

Lämpöteknisen mitoituksen integrointi mekaaniseen suunnitteluun

Ville Heimonen

Opinnäytetyö
Toukokuu 2016
Tekniikan ja liikenteen ala
Insinööri (AMK), energiatekniikan koulutusohjelma

Tekijä(t) Heimonen, Ville	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Toukokuu 2016
	Sivumäärä 82	Julkaisun kieli Suomi
		Verkkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Lämpötekniikan mitoituksen integrointi mekaaniseen suunnitteluun		
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) Hytönen Kari, Matikainen Jorma		
Toimeksiantaja(t) Vehviläinen Pekka, Kuivalainen Timo, Sahala Works Oy		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön toimeksiantajana oli Sahala Works Oy. Toimeksiantajan tavoitteena oli löytää ohjelmistoalusta, jolla pystyy suorittamaan putkilämmönsiirtimien lämpötekniikan mitoituksen, mekaanisen suunnittelun sekä antamaan kustannusarvion samalla kertaa. Nykyään Sahala Works tekee nämä eri suunnittelun vaiheet eri ohjelmistoalustoilla, mikä haittaa laitesuunnittelua etenkin lämmönsiirtimen tarjous- ja myyntivaiheessa, kun tulokset täytyisi saada nopeasti. Työ rajattiin koskemaan syöttöveden korkeapaine-esilämmittimiä.</p> <p>Toimeksiantaja osti kyseiseen tarkoitukseen AspenTech ohjelmiston. Tavoitteena oli selvittää, kykeneekö tämä ohjelma suorittamaan laskennan oikein ja riittävällä tarkkuudella. Opinnäytetyö toteutettiin mitoittamalla AspenTech ohjelmalla valittu kp-esilämmitin, joka oli jo aiemmin mallinnettu vanhalla mitoitusohjelmalla. Valitun esimerkin vanhalla ohjelmistolla laskettujen arvojen tiedettiin toimivan käytännössä. AspenTechillä tavoitteena oli päästä lähelle niitä arvoja. Työssä keskityttiin enemmän lämpötekniikan mitoitukseen ja tärkein vertailtava arvo oli esilämmittimen lämpöpinnan määrä.</p> <p>AspenTechillä lämpötekniikan laskennan tuloksissa ei päästy täysin haluttuihin arvoihin. Lämpöpinnan määrässä oli esimerkki kp-esilämmittimen tulostuksenpoisto-osan ja lauhteenjäähdyttimen osalta suuriakin eroja verrattuna vanhan järjestelmän tuloksiin. Kokonaislämpöpinnan määrä erosi ohjelmien välillä kuitenkin vähemmän, noin 10 %. Mekaaninen suunnittelu epäonnistui esimerkin osalta täysin, kun AspenTech ei suostunut mekaanista laskentaa suorittamaan. AspenTechin suhteen ei kuitenkaan kannata vielä luovuttaa työn tulosten perusteella. AspenTechin tuomat edut laitesuunnitteluun olisivat niin suuret, että suositeltavaa olisi testata ohjelmaa yksinkertaisemmalla lämmönsiirtimellä, ja katsoa antaako ohjelma luotettavia tuloksia.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Lämpötekniikan mitoitus, laitesuunnittelu, korkeapaine-esilämmitin		
Muut tiedot		

Author(s) Heimonen, Ville	Type of publication Bachelor's thesis	Date May 2016 Language of publication: Finnish
	Number of pages 82	Permission for web publication: x
Title of publication Integrating thermal engineering and mechanical design		
Degree programme Degree Programme in Energy Technology		
Supervisor(s) Hytönen Kari, Matikainen Jorma		
Assigned by Vehviläinen Pekka, Kuivalainen Timo, Sahala Works Oy		
Abstract <p>The thesis was assigned by Sahala Works Oy. Their goal was to find a software program which is able to handle thermal engineering, mechanical design and give cost estimates for shell and tube heat exchangers at the same time. At the moment, Sahala Works was using different software platforms for each of these stages in design, which is a drawback in designing equipment, especially when giving quotations and selling the heat exchangers. The quotation process of a heat exchanger needs to be quick. The thesis focused on high pressure feedwater heaters.</p> <p>Sahala Works bought AspenTech software for this purpose and the object was to study if the program was able to execute calculations correctly and with sufficient precision. The thesis was conducted by designing a selected high pressure feedwater heater using AspenTech, which had been previously designed using the old program. Thermal calculations with the old program were known to be somewhat correct so the goal was to get similar results with AspenTech. The most important value in the results was the comparison of the heating surface between AspenTech and the old system.</p> <p>The results of the thermal engineering calculation using AspenTech were not entirely, what was expected. The heating surface area of the desuperheating zone and drain cooler in the example high pressure feedwater heater differed significantly from the results achieved using the old program. The Overall heating surface area differed less between these programs, by about 10 %. Mechanical designing for the selected example failed badly, because AspenTech did not compute mechanical calculations at all. However, there is no reason to quit using AspenTech yet, based on thesis results. The advantages for equipment design would be so big that it would be recommended to test AspenTech with a simpler heat exchanger to see if the program gives reliable results.</p>		
Keywords/tags (subjects) Thermal engineering, Mechanical design, High pressure feedwater heater		
Miscellaneous		

Sisältö

1	Johdanto.....	4
1.1	Opinnäytetyön tausta.....	4
1.2	Opinnäytetyön tavoite	4
1.3	Työn toteutus	5
2	Sahala Works.....	5
3	Syöttöveden esilämmitys	5
3.1	Syöttöveden kierto voimalaitosprosessissa	5
3.2	Korkeapaine-esilämmitin	11
3.3	Matalapaine-esilämmitin	15
3.4	Syöttövesisäiliö.....	15
3.5	Ekonomaiseri.....	18
4	Lauhtuminen lämmönsiirtimissä.....	21
4.1	Kalvolauhtuminen	23
4.2	Pisaralauhtuminen	28
5	AspenTech-ohjelmisto.....	29
6	Sahala Worksin vanha mitoitusohjelma Konva.....	31
7	TEMA, HEI ja VDI standardit.....	32
8	Korkeapaine-esilämmittimen mitoitus	33
8.1	Asiakkaalta saadut lähtötiedot.....	34
8.2	Lämpötekkinen mitoitus Konvalla.....	36
8.3	Korkeapaine-esilämmittimen mitoitus AspenTechillä	40
8.3.1	Lauhdutinosi	42
8.3.2	Tulistuksenpoisto-osa	42
8.3.3	Lauhteenjäähdytin.....	43
8.3.4	Mekaaninen suunnittelu	43
8.3.5	Tulokset	43
8.3.6	Toinen esimerkki.....	44

9	Pohdinta	46
	Lähteet.....	48
	Liitteet	50
	Liite 1. Sahala Worksin esimerkki kp-esilämmittimen lähtötiedot ja täytetty tietolomake	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.
	Liite 2. Sahala Worksin esimerkki kp-esilämmittimen Konvalla lasketut tulokset ja tarjouskuva	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.
	Liite 3. Sahala Worksin esimerkki kp-esilämmittimen AspenTech laskennan tulokset.....	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.
	Liite 4. Sahala Worksin esimerkki kp-esilämmittimen tulosten yhteenveto ja vertailu Konvan tuloksiin	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.
	Liite 5. AspenTech manuaalin kp-esilämmittimen vertailu Konvan tuloksiin	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.
	Liite 6. AspenTech manuaalin esilämmittimen Mechanical ohjelman tuloksia.	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.
	Liite 7. Korkeapaine-esilämmittimen mitoitus AspenTechillä	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.

Kuviot

Kuvio 1. Kaukolämpövoimalaitoksen prosessikaavio.....	7
Kuvio 2. Syöttöveden lämmityksen vaikutus voimalaitoksen prosessihyötysuhteeseen	9
Kuvio 3. Makaava korkeapaine-esilämmitin	11
Kuvio 4. Suljetun syöttöveden esilämmittimen periaatekuva	12
Kuvio 5. Syöttöveden esilämmittimen optimointi	14
Kuvio 6. Syöttövesisäiliön ja kaasunpoistimen asennus	16
Kuvio 7. Syöttövesisäiliö ja kaasunpoistin.....	17
Kuvio 8. Hapen ja typen liukoisuus veteen eri lämpötiloissa.....	18
Kuvio 9. Ekonomaiserimoduuli.....	19

Kuvio 10. Ekonomaiserin periaatekuva.....	20
Kuvio 11. Kalvo- ja pisaralauhtuminen pystysuoraan seinämään	22
Kuvio 12. Pisara- ja kalvolauhtuminen kuparilevyllä.....	23
Kuvio 13. Kalvolauhtumisen alueet.....	24
Kuvio 14. Virtaavan höyryn lauhtuminen pystysuoralle seinälle.....	26
Kuvio 15. Lauhtumaton kaasu lauhdekalvon pinnalla	28
Kuvio 16. Pisaralauhtumista pinnoitetulla kuparipinnalla	29
Kuvio 17. AspenTech Shell & Tube Exchanger-ohjelmisto.....	30
Kuvio 18. Kp-esilämmittimeen asiakkaalta saatavat lähtötiedot	35
Kuvio 19. Tukilevyjen maksimiväli.....	38
Kuvio 20. Konvalla laskenta.....	39

Taulukot

Taulukko 1. Kuvion 4 suomennokset	13
Taulukko 2. Esilämmittimen suositeltu asteisuus	13
Taulukko 3. Kuvion 5 suomennokset	15
Taulukko 4. Konvaan tarvittavat lähtötiedot	36
Taulukko 5. Esimerkkivaihtimen prosessitiedot.....	40
Taulukko 6. Esimerkin suunnitteluolosuhteet	41
Taulukko 7. AspenTech manuaalin esilämmittimen lähtötiedot	45

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön tausta

Opinnäytetyön toimeksiantajan Sahala Works Oy:n nykyinen lämmönvaihtimien lämpötekni- sen mitoituksen laskentaohjelmisto on tullut tiensä päähän. Nykyinen ohjel- misto Konva käyttää laskennassaan vanhentuneen VDI standardin lämpötekniikan laskentakaavoja, ja kaavoja on yksinkertaistettu ohjelmassa kokemukseen perustuen. Nykyään trendinä on, että kaikki laskenta lämmönsiirtimissä täytyisi suorittaa esim. HEI- ja TEMA-standardien mukaan, ja asiakkaat voivat jo vaatia sitä. Vanhentuneiden laskentamenetelmien lisäksi Konva on kykenemätön minkäänlaiseen mekaaniseen eli laitesuunnitteluun. Sahala Worksin tavoitteena on löytää ohjelma-alusta, joka pystyi- si suorittamaan lämmönsiirtimen lämpötekni- sen mitoituksen, mekaanisen suunnitte- lun sekä antamaan suuntaa antavan kustannusarvion samalla kertaa. Tällainen oh- jelmisto helpottaisi varsinkin lämmönsiirtimen tarjous- ja myyntivaiheen suunnitte- lua. Tällä hetkellä nämä kolme osa-aluetta suoritetaan eri ohjelma-alustoilla. Sahala Works on tätä varten ostanut AspenTech Shell & Tube-ohjelmiston tavoitteenaan selvittää, kuinka kyseinen ohjelmisto suoriutuu vaaditusta tehtävästä.

1.2 Opinnäytetyön tavoite

Opinnäytetyön tavoite oli tutkia AspenTech-ohjelmiston toimivuutta mallintaa asiak- kaalta saamien lähtötietojen perusteella perusmallin korkeapaine-esilämmitin. Työs- sä keskityttiin pääosin kp-esilämmitin lämpötekni- sen mitoituksen oikeellisuu- teen, mutta tavoitteena oli myös tutkia, kuinka hyvin ohjelmisto suorittaa vaihtimen laitesuunnittelun käytetyn painelaitestandardin mukaan. Tutkittiin myös, onko As- penTech-ohjelmiston antama kustannusarvio lämmönsiirtimen valmistuksesta riittä- vän tarkka tarjouksen tekemistä varten. Lisäksi tavoitteena oli laatia ohjeet, kuinka AspenTech Shell & Tube-ohjelmistolla suunnitellaan perusmallin korkeapaine- esilämmitin. AspenTechin manuaalissa oleva vastaava ohje on epäselkeä ja puutteel- linen. Ohjeiden tulisi sisältää varsinkin vaihtimen lämpötekni- sen mitoitus sekä myös laitesuunnittelun osuus. Ohjeet ovat liitteessä 7.

1.3 Työn toteutus

Opinnäytetyö toteutettiin vertailemalla AspenTechistä saatuja lämpötekni- sen mitoituksen tuloksia aikaisemmin Konvalla mitoitettuun korkeapaine-esilämmittimeen. Konvalla laskettujen tuloksien tiedetään olevan oikein. Vertailtavia kohteita, olivat esimerkiksi kokonaislämpöpinta sekä U-putkien lukumäärä ja putkipituus. Konvalla ei pysty tekemään laitesuunnittelua, joten se ei antanut vertailupohjaa AspenTechin mekaanisen puolen tuloksille. Ohjeiden laadinnan apuna käytettiin AspenTech ohjelmistosta löytyvää sisäistä manuaalia.

2 Sahala Works

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Sahala Works Oy, joka on erikoistunut lämpö- ja energiateknologiaan. Sahala Works tuottaa lämmönvaihtimia ja paineastioita voimalaitoksille sekä sellu-, petrokemian- ja kemianteollisuuteen Suomen ja Euroopan markkinoille. Yhtiön teolliset perinteet ulottuvat 1800-luvulle, ja sen pääkonttori sekä konepaja sijaitsevat Varkaudessa. Liikevaihto on noin 13 miljoonaa euroa ja henkilömäärä noin 80 joista toimihenkilöitä on noin 20. (Sahala Works Lämmönsiirron asiantuntija n.d.)

Sahala Worksin pääasiallisina tuotteina nykypäivänä ovat voimalaitoksien syöttö- veden esilämmittimet, lauhduttimet sekä kaukolämmönvaihtimet. Syöttöveden esilämmittimiä ovat matala- ja korkeapaine-esilämmittimet sekä syöttövesisäiliö. Yrityksen yksi suurimmista vahvuuksista ja kilpailueduista muihin konepajoihin verrattuna on se, että Sahala kykenee itse suunnittelemaan ja optimoimaan tekemänsä tuotteet lämpötekni- sestä mitoituksesta alkaen. (Kuivalainen & Vehviläinen 2016)

3 Syöttöveden esilämmitys

3.1 Syöttöveden kierto voimalaitosprosessissa

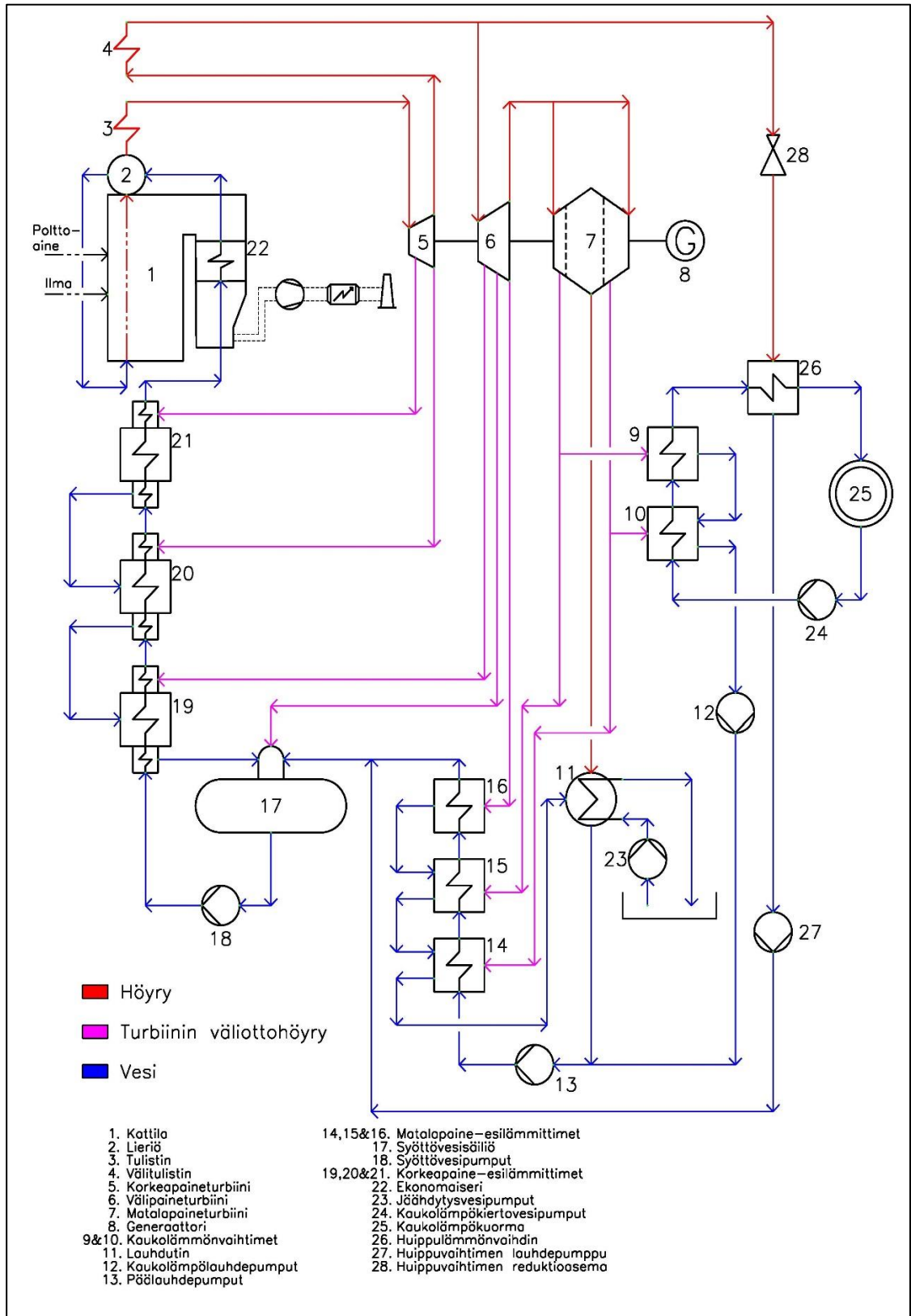
Höyryvoimalaitoksissa syöttövettä esilämmitetään parantamaan laitoksen sähkö- tuotannon hyötysuhdetta sekä rakennusastetta. Rakennusaste kuvaa laitoksen säh-

köntuotannon ja kaukolämmöntuotannon suhdetta. Se on hyvä mittari kuvaamaan kaukolämpölaitoksen prosessin sähköntuotannon tehoa.

$$rakennusaste = \frac{sähköteho}{kaukolämpöteho}$$

Rakennussuhde määräytyy laitoksessa sen mukaan, mitä sähköntuotantoa parantavia muutoksia on tehty prosessiin. Rakennusaste vaihtelee eri kaukolämpövoimalaitoksilla 0,3:n ja 0,6:n välillä, ja sitä voidaan parantaa syöttöveden esilämmityksen lisäksi monivaiheisella kaukolämpöveden lämmityksellä ja välitulistuksella. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2013, 46–48)

Höyryvoimalaitoksen syöttövettä lämmitetään ennen kattilaa matala- ja korkeapaine-esilämmittimillä sekä syöttövesisäiliöllä. Lisäksi syöttövesi kulkee ennen kattilan lieriöön ja keittoputkistoon menemistä savukaasulämmitteisen esilämmittimen eli ekonomaiserin läpi. Kaikki esilämmittimet toimivat turbiinin väliottohöyryllä ekonomaiserin lukuun ottamatta. Väliottohöyry on jo tuottanut sähköä turbiinin läpi virratessaan, joten sen lämpöenergia käytetään hyväksi voimalaitosprosessin sisällä. Siksi esilämmityspiiri parantaa sähköntuotannon hyötysuhdetta. Ilman esilämmitystä lämpöenergia siirtyisi turbiinin läpi suoraan pois prosessista. Välioton avulla saadaan myös höyryvirta turbiinissa jaettua paremmin. Turbiinin korkeapaineosan höyrymäärä suurenee, mikä parantaa turbiinin hyötysuhdetta, ja puolestaan investoinniltaan kalliimman matalapaineosan höyrymäärä ja koko pienenee. Näin saadaan turbiinin välioton avulla sen hyötysuhdetta parannettua sekä hintaa alemmas. (Huhtinen ym. 2013, 48; Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 195; Holmström 1982, 164)

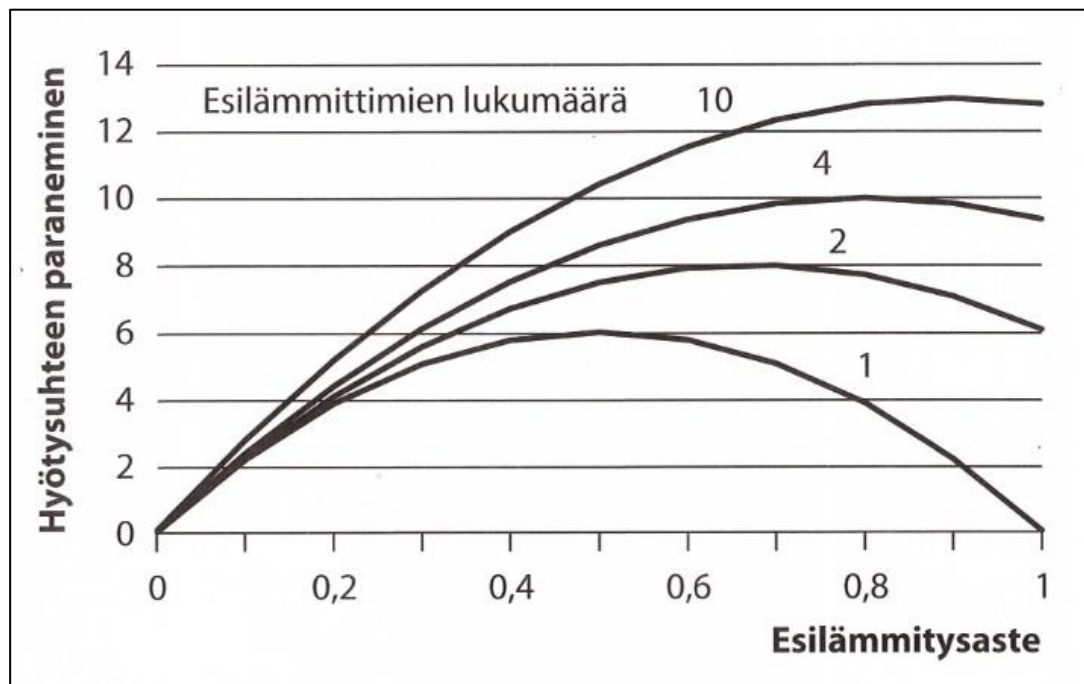


Kuvio 1. Kaukolämpövoimalaitoksen prosessikaavio (Huhtinen ym. 2013, 62)

Kuviossa 1 on kuvitteellisen lauhdeperällä varustetun kaukolämpövoimalaitoksen prosessikaavio. Lauhdeperällä tarkoitetaan vastapaineturbiinin perään rakennettua erillistä lauhdeturbiinia. Tällöin saadaan tuotettua enemmän sähköä kuin on mahdollista pelkällä vastapainetuotannolla. Kyseisessä esimerkissä on seitsemänvaiheinen syöttöveden esilämmitys: kolme korkeapaine- ja kolme matalapaine-esilämmittintä sekä syöttövesisäiliö. Ekonomaiseria ei mielletä osaksi esilämmityspiiriä, vaikka se onkin syöttöveden esilämmitin, koska se katsotaan kuuluvaksi osaksi kattilaa. Muita hyötysuhdetta parantavia tekijöitä kuviossa on kaksivaiheinen kaukolämpöveden lämmitys, joka lisää turbiinista saatavaa sähkötehoa 3–5 %, sekä välitulistus. Välitulistus parantaa prosessihyötysuhdetta noin 3,5–4,5 %. Lisäksi prosessista löytyy huippulämmönvaihdin kovalle kaukolämmönkulutukselle. (Huhtinen ym. 2013, 54)

Kuviosta 1 nähdään hyvin, mistä vaiheesta turbiinia väliottohöyryä otetaan eri syöttöveden esilämmittimiin. Esimerkiksi juuri ennen kattilaa olevaan korkeapaine-esilämmittimeen höyry otetaan korkeapaineturbiinista, jolloin höyryn paine voi olla noin 80 baria ja lämpötila 400 °C eli höyry on vielä voimakkaasti tulistunutta. Syöttövesisäiliö on sekoituslämmönvaihdin johon tulee tulistunutta höyryä välipaineturbiinista, säiliön jälkeisestä korkeapaine-esilämmittimestä ja viimeisestä matalapaine-esilämmittimestä lauhdetta. Matalapaine-esilämmittimiin höyry tulee matalapaineturbiinista, sekä ennen syöttövesisäiliötä olevaan mp-esilämmittimeen välipaineturbiinista. Kyseisessä esimerkissä on mahdollista kytkeä lauhdeturbiini kokonaan irti prosessista. Tällöin matalapaineturbiinista ei mene höyryä lauhduttimelle, vaan tämä höyry on ohjattu vastapaineturbiinista menemään kaksivaiheisen kaukolämpöveden lämmityksen lämmönvaihtimiin.

Kuvion 1 prosessissa sekä korkeapaine- että matalapaine-esilämmittimet on kytketty sarjaan. Sarjaan kytkemällä pyritään saavuttamaan mahdollisimman suuri syöttöveden lämpötilan nosto. Korkeamman paineen esilämmittimen turbiinin väliotosta tulleen höyryn lämmönsiirtimessä lauhtunut lauhde siirretään aina seuraavaan matalamman paineen esilämmittimeen. Ensimmäisestä eli pienimmän paineen korkeapaine-esilämmittimessä välioton lauhtunut höyry siirretään lopulta syöttövesisäiliöön ja pienimmän paineen matalapaine-esilämmittimessä välioton lauhtunut höyry päättyy lauhduttimeen.



Kuvio 2. Syöttöveden lämmityksen vaikutus voimalaitoksen prosessihyötysuhteeseen (alkup. kuvio ks. Huhtinen ym. 2013, 52)

Kuviossa 2 on esitetty, miten syöttöveden esilämmittimien lukumäärä vaikuttaa voimalaitoksen prosessihyötysuhteeseen. Vaaka-akselilta nähdään prosessin esilämmitysaste. 1 eli 100 % tarkoittaa sitä, että syöttövesi on esilämmitetty höyrystyslämpötilaansa, ja 0 puolestaan kertoo, että syöttöveettä ei ole esilämmitetty ollenkaan. Pystyakselilta nähdään, kuinka paljon prosessin hyötysuhde paranee prosentteina esilämmittimien lukumäärän mukaan. Neljällä esilämmittimellä, esimerkiksi syöttövesisäiliöllä, kahdella korkeapaine-esilämmittimellä ja yhdellä matalapaine-esilämmittimellä varustetussa voimalaitoksessa optimaalinen esilämmitysaste syöttövedelle on kuvion mukaan noin 80 %. Tällöin hyötysuhde paranee perusprosessiin (ei yhtään esilämmitintä) nähden 10 %. (Huhtinen ym. 2013, 52)

Optimaalisen esilämmitysasteen pystyy määrittämään seuraavalla kaavalla:

$$\text{Optimiesilämmitysaste} = \frac{n}{n + 1}$$

missä $n = \text{esilämmittimien lukumäärä}$

Syöttöveden esilämmittimien määrä laitoksella on taloudellinen kysymys. Mitä enemmän esilämmittimiä on, sitä parempi on voimalaitoksen hyötysuhde, mutta esilämmittimien investoinnit on saatava maksettua takaisin niistä kertyvällä polttoainesäästöllä. Jokainen uusi esilämmitin kasvattaa prosessin hyötysuhdetta aina vähemmän kuin edellinen, joten ennen pitkään ollaan tilanteessa, jossa uutta esilämmitintä ei ole taloudellisesti järkevää lisätä prosessiin. Suurissa lauhdevoimalaitoksissa on järkevää käyttää jopa 6-8 esilämmitintä. Laitoksessa voi esimerkiksi olla syöttövesisäiliö, neljä matalapaine-esilämmitintä ja kaksi korkeapaine-esilämmitintä. (Huhtinen ym. 2013, 52–53)

Huhtisen, Korhosen, Pimiän ja Urpalaisen (2013, 52) mukaan syöttöveden esilämmityksen ansiosta saatava lisäsähköteho voidaan selittää kaavalla:

$$P_{\text{lisä}} = m * \Delta h$$

missä $P_{\text{lisä}} = \text{esilämmityksen vaikutuksesta saatu lisäsähköteho}$

$m = \text{esilämmitykseen tarvittu höyryvirta}$

$\Delta h = \text{höyryn muutoksen entalpiaero turbiinin sisällä}$

Turbiinista saatava lisäsähköteho, joka on saatu esilämmityksen avulla, riippuu siis esilämmityksen tarvitsemasta höyryvirrasta ja höyryvirran turbiinin läpi virratessaan tuottamasta sähkötehosta. Jos syöttövettä lämmitetään aikaisemmin mainittua optimia enemmän, esilämmitykseen tarvittava massavirta kasvaisi, mutta lämmityshöyry otettaisiin korkeammasta paineesta. Lisäsähköteho olisi optimia pienempi, koska turbiinin sisällä höyryn muutoksen entalpiaero pienenesi. Liian vähäinen esilämmitys puolestaan johtaa siihen, että lämpöteho ja massavirta, joka tarvitaan lämmitykseen, olisivat pienemmät. Entalpiaero turbiinin sisällä olisi tällöin suurempi, mutta se suurenisi vähemmän kuin lämmitykseen tarvittava massavirta pienenesi, jolloin lisäsähköteho pienenee optimista. (Huhtinen ym. 2013, 52)

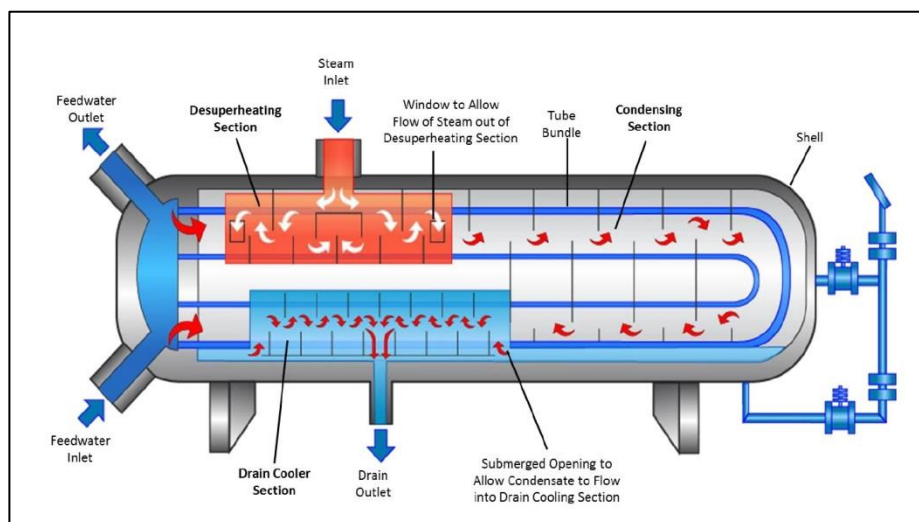
3.2 Korkeapaine-esilämmitin

Korkeapaine-esilämmitin on suljettu syöttöveden esilämmitin, ja se sijaitsee voimalaitosprosessissa syöttövesisäiliön ja kattilan välissä. Suljetulla esilämmittimellä tarkoitetaan, että syöttövesi ja sitä lämmittävä turbiinin väliottohöyry eivät ole kosketuksissa keskenään. Suurin osa korkeapaine-esilämmittimistä on U-putkityyppisiä, joissa lieriön muotoisen vaipan sisällä on U-putkinippu. Syöttövesi virtaa U-putkien sisällä, ja väliottohöyry lämmittää putkia (ks. kuvio 3). Toinen, mutta paljon harvinaisempi kp-esilämmittimen malli on kammiotyyppinen korkeapaine-esilämmitin. Siinä on kaksi paksuseinäistä putkea, joita käytetään syöttöveden tulo- ja poistokammioina, ja kammioiden välillä kuoressa mutkittelee ”käärmeputkisto”. Kammiotyyppinen kp-esilämmitin on paljon monimutkaisempi valmistaa kuin U-putkityyppinen, ja siksi yleensä kalliimpi vaihtoehto. (Huhtinen ym. 2013, 49; Yokell, Catapano & Svensson 2014, 5)



Kuvio 3. Makaava korkeapaine-esilämmitin (Sahala Works Oy 2016)

Korkeapaine-esilämmitin koostuu yleensä kolmesta yksiköstä: väliottohöyryn tulistuksen poistimesta, väliottohöyryn lauhduttimesta ja lauhteenjäähdyttimestä, joilla kullakin on oma tarkoituksensa (ks. kuvio 4). Taulukossa 1 on suomennettu kuvion 4 tekstit. Väliottohöyryn tullessa korkeapaine-esilämmittimelle siinä voi olla vielä 40–200 °C tulistusta. Kun turbiinin väliottohöyryllä on riittävä määrä tulistusta kaikilla laitoksen kuormitustasoilla, on tyypillistä käyttää esilämmittimessä höyryn tulistuksen poistoa, jossa höyry jäähdytetään kylmäiseksi. Tulistuksen poisto vähentää väliottohöyryn määrää, joka tarvitaan nostamaan syöttöveden lämpötila halutulle tasolle, näin ollen parantaen hyötysuhdetta. Lauhduttimessa kyläinen höyry lauhtuu valuen lämmönvaihtimen pohjalle, jossa lauhteen pinta on mitattavissa. Lauhteenjäähdytyn on vesi-vesi-lämmönsiirrin lauhduttimen sisällä. Jäähdyttimen tarkoitus on maksimoida lämmönsiirto vaipan lauhteesta esilämmittimeen tulevaan syöttöveteen ennen lauhteen poistumista. Lauhdetta tulisi alijäähdyttää riittävästi, jotta vältetään kavitoiva kaksifaasivirtaus, koska se voi vahingoittaa esilämmittimen sisäosia ja siitä lähtevää putkistoa. Tarvittavan tai käytetyn väliottohöyryn paine selviää höyrytaulukon avulla, kun tiedetään mihin lämpötilaan syöttövesi lämpenee esilämmittimessä. Esimerkiksi, jos syöttövesi lämpenee 200 asteeseen, niin höyrytaulukon mukaan vesi lauhtuu tässä lämpötilassa 15,5 barin paineessa eli väliottohöyryn paineen tulee olla 15,5 baria. (Huhtinen ym. 2013, 49–50; Yokell ym. 2014, 6, 235)



Kuvio 4. Suljetun syöttöveden esilämmittimen periaatekuva (AspenTech n.d.)

Taulukko 1. Kuvion 4 suomennokset

Kuviosta 4	Suomennos
Feedwater outlet	Syöttövesi ulos
Feedwater inlet	Syöttövesi sisään
Steam inlet	Höyry sisään
Drain outlet	Lauhde ulos
Shell	Vaippa
Tube bundle	Putkiryhmä
Desuperheating section	Tulistuksenpoisto-osa
Condensing section	Lauhdutinosi
Drain cooling section	Lauhteenjäähdytin
Window to allow flow of steam out of desuperheating section	Aukko josta höyry pääsee pois tulistuksenpoisto-osasta
Submerged opening to allow condensate flow into drain cooling section	Aukko josta lauhde pääsee lauhteenjäähdyttimeen

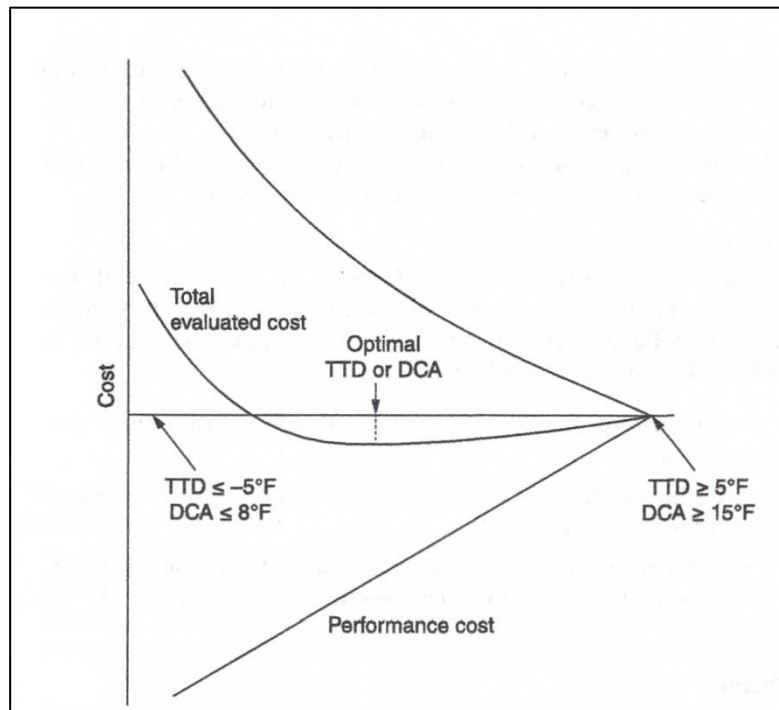
Esilämmittimen tehokkuutta mitataan kahdella eri arvolla: TTD (terminal temperature difference) ja DCA (drain cooler approach). TTD eli asteisuus tarkoittaa väliottohöyryn lauhtumislämpötilan ja syöttöveden loppulämpötilan eroa. DCA on lauhteen loppulämpötilan ja esilämmittimeen saapuvan syöttöveden lämpötilaero. Jos esilämmittimessä ei ole tulistuksenpoisto-osaa TTD on aina positiivinen. Vaakatasossa olevien esilämmittimien asteisuus ilman tulistuksen poistoa on kokemuksen perusteella noin 1 °C, ja pystymalleilla noin 3 °C. Kun esilämmittimessä on tulistuksenpoisto-osa, TTD on yleensä 0 ja -1,6 °C välissä. Syöttövesi siis lämpenee yli väliottohöyryn lauhtumislämpötilan. Taulukossa 2 on suositellut asteisuudet esilämmittimille verrattuna, kuinka paljon tulistusta väliottohöyryssä on. (Yokell ym. 2014, 7)

Taulukko 2. Esilämmittimen suositeltu asteisuus

Suosittelut asteisuus (TTD), [°C]	Paljonko tulistusta saatavilla, [°C]
0	65-95
-0,6	95-120
-1,1	120-150
-1,6	>150

(Yokell 2014, muokattu)

Kuvio 5 kertoo syöttöveden esilämmittimen optimoinnista, ja sen alla taulukossa 3 on suomennettu kuvion tekstit sekä muunnokset Fahrenheitista Celsiusiin. TTD ja DCA pystytään optimoimaan perustuen esilämmittimen kustannuksiin ja fysikaalisiin rajoitteisiin. TTD ja DCA täytyy optimoida prosessin joka esilämmittimelle erikseen, ja optimointi tulee tehdä useaan kertaan kyseessä olevaan prosessiin, jotta saadaan parhaat arvot joka lämmönsiirtimelle. (Yokell ym. 2014, 12)



Kuvio 5. Syöttöveden esilämmittimen optimointi (alkup. kuvio ks. Yokell ym. 2014, 13)

Taulukko 3. Kuvion 5 suomennokset

Cost	Kustannus
Total evaluated cost	Arvioitu kokonaiskustannus
Optimal TTD or DCA	Optimaalinen TTD tai DCA
Performance cost	Suorituskyvyn hinta

-5 °F	-2,8 °C
5 °F	2,8 °C
8 °F	4,4 °C
15 °F	8,3 °C

3.3 Matalapaine-esilämmitin

Matalapaine-esilämmitin on myös kp-esilämmittimen tapaan suljettu syöttöveden esilämmitin, ja se sijaitsee voimalaitosprosessissa turbiinilauhduttimen/kaukolämmönvaihtimien ja syöttövesisäiliön välissä. Rakenteeltaan matalapaine-esilämmitin on hyvin pitkälle korkeapaine-esilämmittimen kaltainen. Mp-esilämmittimissä ei ole tulistuksenpoisto-osaa, koska höyry ei ole tulistunutta tullessaan esilämmittimeen, tai tulistus on hyvin vähäistä. Matalapaine-esilämmittimen toiminta on täsmälleen sama kuin kp-esilämmittimessä pois lukien tulistuksenpoisto-osa, eli kylläinen höyry lauhtuu putkien pinnalle, ja lauhde kulkee lauhteenjäähdyttimen kautta sarjassa seuraavaan esilämmittimeen tai lauhduttimeen. Mp-esilämmittimissä tärkeää on tulohöyryn kohdalla sijaitseva suojalevy, joka estää höyryn seassa olevien vesipisaroiden aiheuttaman eroosion lämmönsiirtimen putkiin. Suojalevy on myös korkeapaine-esilämmittimissä, sillä vaikka tulohöyry on normaalisti tulistunutta ja kuivaa, voi käynnistyksen aikana höyryn seassa olla pisaroita. Tehokkuutta mitataan samoilla mittareilla kuin kp-esilämmittimissä eli TTD:llä ja DCA:lla. TTD eli asteisuus on matalapaine-esilämmittimillä yleensä noin pari astetta, ja DCA voi olla jopa noin 8 °C. Optimointi on myös mp-esilämmittimillä kuvion 5 mukaan. (Huhtinen ym. 2013, 48–49; Yokell ym. 2014, 8)

3.4 Syöttövesisäiliö

Syöttövesisäiliö on matalapaine- ja korkeapaine-esilämmittimien välissä oleva sekoituslämmönsiirrin (ks. kuvio 6). Sen tarkoituksena on toimia syöttöveden esilämmit-

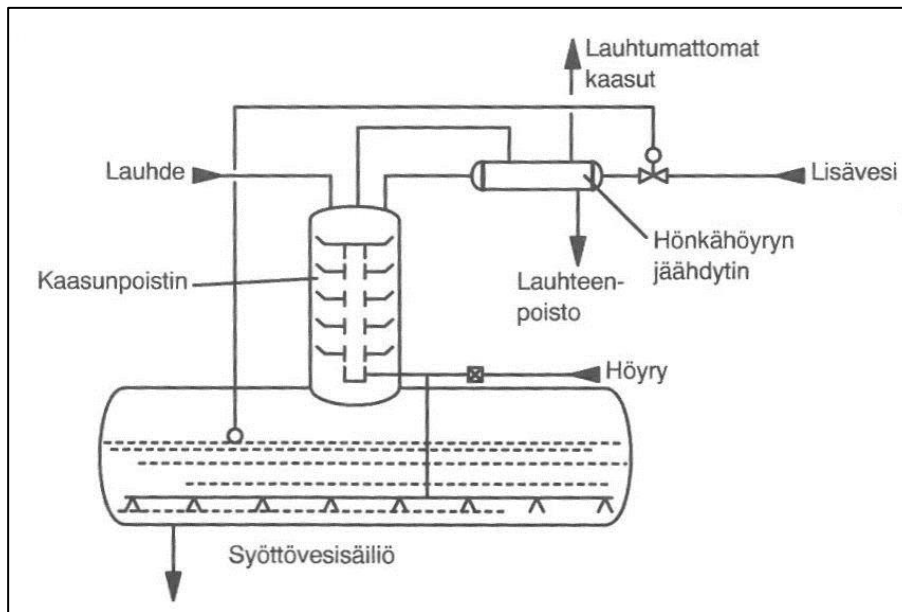
timenä, väliaikaisena varastona ja kaasunpoistimena. Syöttövesisäiliössä riittää tyypillisesti vettä 10–30 minuutin mittaiseen vedenkulutukseen ajettaessa laitosta täydellä teholla. Säiliö on hyvä tasaamaan kuormituksen vaihteluita. Säiliöön ajetaan lisävetä lisävesisäiliöstä, kun vedenpinnan taso laskee liikaa. (Huhtinen ym. 2013, 49; Holmström 1982, 169)



Kuvio 6. Syöttövesisäiliön ja kaasunpoistimen asennus (Anttila 2016)

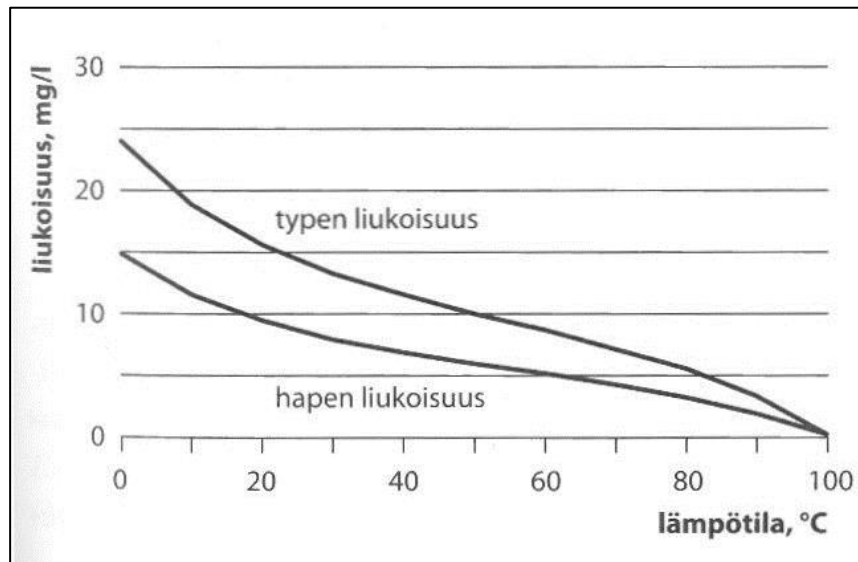
Syöttövesisäiliö on avoin syöttöveden esilämmitin eli turbiinilta tuleva väliottohöyry sekoittuu suoraan kaukolämmönvaihtimilta tai lauhduttimelta tulevaan lauhteeseen, ja väliottohöyry lauhtuu säiliössä väliottopaineessaan. Lauhteen paine on pienempi kuin väliottohöyryn, joten lauhduttimelta tai kaukolämmönvaihtimilta tulevan lauhteen paine täytyy nostaa väliottohöyryn tasolle lauhdepumpuilla. Säiliössä paineet eivät muutu, joten tulevien virtojen ja lähtevän syöttöveden paineet ovat samat. Syöttövesisäiliöstä lähtevän syöttöveden tulee olla kokonaan vettä eli höyrypitoisuus on 0 %, sillä jos syöttövedessä on höyryä mukana, paineen nostaminen kattilapai-

neen tasolle vaatisi paljon tehoa. Ideaalitapauksessa säiliöstä lähtevä syöttövesi on kylläistä, ja sen paine vastaa väliottohöyryn painetta. (Wikstén 2009, 63; Yokell ym. 2014, 4)



Kuvio 7. Syöttövesisäiliö ja kaasunpoistin (alkup. kuvio ks. Huhtinen ym. 2013, 32)

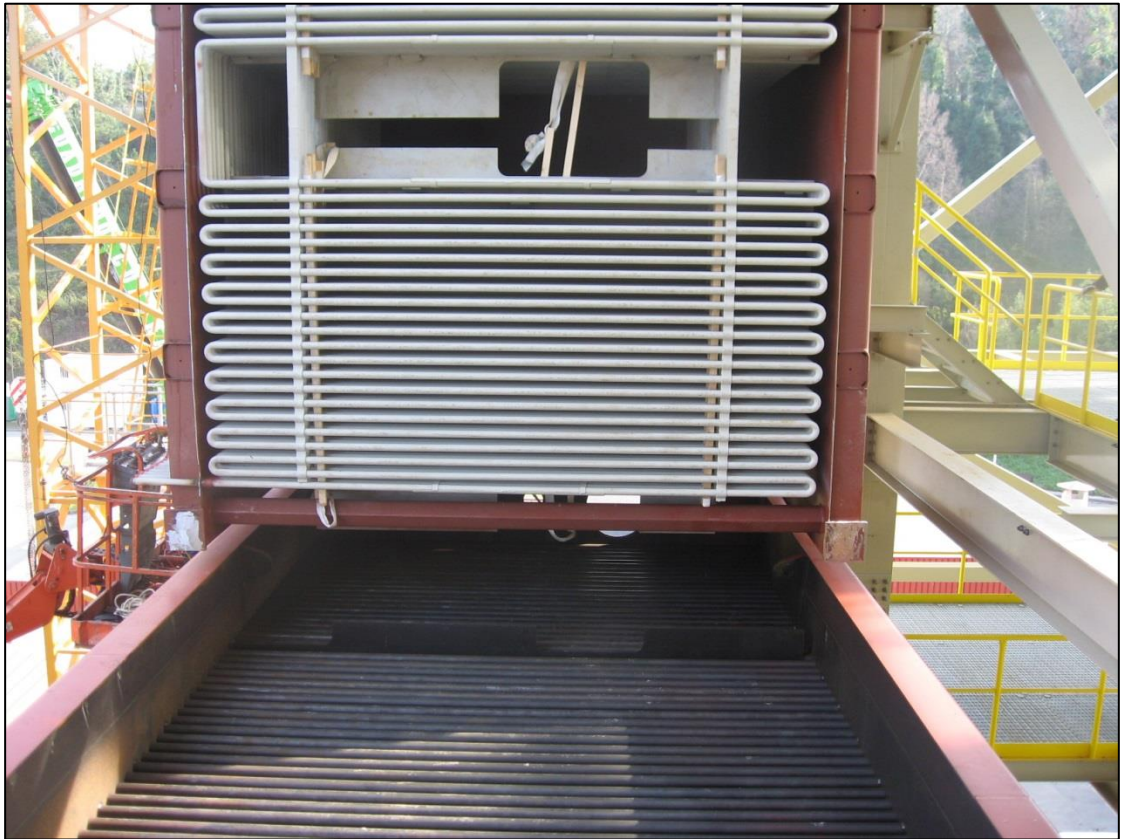
Syöttövesisäiliön yhteyteen rakennetaan usein kaasunpoistin, ja se sijaitsee yleensä säiliön päällä. Kaasunpoistin on torni, jossa on teräksisiä rei'itettyjä välipohjia. Syöttövesi tulee torniin ylhäältä, ja höyry virtaa tornissa alhaalta ylös. Tornin päältä lähtevästä hönlöhöyryputkesta kaasut johdetaan katolle, ja välissä saattaa olla myös lämmöntalteenotto (ks. kuvio 7). Veden ollessa kiehumispisteessään, kaasujen liukeminen veteen on käytännössä nolla. Kaasunpoisto toimii parhaiten, kun vesi pysyy kiehumispisteessään sekä saadaan mahdollisimman nopeasti kiehumispisteeseensä kaasunpoistimessa. Lisäksi veden tulisi olla mahdollisimman tasaisesti hajaantunut pieniksi pisaroiksi. Syöttövesisäiliön yhteyteen rakennettu terminen kaasunpoistin on suunniteltu poistamaan pääasiassa happi syöttövedestä, mutta se poistaa myös muita kaasuja esimerkiksi hiilidioksidia (ks. kuvio 8). (Huhtinen ym. 2013, 33)



Kuvio 8. Hapen ja typen liukoisuus veteen eri lämpötiloissa (alkup. kuvio ks. Huhtinen ym. 2013, 33)

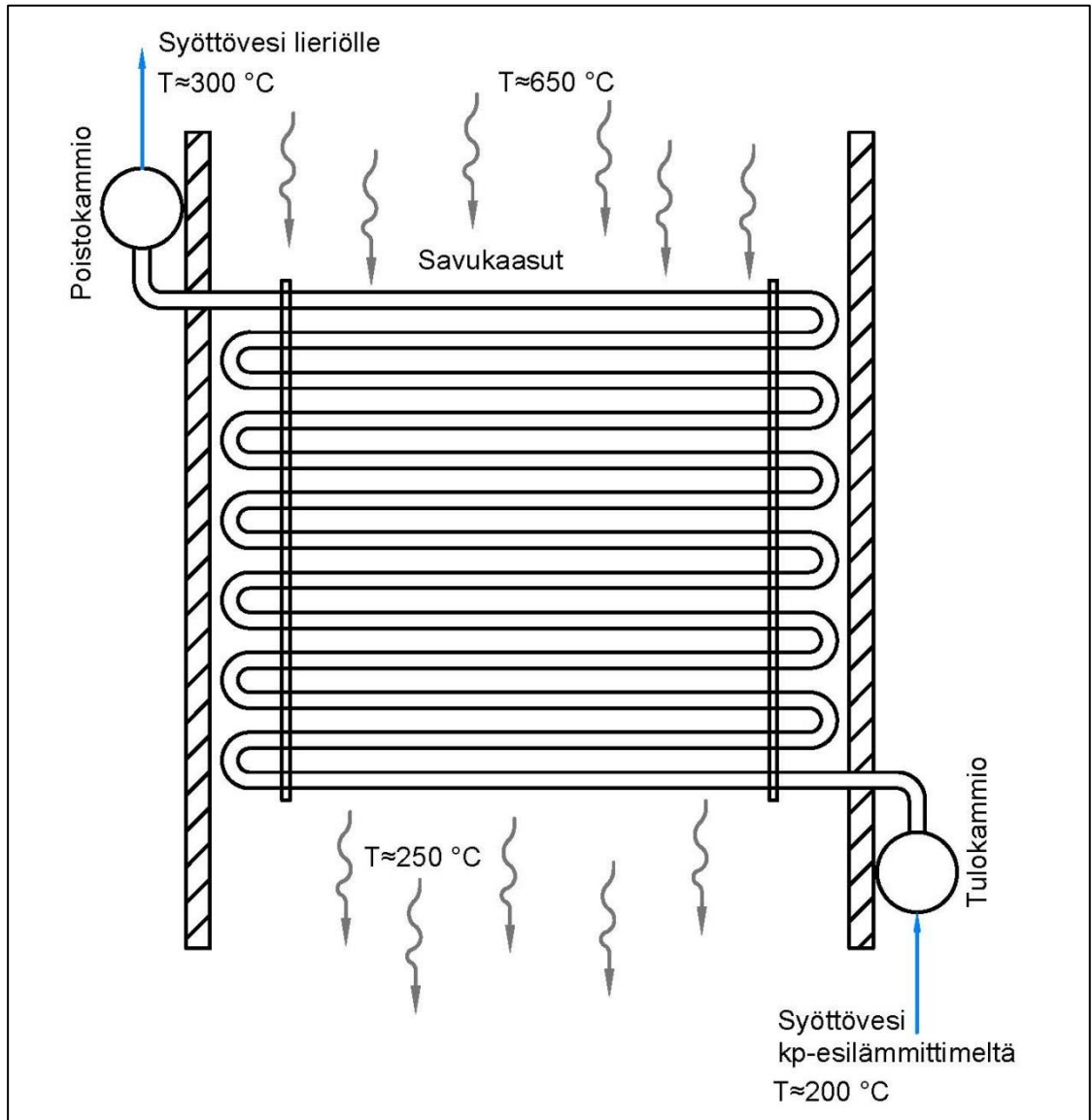
3.5 Ekonomaiseri

Ekonomaiseri, lyhyemmin eko, on kattilan savukaasukanavassa sijaitseva syöttöveden esilämmitin (ks. kuvio 9). Eko on savukaasukanavassa heti tulistimien jälkeen, ja savukaasun lämpötila ekonomaiserin kohdalla on vielä noin 600–800 °C. Savukaasujen lämpötila saadaan ekossa pudotettua lähelle syöttöveden lämpötilaa. Kattilan hyötysuhde olisi paljon huonompi, jollei tätä lämpöä otettaisi talteen. Ekonomaiserit voidaan jakaa niiden toimintansa puolesta kahteen eri tyyppiin: Höyrystäviin ja höyrystämättömiin. Höyrystävässä osa syöttövedestä höyrystyy jo ekonomaiserin loppuvaiheessa. Höyrystymättömässä syöttöveden lämpötila ekonomaiserista poistuttua on noin 20 °C höyrystymispistettä alhaisempi, jottei kiehumisvaaraa tule missään oloissa kuormitusvaihtelujen seurauksena. Puhuttaessa syöttöveden esilämmityspiiristä, siihen mielletään kuuluvaksi matala- ja korkeapaine-esilämmittimet sekä syöttövesisäiliö. Ekonomaiseria ei tähän lasketa mukaan vaikka se syöttövettä lämmittääkin, koska se mielletään kuuluvan osaksi kattilaa. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 194)



Kuvio 9. Ekonomaiserimoduuli (Anttila 2016)

Ekonomaiserille syöttövesi tulee korkeapaine-esilämmittimiltä. Mitä suuremmasta voimalaitoksesta on kyse, sitä kuumemmaksi pyritään syöttöveden lämpötila saamaan esilämmityspiirissä sähköntuotannon hyötysuhteen parantamiseksi ennen ekonomaiseria. Ekonomaiseriin tulevan veden lämpötila voi olla näin ollen noin 100–250 °C ja savukaasujen lämpötila ekon jälkeen noin 250–450 °C. Kuviossa 10 on ekonomaiserin periaatekuva. Syöttövesi tulee kp-esilämmittimiltä ekonomaiserin tulokammioon, josta lähtee monta rinnakkaista putkea mutkitellen savukaasukanavan läpi poistokammioon. Poistokammioista vesi menee kylläisenä kattilan lieriöön. (Huhtinen ym. 2000, 195)



Kuvio 10. Ekonomaiserin periaatekuva

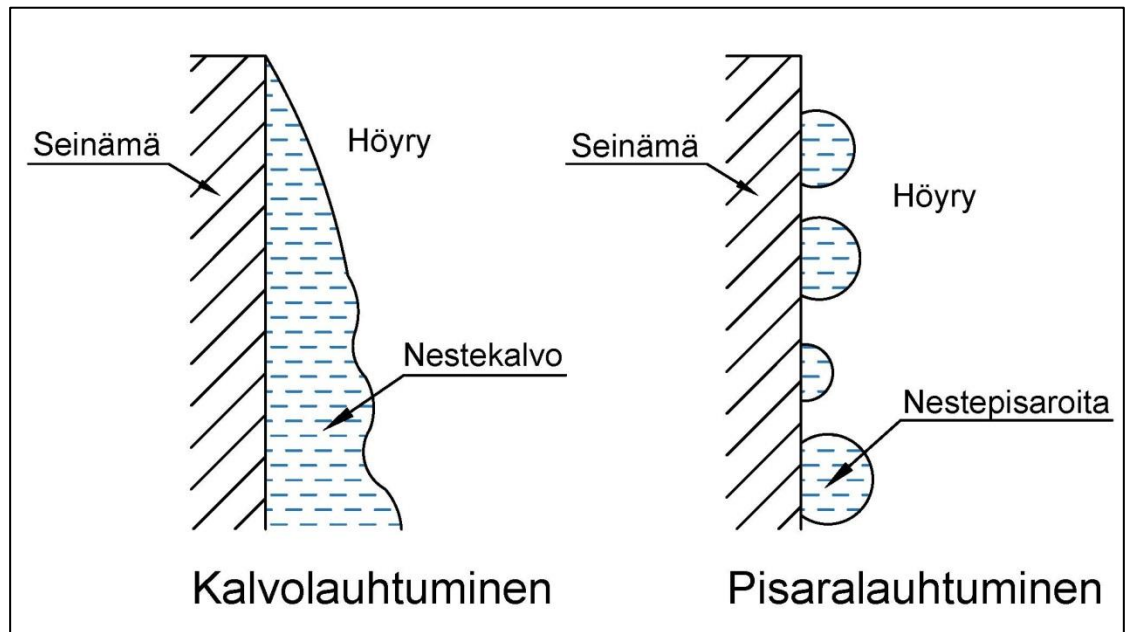
Käytetyimpiä materiaaleja ekon putkissa ovat normaalit hiiliteräkset, koska niillä on hyvä lämmönjohtokyky ja muokattavuus, niitä on helppo hitsata, hiiliteräksillä on pieni lämmönlaajenemiskerroin sekä halpa hinta. Jos syöttövesi laitoksella on hyvin kylmää, voidaan ekossa käyttää valurautaisia putkia paremman matalalämpötilasyöpymisen kestävyuden takaamiseksi, mutta pelkät valurautaiset putket eivät kestä kovin hyvin painetta verrattuna teräspanputkiin. Paksuseinämaiset valurautaputket kestävätkin myös paremmin savukaasuissa olevien hiukkasten ja nuohimien aiheuttamaa kulutusta. Ekonomaiserin savukaasupuolella kaasun lämmönsiirto-ominaisuudet

ovat paljon heikommät kuin veden, joten joskus lämmönsiirtimen savukaasupuolen lämmönsiirtopinta-alaa kasvatetaan rivoituksella. Rivoitusmateriaaleina voivat olla teräs, valurauta tai alumiini. On myös mahdollista valmistaa compoundputkia, joissa on rivoitetun valurauta- tai alumiiniputken sisälle laitettu teräsputki, paremman paineenkestävyyden saavuttamiseksi. Sileät putket ovat kuitenkin paljon yleisempiä katiloissa joissa muodostuu paljon lentotuhkaa, koska rivoitettuja putkia on vaikeampi puhdistaa. Rivoitetut putket ovat myös paljon kalliimpia valmistaa kuin sileät putket. (Huhtinen ym. 2000, 195–196)

4 Lauhtuminen lämmönsiirtimissä

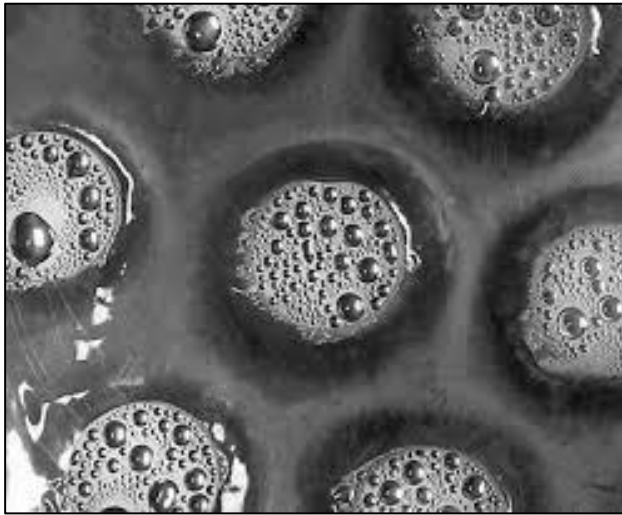
Lauhtumista tapahtuu, kun kyläinen tai tulistunut höyry on kosketuksessa esineen, esimerkiksi seinän tai muun epäpuhtauden kanssa, jonka lämpötila on höyryn kyläytymispistettä alhaisempi. Höyry tiivistyy eli lauhtuu seinämän pintaan nesteinä, jota kutsutaan lauhteeksi. Höyryn lauhtuessa lämmönsiirto on erittäin tehokasta, ja tästä syystä voimalaitoksilla pyritään käyttämään lauhtumiseen perustuvia lämmönsiirtimiä mahdollisimman paljon. Voimalaitoksien syöttöveden esilämmityspiirin korkea- ja matalapaine-esilämmittimet perustuvat turbiinin väliottohöyryn lauhtumiseen esilämmittimessä. Syöttövesisäiliössä väliottohöyry lauhtuu sekoittuessaan syöttöveden kanssa. (Faghri, Zhang & Howell 2010, 590; Wagner 1994, 95)

Höyryn lauhtuminen seinämän pintaan voi tapahtua joko kalvolauhtumisena tai pisaralauhtumisena. Kuviossa 11 on esitetty nämä kaksi eri lauhtumistyyppiä pysyvästi suoraan seinään. Kalvolauhtuminen tarkoittaa, että tiivistynyt lauhdekalvo peittää kokonaan seinän pinnan, kun taas pisaralauhtumisessa neste tiivistyy pisaroina seinän pinnalle. Teknillisten sovellutusten lauhtumislämmönsiirron yleisin ja melkein aina oletettu mekanismi on kalvolauhtuminen. Syöttöveden esilämmittimien lauhtumislämmönsiirron laskenta suoritetaan aina kalvolauhtumisen menetelmin. Joissain harvoissa tapauksissa voidaan lämmönsiirron laskenta suorittaa pisaralauhtumisen menetelmällä, mutta käytännössä kannattaa laskea huonommilla ja varmemmilla kalvolauhtumisen arvoilla. (Faghri ym. 2010, 590; Sarkomaa 2003; Wagner 1994, 95)



Kuvio 11. Kalvo- ja pisaralauhtuminen pystysuoraan seinämään (Faghri 2010, muokattu)

Kuviossa 12 on kuparisella, osittain kovapinnoitteella päällystetyllä levylä sekä kalvo-, että pisaralauhtumista havaittavissa. Pisaralauhtumista tapahtuu ympyränmuotoisilla alueilla, joiden kohdalla päällyste on, ja kalvolauhtumista näiden ympyröiden välissä, jossa ei päällystettä ole. Kovapinnoitteen paksuus pisaralauhtumisen alueilla on noin $1 \mu\text{m}$. (VDI Gesellschaft 2010, 934)



Kuvio 12. Pisara- ja kalvolauhtuminen kuparilevyllä (alkup. kuvio ks. VDI Gesellschaft 2010, 934)

4.1 Kalvolauhtuminen

Kuten on jo edellisessä kappaleessa mainittu, kalvo- tai filmilauhtumista tapahtuu, kun kylmä seinä on kosketuksessa höyryyn joka on lähellä kyllästymispistettään, ja tiivistynyt lauhde peittää seinän pinnan. Lauhtumisprosessi alkaa höyryn lauhtumisesta suoraan seinän pintaan, mutta kun seinän pinta on peittynyt kokonaan lauhdeella, se pysyy peittyneenä ohuella lauhdekalvolla. Tämän jälkeen lauhtuminen tapahtuu nesteen ja höyryn rajapinnassa. Tämän vuoksi lauhtumisen nopeus riippuu suoraan siitä, kuinka lämpö siirtyy höyryyn ja nesteen rajapinnasta nestekalvon läpi seinään. Kuviossa 13 on kalvolauhtumisen kolme eri virtaustyyppiä (laminaarinen, aaltoileva ja turbulenttinen) pystysuorassa seinässä. Höyryn virtausnopeus on likimain nolla ja lauhdekalvon virtauksen nopeuteen vaikuttaa ainoastaan painovoima. Reynoldsin luvun arvo, joka kertoo onko virtaus laminaarista, aaltoilevaa vai turbulenttista, on määritelty kaavalla:

$$Re_{\delta} = \frac{4\Gamma}{\mu_l}$$

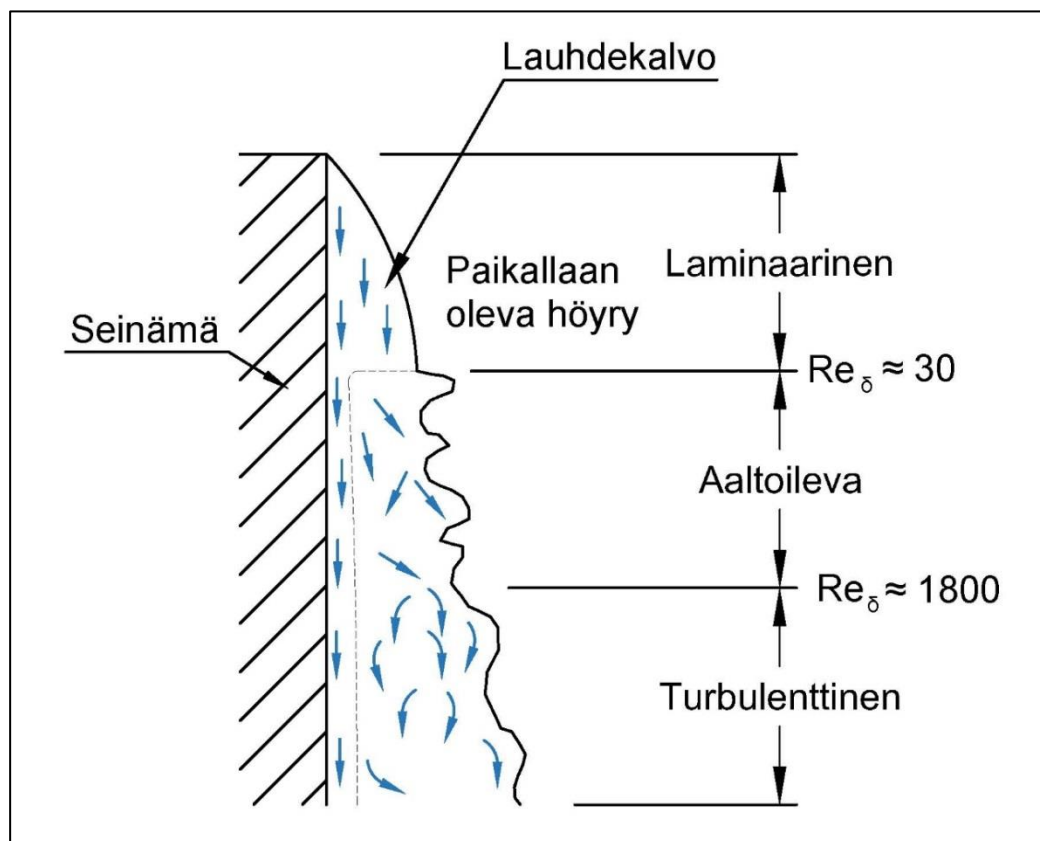
missä

Re_{δ} = Reynoldsin luku

Γ = Lauhteen massavirta jaettuna sen leveydellä

μ_l = Lauhteen dynaaminen viskositeetti

Kuviossa 13 seinän yläosassa sijaitsee laminaarisen lauhtumisen alue, jossa lauhdekalvo on ohuimmillaan. Lauhtumisprosessin edetessä, aina vain enemmän lauhdetta kertyy seinän pinnalle, ja painovoiman vaikutuksesta lauhde alkaa valua alaspäin. Lauhteen liikkeessä alaspäin sen paksuus kasvaa. Ensimmäinen merkki lauhdekalvon siirtymisestä ei-laminaariseen on, kun lauhde alkaa väräillä tai aaltoilla säännöllisesti. Tätä aluetta kutsutaan aaltoilevaksi, eikä se ole laminaarista tai turbulenttista. Lopuksi, jos seinä on tarpeeksi pitkä, on lauhdekalvon paksuus jo niin suuri, että alkaa muodostua epäsäännöllistä väräilyä lauhteeseen. Tätä lauhdekalvon aluetta kutsutaan turbulenttiseksi. (Faghri ym. 2010, 609–610)



Kuvio 13. Kalvolauhtumisen alueet (Faghri 2010, muokattu)

Useimmissa käytännön tilanteissa, kuten myös syöttöveden esilämmittimissä, höyrylä on lämmönsiirtimeen tullessaan ja siirtimen sisällä tietty nopeus, joka vaikuttaa lauhtumisen tehokkuuteen. Joissain tilanteissa laskujen yksinkertaistamiseksi voidaan lauhtuvan höyryn olettaa olevan liikkumatonta, mutta useimmissa käytännön sovelluksissa höyryn nopeus on otettava huomioon. Virtaavan höyryn lauhtuessa lämpöpinnalle, se aiheuttaa lauhdekalvoon leikkausjännityksen alla olevan yhtälön mukaan:

$$\tau_{\delta} = \frac{\zeta}{8} * \rho_h * w_h^2$$

missä

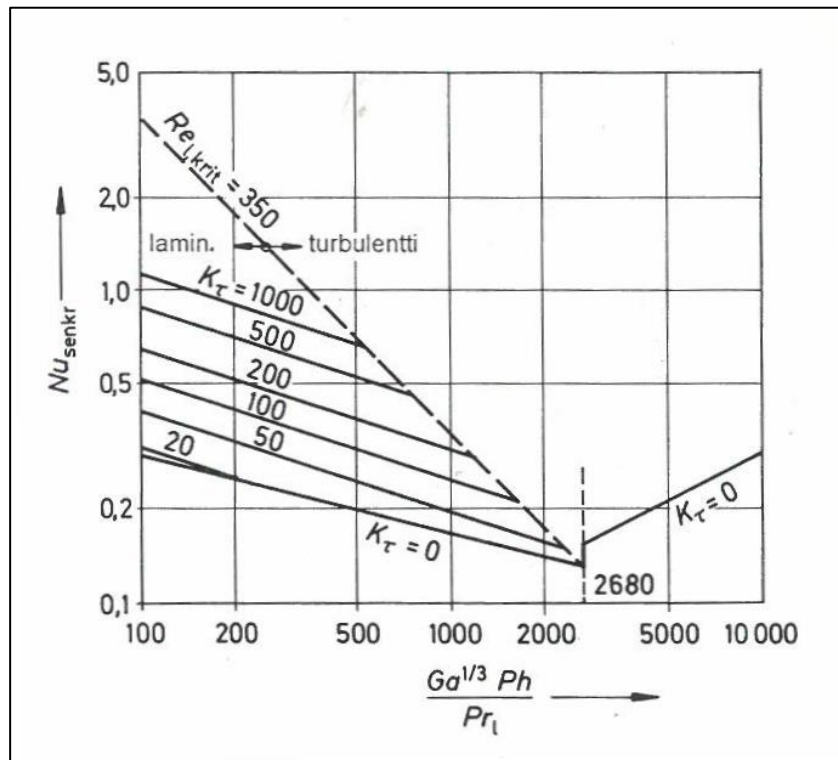
τ_{δ} = Leikkausjännitys (N/m²)

ζ = Vastuskerroin (arvoksi voidaan asettaa 0,02)

ρ_h = Höyryn tiheys (kg/m³)

w_h = Höyryn virtausnopeus (m/s)

Leikkausjännitys aiheuttaa lauhdekalvoon nopeusprofiilin muutoksen, ja tällöin lauhdekalvon paksuus ei enää riipu painovoimasta, vaan höyryn tiheydestä ja höyryn virtausnopeudesta. Leikkausjännityksen takia siirtyy laminaarisen ja aaltoilevan sekä aaltoilevan ja turbulenttisen virtauksen muutospisteet pienempiin Reynoldsin luvun arvoihin verrattuna liikkumattomaan höyryyn (ks. kuvio 13). Virtaava höyry tehostaa lämmönsiirtoa, koska lauhteen virtaus muuttuu aaltoilevaksi ja turbulenttiseksi seinämän pinnalla aiemmin kuin, jos höyry olisi levossa, ja turbulenttisessa virtauksessa lämmönsiirto on parempi kuin laminaarisessa (ks. kuvio 14). (Faghri ym. 2010, 623; Holmström 1982, 16; Wagner 1994, 99)

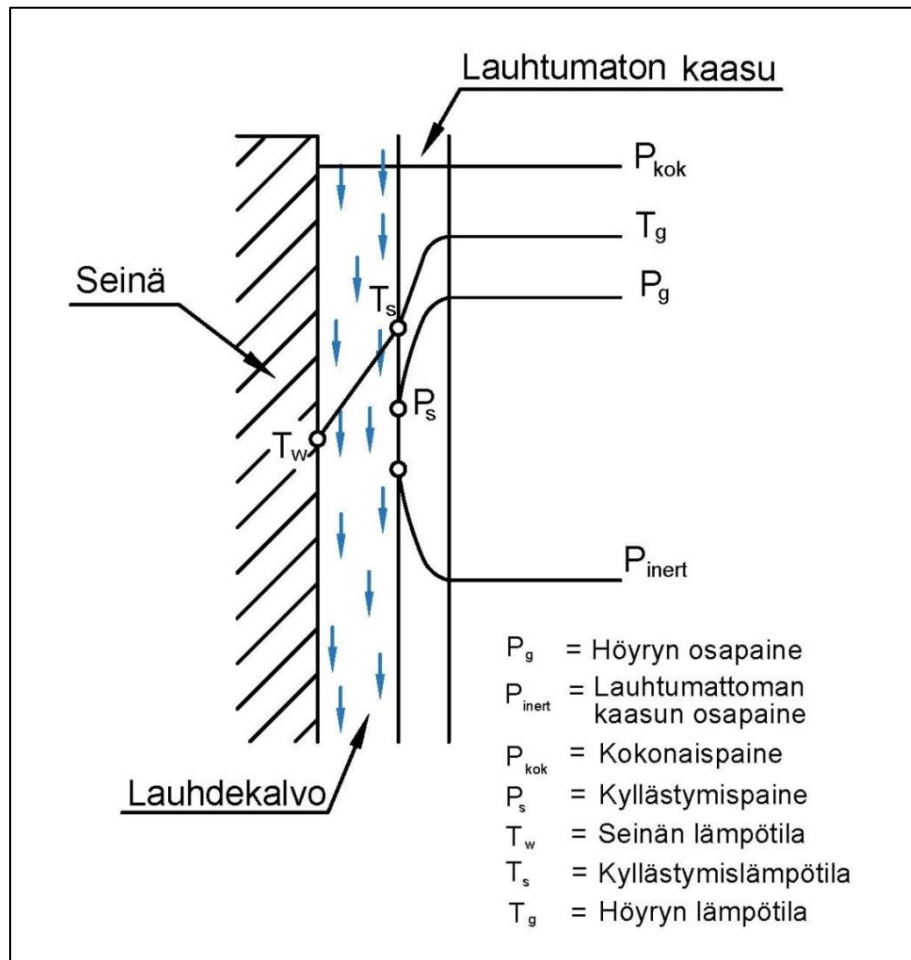


Kuvio 14. Virtaavan höyryn lauhtuminen pystysuoralle seinälle (alkup. kuvio ks. Wagner 1994, 99)

Jos höyry on lauhtuessaan puhdasta, höyryn tulistuksen vaikutus lämmönsiirtoon jää pieneksi. Tulistus saattaa hiukan parantaa lämmönsiirtoa samassa paineessa olevaan, kylläiseen höyryyn verrattuna. Tulistuksen vaikutus korostuu, jos lauhtuva höyry sisältää lauhtumattomia kaasuja. Tulistuksella voi olla merkittäväkin vaikutus lämmönsiirtoon lepotilassa olevaan höyryyn. Virtaavaan höyryyn tulistuksella on samantapainen vaikutus lämmönsiirtoon, mutta paljon pienempi. Tulistuneen höyryn hyödyt lauhtumislämmönsiirtoon häviää suurilla höyryn virtausnopeuksilla, koska tulistuneen höyryn aiheuttamat leikkausjännitykset lauhdekalvoon ovat pienempiä verrattuna kylläiseen höyryyn, tulistuneen höyryn pienemmän tiheyden vuoksi. Lämmönsiirtokerroin tulistetun höyryn lauhtuessa onkin likimäärin sama kuin lämmönsiirtokerroin samanpaineisen kylläisen höyryn lauhtuessa. Jotta lämmönsiirto tapahtuisi tulistetusta höyrystä lauhtumisena, on höyryn koskettaman pinnan lämpötila oltava höyryn painetta vastaavaa kyllästymislämpötilaa pienempi. Jos tulistuneen höyryn lämpötila on suurempi kuin lämpöpinnan lämpötila ja pinnan lämpötila suurempi

kuin höyryn painetta vastaava kyllästymislämpötila, lämmönsiirto höyrystä pintaan tapahtuu pakkokonvektiona. Pakkokonvektion lämmönsiirtokerroin on selvästi huomppi kuin lauhtumisen avulla saavutettava lämmönsiirtokerroin. Korkeapaine-esilämmittimien höyryn tulistuksenpoisto-osassa lämmönsiirto tapahtuu pakkokonvektiona, ja niissä höyryn nopeus pyritään pitämään tarpeeksi suurena tarvittavan lämmönsiirtokertoimen saavuttamiseksi. Tulistuksen poistossa höyryn jäähdyttämistä ei ole mielekästä viedä pidemmälle kuin, että höyryn tulistus saadaan sille tasolle, josta lämmönsiirto tapahtuu lauhtumisena. Höyrynlauhduttimen painehäviö kun pienentää esilämmittimen lauhdutinosaan lämpötilaeroa. (Holmström 1982, 49–50)

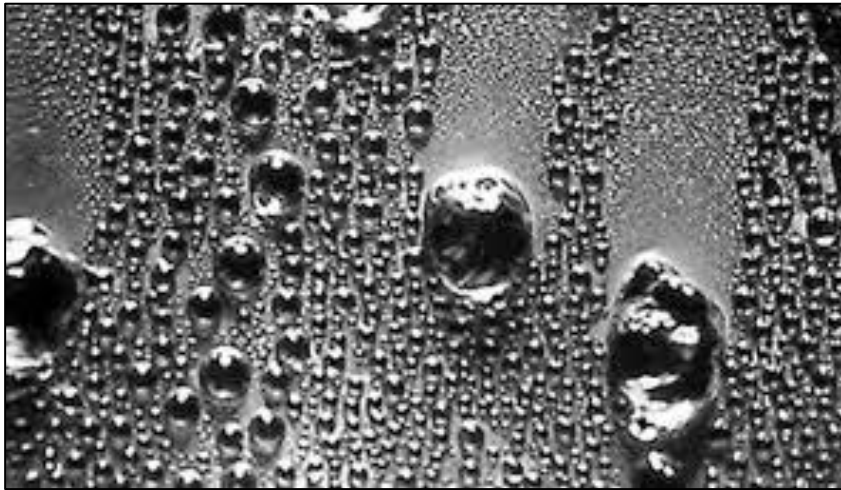
Jos lauhtuvassa höyryssä on pienikin määrä jotakin lauhtumatonta kaasua esim. ilmaa, se kerääntyy lauhdekalvon pinnalle kerrokseksi, jonka läpi höyryn pitää diffundoitua. Lauhtumatonta kaasua lauhdekalvon pinnalla heikentää merkittävästi lämmönsiirron tehokkuutta, ja esimerkiksi miljoonasosalla kaasua on jo suuri vaikutus. Höyryn sisältäessä lauhtumatonta eli tehotonta kaasua, se huonontaa lämmönsiirtoa kahdella tavalla. Höyryn osapaine jää pienemmäksi verrattuna puhtaaseen höyryyn, sillä kokonaispaine muodostuu nyt tehotoman kaasun ja höyryn osapaineista, ja näin ollen vaikuttava lämpötilaero on pienempi. Lauhdekalvon pinnalle muodostuu kaasukerros höyryn lauhtumisesta, mikäli siinä on tehotonta kaasua mukana. Lauhtumatonta kaasua on saatava lämmönsiirtimestä pois joko huuhtelemalla tai imemällä, koska lauhtumisprosessi voi estyä muuten. Kattilalaitokselle lauhtumatonta kaasua pääsee höyryyn lisäveden mukana. Lisävedessä on siihen liuenneita kaasuja, jotka poistetaan pääosin syöttövesisäiliön kaasunpoistajassa, mutta veteen jää kuitenkin osa kaasuista jotka ovat pääosin tyypeä ja noin yhden prosentin verran argonia. Veteen jääneet lauhtumattomat kaasut kerääntyvät paikkoihin missä höyry lauhtuu eli syöttöveden höyryesilämmittimiin, lauhdevoimalan lauhduttimeen ja tehtaan höyrynkuluttajien lämmönsiirtimiin. Kuviossa 15 on esitetty lauhtumatonta kaasua sisältävä lauhdekalvo. Kuvioista nähdään, että lauhtuvan höyryn lauhtumattomien kaasujen osapaine on suurin lauhdekalvon pinnalla, ja lauhtuvan höyryn osapaine ja kyllästymislämpötila ovat vastaavasti pienempiä lauhdekalvon pinnalla. (Wagner 1994, 100; Sarkomaa 2003)



Kuvio 15. Lauhtumaton kaasu lauhdekalvon pinnalla (Wagner 1994, muokattu)

4.2 Pisaralauhtuminen

Pisaralauhtumisessa lauhde kerääntyy seinämän pinnalle pisaroiksi, jotka maan veto-voima tai jokin muu esim. keskipakoisvoima poistavat seinämän pinnalta. Pisaralauhtumisen lämmönsiirtokerroin on erittäin suuri, jopa kymmen kertaa suurempi kuin kalvolauhtumisessa. Pisaralauhtuminen voidaan toteuttaa lämmönsiirtimissä käsittelemällä pinta aineella, joka tekee sen kostumattomaksi. Vedelle tällaisia pinnoitteita ovat muun muassa teflon ja kuparipinnalla dioktadesyylidisulfidi. Kuviossa 16 on pisaralauhtumista pystysuoraan pinnoitettuun kupariseinään. Kuvasta nähdään kuinka suuremmat pisarat valuvat alaspäin seinää pitkin painovoiman vaikutuksesta. (Sarkomaa, 2003)



Kuvio 16. Pisaralauhtumista pinnoitetulla kuparipinnalla (alkup. kuvio ks. VDI Gesellschaft 2010, 934)

Jotta pisaralauhtuminen on mahdollista, täytyy lauhteen ja höyryn rajapinnan pintajännityksen oltava suurempi kuin lämpöpinnan materiaalin kriittinen pintajännitys. Jos näin ei ole, lauhtuminen tapahtuu kalvolauhtumisena. Lämpöpinnan kriittinen pintajännitys riippuu ainoastaan pinnan materiaalista, sekä siinä mahdollisesti olevasta kalvosta. Lämpöpinnan kriittinen pintajännitys onkin raja-arvo, jonka vaikuttaessa lauhde kostuttaa pinnan kokonaan. Promoottirilla eli lämpöpinnalle levitettävällä kemiallisella aineella voidaan saada lämpöpinnan kriittinen pintajännitys, höyryn ja lauhteen rajapinnan pintajännitystä pienemmäksi, jos se ei sitä alun perin ole. Promoottori voidaan levittää lämmönsiirtimen lämpöpinnalle ennen käyttöönottoa tai sitä on höyryn joukossa ja näin ollen promoottori leviää lämpöpinnalle höyryn mukana käytön aikana. (Holmström 1982, 43–44)

5 AspenTech-ohjelmisto

Opinnäytetyössä tutkittiin AspenTech-ohjelmiston Shell & Tube Exchanger ja Mechanical version V8.8.2-osien soveltuvuutta korkeapaine-esilämmittimien lämpötekniseen mitoitukseen ja mekaaniseen suunnitteluun. Shell & Tube Exchanger on työkalu, jolla voidaan tehdä lämpötekninen mitoitus yksittäiselle putkilämmönvaihtimelle. Ohjelma laskee annettujen lähtöarvojen perusteella lämmönvaihtimelle mm.

tehon, tarvittavan lämpöpinnan, lämpöputkien määrän ja pituuden ja paljon muita arvoja. Shell & Tube Exchangerilla lasketut arvot voidaan siirtää AspenTechissä mekaanisen suunnittelun ohjelmistoon eli Mechanicalin puolelle. Shell & Tube Mechanicalilla voidaan lämpöteknisen mitoituksen puolella suunniteltu lämmönvaihdin optimoida mekaanisen suunnittelun kannalta. Mechanical laskee esim. tarvittavan seinämävahvuuden lämmönvaihtimen eri osille ja tarkastaa, onko tietyn osan paksuus riittävä kyseisille lämmönvaihtimessa vallitseville paineille ja lämpötiloille. AspenTech tekee myös vaihtimesta mittakuvia, mutta niiden tulosteet ovat alkeellisella tasolla. Ohjelma myös huomio korroosiovarat ja suorittaa vaihtimelle värähtelytarkastelun. AspenTech antaa myös mitoitettulle vaihtimelle kustannusarvion sen valmistamisesta. Kuviossa 17 on esitetty, miltä AspenTech Shell & Tube-mitoitusohjelmisto näyttää. (Simplify the Most Complex Heat Exchanger Challenges n.d.)



Kuvio 17. AspenTech Shell & Tube Exchanger-ohjelmisto (Simplify the Most Complex Heat Exchanger Challenges n.d.)

AspenTech-ohjelmisto käyttää lämpötekniikan mitoituksen laskennassa HEI- ja TEMA-standardeja. Mekaanisella puolella käytössä on TEMA-standardi, ja painelaitestandardina on valittavissa mm. Amerikkalainen ASME tai Eurooppalainen PED. Materiaalistan- dardista valittavana on esim. ASME, EN/ISO tai DIN. AspenTech-ohjelmalla las- kettaessa voidaan käyttää joko Yhdysvaltalaisia mittayksiköitä tai SI- järjestelmän mukaisia yksiköitä. Yksikönmuunnokset tehdään valikosta vaihtamalla. AspenTech on hyvä ohjelma Sahala Worksille ohjelman käyttämien standardien puolesta. Nykyään putkilämmönvaihtimien suunnittelu perustuu maailmanlaajuisesti yhä vahvemmin HEI- ja TEMA-standardeihin, ja lämmönsiirtimien tilaajat usein vaativat noudatta- maan kyseisiä standardeja. Sahala Worksin intressinä onkin saada heidän tarpeisiinsa sopiva ohjelma, jolla pystyy mitoittamaan etenkin suljettuja syöttöveden esilämmit- timiä, mutta myös muita putkilämmönsiirtimiä, ja joka tukee kyseisiä standardeja. AspenTechin lämpötekniikan ja mekaanisen laskennan yhdistäminen samassa ohjel- massa toimii hyvin Sahalalle varsinkin tarjoutta tehtäessä lämmönsiirtimelle. Tällöin ei tarvitse käyttää ylimääräisiä resursseja lämpötekniikan, lujuustarkastelun ja kus- tannusarvion tekemiseen eri ohjelmistoalustoilla. (AspenTech n.d.; Vehviläinen 2016b)

6 Sahala Worksin vanha mitoitusohjelma Konva

Konva on vanha mitoitusohjelma, jota Sahala Works käyttää mitoittaessaan putki- lämmönsiirtimiä. Ohjelman ensimmäinen versio on tehty aikanaan Ahlströmille 80- luvulla, ja se on DOS-pohjainen ohjelmisto. Sahala Works toimi tällöin vielä Ahlströ- min nimellä. Nykyversio Konvasta toimii PC-koneilla. Konvan etuna on erittäin nopea lämpötekniikan mitoitus lämmönsiirtimelle. Mitoitus on mahdollista tehdä alle 10 minuutissa. Konva antaa myös yleensä luotettavia tuloksia, joiden pohjalta laite- suunnittelu voidaan lämmönsiirtimelle tehdä. (Kuivalainen 2016)

Konvan ongelmana on kuitenkin se, että se ei ota huomioon mitoituksessaan mekaa- nista puolta juuri ollenkaan, toisin kuin esimerkiksi AspenTech. Mekaaninen eli laite- suunnittelu on siis tehtävä kokonaisuudessaan eri menetelmillä esim. käsin laskemal- la tai toisella mitoitusohjelmalla. Tämä on varsinkin tarjousvaiheessa ongelma, kun laskuihin joudutaan käyttämään paljon aikaa ja resursseja, ja tulokset täytyisi saada nopeasti. Toinen ongelma Konvassa on sen vanhuus ja sen laskennassa käyttämät

laskukaavat. Konvan laskentakaavat perustuvat saksalaiseen lämpötekniikan VDI-standardiin, ja siitä erittäin vanhaan versioon. VDI-standardin mukaisia kaavoja on myös Konvaan yksinkertaistettu ja muokattu kokemuksen perusteella. Vaikka ohjelmalla saadaan laskettua luotettavasti vaihdin, joka toimii hyvin käytännössä, olisi yritykselle eduksi tehdä laskenta nykystandardien (TEMA ja HEI) mukaisesti, koska niitä usein vaaditaan tietyiltä asiakkailta. (Vehviläinen 2016b)

7 TEMA, HEI ja VDI standardit

TEMA tulee sanoista Tubular Exchanger Manufacturers Association, eli se on standardi putkilämmönvaihtimien valmistajille. TEMA-standardi on saanut maailmanlaajuisen suosion putkilämmönsiirtimien mekaanisen eli laitesuunnittelun perustana. Viimeisin versio standardista on ilmestynyt vuonna 2007, joka on yhdeksäs painos. Sahalalla on käytössä standardin viimeisin painos. Standardista löytyy kolme eri luokkaa putkilämmönvaihtimille: R-luokka vaativille vaihtimille öljynjalostukseen (ja yleensä sisältäen suuren mittakaavan prosessisovellukset), C-luokka yleisille kaupallisille sovelluksille ja B-luokka kemikaaliprosesseille. Korkeapaine-esilämmittimien TEMA-luokitus on C tai R. (TEMA n.d.; Bell 2011)

HEI on organisaatio, joka on hyväksytty maailmanlaajuisesti lämmönsiirtimien standardien tekijänä. HEI tulee sanoista Heat Exchanger Institute, ja se tekee standardeja useille erityyppisille lämmönvaihtimille mm. putkilämmönvaihtimille, suljetuille syötöveden esilämmittimille, ilmajähdytteisille lauhduttimille ja kuudelle muulle erityyppille. HEI-standardit tarjoavat tietoa lämmönsiirtimien nimikkeistöstä, mitoituksesta, testauksesta ja suorituskyvystä. Sahala Worksilla on käytössä HEI-standardi voimalaitoksen lämmönvaihtimille (Standards for Power Plant Heat Exchangers), joka on neljäs painos vuodelta 2004. (HEI n.d.)

VDI-standardeja on paljon erilaisia, ja ne ovat saksalaisten insinöörien tekemiä. VDI-standardeista Sahala Worksilla ei ole tarvetta, kuin lämpötekniikan standardille. VDI lämpötekniikan kirja on englanniksi VDI Heat Atlas ja saksaksi Wärmeatlas, ja siitä löytyy kaikki tarvittavat laskentakaavat ja menetelmät lämmönsiirrolle. VDI-standardilla saattaa Sahalalla tulevaisuudessa olla tarvetta, jos haluaa tarkastaa jotain lämmönsiirtoon liittyviä laskuja jälkikäteen. VDI Heat Atlaksen uusin painos on

ilmestynyt vuonna 2010 ja saksankielinen 2013. Sahala Worksilla on vanha painos 60-luvulta johon laskentaohjelmisto Konvan laskumenetelmät perustuvat. (VDI Standards and their significance n.d.)

8 Korkeapaine-esilämmittimen mitoitus

Lämpötekniikan mitoituksen tavoitteena korkeapaine-esilämmittimille ja myös muillekin lämmönvaihtimille on saada minimoitua vaihtimen lämpöpinta. Mitä pienempi on vaihtimen lämpöpinta, sitä pienemmäksi saadaan lämmönsiirtimen rakenne. Pienempään rakenteeseen pyritään, kokonaistaloudellisesta näkökulmasta ja sen tuottamasta kilpailukykyä. Lämpötekniikassa mitoituksessa tulee ottaa huomioon, ettei painehäviö kasva liian suureksi putkipuolella syöttövedessä eikä vaippapuolella lauhduttavassa höyryssä. (Kuivalainen 2016)

Lämpötekniikan mitoituksen jälkeen siitä saaduilla arvoilla voidaan suorittaa laitesuunnittelu eli lämmönsiirtimen mekaaninen mitoitus. Laitesuunnittelussa keskitytään lämmönsiirtimen lujustekniiseen tarkasteluun ottaen huomioon käytetyn painelaitestandardin vaatimukset. Käytetty standardi riippuu asiakkaan vaatimuksesta, ja yleensä se on EN/PED-painelaitedirektiivin (Pressure Equipment Directive) tai ASME-standardin (Boiler and Pressure Vessel Code) mukainen. Laitesuunnitteluun kuuluu myös laatia yksityiskohtaiset työpiirustukset tarjouskuvista, osaluettelot ja hitsaustyöhön tarvittavat tarkastusluettelot. Sahala Worksilla on nyt käytössä laitesuunnitteluun virallisesti hyväksytty VVD-mitoitusohjelmisto (Visual Vessel Design). VVD:llä suunnitellaan ja analysoidaan painelaitteita, putkilämmönvaihtimia ja kattiloita, ja se tuntee useita eri standardeja, mm. EN13480, PD5500 ja ASME Section VIII. VVD:llä ei kuitenkaan voida tehdä lämpötekniistä mitoitusta. (Intergraph Visual Vessel Design n.d.; Vehviläinen 2016a)

Tässä opinnäytetyössä keskityttiin pääosin korkeapaine-esilämmittimen lämpötekniiseen mitoitukseen. Tutkittiin kuinka AspenTech Shell & Tube-ohjelmisto kykenee mallintamaan asiakkaalta saatujen lähtötietojen perusteella perusmallisen korkeapaine-esilämmittimen. Perusmallilla tarkoitetaan esilämmitintä, johon ei tule sivulauhdetta toisesta vaihtimesta. AspenTech-ohjelmisto mahdollistaa tarjous- ja myyntivaiheessa kolmen asian yhdistämisen, jotka ovat lämpötekniikka, lujustarkastelu ja kustan-

nusarvio. Sahala Works tekee nämä tarkastelut tällä hetkellä eri ohjelmistoalustoilla. Tämä vie ylimääräisiä resursseja. Tarjousliitteenä oleva tarjouspiirustus joudutaan kuitenkin toteuttamaan eri ohjelma-alustalla kuin AspenTechillä esimerkiksi AutoCadilla (nykyään käytössä Sahalalla), koska AspenTechin tuottamat piirustukset ovat visuaalisesti liian alkeellisella tasolla. Tarjouspiirustuksista vastaa myös laitesuunnittelu, eikä niihin oteta tässä työssä sen enempää kantaa kuin, että AspenTechin tuottamia kuvia ei voida käyttää tarjousliitteenä.

Työssä arvioidaan AspenTech-ohjelmistolla Sahala Worksin määrittämän esimerkin avulla, kuinka lähelle lopputuloksessa päästään verrattuna nykyisellä ohjelmalla tehtyyn lämpötekniseen mitoitukseen. Konvalla laskettujen arvojen tiedetään toimivan käytännössä eli pyritään suurin piirtein samaan vaihtimen kokoon ja lämpöpinnan määrään. Lämpöteknisen mitoituksen pohjalta tuli tehdä myös AspenTechillä vaihtimelle mekaaninen tarkastelu, jotta nähtiin osaako ohjelmisto laskea käytetyn painelaitestandardin mukaisesti oikeat arvot vaihtimelle, esim. vaipan seinämän vahvuus jne. Lisäksi tarkastellaan AspenTechin antamaa kustannusarviota esilämmittimestä, kuinka lähellä se on Sahala Worksin aikaisemmin määrittämää kustannusarviota. Liitteessä 2 on Konvalla lasketut tulokset sekä tarjouskuva vaihtimesta. Vaikka AspenTechin laskenta käyttää standardien mukaisia kaavoja (laitesuunnittelu), se soveltuu oikeastaan vain budjettiluontoiseen tarkasteluun, koska ohjelmalla ei ole mahdollisesti virallista statusta/hyväksyntää tarkastuslaitosten kannalta katsottuna. Toimitusprojekteihin liittyvä painelaitelaskenta on siis myös tehtävä jatkossakin muulla ohjelmistolla (VVD, Compress, PVElite jne.) tarjousvaiheen jälkeen vaikka AspenTech antaisikin oikean suuntaisia tuloksia. (Vehviläinen 2016a)

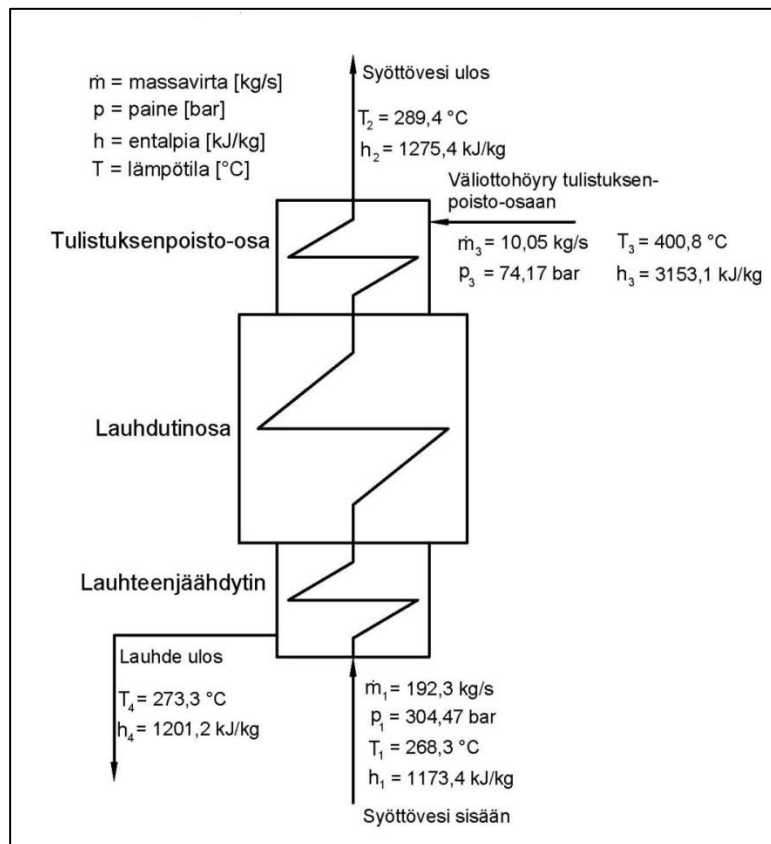
8.1 Asiakkaalta saadut lähtötiedot

Korkeapaine-esilämmittimen mitoitus lähtee liikkeelle asiakkaalta saatavilla lähtötiedoilla. Kuviossa 18 on esitetty, mitä lähtötietoja yleensä asiakkailta tulee, ja myös lähtöarvot, joita esimerkkivaihtimen mitoituksessa on käytetty. Vaihtimeen sisään menevästä syöttövedestä ja turbiinilta tulevasta väliottohöyrystä tiedetään massavirta, paine, lämpötila ja niistä saatava entalpia. Vaihtimesta ulostulevasta syöttövedestä ja lauhteesta tiedetään lämpötila ja entalpia. Saatavat lähtötiedot voivat vaihdella projektista riippuen, mutta nämä arvot ovat yleisimpiä. Esimerkiksi entalpia-arvoja ei

välttämättä ole ilmoitettu asiakkaan puolesta, mutta ne on helppo tarkastaa höyrytaulukosta. AspenTech-ohjelmistoon ei tosin veden entalpia-arvoja tarvitakaan, kun ohjelmassa on sisäänrakennetut höyrytaulukot.

Asiakkaalta tulee myös lämpöteknistä mitoitus- ja mekaanista suunnittelua määritteleviä tekijöitä:

- Putkipuolen sallittu painehäviö, joka on normaalisti noin puolen barin tietämissä.
- Vaippapuolen sallittu painehäviö voi olla ilmoitettu. Tämän ei ole suotavaa olla enempää kuin 0,345 baria minkään yksittäisen vaihtimen eri osan yli (tulistuksenpoisto, lauhdutin ja lauhteenjäähdytin). (Yokell ym. 2014, 374)
- Putkipuolelle on määritelty veden maksiminopeus. Jos tätä ei ole annettu, on hyvä lähteä liikkeelle arvosta 1,8 m/s, ja katsoa ylittyykö sallittu putkipuolen painehäviö. (Kuivalainen 2016)
- Onko esilämmitin makaava vai pystyssä.
- Suunnittelulämpötila.
- Minkä standardin/standardien mukaan esilämmittimen suunnittelu tulee tehdä.



Kuvio 18. Kp-esilämmittimeen asiakkaalta saatavat lähtötiedot

Lisäksi Sahala Worksin esimerkin kp-esilämmittimeen maksimi putkipuolen painehäviö saa olla 0,7 bar ja maksimi veden nopeus putkipuoella saa olla 1,8 m/s. Liitteessä 1 on tarkemmat tiedot esimerkkinä käytetystä korkeapaine-esilämmittimestä ja täytetty tietolomake.

8.2 Lämpötekniinen mitoitus Konvalla

Vertailun vuoksi työssä tarkasteltiin kp-esilämmittimen lämpötekniisen mitoituksen toteutusta myös Konva ohjelmistolla. Esimerkkivaihdinhan (ks. liite 1) on mitoitettu kyseisellä ohjelmistolla. Taulukossa 4 on tiedot, jotka tarvitaan lämpötekniiseen mitoitukseen Konvalla.

Taulukko 4. Konvaan tarvittavat lähtötiedot

Lähtötieto	Yksikkö	Huom!
Rakenne: Kp, mp, klv tai muu		Korkeapaine-esilämmittimelle kp
Höyryn tulolämpötila	°C	Täytyy valita laskeeko lämpötilalla vai entalpialla
Höyryn tuloentalpia	kJ/kg	Täytyy valita laskeeko lämpötilalla vai entalpialla
Lauhteen poistolämpötila	°C	
Höyryn tulopaine	bar	
Höyryn massavirta	kg/s	
Sivulauhteen tulolämpötila	°C	Jos ei sivulauhdetta, tämä ohitetaan
Sivulauhteen tulopaine	bar	Jos ei sivulauhdetta, tämä ohitetaan
Sivulauhteen massavirta	kg/s	Jos ei sivulauhdetta, tämä ohitetaan
Syöttöveden tulolämpötila	°C	
Syöttöveden lähtölämpötila	°C	
Syöttöveden paine	bar	
Syöttöveden massavirta	kg/s	
Putkiseinämän lämmönjohtavuus	W/m*K	Materiaali hiiliteräs, arvo 48
Putken ulkohalkaisija	mm	Täytyy valita itse
Putken seinämänpaksuus	mm	Täytyy valita itse
Putkijako	mm	TEMA standardi
Putkipuolen nopeus	m/s	Max. 1,8
Leikkausprosentti, tulistuksen poisto-osa	%	Sahala Works
Leikkausprosentti, lauhteenjäähdytysosa	%	Sahala Works
Likakerroin	m ² *K/W	HEI standardi
Pysty/vaakamalli		
Tukilevyn etäisyys	mm	TEMA standardi
Sallittu putkipuolen painehäviö	bar	

Laskennassa väliottohöyrystä voidaan käyttää joko höyryn tulolämpötilaa tai tuloentalpiaa, mutta suositeltavaa olisi käyttää entalpia-arvoa. Perusmallin korkeapaine-esilämmittimeen ei tule sivulauhdetta toisesta vaihtimesta, joten sivulauhteen arvot voidaan ohittaa. Kp-esilämmittimien putkien materiaali on aina hiiliteräs, jonka lämmönjohtavuus on $48 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (Kuivalainen 2016). Putkien ulkohalkaisija tulee valita itse insinöörin silmällä mitoitusta varten. Yleisimpiä kokoja putkille on 16, 18 tai 20 mm, ja kokeilemalla eri halkaisijoita haetaan paras tulos. Putkien seinämävahvuuden voisi määrittää painelaitestandardin mukaan, mutta Sahala Worksilla on niin paljon kokemusta asiasta, että esimerkiksi tiedetään 18 mm ulkohalkaisijaltaan olevalle putkelle, hyvä seinämän vahvuus on 2,2 mm. Putkijaolle on TEMA-standardissa määriteltä miniarvot, joka on 1,25 kertaa putken ulkohalkaisija. Jos putken ulkohalkaisija on pienempi kuin 15,9 mm, kerroin on 1,2 (TEMA 2007, 5.2-3). Putkipuolen veden nopeudelle on HEI-standardissa annettu hiiliteräkselle maksiminopeus $2,44 \text{ m/s}$ (HEI 2004, 5), mutta käytännössä ei ole suotavaa, että nopeus olisi enemmän kuin $1,8 \text{ m/s}$. Painehäviö kasvaa liian suureksi, liian nopealla virtauksella. Lauhteen likakertoimelle on HEI-standardissa annettu alue, joka on $5,3 \cdot 10^{-5} - 1,76 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ (HEI 2004, 3). Mitä suuremmalla likakertoimella laskee, sitä suuremmaksi vaihtimen rakenne kasvaa. Optimaaliset leikkausprosentit tulistuksen poisto-osalle ja lauhteenjäähdyttimelle ovat määritelleet Konvaan Sahala Worksin henkilöstö. TEMA-standardissa on määritetty maksimivälit tukilevyille, jotka ovat kuviossa 19. Tämä ei kuitenkaan ota huomioon värähtelyjä, joten tukilevyjä on syytä olla tiheämmin.

MAXIMUM UNSUPPORTED STRAIGHT TUBE SPANS		
Dimensions in Inches (mm)		
Tube OD	Tube Materials and Temperature Limits ° F (° C)	
	Carbon Steel & High Alloy Steel, 750 (399) Low Alloy Steel, 850 (454) Nickel-Copper, 600 (316) Nickel, 850 (454) Nickel-Chromium-Iron, 1000 (538)	Aluminum & Aluminum Alloys, Copper & Copper Alloys, Titanium Alloys At Code Maximum Allowable Temperature
1/4 (6.4)	26 (660)	22 (559)
3/8 (9.5)	35 (889)	30 (762)
1/2 (12.7)	44 (1118)	38 (965)
5/8 (15.9)	52 (1321)	45 (1143)
3/4 (19.1)	60 (1524)	52 (1321)
7/8 (22.2)	69 (1753)	60 (1524)
1 (25.4)	74 (1880)	64 (1626)
1-1/4 (31.8)	88 (2235)	76 (1930)
1-1/2 (38.1)	100 (2540)	87 (2210)
2 (50.8)	125 (3175)	110 (2794)

Kuvio 19. Tukilevyjen maksimiväli (TEMA 2007, 5.4-5)

Kuviossa 20 on laskettu Konvalla kuvitteellisilla arvoilla korkeapaine-esilämmitin. Kuviossa nähdään, mitä tuloksia ohjelmistolla saadaan. Konva esimerkiksi määrittää jokaiselle vaihtimen osalle erikseen tehot, lämpöpinnat, teholliset pituudet ja paljon muuta.



Kuvio 20. Konvalla laskenta

Tämän pidemmälle ei voi Konvalla lämmönvaihdinta suunnitella, ja tästä lämpötekni-
sestä mitoituksista saatavat tulokset annettaisiin laitesuunnitteluun, joka suorittaisi
vaihtimen mitoituksen loppuun. Liitteessä 2 on tämän työn Sahala Worksin valitse-
man esimerkin lämpötekni-
sestä mitoituksen tulokset Konvasta ja tarjouskuva vaihti-
mesta. Liitteen 2 tuloksia on käytetty AspenTech laskennan vertailupohjana.

8.3 Korkeapaine-esilämmittimen mitoitus AspenTechillä

Korkeapaine-esilämmittimen suunnittelua AspenTechillä hankaloittaa vaihtimessa olevat eri osat (tulistuksenpoisto-osa, lauhdutinosa ja lauhteenjäähdytin). AspenTech ohjelmalla täytyy tehdä lämpötekniinen tarkastelu jokaiselle osalle erikseen. Tulistuksen poisto-osa, lauhdutinosa ja lauhteenjäähdytin on siis mielletävä lämpötekniisen mitoituksen aikana omina lämmönvaihtiminaan, ja mitoitettava erillisissä tiedostoissa. Mekaanisessa mitoituksessa saadut tulokset sitten yhdistetään yhdeksi vaihtimeksi. Lauhdutinosan mallia kasvatetaan Mechanical puolella ottaen huomioon lämpötekniisestä mitoituksesta saadut putkipituudet tulistuksenpoisto-osalle ja lauhteenjäähdyttimelle. Näin saadaan mallinnettua karkeasti korkeapaine-esilämmitin kokonaisuudessaan, vaikka AspenTech ei kykene suorittamaan lämpötekniistä mitoitusta samanaikaisesti kaikille vaihtimen osille.

Mitoituksen selkeyttämiseksi ja nopeuttamiseksi AspenTechillä, kannattaa tarvittavat lähtötiedot taulukoida. Taulukossa 5 on Sahalan esimerkin kp-esilämmittimen prosessitiedot ja taulukossa 6 esilämmittimen suunnitteluarvot jokaiselle osalle erikseen. Taulukoiden 5 ja 6 tiedoilla lähdetään vaihtimen eri osia suunnittelemaan.

Taulukko 5. Esimerkkivaihtimen prosessitiedot

	Väliottohöyry	Syöttövesi
Massavirta [kg/s]	10,05	192,3
Lämpötila sisään/ulos [°C]	400,8/273,3	268,3/289,4
Sallittu painehäviö [bar]	0,345	0,7
Likakerroin [$m^2 \cdot K/W$]	0,00008 (0,0 lauhttimelle)	0,00008

Taulukko 6. Esimerkin suunnitteluolosuhteet

	Tulistuksenpoisto	Lauhdutin	Lauhteenjäähdytin
Höyryn tulolämpötila [°C]	400,8	324,77	289,55
Höyryn/lauhteen poistolämpötila [°C]	324,77	289,55	273,3
Syöttöveden tulolämpötila [°C]	286,65	269,3	268,3
Syöttöveden poistolämpötila [°C]	289,4	286,65	269,3
Vaippapuolen tulopaine [bar]	74,17	73,93	73,92
Putkipuolen tulopaine [bar]	303,92	304,32	304,47
Vaippapuolen sallittu painehäviö [bar]	0,24	0,01	0,05
Putkipuolen sallittu painehäviö [bar]	0,15	0,4	0,15
Vaippapuolen likakerroin [m ² *K/W]	0,00008	0	0,00008
Putkipuolen likakerroin [m ² *K/W]	0,00008	0,00008	0,00008

Putkipuolella vaihtimen painehäviö kokonaisuudessaan saa olla asiakkaan vaatimuksesta 0,7 bar, ja eri osien välille sallittu painehäviö on jaettu siten, että lauhdutinosalta painehäviö on suurin. Vaippapuolelle on päätetty eri osien painehäviöt ottamalla mallia AspenTechin sisäisestä manuaalista niin, että tulistuksenpoisto-osalle on suurin häviö ja lauhdutinosalta ei ole painehäviötä käytännössä laisinkaan. Tiedetään ettei ole suotavaa, että vaippapuolella painehäviö on enemmän kuin 0,345 bar minäkään yksittäisen osan yli (Yokell ym. 2014, 374), mutta käytännössä pyritään pienempiin painehäviöihin esilämmittimen toiminnan varmistamiseksi. Painehäviöiden perusteella saadaan tulo- ja poistopaineet jokaiselle eri osalle määritettyä.

Tulistuksenpoisto-osa on suunniteltava siten, ettei tulohöyryn lämpötila laske siinä lauhtumislämpötilaan. Tulistuksenpoisto-osassa ei saa lauhtumista tapahtua, koska pisarat voisivat aiheuttaa eroosiota suuren höyryn nopeuden takia. Hyvä arvio höyryn poistolämpötilalle tulistuksenpoisto-osasta on lauhtumislämpötila kyseisessä paineessa plus 35 °C (AspenTech 2013). Lauhdutinosasta lähtevän lauhteen lämpötila saadaan, kun katsotaan höyrytaulukosta, mikä on kylläisen höyryn lämpötila 73,93 barissa, joka on 289,55 °C. Syöttöveden lämpötilan nousu eri osien välillä on arvioitu lauhtuvan höyryn arvojen perusteella. AspenTech antaa varoituksen, jos kuumen ja kylmän virran tehot eroavat liikaa toisistaan, ja tällöin lähtöarvoja on syytä muokata.

8.3.1 Lauhdutinososa

Vaihtimen mitoitus aloitetaan lauhdutinosasta, AspenTechin Design työkalulla. Design työkalu laskee lämmönvaihtimen koon annettujen prosessitietojen perusteella. Lauhduttimelle valitaan TEMA-rakenne BXU. B tarkoittaa kiinteää päätyä, X on risti-virtausvaippa ja U on U-putkinippupääty (HEI 2004, 66–72). Tärkeää on laittaa putkipuolelle kauttakulkujen määräksi 2. Maksiminopeus putkissa on asetettava arvoon 1,8 m/s. Asetuksista valitaan myös haluttu painelaitestandardi laskennalle. Erityisen tärkeää on valita oikea ohjelman käyttämä höyrytaulukko, koska esimerkissä on korkeat paineet ja lämpötilat, joten höyryn ja veden arvojen on oltava riittävän tarkkoja laskennan onnistumiseksi. Maksimi paine- ja lämpötila-arvot valitaan tulistuneen höyryn perusteella. Kun Design-työkalulla on saatu vaihtimelle laskettua rakenne, vaihdetaan ohjelma Rating/Checking tilaan. Rating/Checking työkalulla arvioidaan, kuinka paljon yli tai ali vaihtimen lämpöpinta on prosessin tarpeelle. Tässä tilassa vaihdinta optimoidaan ja pyritään saamaan pinta-alasuhde lähelle ykköstä rakennetta muuttamalla. Lauhdutinosan laskennan tulokset ovat liitteessä 3.

8.3.2 Tulistuksenpoisto-osa

Tulistuksenpoisto-osa suunnitellaan kokonaan Rating/Checking tilassa. Suunnitteluun ei käytetä Design työkalua, koska putkimääränä on käytettävä puolta siitä määrästä mitä lauhdutinosassa on. Putkimäärä on siis se, mitä lauhdutinosan yhdessä kauttakulussa on. TEMA-rakenteeksi tulistuksenpoisto-osalle valitaan BEM. E tarkoittaa yhden kauttakulun vaippaa ja M on kiinteä pääty (HEI 2004, 66–72). Vaipan halkaisija valitaan siten, että haluttu putkimäärä mahtuu vaipan sisään. Ohjelma antaa varoituksen, jos valittu vaipan halkaisija ei ole tarpeeksi suuri putkimäärään nähden. Maksiminopeudet putkipuolella, laskentastandardit, höyrytaulukko ja maksimi paine- ja lämpötila-arvot valitaan samoin kuin lauhdutinosalle. Pinta-alasuhde pyritään saamaan lähelle ykköstä. Välilevyjen määrää valittaessa on huomioitava, ettei vaippapuolen painehäviö kasva liian suureksi. Värähtelyn pienentämiseksi voidaan käyttää värähtelyä vaimentavaa välilevyä. Tulistuksenpoisto-osan laskennan tulokset ovat liitteessä 3.

8.3.3 Lauhteenjäähdytin

Lauhteenjäähdytin suunnitellaan samalla tavalla, kuin tulistuksenpoisto-osa. Vaakatasossa olevat välilevyt tiheillä väleillä johtaa yleensä parempiin tuloksiin, mutta painehäviöihin on kiinnitettävä huomioita. Lauhteenjäähdyttimen laskennan tulokset ovat liitteessä 3.

Kun kaikki korkeapaine-esilämmittimen osat on mallinnettu Simulation työkalulla voidaan arvioida, mitkä syöttöveden ja höyryn/lauhteen poisto-olosuhteet on saavutettavissa kyseisten osien malleilla.

8.3.4 Mekaaninen suunnittelu

AspenTechin Mechanical osiossa yksittäin suunnitellut vaihtimen osat yhdistetään. Tämä tapahtuu siten, että lauhdutinosaan lämpötekniikan laskennan tulokset siirretään Mechanical osioon, ja putkipituutta kasvatetaan tulistuksenpoisto-osasta ja lauhteenjäähdyttimestä saatujen pituuksien verran. Mechanical ohjelmalla ei ole mahdollista yhdistää täydellisesti kaikkia kolmea osaa. Esimerkiksi välilevyjä ei pysty laittamaan vaihtimen eri osille oikein. Mechanical ohjelmalla varmistetaan, että esim. vaipan paksuus tulee käytetyn painelaitestandardin mukaisesti ja yhteet ovat standardin mukaisesti laskettu. Mechanicalin tärkeitä ominaisuuksia on vaihtimen osaluettelon ja työpiirustuksien luonti. Dokumentit helpottavat laitesuunnittelua jatkossa.

AspenTech Mechanical ei suostunut laskemaan esimerkin mukaista kp-esilämmitintä, useista yrityksistä huolimatta. Syitä tähän on mietitty pohdintaosiossa.

8.3.5 Tulokset

AspenTechin lämpötekniikan laskennan yhteenveto ja vertailu Konvan antamiin tuloksiin esimerkkivaihtimesta löytyy liitteestä 4. AspenTechin ja Konvan määrittämät tehot vaihtimen eri osille vastaavat hyvin toisiaan, ja eroa ei ole maksimissaan kuin vajaa 10 % tulistuksenpoisto-osien välillä. Kokonaisteho vastaavasti eroaa vain vajaa pari prosenttia. Lämpöpinnan määrä osien välillä taas eroaa huomattavasti enemmän. Lauhdutinosaan AspenTechin määrittämä lämpöpinta on merkittävästi suurempi kuin Konvalla laskettu arvo. Tulistuksenpoisto-osan ja lauhteenjäähdyttimen Aspen-

Techin laskemat lämpöpinnat ovat huomattavasti pienemmät verrattuna Konvan tuloksiin. Kokonaislämpöpinnan määrä oli noin 10 % suurempi AspenTechin laskennassa. Lämpöpinnan määrä on tärkein vaihtimen mitoitusarvo. Mitä suurempi on lämpöpinta, sitä suurempi on vaihtimen rakenne ja hinta. Koska lämpöpinnan määrä on suurempi AspenTechin tuloksissa luonnollisesti myös putkimäärä ja putkien pituus ovat suuremmat. Putkipuolella syöttöveden painehäviöt ja nopeudet vastasivat hyvin toisiaan ohjelmien välillä. Vaippapuolella AspenTechin laskuissa painehäviöt jäivät paljon pienemmiksi sallituista arvoista. Häviöiden olisi hyvä olla suuremmat, koska se tietäisi tehokkaampaa vaihdinta.

Tärkeä ominaisuus AspenTechissä on värähtelyn/resonoinnin laskenta lämpötekni- sen laskennan yhteydessä. Liitteen 3 tuloksista nähdään, ettei värähtely aiheuta ongelmaa minkään yksittäisen kp-esilämmittimen osaan. Ei voida kuitenkaan varmasti sanoa, mikä on kaikkien kolmen osan yhteisvaikutus, ja onko värähtelyongelmaa todellisuudessa. Kustannusarviot ovat liitteessä 4. AspenTechin kustannusarvio on otettu lauhdutinosaan lämpötekni- sen laskennan yhteydessä olevasta karkeasta suuntaa antavasta kustannuksesta, koska AspenTech Mechanical ei suostunut laskemaan esimerkiksi vaihdinta. Vaikka AspenTechin kustannusarviossa on huomioitu vain lauhdutinosa, se on silti 71 % suurempi kuin vertailuarvo.

8.3.6 Toinen esimerkki

Koska valitun esimerkin laskennassa ei päästy haluttuun tulokseen, katsottiin järkeväksi tarkastaa minkälaisia tuloksia Konva-ohjelmisto antaa lämpötekni- selliselle AspenTechin manuaalista löytyvälle syöttöveden esilämmittimelle, ja katsoa kuinka tulokset vertautuvat keskenään. Tämä manuaalista löytyvä esilämmitin kuuluu ohjeeseen, jossa neuvotaan mallintamaan syöttöveden esilämmitin AspenTech Shell & Tube-ohjelmistolla, joten sen lopputuloksien oletetaan olevan suhteellisen oikein. Tämän vaihtimen lähtöarvot ovat taulukossa 7.

Taulukko 7. AspenTech manuaalin esilämmittimen lähtötiedot

Prosessitiedot			
	Väliottohöyry	Syöttövesi	
Massavirta [kg/s]	16,81	333,3	
Lämpötila sisään/ulos [°C]	399/230,3	226,9/250,7	
Sallittu painehäviö [bar]	0,345	0,62	
Likakerroin [m ² *K/W]	0,00005 (0,0 lauhduttimelle)	0,00004	
Suunnittelutiedot			
	Tulistuksenpoisto	Lauhdutin	Lauhteenjäähdytin
Höyryn tulolämpötila [°C]	399	287,1	251,4
Höyryn/lauhteen poistolämpötila [°C]	287,1	251,4	241,4
Syöttöveden tulolämpötila [°C]	247,7	228	226,9
Syöttöveden poistolämpötila [°C]	250,7	247,7	228
Vaippapuolen tulopaine [bar]	41	40,8	40,8
Putkipuolen tulopaine [bar]	89,7	89,9	90
Vaippapuolen painehäviö [bar]	0,17	0	0,01
Putkipuolen painehäviö [bar]	0,09	0,26	0,09
Vaippapuolen likakerroin [m ² *K/W]	0,00005	0	0,00005
Putkipuolen likakerroin [m ² *K/W]	0,00004	0,00004	0,00004

Lämpöteknisen laskennan tulokset molemmilla ohjelmilla on liitteessä 5. Tässä AspenTechin manuaalin vaihtimessa kokonaislämpöpinnan määrät vastaavat paremmin toisiaan eron ollessa AspenTechin laskennassa noin 3 % suurempi. Toisaalta tulistuksenpoisto-osan lämpöpinnan määrä AspenTechillä on merkittävästi pienempi ja lauhteenjäähdyttimen erittäin paljon suurempi kuin Konvan laskennassa. Kahden eri lämmönsiirtimen laskujen perusteella voidaan sanoa, että eri vaihtimen osien välillä voi olla todella suuriakin eroja lämpöteknisessä laskennassa.

AspenTech Mechanical oletetusti laskee manuaalin esilämmittimen mekaanisen laskennan. Mechanicalin antamia tuloksia on liitteessä 6 piirustuksien muodossa. Tässä esilämmittimessä Mechanical antoi suhteellisen hyviä tuloksia, ja sen antamia piirustuksia, osaluetteloa ja kustannusarviota voisi jatkossa hyödyntää laitesuunnittelussa.

9 Pohdinta

Valitun korkeapaine-esilämmittimen laskennassa ei päästy aivan odotettuihin tuloksiin AspenTechillä lämpöteknisessä laskennassa eikä mekaanisessa suunnittelussa. AspenTechin ja Konvan välillä oli esim. lämpöpinnoissa todella suuria eroja joissain vaihtimen eri osissa. Mekaaninen suunnittelu epäonnistui täysin Sahala Worksin valitseman esimerkin osalta, kun AspenTech Mechanical ei suostunut mallintamaan esilämmitintä laisinkaan. Tähän saattoi olla myös syynä kiireellinen aikataulu ja suppea kokemus ohjelman käytöstä.

AspenTechin manuaalista löytyvän esilämmittimen mekaaninen mitoitus sen sijaan onnistui suhteellisen hyvin, ja sen antamia tuloksia voisi hyödyntää laitesuunnittelussa. Mechanicalin antamat tulokset eivät ole kuitenkaan täydellisiä, koska korkeapaine-esilämmittimen lauhdutinosa, tulistuksenpoisto-osa ja lauhteenjäähdytintä ei pysty AspenTechillä yhdistämään riittävällä tasolla kokonaiseksi kp-esilämmittimeksi. AspenTech-ohjelmiston tekemä värähtelytarkastelu on erittäin hyödyllinen. Sen tekeminen muutoin on erittäin työlästä ja aikaa vievää.

Sahala Worksin esimerkissä lämpötekni- sen laskennan tuloksissa oli jonkin verran eroa ohjelmien välillä, ja osittain niitä voidaan selittää laskentamenetelmien eroilla ohjelmien välillä. AspenTechin lämpötekni- sten laskujen tuloksissa oli kuitenkin muutama asia jotka kiinnittivät huomion. Vaippapuolen painehäviöille oli jokaiseen vaihtimen osaan määritelty maksimi- arvot, mutta tuloksista kävi ilmi, etteivät lasketut häviöt olleet lähelläkään asetettuja maksimi- arvoja. Suurempi painehäviö parantaisi lämmönsiirtoa. Putkipuo- lella painehäviöt olivat AspenTechin ja Konvan välillä suurin piirtein samat. AspenTech antoi myös laskennan yhteydessä varoituksia liian suurista paineista varsinkin syöttöveden osalta, mikä on voinut vaikuttaa tuloksiin. Lämpö- tekni- sen laskennassa AspenTech määrittä- liian suuren vaipan vaihtimelle verrattuna putkiryhmän kokoon, ja vaipan ja putkien väliin jäi tarpeettoman suuri tyhjä tila. Tämä vaikutti todennäköisesti siihen, ettei mekaaninen laskenta onnistunut. Kustan- nusarvio meni ainakin osittain väärin liian suuren vaihtimen halkaisijan vaipan takia.

AspenTechin manuaalin mukaisen syöttöveden esilämmittimen laskenta toimi odote- tusti huomattavasti paremmin sekä lämpötekni- sen, että mekaanisen laskennan osalta. Konvan ja AspenTechin välillä oli silti suuria eroja tuloksissa, varsinkin tulistuksen-

poisto-osassa ja lauhteenjäähdyttimessä. Oletettavasti tämän esimerkin pienemmät paineet ja lämpötilat takasivat laskennan paremman onnistumisen. Molempien esimerkkien tuloksiin lauhteenjäähdyttimen osalta vaikuttaa todennäköisesti se, että Konva mitoittaa lauhteenjäähdyttimen putkien lukumäärän, pituuden ollessa koko vaihtimen mittainen ja AspenTechillä mitoitus tapahtuu manuaalisissa olevien ohjeiden mukaan toisin päin. Käytettävissä olevan ajan puitteissa ei ollut mahdollista suorittaa AspenTechin lauhteenjäähdyttimen laskentaa Konvan mallin mukaan.

AspenTech Shell & Tube-ohjelmistolla ei pystynyt yhdistämään korkeapaine-esilämmittimen kolmea eri osaa kokonaisuudessaan, mutta AspenTechiltä löytyy tähän tarkoitukseen oma ohjelma: Aspen FRAN. Kyseinen ohjelma on tarkoitettu nimenomaan syöttöveden esilämmittimille, ja sillä pystyisi mm. mitoittamaan, simuloimaan ja tekemään värähtelytarkastuksen esilämmittimille, joissa on useampi kuin yksi osa. Ohjelma vaatii kuitenkin oman lisenssinsä, eikä sitä ollut mahdollista käyttää. (Aspen FRAN n.d.)

AspenTech Shell & Tube-ohjelmistoa olisi järkevintä kokeilla ensin yksinkertaisemmalla lämmönsiirrintyyppillä. Tällainen vaihdin voisi olla esimerkiksi lauhtutin, jossa kylläinen höyry lauhtuu, ja lauhde poistuu kylläisenä vetenä. Kun yksinkertaisen vaihtimen mitoitukselta on saatu lupaavia tuloksia, voidaan sen jälkeen siirtyä monimutkaisempiin rakenteisiin. Muita AspenTechin kaltaisia lämmönsiirtimien suunnitteluohjelmia, joiden toimivuutta kp-esilämmittimen mitoituksessa voisi testata, on esim. HTRI Xchanger Suite ja S&THex – Shell and Tube Heat Exchanger Design.

Kokonaisuudessaan työ oli mielenkiintoinen ja haastava. Käytettävissä olleen ajan puutteen vuoksi AspenTechillä ei keritty tekemään tarkastelua yksinkertaisemmalle lämmönsiirtimelle kuin korkeapaine-esilämmittimelle, eikä ohjelman mekaanisen laskennan tulosten tarkastelua saatu vietyä halutulle tasolle. Vaikka AspenTechillä ei tämän työn puitteissa päästy haluttuihin tuloksiin lämpötekniikan mitoituksen ja mekaanisen suunnittelun osalta kp-esilämmittimellä, ei ohjelman suhteen ole vielä syytä luovuttaa. AspenTechin hyödyt laitesuunnitteluun sen toimiessa oikein ovat niin suuret, että olisi hyvä lähteä aluksi liikkeelle yksinkertaisemmasta vaihtimesta, ja selvittää toimiiko ohjelma siinä.

Lähteet

- Anttila, R. 2016. Kuvia opinnäytetyötä varten. Sähköpostiviesti 1.4.2016. Vastaannottaja Heimonen, V.
- Aspen FRAN. N.d. Esittely Aspen FRAN ohjelmistosta. Viitattu 4.5.2016. <http://www.aspentech.com/products/aspens-fran.aspx>
- AspenTech Shell & Tube. 2013. Lisensoitu ohjelmisto. Sisäinen manuaali. Viitattu 4.5.2016.
- AspenTech Shell & Tube. N.d. Lisensoitu ohjelmisto. Sisäinen manuaali. Viitattu 27.4.2016.
- Bell, K. 2011. TEMA Standards. Tietoa TEMA standardista. Thermopedia 9.2.2011. Viitattu 22.4.2016. <http://www.thermopedia.com/content/1182/>
- Faghri, A. Zhang, Y. Howell, J. 2010. Advanced Heat and Mass Transfer. Global Digital Press
- HEI Standards. N.d. Tietoa HEI standardista Heat Exchange Institute, Inc. verkkosivuilla. Viitattu 22.4.2016 <http://www.heatexchange.org/standards.html>
- HEI. Heat Exchange Institute, Inc. 2004. Standards for Power Plant Heat Exchangers. Fourth Edition. Cleveland: Heat Exchange Institute. Viitattu 26.4.2016.
- Holmström, P. 1982. Lauhduktimet teoria ja käytäntö. Jyväskylä: K.J. Gummerrus
- Huhtinen, M. Kettunen, A. Nurminen, P. Pakkanen, H. 2000. Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Edita.
- Huhtinen, M. Korhonen, R. Pimiä, T. & Urpalainen, S. 2013. Voimalaitostekniikka. Tampere: Suomen Yliopistopaino Oy.
- Intergraph Visual Vessel Design. N.d. Esittely Visual Vessel Design ohjelmistosta. Viitattu 26.4.2016. <http://ppm.intergraph.com/products/analysis-product-family/visual-vessel-design>
- Kuivalainen, T. Sahala Works Oy. Palaveri 18.4.2016.
- Kuivalainen, T. Vehviläinen, P. Sahala Works Oy. Palaveri 2.3.2016
- Optimize Mechanical Design & Rating from the Same Tool. N.d. Tietoa AspenTech Mechanical ohjelmasta. Viitattu 20.4.2016. <https://www.aspentech.com/products/aspens-teams.aspx>
- Sahala Works Lämmönsiirron asiantuntija. N.d. Yritysesittely Sahala Worksistä. Viitattu 3.3.2016. http://www.sahala.fi/sahala_works/default.asp?siteid=fi&id=sahala_works_yritys
- Sahala Works Oy. 2016. Kuva syöttöveden esilämmittimestä konepajalta.
- Sarkomaa, P. 2003. Insko seminaari. Insko seminaarin opetusmateriaali. Viitattu 6.4.2016.

Simplify the Most Complex Heat Exchanger Challenges. N.d. Tietoa AspenTech Shell & Tube ohjelmistosta. Viitattu 20.4.2016.

<https://www.aspentech.com/products/aspentascplus.aspx>

TEMA Standards. N.d. Yleistietoa TEMA standardista Tubular Exchanger Manufacturers Association, Inc. verkkosivuilla. Viitattu 22.4.2016.

<http://www.tema.org/>

TEMA. Tubular Exchanger Manufacturers Association, Inc. 2007. Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association. Ninth Edition. Tarrytown: Tubular Exchanger Manufacturers Association. Viitattu 25.4.2016.

Wagner, W. 1994. Lämmönsiirto. Helsinki: Painatuskeskus Oy.

VDI Gesellschaft. 2010. VDI Heat Atlas Second Edition. Springer.

VDI Standards and their significance. N.d. Esittely VDI standardeista. Viitattu

26.4.2016. <http://www.vdi.eu/engineering/vdi-standards/about-vdi-standards/>

Vehviläinen, P. 2016a. Opinnäytetyö, kp-esilämmittimet. Sähköpostiviesti 21.4.2016. Vastaanottaja Heimonen, V.

Vehviläinen, P. 2016b. Sahala Works Oy. Palaveri 26.4.2016.

Wikstén, R. 2009. Lämpövoimaproessit. Helsinki: Hakapaino Oy.

Yokell, S. Catapano, M. Svensson, E. 2014. Closed Feedwater Heaters for Power Generation A Working Guide. Europe: McGraw-Hill Education

Liitteet