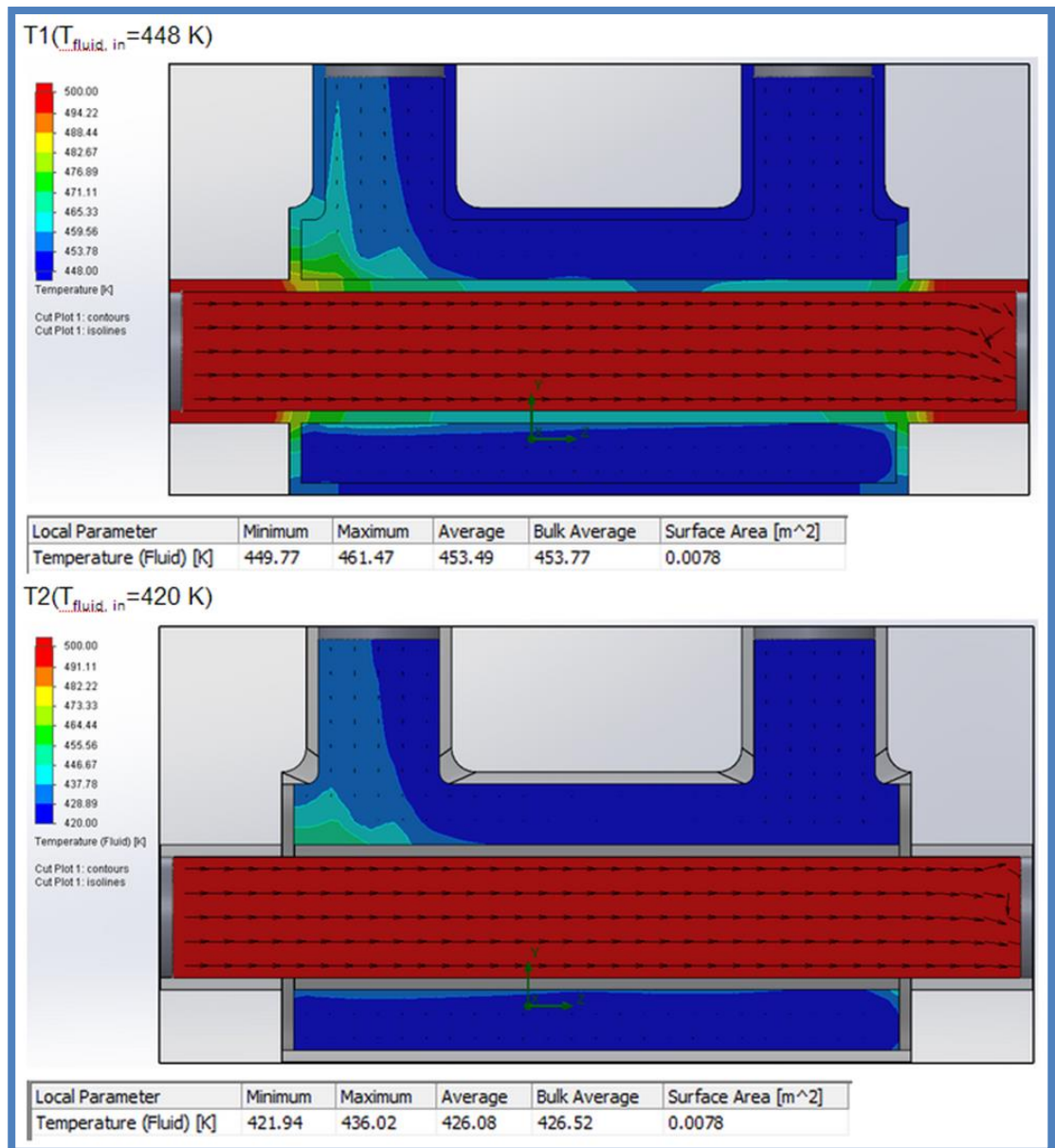
Kuvio 25. Materiaalin Stainless Steel 321 lämmönjohtuvuus SolidWorks Flow Simulation 2012 ohjelmakirjastossa

Oletukset ovat hyvin likimääräisiä, mutta toimivat tässä tapauksessa parempana approksimaationa, kuin käsin teorian avulla tehty laskenta. Savukaasujen lämpötila kuvaa tilannetta tulitorvikattilan kolmannessa vedossa. Savukaasujen koostumus on lähellä ideaalista hiilen palamista vastaavaa koostumus-

ta, joka ei vastaa todellisuutta. Esimerkiksi todellisessa täydellisessä palamisessa tarvitaan ilmaylimäärää, mikä näkyisi koostumuksessa tiettyinä hapen osuutena. Lisäksi virtaukset, geometria ja materiaali täytyisi tarkistaa todellisesta kattilasta. Suurimmat epävarmuustekijät liittyvät säteilylämmönsiirron ja faasimuutoksen poisjättämiseen sekä arvion tekemiseen vain osalla kokonaislämmönsiirtoalasta.

9.3 Hyötysuhdevertailun tulokset

Simulaation mukaan vedenlämpötilalla oli merkitystä veteen siirtyvän lämmön määrään, kuten oli oletettu. Kuviossa 26 on esitetty simulaation tulokset.



Kuvio 26. CFD -simulaation mukaiset lämpötilajakaumat ja poistuvien vesien lämpötilat

Kuviossa 26 lämpötilajakauman väritys on skaalattu samalle asteikolle molemmissa tapauksissa, mikä saa suuremmalla sisään tulevan veden lämpötilalla toimivan vaihtoehdon (vaihdinjärjestelmän) nopeasti katsottuna näyttämään tehokkaammalta. Kuitenkin lämmönsiirron kannalta oleellisempi tulos, poistuvan veden lämpötila on esitetty lämpötilajakaumien alapuolella. Alemmassa kuviossa on rakenteen hahmottamisen helpottamiseksi jätetty lämpötilajakauma kiinteän rakenteen osalta esittämättä. Tummat nuolet esittävät virtauksen nopeutta ja suuntaa.

Koska molemmissa tapauksissa massavirta on sama ja ominaislämpökapasiteetti likimain sama, voidaan siirtyvää lämpömäärää arvioida tulevien ja poistuvien virtojen lämpötilaeroilla. Ylemmän kuumemman veden tapauksessa vesi lämpeni noin 5,5 °C ja alemman viileämmän veden kohdalla enemmän noin 6,1 °C. Olettamalla ominaislämpökapasiteetit samoiksi voidaan lämmönsiirron tehokkuutta arvioida suoraan tulevien ja poistuvien virtojen lämpötilaerojen eroilla. Laskentatavalla kuumemmalla vedellä toimiva vaihdinjärjestelmä oli noin 10 % heikompi.

Tulos sisältää useita epävarmuustekijöitä, mutta suuruusluokka ei tunnu ylläpöydä. Kiehumis- ja säteilylämmönsiirron pois jättäminen lämmönsiirron teorian mukaan heikentäisi tulitorvivaihtoehdon tulosta, mutta muiden oletusten vaikutusten suuntaa ei voida sanoa. Tulosta voidaan pitää suuntaantavana ja koko hyötysuhdevertailua osoituksena höyryjärjestelmien lämmönsiirron määrittämisen hankaluudesta.

9.3 Höyryjärjestelmien taloudellisuusvertailun laskelmat

Investointilaskelmat aloitettiin mitoituslaskelmien tulosten perusteella 3 MW vaihdinjärjestelmälle. Hintoja eri komponenteille lähdettiin etsimään tekemällä tarjouspyyntöjä eri valmistajilta. Verrokkilaitteiden hinnat saatiin höyrytoimittajille tehdyn kyselyn perusteella. Verrokkilaitteiksi valikoitiin tulitorvikattilat vastaavissa teholuokissa. Lähtökohtana oli verrata hake- ja pellettilaitteistoja kahdella eri menetelmällä (vaihdin ja tulitorvi) vastaaviin öljylaitteistoihin. Lisäksi tarkasteltiin tilannetta 12 baarin höyryntuotannolla, johon ei tällä hetkellä ole valmiuksia toimeksiantajan nykyisiin kuumavesikattiloihin perustuen, mutta paineluokka arvioitiin tärkeäksi tulevaisuuden kannalta.

Energiankulutusta, energiahintoja ja rahoitusta koskevat tiedot on koottu taulukoihin 13 ja 14. Liitteessä 2. on esitetty puolestaan laskelmien perusteena olevien investointihintojen huoltokulujen arviot sekä energiankulutuslaskelmien tulokset järjestelmittäin.

Taulukko 13. Energiankulutuksessa huomioitavat tekijät

Järjestelmä	
Huipunkäyttöaika [h/a]	8000
Kattilan teho [MW]	3,0
Hyötysuhde öljykattila [%]	90 %
Hyötysuhde biokattila [%]	90 %
Kiertopumpun teho [MW]	0,0110
Hyötysuhteen alenema vaihdinj. [%]	10 %

Taulukon 13 arvojen avulla laskettu energiankulutus perustuu kattilatehon ja huipunkäyttöajan tuloon, joka on jaettu hyötysuhteella. Vaihdinjärjestelmän hyötysuhdetta alennettiin, koska hinnoittelussa jätettiin savukaasuja hyödynnävä syöttövedenesilämmitin pois. Hyötysuhteen alenema arvioitiin simulaatioiden avulla. Lisäksi vaihdinjärjestelmissä on huomioitu kiertopumpun käyttämä sähkö.

Taulukko 14. Hintojen ja rahoituksen lähtötiedot

Hinnat ja rahoitus		
	Lainakorko ⁷⁾	5,00 %
	Inflaatio ¹⁵⁾	3,60 %
	Tuen osuus investoinnista	0,00 %
	Maksukerrat [a]	15
	Uusi inv.=1 Vanha öljykattila=0**	0
SÄHKÖ	Kulmakerroin [€/MWh/a] ¹²⁾	2,3712
	herkkyyskerroin*	0,00 %
	Lähtöhinta [€/MWh] ⁷⁾	85,00
RPÖ	Kulmakerroin [€/MWh/a] ¹¹⁾	3,7413
	herkkyyskerroin*	0,00 %
	Lähtöhinta [€/MWh] ⁷⁾	70,00
HAKE	Kulmakerroin [€/MWh/a] ¹⁰⁾	1,3036
	herkkyyskerroin*	0,00 %
	Lähtöhinta ⁷⁾	21,00
Pelletti	Kulmakerroin [€/MWh/a] ¹³⁾	4,1029
	herkkyyskerroin*	0,00 %
	Lähtöhinta [€/MWh] ¹³⁾	55,00

*herkkyyskerroin = kk:n kerroin **HUOM. takaisinmaksuaika

Taulukon 14 yläindeksien viitteet on avattu liitteessä 2. Taulukossa 14 esitettyjen kulmakertoimien, herkkyysskertoimien ja lähtöhintojen välinen suhde on avattu yhtälössä 18.

$$\text{Energiakulut} = E \cdot H_e \cdot (x \cdot h_{kk} \cdot n_a) \quad (18)$$

missä

Energiakulut on energialähteestä aiheutuva kustannus, €/a

E on energiankulutus, MWh/a

H_e on energian lähtöhinta, €/MWh

x on herkkyysskerroin, %

h_{kk} on hinnannousun kulmakerroin, €/MWh/a

n_a vuosien määrä, a.

Yhtälö rakennettiin Excel -ohjelman laskentaselujen sisälle helpottamaan herkkyyssanalyysin tekemistä. Korkokulujen laskennassa puolestaan käytettiin annuiteettilainan laskentamenetelmää, joka on avattu yhtälössä 19.

$$H_{inv} \cdot (1 + p)^{n_a} \cdot \frac{p}{(1+p)^{n_a} - 1} - \frac{H_{inv}}{n_a} \quad (19)$$

missä

H_{inv} on investoinnin suuruus, €

p on lainakorko, desimaalilukuna

n_a on laina-aika, a.

Laskelmien perustana oli verrata menetelmien kannattavuutta vastaavan teho- ja paineluokan öljykäyttöiseen tulitorvikattilaan. Investointien tuotoiksi laskelmissa ajateltiin verrokkina olleen öljylaitteistojen ja verrattavien laitteistojen kulujen erotukset. Kannattavuuden mittareista laskettiin investoinnin sisäinen korko (IRR), nettonykyarvo (NPV), pääoman tuottoaste (ROI) sekä takaisinmaksuaika (TA). Sisäisen koron ja nettonykyarvon laskennassa käytettiin Excelin sisäisiä funktioita. Pääoman tuottoaste laskettiin jakamalla keskimääräi-

nen vuosituotto investoinnin suuruudella, ja takaisinmaksuaika puolestaan jakamalla investointi keskimääräisellä tuotolla.

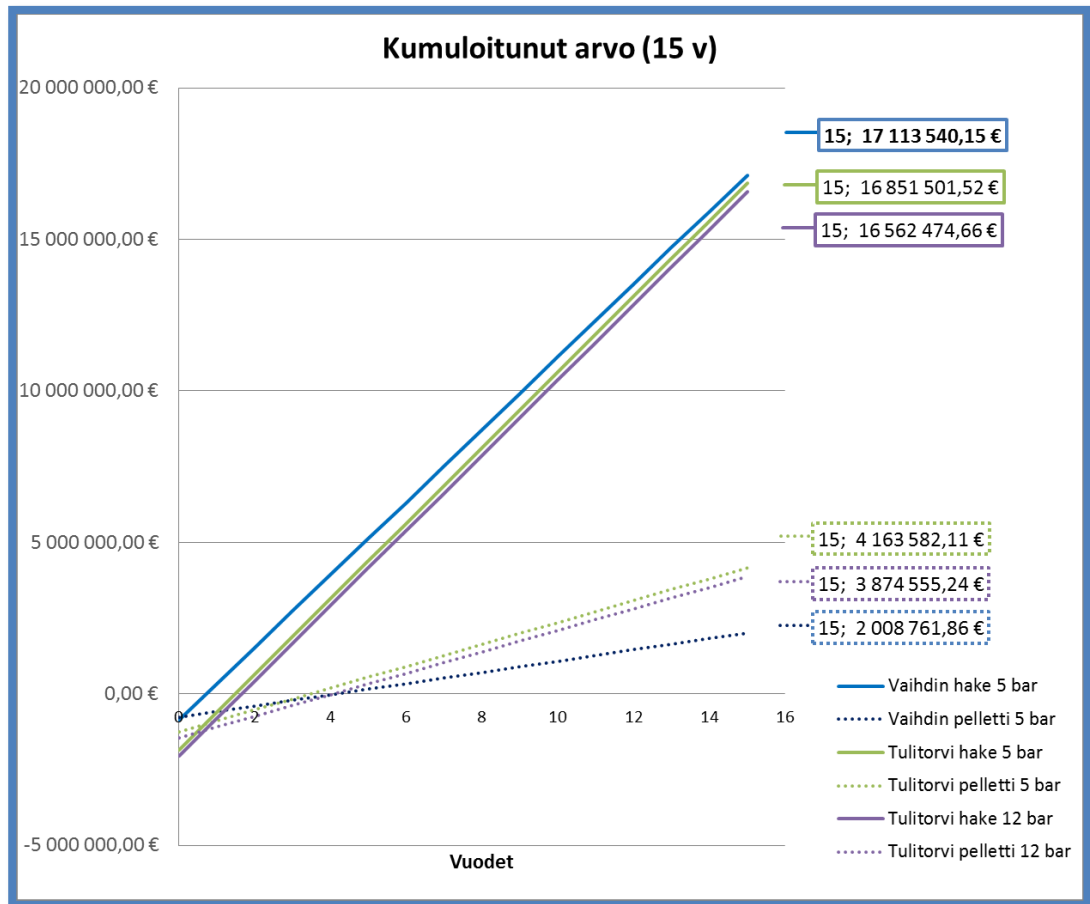
Nettonykyarvon määrittämisessä käytettiin tilastollista inflaation keskiarvoa ja sisäisen koron vuosituotossa jätettiin korkokulut huomioimatta, koska funktion tavoitteena on etsiä korko, jolla investoinnin nettonykyarvo on nolla. Muissa laskelmissa korkokulut vähennettiin vuosituotosta. Takaisinmaksuaika laskettiin investointien erotuksista ja tuotosta vähennettiin korkokulujen erotus, jos valittiin vertailla uusia investointeja. Vastaavan vanhan öljykattilan korvaamista varten takaisinmaksuaikaan luettiin koko investointi ja tuloksesta vähennettiin uuden laitoksen korkokulut. Kaikissa laskelmissa tuottoon huomioitiin huoltokuluarvioiden erotukset. Huoltokulujen arvot ovat karkeita arvauksia, mutta sijoittuvat toisiinsa nähden kohtuullisen luotettavasti, öljyn ollessa halvin, pelletin toiseksi halvin ja hakkeen ollessa kallein.

9.4 Höyryjärjestelmien taloudellisuusvertailun tulokset

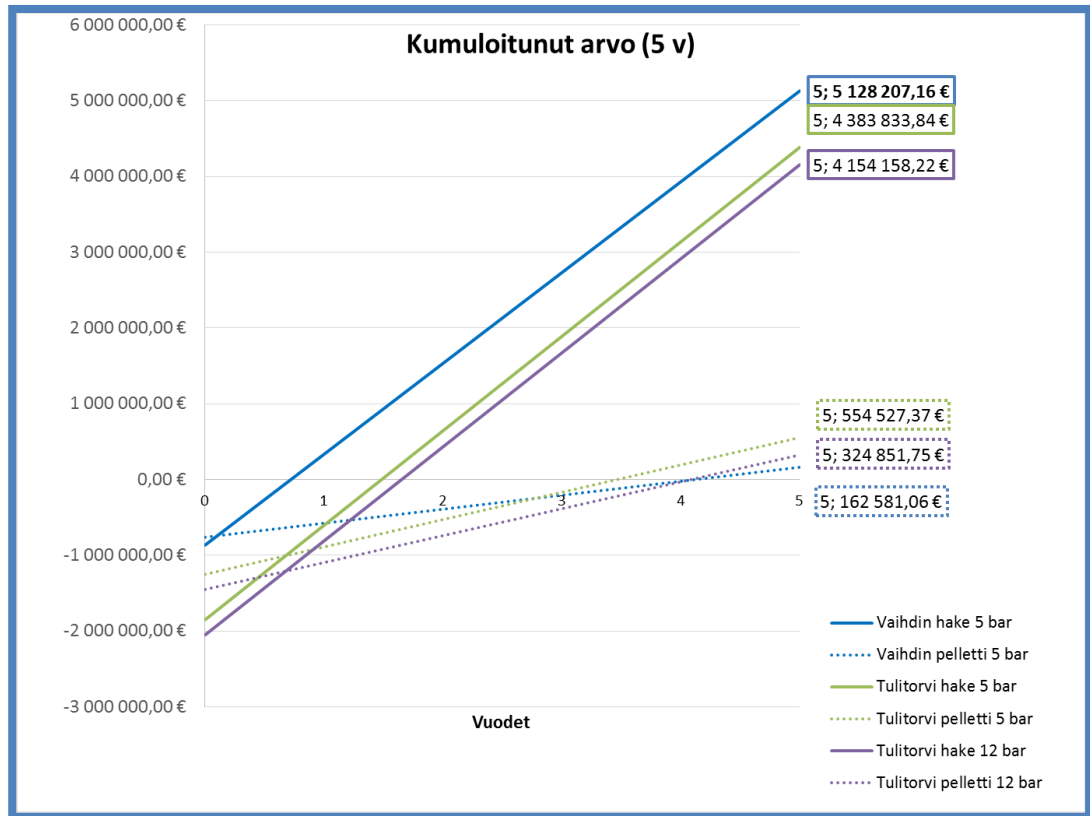
Kannattavuustarkastelun lähtökohdiksi etsityt hinnat vaikuttivat olevan ristiriidassa käytännön kokemusten kanssa, koska vaihdinjärjestelmien kokonais hinnat asettuivat halvimmiksi. Ongelmana oli, että verrokkilaitteiden hinnoitteluperusteista oli tiedossa vain, että arvio oli tehty kokonaistoimitukselle sekä käytettävälle polttoaineelle. Jos esimerkiksi verrokkilaitteiden hinnoittelussa on arvioitu järjestelmän ympärille tarvittava rakennus ja kattavampi varustelutaso, antaa se vaihdinjärjestelmälle virheellisesti huomattavan kilpailuedun. Lisäksi pumppuja lukuun ottamatta tiedot ovat vain yhden valmistajan arvion tai tarjouksen varassa. Siksi tuloksien merkittävin anti oli Excel -pohja itsessään sekä jollakin tarkkuudella tuottokertymien suunta toisiinsa nähden. Suunnankin arvioinnissa investointi vääristää korkokulujen kautta tuloksia. Lisäksi pelletin hinnoittelussa käytetty kuluttajahinta on turhan korkea teholuokka huomioiden.

Etsityillä hinnoilla ja tehdyillä oletuksilla järjestelmien kerryttämät tuotot suhteessa vastaaviin korvattaviin vanhoihin öljykattiloihin on esitetty kuvioissa 27 ja 28. Kuviossa 27 on kertymä koko tarkastelujaksolta ja kuviossa 28 ajalta,

josta takaisinmaksuajat on helpompi erottaa. Taulukossa 15 on yhteenveto kannattavuuden mittareista, ja se sisältää lisäksi tulokset takaisinmaksuajoista tilanteessa, jossa tehdään täysin uusi höyryjärjestelmä.



Kuvio 27. Järjestelmien kumuloituneet tuotot verrattuna vastaavaan vanhaan öljykattilaan 15 vuoden ajanjaksolla



Kuvio 28. Järjestelmien kumuloituneet tuotot verrattuna vastaavan vanhaan öljykattilaan 5 vuoden ajanjaksolla

Taulukko 15. Järjestelmien kannattavuusmittareiden vertailu 15 vuoden ajan ajanjaksolla

Menetelmien vertailu:	IRR	NPV	ROI	TA	TA Uusi
Vaihdin hake 5 bar	142 %	12 395 640 €	139 %	0,72	0,37
Vaihdin pelletti 5 bar	26 %	1 303 832 €	24 %	4,12	1,73
Tulitorvi hake 5 bar	70 %	11 976 773 €	67 %	1,48	1,14
Tulitorvi pelletti 5 bar	31 %	2 777 307 €	29 %	3,46	2,22
Tulitorvi hake 12 bar	63 %	11 718 208 €	61 %	1,65	1,63
Tulitorvi pelletti 12 bar	27 %	2 518 741 €	24 %	4,08	3,94

Taulukon takaisinmaksuajat on esitetty tilanteelle, jossa korvataan vanha öljykattila ja tilanteelle, jossa tehdään kokonaan uusi investointi.

Vaikka kannattavuusvertailun tuloksien luotettavuus järjestelmien välillä on kyseenalainen, voidaan tuloksista todeta että höyryntuottaminen bioenergialla suhteessa raskaaseen polttoöljyyn on hyvin kannattavaa, sillä kaikki järjestel-

mät maksavat itsensä takaisin 4 vuodessa tai aiemmin. Jatkossa kannattavuus on parantumassa sillä säädökset ovat estämässä raskaan polttoöljyn käytön, mikä johtaisi öljylaitteistoilla kevyen polttoöljyn käyttämiseen ja olisi entistä kalliimpaa. Vaihdinjärjestelmien arvioitu heikompi hyötysuhde näkyy selvästi pellettilaitteiston kohdalla, mutta myös hakejärjestelmän kohdalla ero on huomattavissa pitkällä 15 vuoden aikavälillä.

Vaihdinjärjestelmien takaisinmaksuajoille tehty herkkyystarkastelu on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16. Vaihdinjärjestelmien kannattavuuden herkkyys

Uhka	TA Hake [a]	TA Pelletti [a]
Lainakorko +50 %	0,73	4,43
Sähkön hinta +50 %	0,72	4,20
Öljynhinta -50 %	3,26	-1,02
Hakkeen hinta +50 %	0,98	4,12
Pelletin hinta +50 %	0,72	-1,19
Hinnat nousevat kk:lla	ks. Liite 5	ks. Liite 5
Huipun käyttöaika -50 %	1,48	9,50
Investointi +50 %	1,09	6,58
Alkup. oletuksilla:	0,72	4,12

Taulukon 16 arvot on laadittu pitämällä muut tekijät oletusarvoissaan (taulukot 13 ja 14) ja muuttamalla takaisinmaksuajoille mainittuja uhkia suhteessa alkuperäiseen oletukseen. Suurimmiksi uhkiksi osoittautuivat raskaan polttoöljyn hinnanlasku sekä pienempi huipunkäyttöaika. Pellettilaitteiston kannattavuus vaikuttaa olevan herkempi pelletin hinnan nousulle, kuin hakelaitteisto vastaavasti hakkeen hinnan nousulle. Kulmakertoimilla tehty vertailu oli laskennallisesti vääriä, koska laskenta perustui tuoton keskiarvoon. Liitteen 5 kuviossa näkyy, että pellettilaitteisto melkein maksaa itsensä takaisin, mutta kääntyy tappiolliseksi n.6 vuoden jälkeen.

Hintojen nousun kulmakertoimet on määritetty kohtalaisen luotettavista tärhteistä, mutta ongelmana on, että osa on määritetty silmämääräisesti ja osa laskennallisesti. Kulmakertoimien taustalla olevat tilastot eivät myöskään ole yhteneväsiltä ajanjaksoilta. Tästä syystä niihin täytyy suhtautua suurella varauksella. Kulmakertoimet toimivatkin lähinnä skenaariona, jossa raskaan polttoöljyn hinta nousee nopeasti suhteessa hakkeeseen, kohtalaisen nopeasti suhteessa sähköön, mutta laskee hitaasti suhteessa pellettiin.

10 Opinnäytteen tulosten pohdintaosuus

10.1 Tavoitteiden saavuttaminen ja luotettavuus

Merkittävimmät tulokset opinnäytetyössä saavutettiin tietoperustan keräämisessä sekä höyryjärjestelmä- ja komponenttitoimittajien haarukoimisessa. Komponenttien mitoitusten tulokset ovat tietyiltä osin kohtalaisen luotettavia, mutta höyryjärjestelmien hyötysuhde- ja taloudellisuusvertailujen tulokset ovat erittäin epäluotettavia.

Tietoperustan keräämisessä aineisto jäi yleiskuvausten ja otsikkotason tasolle, mutta suurin arvo on aineiston laajuudella. Tietoperustaa voidaan käyttää muistilistana tuleville jatkoselvityksille ja se antaa aihekohtaiset perustiedot aiheen ymmärtämiseksi. Huomionarvoisina asioina esille tulivat kuitenkin, höyryrystämisen huomattavasti suurempi energiantarve suhteessa veden lämmittämiseen sekä höyryjärjestelmän vaatimat uudet komponentit.

Suomessa toimiville höyryjärjestelmätoimittajille tehdyssä kyselyssä esille tuli arvokasta tietoa toimittajien sijoittumisesta valmistajakentällä. Huomion arvoista oli, että biopolttoainekäyttöistä matalilla paineilla ja tehoilla toimivan laitteen toimittajalle ei löytynyt suoraan kotimaista vastinetta. Toimittajien etsinnän yhteydessä löytyi kuitenkin jo yksi ulkomainen toimittaja, jonka järjestelmät käyttävät biopolttoaineita sekä toimivat matalilla teho- ja painealueilla.

Vaihdinjärjestelmän mitoituslaskelmissa nousivat esille tärkeimmät mitoituksessa tarvittavat arvot. Samalla saatiin järjestelmän höyry-vesi -kierron eri muuttujien (paine, lämpötila, entalpia ja massavirta) suuruusluokista jonkinlainen käsitys. Tuloksissa kuitenkin epävarmuutta aiheuttaa karkeaan arvioon perustuvan höyrystimen virtausten lämpötilaero -arvo, mikä vaikutti erityisesti kuumavesikierron arvoihin ja välillisesti komponenttien hinnoittelun kautta taloudellisuuskalkyloihin.

Kilpailukykyyn mittaamisen arviointia varten tehdyt hyötysuhdesimulaatiot ja taloudellisuusarviot kärsivät epätarkoista ja osittain vertailukelvottomista lähtötiedoista. Hyötysuhteen määrittämisessä erityisesti käytetyn ohjelman kyvyttömyys huomioida kiehumisen vaikutusta lämmönsiirtoon sekä geometriamallin käyttäminen todellisen kattilan geometrian sijaan, tekivät tuloksista erittäin kyseenalaiset. Taloudellisuusarviossa epätarkkuutta tuloksiin aiheutti komponenttitoimittajien haluttomuus antaa vastauksia sekä hintatietoja opiskelijalle sekä verrokkilaitteiston toimituslaajuuteen liittyvistä tietoaukoista. Tulokset olivatkin ristiriidassa käytännön kokemusten kanssa, koska käytännössä vaihdinjärjestelmä oli osoittautunut kalliimmaksi vaihtoehdoksi. Tässä opinäytetyössä saadut hinnat osoittivat päinvastoin vaihdinjärjestelmien olevan edullisempia. Hinnoitteluosioon myös kumuloituivat epätarkkuudet hyötysuhde- ja mitoituslaskelmista, joita molempia käytettiin pohjana taloudellisuusarvioinnin laskelmissa.

10.2 Jatkoselvitykset ja -toimenpiteet

Opinnäytetyössä selkeimmät epätarkkuudet voitaisiin korjata tulevissa selvityksissä tekemällä uskottavalla taustalla tarjouspyyntöjä vaihdinjärjestelmän komponenteista ja tekemällä luotettavimmat arviot vaihdinjärjestelmien ja tulitorvikattiloiden välisistä suorituskykyeroista. Samalla täytyisi etsiä lisää tietoa vesiputkikattiloista, jotka jäivät tämän selvityksen puitteissa käsittelemättä, ja ottaa nämä yhdeksi vertailukohdaksi mukaan. Myös matalapainehöyryjärjestelmien vesihöyrykierron erityisvaatimuksia tulisi selvittää tarkemmin, koska

esimerkiksi höyrykattilan vesikemian hallitseminen on oleellista laitteen käytön hallinnassa ja sijoittamisessa oikealla tavalla oikeaan prosessiin.

Lisätietojen haalimista tärkeämpää olisi kuitenkin selvittää, millainen kysyntä matalapainehöyryjärjestelmillä on ja millaisiin olosuhteisiin ja käyttötilanteisiin kattiloita tarvitaan. Esimerkiksi tavallisimmat huipunkäyttöajat ja muut käytettävyyteen liittyvät tekijät vaikuttavat suuresti kannattaako biokäyttöiseen laitteistoon investoida.

Lähteet

Aaltonen, J. 2014. Liiketoiminnan kehitysjohdaja. KL -Lämpö Oy. Haastattelu 22.4.2014.

Boles, M. & Çengel Y. A. 2011. Thermodynamics: An Engineering Approach. Seventh Edition in SI Units. New York: Mc Graw Hill.

Çengel, Y. A. & Ghajar, A. J. 2011. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. Fourth Edition in SI Units. New York: Mc Graw Hill.

Holmström, P. 1982. Lauhduttimet. Teoria ja käytäntö. Tampere: Sonator.

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2004. Höyrykattilatekniikka 6. p. Helsinki: Edita.

Kothandaraman, C.P. 2006. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Revised Third Edition. Delhi: New Age International.

KTMp 1999/838. 1999. Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös painelaitteista 30.9.1999. Viitattu 10.3.2014.

<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1999/19990938>

L1999/869. 1999. Painelaitelaki 27.8.1999. Viitattu 11.3.2014.

<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990869>

Lauhteenpoisto. N.d. Konwell. Viitattu 25.3.2014.

<http://www.konwell.fi/fi/teollisuusventtiilit/lauhteenpoisto>

Painelaitteet. N.d. Turvatekniikan keskuksen opas. Viitattu 10.3.2014.

http://www.tukes.fi/Tiedostot/painelaitteet/esitteet_ja_opaat/painelaitteopas.pdf

Pihkala, J. 2005. Prosessitekniikan yksikköprosessit. 3.-1 tarkistettu painos. Helsinki: Opetushallitus.

Poltto ja palaminen. 2002. Toim. Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. Toinen täydennetty painos. Helsinki: Teknillistieteelliset akatemiat – De tekniskvetenskapliga akademierna r.y.

PSK:n esittelykalvot. N.d. PSK. Viitattu 11.3.2014.

<http://www.psk-standardisointi.fi/Alasivut/Info/PSK-slides%202009.ppt>

Singh, O. 2009. Applied Thermodynamics. 3. p. Delhi: New Age International.

The Boiler House. N.d. Spirax-Sarco. Viitattu 31.3.2014.

<http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials/the-boiler-house.asp> , alisivut: The Feedtank and Feedwater Conditioning, Shell Boilers

Valtanen, E. 2010. Tekniikan Taulukkirja. 18. p. Jyväskylä: Genesis-Kirjat Oy.

Liitteet

Liite 1. Kyselylomake kotimaisille höyrytoimittajille

Höyrytoimittajat

Hei, opiskelen energiatekniikkaa Jyväskylän ammattikorkeakoulussa. Teen opinnäytetyötä matalapainehöyryjärjestelmistä, ja pyydän teitä ystävällisesti vastaamaan oheiseen kysymyslomakkeeseen tai välittämään sen eteenpäin organisaatiossanne.

Oheessa oleva kysymyslista on laadittu laitetoimittajakentän kartoittamiseksi. Opinnäytetyössä vastauksia käsitellään niin, että vastausta ja vastaajaa ei voida yhdistää toisiinsa. Luvallanne teen kuitenkin listan höyrytoimittajista ja -valmistajista.

Vastaaminen vie noin 2 minuuttia.

Terveisin,
Albert Lehtoaho

Palaute ja lisätiedot:
albert.lehtoaho@gmail.com
040 844 9115

*Pakollinen



Mitä yhtiötä edustatte?
Vastatkaa, mikäli haluatte yhtiönne nimen toimittaja- tai valmistajalistalle.

Valmistatteko tai toimitatteko matalapainehöyryn kehitykseen soveltuvia laitteistoja? *

Valmistamme
 Toimitamme
 Valmistamme ja toimitamme
 Emme kumpaakaan

33 % valmiina

Palvelun tarjoaa  Google Drive

Google ei ole luonut tai hyväksynyt tätä sisältöä.
Ilmoita väärinkäytöstä - Palveluehdot - Lisäehdot

Höyrytoimittajat

*Pakollinen

Tuotetiedot

Mikä on tuotteiden painealue? *

(X-X bar, absoluuttinen)

Mikä on tuotteiden tehoalue? *

(X-X kg/h, tuorehöyryä)

Mitkä ovat tuotteiden polttoaine-vaihtoehdot? *

Bio (hake, pelletti)

Turve

Öljy (raskas, kevyt)

Maakaasu

Muu:

Seuraava valinnainen osio on tarkoitettu eri tuotantomenetelmien kannattavuuden selvittämiseksi. Lähtökohdiana on 3600 kg/h tuorehöyryä. Etsin likimääräistä hintahaarukkaa.

*

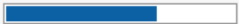
En halua vastata

Haluan vastata

Sanallinen tarkennus tai selitys

[« Takaisin](#)

[Jatka »](#)

 66 % valmiina

Palvelun tarjoaa
 Google Drive

Google ei ole luonut tai hyväksynyt tätä sisältöä.
[Ilmoita väärinkäytöstä](#) - [Palveluehdot](#) - [Lisäehdot](#)

Höyrytoimittajat

*Pakollinen

Hinta-arvio

Tämä valinnainen osio on tarkoitettu eri tuotantomenetelmien kannattavuuden selvittämiseksi. Lähtökohdaksi on 3600 kg/h tuorehöyryä. Etsin likimääräistä hintahaarukkaa.

Hinnoitteluperuste *

- Kokonaisuus
 Pelkkä kattila/kehitin

Bio (hake, pelletti) -käyttöinen, 5 bar (absoluuttinen)

(euroa)

Fossiili (öljy, maakaasu) -käyttöinen, 5 bar (absoluuttinen)

(euroa)

Bio (hake, pelletti) -käyttöinen, 12 bar (absoluuttinen)

(euroa)

Fossiili (öljy, maakaasu) -käyttöinen, 12 bar (absoluuttinen)

(euroa)

Sanallinen tarkennus tai selitys

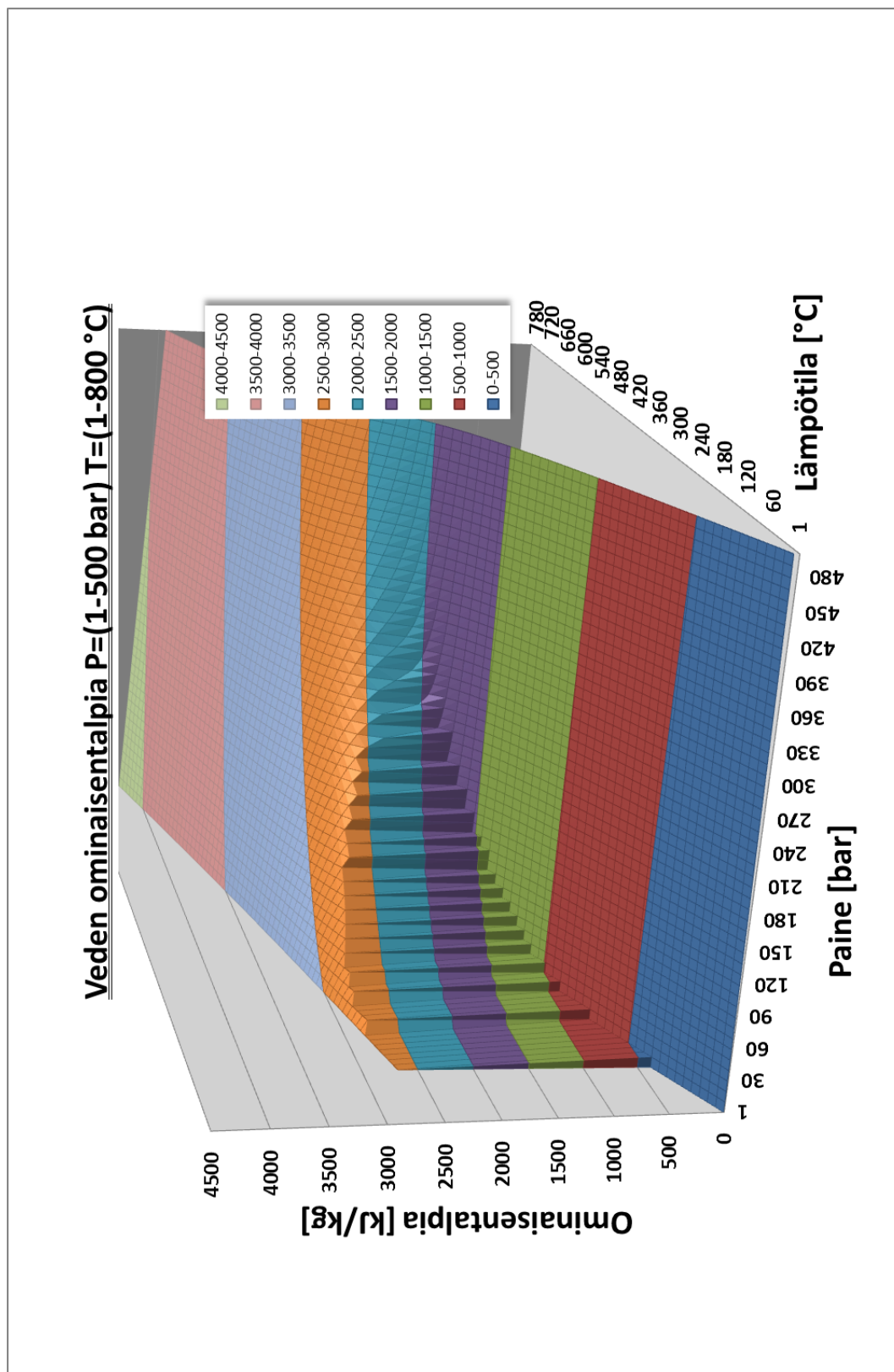
Älä koskaan lähetä salasanaa Google Formsin kautta.

100 %. Sait sen valmiiksi.

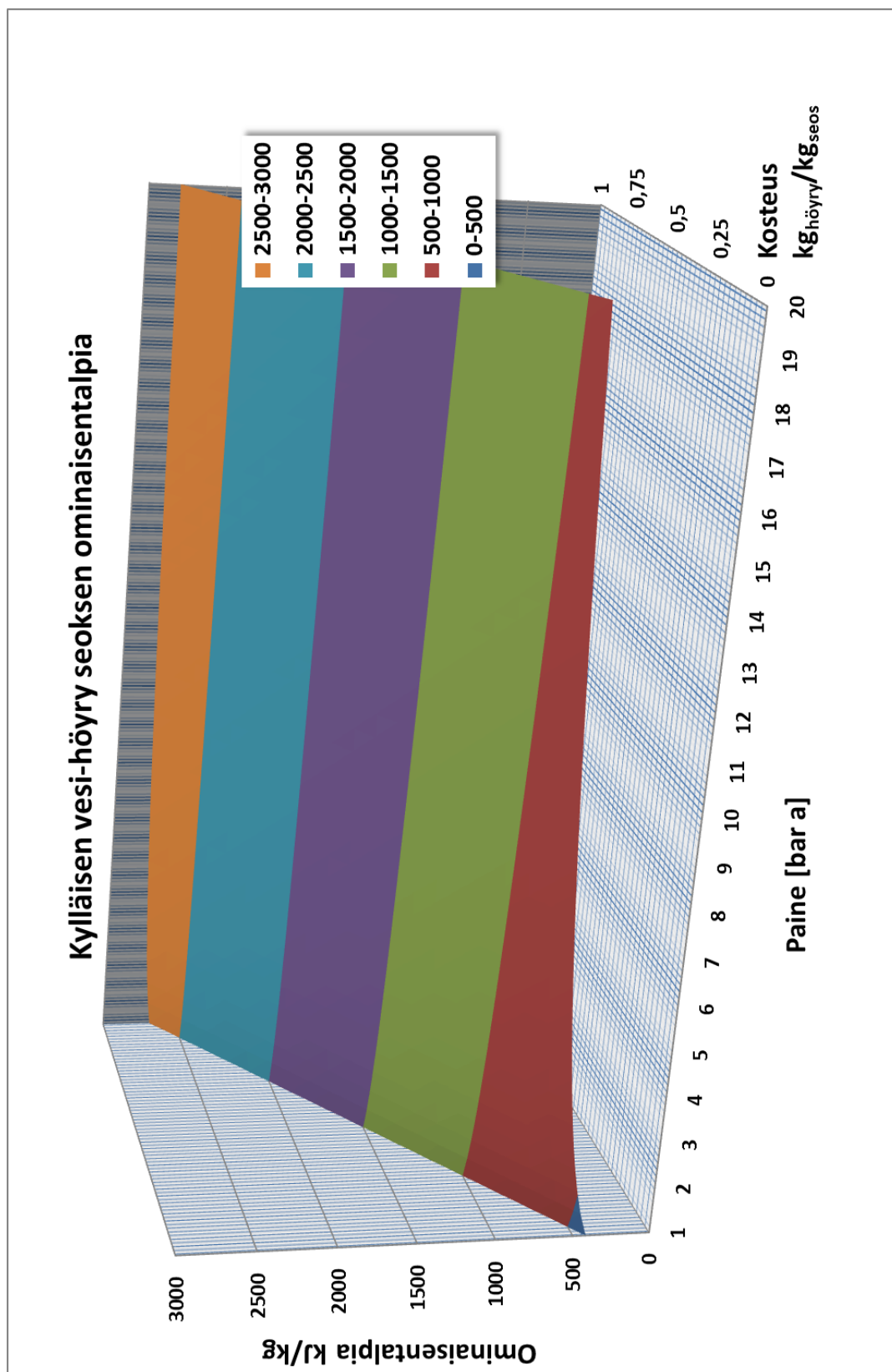
Palvelun tarjoaa
 Google Drive

Google ei ole luonut tai hyväksynyt tätä sisältöä.
Ilmoita väärinkäytöstä - Palveluehdot - Lisäehdot

Liite 3. Veden ominaisentalpia paineen ja lämpötilan mukaan



Liite 4. Kylläisen matalapainehöyryn ominaisentalpia



Liite 5. Järjestelmien kumuloituneet tuotot oletusarvoilla ja hintojen nousulla

