



TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# TERÄSTEHTAAN HÖYRYNKÄYTÖN KARTOITUS JA OPTIMOINTI

Miska Koivusaari

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2017  
Biotuote- ja prosessiteknikka  
Prosessiteknikka



## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Biotuote- ja prosessitekniikka  
Prosessitekniikka

KOIVUSAARI, MISKA

Terästehtaan höyrynkäytön kartoitus ja optimointi

Opinnäytetyö 53 sivua, joista liitteitä 0 sivua  
Toukokuu 2017

---

Opinnäytetyön tavoitteena oli kartoittaa SSAB:n Hämeenlinnan tehtaan höyryä kuluttavat ja tuottavat kohteet. Työn ensimmäisenä vaiheena oli taustatutkimus erityyppisistä höyryntuotantolaitteista ja lämmönvaihtimista.

Toisessa vaiheessa tavoitteena oli tehtaan höyryjärjestelmien perusteellinen kartoitus, joka toteutettiin käymällä paikan päällä tarkistamassa jokaisen PI-kaaviossa näkyvän höyryä kuluttavan tai tuottavan laitteen käytössä oleminen. Selvityksessä ilmeni, että osa kaavioissa näkyvistä laitteista oli poistettu ilman asian merkitsemistä PI-kaavioihin. Yhdessä tapauksessa säiliön höyrylämmitys oli muutettu vesilämmitykseksi.

Kolmas ja viimeinen vaihe koostui optimointiehdotusten laatimisesta. Kartoituksen perusteella voitiin huomata, että tehtaalla käytetään lähes kaikkeen lämmöntarpeeseen höyryä. Höyry ei kuitenkaan kaikissa sovelluksissa ole välttämättä taloudellisin ratkaisu. Useissa neste- ja öljysäiliöissä lämmitys on toteutettu säiliössä kiertävällä höyrykierukalla. Höyry on tehokas lämmitysmenetelmä, mutta sen korkeiden tuotantokustannusten vuoksi matalaenergisempi vaihtoehto olisi sopivampi kohteissa, joissa korkeat lämpötilat tai nopea lämmitys ei ole tarpeen. Yhdessä kohteessa säiliö olikin muutettu aiemmin höyrylämmitteisestä kuumalla vedellä lämmitettäväksi. Toinen yleinen käyttökohde tehtaalla oli höyrylämmiteinen ilmakeuhutus. Useita höyrypattereita käytetään teräsnauhan kuivaimiseksi. On todennäköistä, että höyrylämmitys ei ole kaikissa kohteissa ensisijaisen tärkeä.

Tehtaan suurin höyrynkuluttaja on peittauslinja. Peittaukseen käytettävää suolahappoa lämmitetään grafiittilämmönvaihtimissa höyryllä. Nykyisen järjestelmän tilalle ehdotettiin osan tai kaikkien lämmönvaihtimien korvaamista suoralla höyrylämmityksellä. Tämän vaihtoehdon järkevyyttä tutkittiin myös laskennallisesti.

---

Asiasanat: höyry, teräs, lämmönvaihdin, peittaus

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Bioproduct and Process Technology  
Process Technology

KOIVUSAARI, MISKA  
Mapping and Optimising Steam Usage in a Steel Factory

Bachelor's thesis 53 pages, appendices 0 pages  
May 2017

---

The purpose of this thesis was to locate and optimise all processes that produce or consume steam at SSAB factory in Hämeenlinna in Southern Finland. The first phase of the work was preparation in the form of researching types of steam producing equipment and heat exchanger equipment.

The purpose of the second phase was to map the steam network accurately. The PI-diagrams were checked thoroughly by walking through all the locations and identifying each steam consumer and producer. It was discovered that some of the equipment described in the diagrams were no longer on site or they were removed from active use. This was the case in multiple areas of the factory. In one case a steam heating system had been converted into water heating without it being added in the diagram.

The third and last phase consists of suggestions for optimisation. It was found that in general steam is used for heating applications, even when it might not be the optimal solution. Heating of multiple liquid and oil tanks in different locations is achieved by using coils if steam pipes in the tanks. Steam is an effective means of heating, but due to the high production costs a lower energy application would be suitable where high temperatures or fast heating is not necessary. In one case a tank heating system had already been converted from steam to hot water. Another common usage of steam is in drying. Multiple steam radiator heated air blowers are used in steel strip drying. It is likely that steam heating is not necessary in all cases.

The biggest steam consumer of the factory is the pickling line. Hydrochloric acid used for pickling is heated in graphite heat exchangers using steam. A suggestion was made that few or all the heat exchangers were replaced by live steam heating. A calculation was made to evaluate the validity of this option.

---

Key words: steam, steel, heat exchanger, pickling

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	TAUSTATUTKIMUS.....	8
2.1	Lämmönvaihdintyytit.....	8
2.1.1	Putkilämmönvaihdin .....	9
2.1.2	Levyllämmönvaihdin .....	11
2.1.3	Lämpöputki .....	12
2.1.4	Pyörivä lämmönvaihdin .....	14
2.1.5	Suoran kontaktin lämmönvaihtimet .....	15
2.1.6	Höyrypatterit .....	16
2.2	Lämmönvaihtimien ominaisuudet .....	16
2.2.1	Lämmönsiirtopinta .....	17
2.2.2	Lämmönsiirtomateriaali .....	18
2.3	Likaantumisen vaikutus lämmönvaihtimen toimintaan .....	19
2.4	Höyrykattilat .....	20
2.4.1	Suurvesikattila.....	21
2.4.2	Luonnonkiertokattila .....	22
2.4.3	Pakkokierto kattila .....	23
2.4.4	Läpivirtauskattila.....	23
2.4.5	Höyrykattilan polttoaineet.....	24
2.5	Höyryn käyttökohteet ja syyt .....	25
3	MITOITTAMINEN.....	26
3.1	Lämmönvaihtimen lämpötekniinen mitoitus .....	26
3.2	Likaantumisen vaikutusten arvioiminen .....	28
3.3	Lämpömäärän laskeminen .....	28
4	KENTTÄTUTKIMUS .....	31
4.1	Höyryn tuotanto tehtaalla.....	32
4.1.1	Kattilalaitos .....	33
4.1.2	Sinkityslinja 3 .....	33
4.1.3	Maalipinnoituslinja .....	34
4.2	Höyrynkulutus .....	35
4.2.1	Peittaus .....	35
4.2.2	Öllykellari .....	37
4.2.3	Sinkityslinja 1 .....	37
4.2.4	Sinkityslinja 2 .....	38
4.2.5	Sinkityslinja 3 .....	38
4.2.6	Maalipinnoitus .....	40

4.2.7	Kattilalaitos .....	41
4.2.8	Emulsionhajotus .....	41
5	OPTIMOINTIMAHDOLLISUUDET .....	42
5.1	Peittaus .....	42
5.2	Höyrylämmitteiset säiliöt .....	45
5.3	Sinkityslinja 1 .....	47
5.4	Sinkityslinja 3 .....	47
5.5	Kattilalaitos .....	48
5.6	Muita optimointikeinoja .....	49
6	POHDINTA .....	51
	LÄHTEET .....	52

## LYHENTEET JA TERMIT

demivesi	Käänteisosmoosilla puhdistettu vesi. Demineralisoitu vesi.
elvytys	Käytetyn suolahapon regeneroiminen uudelleen käytettäväksi.
fluidi	Epäkiinteä aine, jonka rakenneosaset pystyvät liikkumaan vapaasti suhteessa toisiinsa. Esimerkiksi nesteet ja kaasut.
höyrystyslämpö	Energiamäärä, joka tarvitaan höyrystämään yksi kilogramma nestettä. Yksikkö J/kg.
kylläinen höyry	Vesihöyry jonka lämpötila on kiehumispisteessä. Voi olla yli 100-asteista, sillä kiehumispiste nousee paineen kasvaessa.
LTO	Lämmön talteenotto
lämmönvaihdin	Laite joka suoraan tai epäsuorasti siirtää lämpöenergiaa aineesta toiseen. Synonyymi: lämmönsiirrin.
MAPI	Maalipinnoituslinja
ominaislämpökapasiteetti	Kertoo kuinka paljon energiaa tarvitaan kuumentamaan ainekiloa yhden kelvinasteen. Tunnus c. Yksikkö J/kgK
peittaus	Prosessi jossa teräksen pinnasta puhdistetaan epäpuhtauksia hapon avulla.
tulistettu höyry	Höyry jonka lämpötila on yli kiehumispisteen. Siis höyry joka voi luovuttaa energiaa tiivistymättä.
VOK	Venytysoikaisukone

## 1 JOHDANTO

Tämän työn tarkoituksena oli kartoittaa SSAB:n Hämeenlinnan tehtaan höyryn tuotanto- ja käyttökohteet, tuotettava höyryn määrä, sekä selvittää mahdollisuudet tehokkaampiin ratkaisuihin. Työ aloitettiin perehtymällä käytössä oleviin lämmönsiirtolaitteisiin ja höyryntuotantovaihtoehtoihin.

Tutkimuksen ohessa tarkistettiin tehtaan PI-kaavioiden paikkansapitävyys, sekä selvitettiin, missä kohteissa tehtaalla käytetään höyryä ja kuinka paljon.

Työn viimeisessä vaiheessa selvitettiin millä tavoilla tehtaan höyryn tuotantoa ja käyttöä voitaisiin optimoida esimerkiksi ottamalla käyttöön vaihtoehtoisia ratkaisuja. Tehtaalta kerätyn datan ja tutkimuksessa löytyneiden tietojen pohjalta arvioitiin optimaalisia lämmöntuotantomenetelmiä eri kohteissa.

Työssä ei käsitelty muita suoranaisesti höyryyn liittymättömiä energiatehokkuuskysymyksiä, kuten kaukolämpöverkkoa tai sisäilman ulosvuodon minimoimista talvikuukausina.

## 2 TAUSTATUTKIMUS

Tässä kappaleessa selvitetään, minkälaista laitteistoa teollisuudessa on käytössä lämmön tuottamiseen ja siirtoon. Tutkimus käsittelee erilaisia lämmönvaihdintyyppjä, niiden käyttötarkoituksia ja ominaisuuksia, sekä höyryn tuottamiseen käytettyjä laitteita. Lisäksi pyritään tarkemmin selventämään, millaisiin käyttötarkoituksiin höyryä yleensä käytetään ja missä käyttötarkoituksissa höyryn käyttäminen on yleensäkin taloudellista tai käytännöllistä.

### 2.1 Lämmönvaihdintyytit

Lämmönvaihdin on laite, jonka avulla pystytään siirtämään lämpöenergiaa fluidista toiseen. Tavallisia käyttötarkoituksia teollisuudessa ovat prosesseissa tarvittavien, tai jätteenä syntyvien fluidien lämmitys tai jäähditys. Lisäksi lämmönvaihtimia tarvitaan sisäilman lämmitykseen. (Mills 1999, 650.)

Lämmönvaihtimet voidaan luokitella useiden eri tekijöiden perusteella. Lämmönsiirto voi tapahtua joko suoraan aineiden kosketuksessa, tai epäsuorasti jonkin väliaineen tai seinämän kautta. Lämmönvaihtimen rakenne on voitu toteuttaa lukuisilla eri tavoilla, kuten levyillä tai putkilla, jotka voidaan valmistaa eri materiaaleista. Lämmönvaihdin voidaan luokitella myös virtausjärjestelyn perusteella. Käytettävät aineet voivat virrata laitteen läpi kerran tai useammin ja ne voivat virrata samansuuntaisesti, ristiin, vastakkaisesti suuntiin tai jopa vuorotellen tietyissä ratkaisuissa, joissa lämpö varastoidaan johonkin välikappaleeseen. Lisäksi luokittelun voi tehdä käytettävien ainevirtojen lukumäärän perusteella, käyttökohteen perusteella tai sen perusteella, tapahtuuko vaihtimessa faasimuutoksia vai ei. (Lampinen & Fagerholm 2005, 14.)

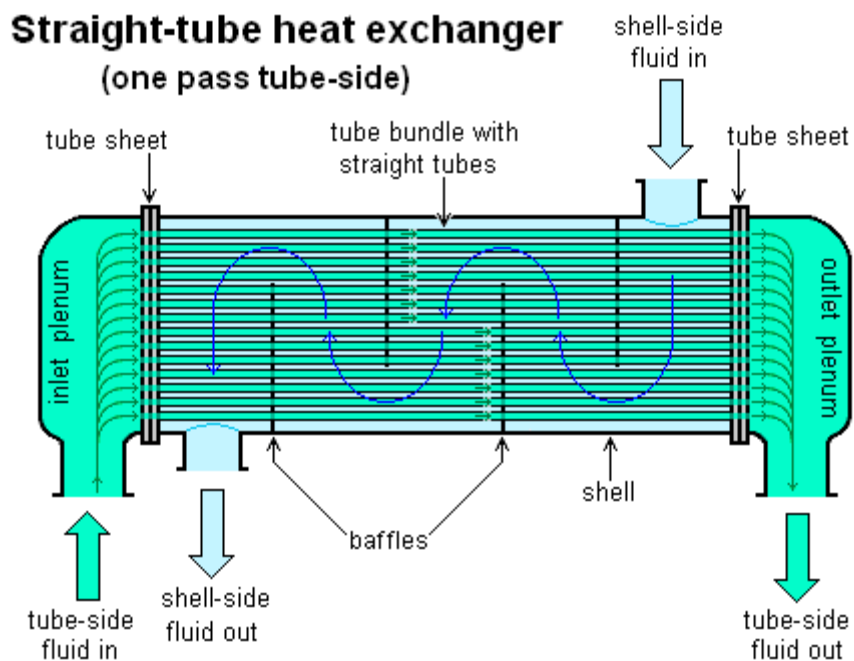
Lämmönvaihtimet voidaan jakaa toimintaperiaatteen perusteella karkeasti rekuperaattoreihin ja regeneraattoreihin. Rekuperaattoreissa molemmat ainevirrat kulkevat samanaikaisesti lämpöä siirtävän osan eri puolilla, kuten esimerkiksi levylämmönvaihtimessa. Regeneraattoreissa lämmönsiirtoon osallistuvat aineet kulkevat vuorotellen jonkin lämpöä varastoivan osan läpi, tai lämpöä varastoiva kappale liikkuu vuorotellen kylmän ja kuumen fluidin läpi siirtäen lämpöenergiaa, kuten esimerkiksi pyörivässä lämmönvaihtimessa tapahtuu. (Lampinen & Fagerholm 2005, 14-15.)



Tässä kappaleessa on käsitelty yleisesti erilaisia lämmönvaihdintyyppäjä ja niiden suunnitteluratkaisuja, sekä yleisiä käyttökohteita.

### 2.1.1 Putkilämmönvaihdin

Yksi yleisimmistä lämmönvaihdintyypeistä on putkilämmönvaihdin. Siinä on ulompi sylinterin muotoinen vaippa, jonka sisällä on lukuisia pienempiä putkia (kuva 1). Toinen fluidi virtaa putkinipussa ja toinen vaipan sisällä ympäröiden pienemmät putket. Vaipan sisällä käytetään ohjauslevyjä, jotta nesteen virtaus saadaan turbulenttiseksi eli pyörteiseksi. Turbulenttinen virtaus mahdollistaa tehokkaamman lämmön siirtymisen, sillä vaipassa virtaavan nesteen lämpötilaerot tasoittuvat tehokkaammin. Myös sisäputket voivat olla uritetut nesteen lämpötilaerojen tasaamiseksi. (Mills 1999, 652.)



KUVA 1. Putkilämmönvaihdin (H. Padleckas, 2006)

Putkilämmönvaihtimen ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa useilla suunnitteluratkaisuilla. Lämmönsiirtopinta-alan kokoon vaikuttavat sisäputkien pituus sekä halkaisija. Useilla ohuilla putkilla saavutetaan suurempi lämmönsiirtonopeus, kuin pienemmällä määrällä paksuja putkia. Lämmönvaihtimen luotettavuus ja huoltamisen helppous täytyy kuitenkin huomioida suunnittelussa, joten kompromisseja täytyy tehdä putkien koossa. (Mills 1999, 686.)

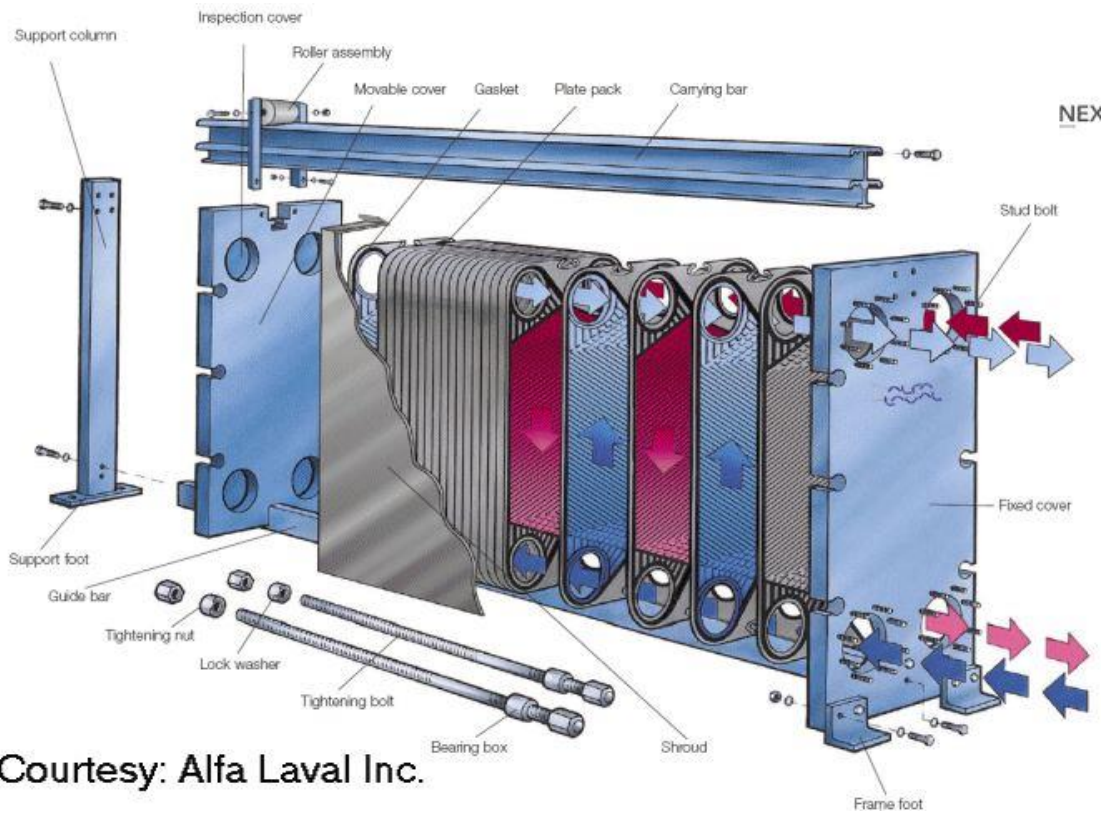
Lämmönsiirtoa voidaan tehostaa myös sisäputkiin lisättävillä rivoilla tai lamelleilla, jotka lisäävät lämpöä siirtävää pinta-alaa, kuitenkin suurentamatta putkikokoa. (Kakaç, Liu & Pramuanjaroenkij 2002) Sisäputkien seinämäpaksuutta valittaessa tulee huomioida, että putket kestävät sekä niissä virtaavan nesteen sisäistä painetta, että vaipassa virtaavan nesteen ulkoista painetta. Putken seinämissä pitää olla myös riittävästi varaa korroosiolle. (Huhtinen 2000, 208.)

Virtaustapana käytetään tavallisesti vastavirtausta, jossa lämpöä luovuttava fluidi virtaa vastakkaiseen suuntaan lämpöä vastaanottavan fluidin kanssa. Vastavirtauksella lämmönsiirto on usein tehokkaampaa, sillä se pitää käytettävien fluidien lämpötilaeron tasaisena vaihtimen kaikissa kohdissa. Käytettäessä samansuuntaisella virtauksella toteutettua vaihdinta lämpötilaero on sisäänmenopäässä suuri ja ulostulopäässä pieni. Huoltotarpeen kannalta suuri virtausnopeus on hyvä, sillä suuri virtausnopeus estää lian tarttumisen lämmönvaihtimen osiin. Vaipan ohjauslevyt hidastavat vaippapuolen fluidin virtausta, lisäten siten likaantumista. Tämän takia on kehitetty spiraalimaisia ohjauslevyjä, jotta virtausnopeus pysyy nopeampana. (Motiva 2016, 14.)

Putkilämmönvaihtimet soveltuvat hyvin korkean paineen ja lämpötilan käyttökohteisiin. Tämän tyyppiset vaihtimet kestävät painetta hyvin vankkuutensa vuoksi. Likaisille fluideille putkilämmönvaihdin sopii useimmin vain silloin, kun likainen fluidi virtaa sisäputkissa. Vaippapuolen puhdistaminen on usein työlästä verrattuna putkien puhdistamiseen ja se likaantuu helpommin ohjauslevyjen käytön vuoksi. (Motiva 2016, 14.)

## 2.1.2 Levylämmönvaihdin

Nimensä mukaisesti levylämmönvaihdin koostuu useista ohuista levyistä, jotka on liitetty yhdeksi paketiksi (kuva 2.). Lämpöä luovuttava ja lämpöä vastaanottava fluidi virtaavat levyjen välissä siten, että joka toisessa levyn välissä virtaa lämpenevää ja joka toisessa välissä jäähtyvää ainetta.



Courtesy: Alfa Laval Inc.

KUVA 2. Levylämmönvaihdin (Alfa Laval Ab).

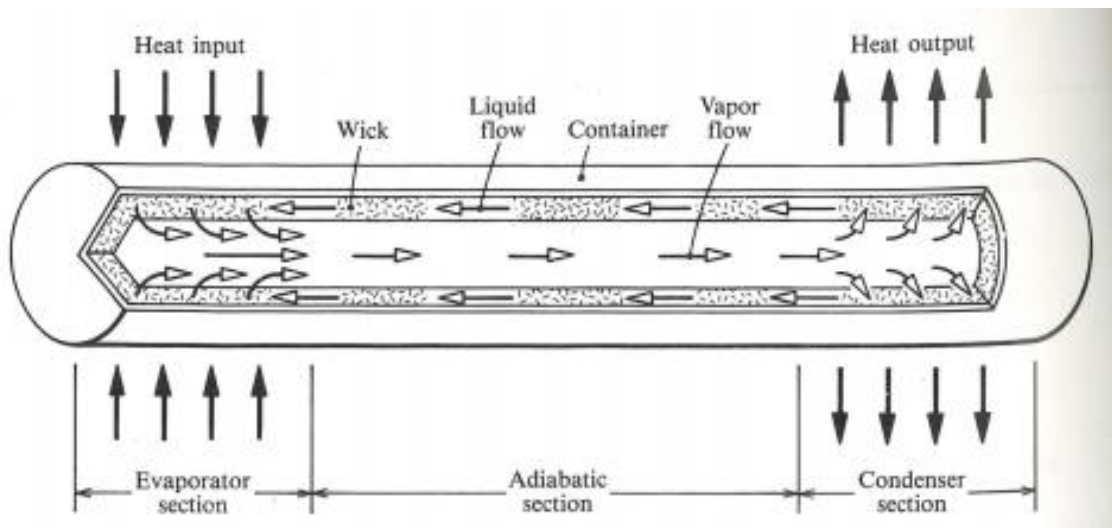
Levylämmönvaihtimen lämmönsiirron tehokkuuteen voidaan vaikuttaa levyjen määrää ja kokoa muuttamalla. Lämmönsiirtopinta-alaa pyritään kasvattamaan valmistamalla uritetuista levyistä. Uritus nopeuttaa lämmön siirtymistä kasvattamatta kuitenkaan vaihtimen lopullista kokoa. Levyjen pinnan kuvioinnilla pyritään myös ohjaamaan fluidin virtausta siten, että se virtaisi turbulenssin ansiosta kaikkialla levyjen välissä tehostaen lämmönsiirtoa. (Alfa Laval Ab.)

Putkilämmönvaihtimeen verrattuna levyvaihtimet ovat pienempiä ja halvempia. Levyvaihtimia käytetään tyypillisesti matalapaineisiin käyttötarkoituksiin. Levylämmönvaihtimissa käytetään erityisen usein vastavirtausta sen tehokkuuden vuoksi. Lämmönvaihtimen levyt voivat olla pysyvästi kiinnitetty toisiinsa, tai irrallisina puristettuna kahden päätylevyn välissä, kuten kuvassa 2, jolloin yksittäisten levyjen vaihtaminen on helppoa. (Kolmetz 2015, 5, 19.)

Levy- ja putkilämmönvaihtimien toimintaperiaate voidaan yhdistää. Tällaisessa lämmönvaihtimessa vaipan sisässä on putkinipun sijasta levyjä. Toinen käytettävistä aineista virtaa levyjen sisällä ja toinen vaipassa. Tämä rakenne mahdollistaa korkean lämmönsiirt nopeuden, sekä korkeamman paineen ja käyttölämpötilan, kuin mitä tavallinen levylämmönvaihdin kestäisi. (Vahterus)

### **2.1.3 Lämpöputki**

Lämpöputkilämmönvaihtimessa energiaa luovuttava ja vastaanottava aine ovat yhteydessä saman lämpöputken eri päihin. Lämpöputki on putki, jonka sisällä on nestettä ja kapillaarirakenne. Energiaa luovuttava aine lämmittää lämpöputken nestettä, kunnes se höyrystyy. Höyrystynyt väliaine kulkeutuu toiseen päähän lämpöputkea, missä se kohtaa kylmemmän seinämän ja tiivistyy luovuttaen energiaa seinämän läpi lämmitettävälle aineelle. Tiivistynyt väliaine kulkeutuu kapillaari-ilmion avulla takaisin höyrystävään päähän ja kierto jatkuu kuvan mukaisesti (kuva 3). (Mills 1999, 620.)



KUVA 3. Lämpöputki, jossa seinämiä kiertävä tiheä verkko muodostaa kapillaarirakennetta. (Mills 1999, 620)

Jos lämpöputki ei tarvitse kapillaari-ilmiötä nesteen palauttamiseen höyrystyspäähän, sanotaan putkea lämpösifoniksi tai Perkins-putkeksi, keksijänsä Angier March Perkinsin mukaan. Lämpösifonien rajoituksena on niiden asettelu. Ilman kapillaarirakennetta höyrystymispään pitää sijaita tiivistymispään alapuolella. Lämpösifonilla voidaan kuitenkin saavuttaa pidempiä siirtomatkoja, kuin kapillaari-ilmioon nojaavalla lämpöputkella. (Mills 1999, 620.)

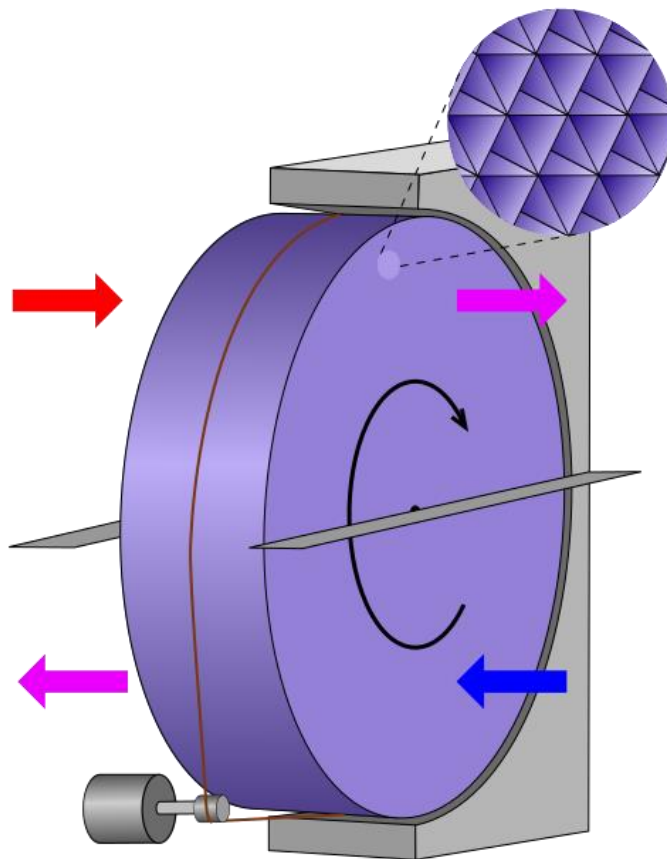
Lämpöputkissa käytetään työaineena nesteitä, joiden höyrystymislämpö on suuri. Siten pienessä määrässä liikkuvaa höyryä voidaan siirtää suuri määrä energiaa. Esimerkiksi vesihöyryn tiivistyessä vapautuu yli viisi kertaa enemmän energiaa kuin veden jäähtyessä kiehumispisteestä jäätympisteeseen (Mäkelä 2005, 178).

Korkean höyrystymislämmön lisäksi muita haluttuja ominaisuuksia lämpöputkien väliaineelle ovat matala viskositeetti ja korkea pintajännitys kapillaari-ilmion helpottamiseksi. Lämpöputkessa käytettäviä väliaineita ovat esimerkiksi natrium tai litium korkeilla lämpötiloilla ja vesi, ammoniakki tai metanoli matalammilla lämpötiloilla. (Mills 1999, 620-621.)

Lämpöputken toimimiseksi vaadittava lämpötilaero luovuttavan ja vastaanottavan aineen välillä riippuu useista muuttujista. Tarvittava lämpötilaero on kuitenkin yleensä pienempi, kuin tarvittaisiin siirtämään lämpöä lämpöputken kokoinen matka pelkällä johtumisella. (Mills 1999, 621.)

### 2.1.4 Pyörivä lämmönvaihdin

Pyörivässä lämmönvaihtimessa pyöreä kennonomainen kiekko pyörii kahden fluidivirran läpi. (Types of Heat Exchangers 2017) Fluidivirta kulkeutuu kiekon kennojen läpi, luovuttaen sille osan lämpöenergiastaan. Varastoitunut lämpöenergia kulkeutuu pyörivän kiekon mukana toiselle puolelle, jossa kiekon läpi kulkeutuu viileämpi fluidivirta. Lämpöenergiaa siirtyy viilempään fluidiin lämmittäen sitä. (Rotary Heat Exchangers for Heat Recovery in Ventilation Systems.) (kuva 4.)



KUVA 4. Pyörivä lämmönvaihdin, jonka läpi kulkee lämmin ja viileä ilmavirta. (Tomia 2007)

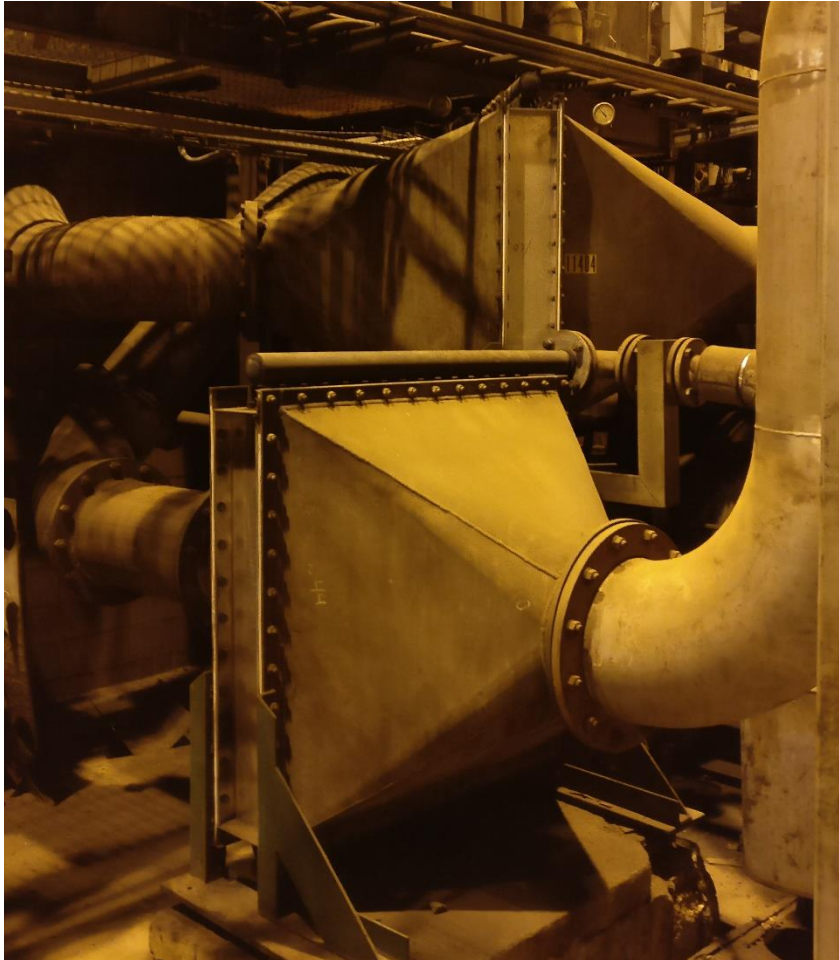
### 2.1.5 Suoran kontaktin lämmönvaihtimet

Lämpöä voidaan siirtää myös suoraan aineesta toiseen ilman väliseinien käyttöä. Menettelyä käytetään yleensä siirrettäessä lämpöä eri faaseissa olevien aineiden välillä, kuten kaasu-neste, neste-kiinteä tai kiinteä-kaasu. Esimerkiksi palokaasut voidaan ohjata putoavien vesipisaroiden läpi, jolloin kaasu jäähtyy ja siitä siirtyy samalla epäpuhtauksia veteen. Menettelyä voidaan käyttää myös tilanteissa, joissa aineina on kaksi nestettä, jotka ovat toisiinsa liukenemattomia. Tämä lämmönsiirtomenetelmä on käytännöllinen tilanteissa, joissa lämpöä siirretään saman aineen kahden faasin välillä. Esimerkiksi lämmitettäessä nesteenä olevaa vettä vesihöyryllä, voidaan vesihöyry päästää suoraan veteen, jossa se tiivistyy ja vapauttaa lämpöenergiaa. (Mills 1999, 657.)

Suoran kontaktin etuna on lämmönsiirtoväli­pinnan aiheuttamien häviöiden puuttuminen. Samoin lämmönsiirtopintojen likaantuminen ei ole ongelma niiden puuttuessa. Kuitenkin haasteena on komponenttien erotus lämmönvaihdon jälkeen – erityisesti käytettäessä kahta toisiinsa liukenematonta nestettä, kuten vettä ja öljyä. (Mills 1999, 657.)

### 2.1.6 Hörypatterit

Hörypatteri on eräänlainen putkilämmönvaihdin, jota käytetään höyryllä lämmittämiseen. Patterissa höyry virtaa putkissa ja ristikkäissuunnassa virtaa yleensä ilma puhaltimen avulla. Hörypattereita voidaan käyttää esimerkiksi tilojen sisäilman lämmityksessä tai paikallisemmin prosessissa kuivaukseen (kuva 5). Tavallisemmin sisäilman lämmityksessä käytetään kuitenkin matalamman lämpötilan fluideja, kuten kaukolämpöä.



KUVA 5. Kaksi hörypatteria peittäuslinjalla.

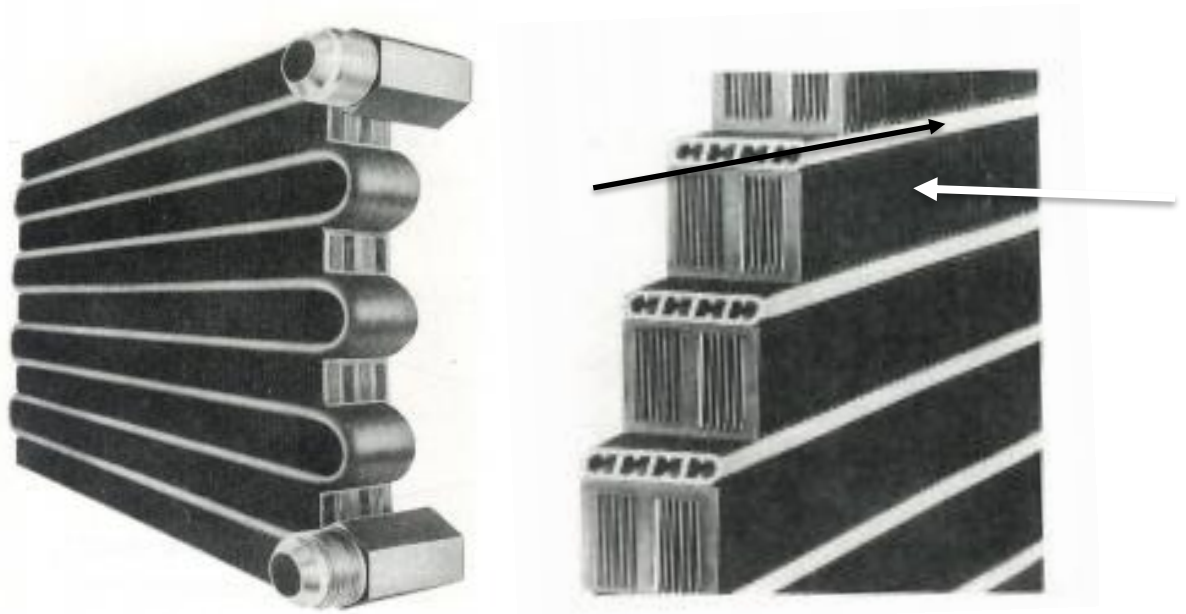
## 2.2 Lämmönvaihtimien ominaisuudet

Lämmönvaihtimen lämmönsiirto-ominaisuudet riippuvat monista tekijöistä, kuten lämmönsiirtopinta-alasta ja materiaalista. Tässä kappaleessa on käsitelty lämmönvaihtimen erilaisia mahdollisia suunnitteluratkaisuja.



### 2.2.1 Lämmönsiirtopinta

Tavallisimmin lämmönsiirtopintana toimii tavallinen, sileä putki, joka voi olla suora tai mutkitella vaihtimessa. Toisinaan putkissa käytetään siivekkeitä, ripoja tai lamelleja lisäämään lämmönsiirtopinta-alaa. Näin on yleensä putken ulkopuolella, jossa kulkee kaasumaista ainetta kuten ilmaa. Suurempi lämmönsiirtoala on tarpeen kaasujen suuremman lämmönsiirtovastuksen takia. Toisinaan myös putkien sisäpinnalla voi olla pinta-alaa kasvattavia rakenteita (kuvat 6 ja 7). (Mills 1999, 657.)



KUVAT 6 ja 7 Öljynjäähdytin ja sen poikkileikkaus. (Mills 1999, 657.)

Kuvissa 6 ja 7 öljy kiertää mutkittelevassa litteässä putkessa ja ilma kulkee pitkien ripojen väleistä. Poikkileikkauksessa öljyn kulku kuvattu mustalla nuolella ja ilma valkoisella nuolella.

Käytettäessä levyrakennetta lämmönsiirtoon, on levyn pinta usein muotoiltu täysin litteän sijaan. Levyn pintamuotoilu lisää samalla tavoin lämpöä siirtävää pinta-alaa, mutta sen tehtävänä on myös ohjata fluidivirtaus tasaisesti levyn koko pinnalle optimaalisen tuloksen saamiseksi. (Alfa Laval Ab.)

### 2.2.2 Lämmönsiirtomateriaali

Lämmönvaihtimen lämpövirta on suoraan verrannollinen väliaineen lämmönjohtamiskykyyn. Yleisin käytetty materiaali lämmönvaihtimissa on ruostumaton teräs tai hiiliteräs. Teräkset ovat suosittuja niiden kestävyys ja hinnan vuoksi. Materiaalivalintaa voidaan kuitenkin muuttaa haluttaessa erikoisominaisuuksia, kuten nopeampaa lämmönsiirtoa, likaantumista vastustavaa pintaa tai kemiallista kestävyttä. Alla on esimerkkejä eri aineiden lämmönjohtavuudesta (Taulukko 1.)

TAULUKKO 1. Esimerkkejä eri materiaalien lämmönjohtavuuksista. (Huhtinen ym. 2000, 205, muokattu, Tietopaketti titaanista.)

Materiaali	Lämmönjohtavuus (W/mK)
Kupari	370
Alumiini	210
Teräs	45
Titaani	22
Ruostumaton teräs	20
Kattilakivi	0,08 - 2,3
Eristeet	0,03 - 0,01

Haluttaessa lämmönvaihtimelta likaantumisen vastustuskykyä, voidaan käyttää lämmönsiirtomateriaalina esimerkiksi lasia tai polymeeriä, kuten teflonia. Tällaisilla erikoismateriaaleilla on kuitenkin usein huonompi lämmönsiirtokyky kuin teräksellä tai muilla metalleilla. Heikompi lämmönjohtavuus tarkoittaa suurempia lämmönsiirtopintoja ja suurempia valmistuskuluja. Lasia ja polymeerejä voidaan käyttää myös yhdessä teräksisen seinämän kanssa pinnoitteena, jolloin ne eivät laske niin suuresti lämmönjohtokykyä. (Motiva 2016, 15.)

Käyttökohteissa joissa tarvitaan kemiallista kestävyttä, voidaan materiaalina käyttää esimerkiksi haponkestävää terästä. Toisinaan haponkestävä teräs ei ole riittävä suoja vahvoja kemikaaleja vastaan. Vaikeammassa olosuhteissa voidaan käyttää grafiitti-, eli hiili-lämmönvaihtimia. Grafiitti kestää hyvin esimerkiksi samanaikaisesti korkeaa lämpötilaa sekä syövyttävää ainetta. Grafiittilämmönvaihtimet ovat kalliimpia kuin tavalliset teräs-lämmönvaihtimet.

Haluttaessa terästä parempaa lämmönjohtavuutta, voidaan lämpöä johtavana materiaalina käyttää muita metalleja, kuten kuparia tai alumiinia. Alumiinin vahvuutena on samalla alhaisempi tiheys, joka mahdollistaa kevyemmät rakenteet. Alumiini kestää heikosti tiettyjä kemikaaleja, kuten elohopeaa, joka haurastuttaa alumiinin (Briant 1983, 432). Kuparin lämmönjohtavuus on erittäin suuri, mutta samoin sen hinta on huomattavasti korkeampi kuin teräksellä. Kuparin etuna on myös sen vastustuskyky biolikaantumiselle, eli bakteri- tai leväkasvun muodostumiselle sen pintaan. Kupari on kuitenkin haitallista vesistöille, joten sitä ei voida käyttää sovelluksissa, joissa se olisi suorassa yhteydessä luonnonveteen. Luonnonvesien kanssa käytettäväksi soveltuu erityisen hyvin titaani. (Motiva 2016, 15.)

### **2.3 Likaantumisen vaikutus lämmönvaihtimen toimintaan**

Motivan arvion mukaan lämmönvaihtimien likaantuminen aiheuttaa Suomessa jopa 500 miljoonan euron kustannukset vuosittain (Motiva 2016, 5). Kustannuksia syntyy mm. kohonneesta polttoaineen kulutuksesta ja päästöistä, lisääntyneestä huolto- ja puhdistustyöstä, korkeammista investointikustannuksista ja menetetyistä tuotantoajasta.

Lämmönvaihtimen likaantuminen voi johtua useista eri syistä. Hiukkaslikaantumisessa lämmönvaihtoon osallistuvissa aineissa on partikkeleita, jotka tarttuvat lämmönsiirtopintoihin. Tällaisia partikkeleita ovat esimerkiksi mineraalihiukkaset vedessä ja pöly ilmassa. Hiukkaslikaantuminen on yleisimpiä likaantumisen syitä lämmönvaihtimessa. Hiukkasten ollessa suuria, ne voivat myös aiheuttaa mekaanista kulutusta lämmönvaihtimiin. Saostumislikaantumisessa puolestaan likaava aine on alun perin liuenneena virtaavaan aineeseen, eikä erillisenä partikkelina. Lämpötilan nousu tai lasku voi muodostaa liuenneista suoloista sakkaa lämmönvaihtopinnoille. Saostumia syntyy myös kemiallisessa likaantumisessa, jossa virtaavan aineen komponentit reagoivat keskenään muodostaen likakerroksen lämmönvaihtopintaan. Vaihtimen pinta itsessään voi toimia katalyyttinä kemiallisessa reaktiossa. Virtaavan aineen reagoiessa itse lämmönsiirtopinnan kanssa puhutaan korroosiolikaantumisesta. (Motiva 2016, 16.)

Lämmönvaihtimen pinnat voivat myös toimia kasvualustana organismeille, kuten levälle tai bakteereille. Näissä tapauksissa kyse on biologisesta likaantumisesta. Yleistä biologinen likaantuminen on esimerkiksi käytettäessä luonnonvettä. Organismit muodostavat tahmean kerroksen pinnoille. (Motiva 2016, 16.)

Alhainen virtausnopeus yleensä lisää pintojen likaantumisenopeutta. Tämän takia lämmönvaihdinta ei kannata tarkoituksellisesti ylimitoitaa, sillä suurempi lämmönvaihdin tarkoittaa alempia virtausnopeuksia, nopeampaa likaantumista ja sitä kautta suurempia energiahäviöitä. Turbulenttinen virtaus vähentää likaantumista, mutta toisaalta useat turbulentsuutta lisäävät tekijät, kuten ohjauslevyt tai pinnan karheus, lisäävät mekaanisia ongelmia. (Motiva 2016, 16.)

Käytettävät lämpötilat voivat myös tapauskohtaisesti vaikuttaa likaantumiseen. Jotkin suolat saostuvat korkeissa lämpötiloissa, mutta useammilla saostuminen tapahtuu matalissa lämpötiloissa. Useat kemialliset reaktiot tapahtuvat nopeammin korkeissa lämpötiloissa. Erilaiset organismit eivät yleensä suosi kovin matalia tai korkeita lämpötiloja. Biologinen likaantuminen onkin nopeinta noin 35 °C lämpötiloissa. (Motiva 2016, 16.)

Lämmönvaihtimen likaisuutta voidaan seurata esimerkiksi tarkkailemalla lämmönsiirron tehokkuutta tai mittaamalla painetta ennen ja jälkeen lämmönvaihtimen. Paine-ero lämmönvaihtimen yli kertoo likaisuudesta. Pidettäessä virtausnopeudet vakiona, alentunut lämmönsiirtoteho viestii likakerroksesta lämmönsiirtopinnoilla. Likaantumisen tarkkailuun voidaan asentaa myös sensoreita, jotka mittaavat optisesti tai sähkönjohtavuuden perusteella likakerroksen paksuutta. Vaihtimen puhdistus on tavallisesti hyödyllisempää tehdä usein, vaikka se tarkoittaakin runsaita puhdistuskuluja. Pienikin likakerros voi kuitenkin vaikuttaa merkittävästi lämmönsiirron tehokkuuteen. (Motiva 2016, 11.)

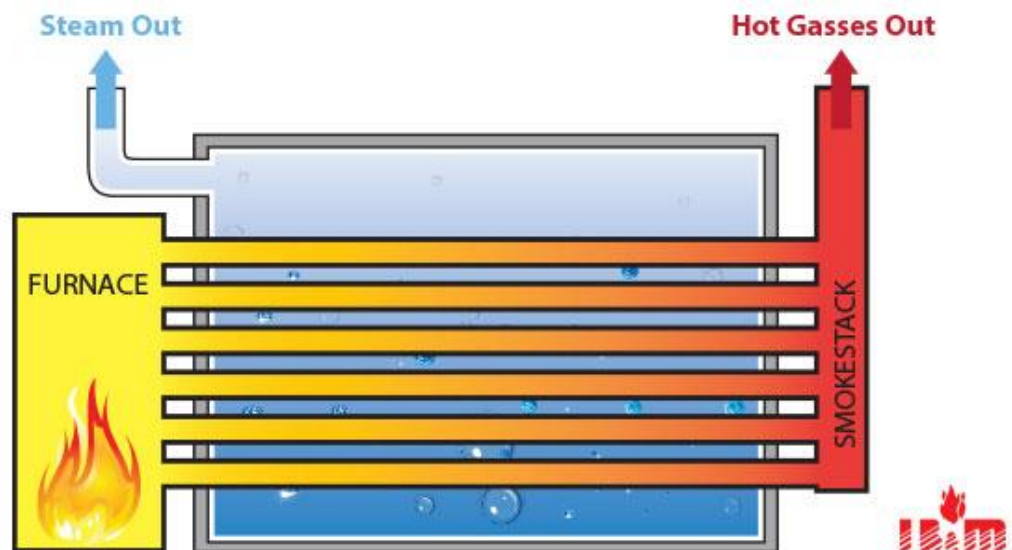
## **2.4 Höyrykattilat**

Höyrykattila on laite, joka tuottaa vedestä kylläistä, eli kiehumispisteessään olevaa vesihöyryä tai tulistettua, eli höyrystymislämpötilaa kuumempaa höyryä. Höyrystin on höyrykattilan osa, joka tuottaa vedestä kylläistä höyryä. Kattilan osaa tai erillistä laitetta, joka tuottaa höyrystä kuumempaa yleensä korkeapaineista höyryä, kutsutaan tulistimeksi. Tu-

listin poistaa höyrystä kosteutta ja parantaa siten höyryn laatua. (Gilman 2005, 6.) Nykyaikainen höyrykattila voidaan ajatella yksinkertaisimmillaan putkena, jonka toisesta päästä syötetään sisään vettä ja toisesta päästä saadaan ulos höyryä. (Huhtinen 2000, 7.) Tässä kappaleessa on käsitelty yleisesti höyrykattiloiden rakennetta ja toimintaperiaatteita.

#### 2.4.1 Suurvesikattila

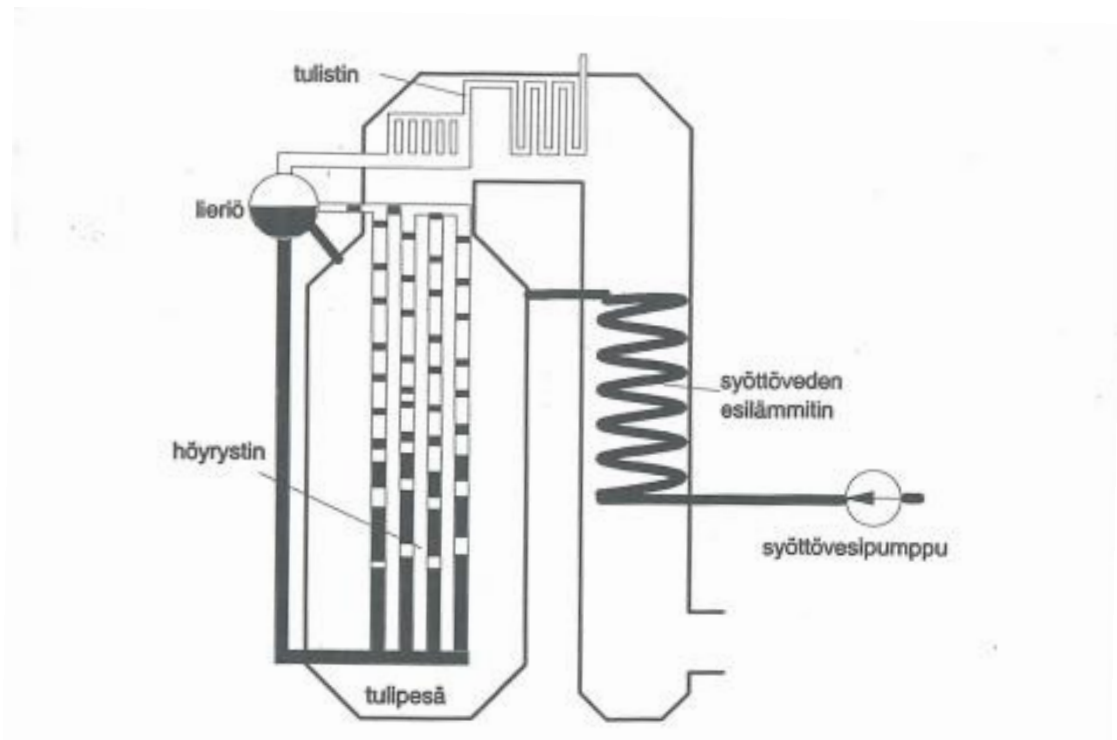
Suurvesikattila tai tulitorvi-tuliputkikattila on kattila, jossa polttoaine palaa tulitorvessa ja palokaasut kulkeutuvat siitä tuliputkiin. Vesi ympäröi tulitorvea ja -putkia. Höyrystyvä vesi siirtyy kattilan yläosassa sijaitsevaan höyrytilaan. Ratkaisu muistuttaa siis putkilämmönvaihdinta, jossa höyrystettävä vesi on vaippapuolella ja palamiskaasut ovat putkipuolella (Kuva 8). Palamiskaasut voivat kiertotavasta riippuen kulkea kattilan läpi yhden tai useamman kerran. (Huhtinen 2000, 112.)



KUVA 8. Periaatekuva tuliputkikattilasta. (Industrial Boiler & Mechanical)

## 2.4.2 Luonnonkiertokattila

Luonnonkiertokattilassa höyrystettävä vesi virtaa putkissa. Tulipesän kohdalla sijaitsee höyrystin. Tulipesästä palamiskaasut kulkeutuvat eteenpäin tulistimelle, jossa höyryä kuumennetaan entisestään. Lopuksi palamiskaasut esilämmittävät syöttövettä ennen poistumistaan. Veden syöttö tapahtuu syöttösäiliöstä ja syötettävä vesi esilämmitetään ennen sen kulkeutumista lieriöön. Lieriöstä vesi kulkeutuu laskuputkia pitkin höyrystimeen. Höyrystimessä osa kattilan alapäästä syötetystä vedestä höyrystyy ja syntynyt höyry kulkeutuu takaisin lieriöön, mukanaan myös höyrystymätöntä vettä. Höyrystymätön vesi sekoittuu lieriössä uudelleen syöttövedeen ja jatkaa kiertoa. Syntynyt höyry puolestaan kulkeutuu lieriöstä tulistimelle, jossa höyryä kuumennetaan höyrystymislämpötilaa korkeampaan lämpötilaan. (Kuva 9.) (Huhtinen 2000, 113.)



Kuva 9. Luonnonkiertokattilan vesihöyrypiiri. (Huhtinen 2000, 113.)

Luonnonkiertokattilassa veden kierto perustuu painovoimaan, eikä avuksi tarvita pumpua. Tiheä nestemäinen vesi laskeutuu höyrystimeen harvemman höyryn noustessa lieriöön ja tulistikamelle. Painetta nostettaessa höyryn tiheys lähestyy nestemäisen veden tiheyttä, minkä takia luonnonkiertokattila ei sovellu kovin korkeapaineista höyryä vaativiin tarkoituksiin. Tulistikamelta saatavan höyryn on oltava paineeltaan alle 170 bar, jotta luonnonkiertokattila toimisi. (Huhtinen 2000, 113-114.)

Koska luonnonkiertokattilassa osa vedestä palautuu höyrystimeltä lieriöön ja kiertoon, jää pääosa kattilakiveä aiheuttavista epäpuhtauksista kattilaveteen. Epäpuhtauksien määrä voidaan pitää alhaisena poistamalla ajoittain osa kattilavedestä ja korvaamalla se puhtaammalla syöttövedellä.

### **2.4.3 Pakkokiertokattila**

Pakkokiertokattila on samankaltainen rakenteeltaan kuin luonnonkiertokattila, mutta vesi kiertää höyrystimessä pumpun kuljettamana. Tämä mahdollistaa hieman korkeampien paineiden tuottamisen, kuin luonnonkiertokattilalla olisi mahdollista. Pakotetun kierron ansiosta putkisto voidaan rakentaa mihin tahansa asentoon, sillä painovoimaa ei hyödynnetä veden kierrättämiseen. Pakkokiertokattiloiden höyrystimen putkien alussa käytetään usein virtauksenkuristimia. Kuristin aiheuttaa putkeen suuren virtauksen paikallisvastuksen, minkä ansiosta vesi jakaantuu tasaisesti kaikkiin höyrystinputkiin. Ilman kuristinta putkiston virtausvastuksen vaikutuksesta jonkin putken läpi voisi kulkea vähemmän vettä, mikä johtaisi ylikuumenemiseen. (Huhtinen 2000, 119.)

### **2.4.4 Läpivirtauskattila**

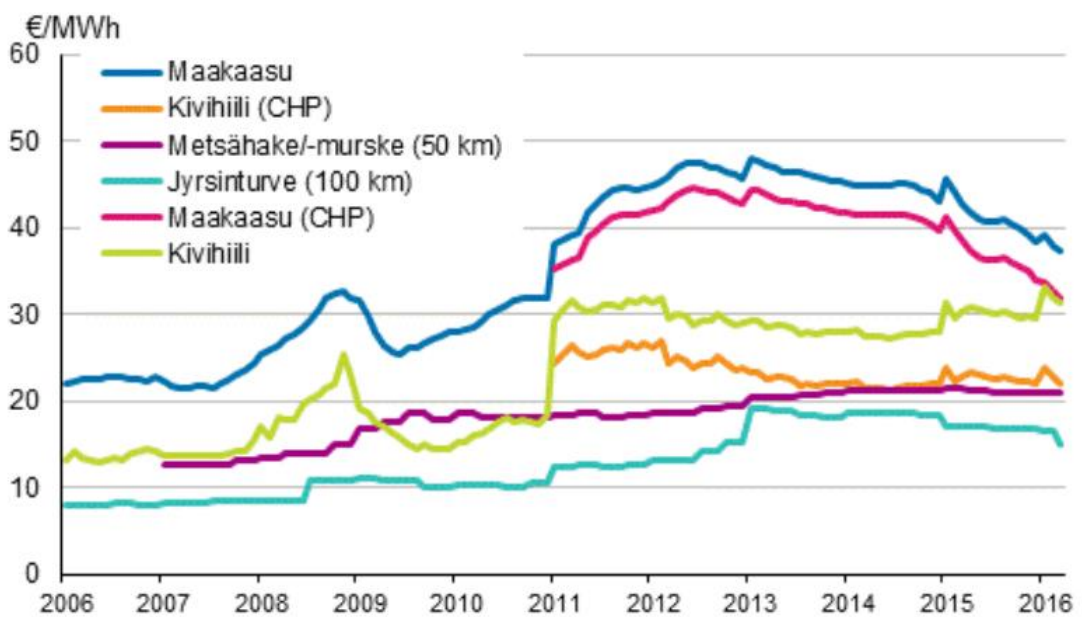
Läpivirtauskattilassa vesi kulkee putken tai putkiryhmän läpi ja tulee toisesta päästä ulos höyrinä. Toisin kuin luonnon- tai pakkokiertokattiloissa, läpivirtauskattilassa ei ole lieriötä, jossa höyry erotetaan vedestä. Läpivirtauskattiloita kutsutaan myös Benson- Sulzer- tai Ramsinkattiloiksi alkuperäisten kehittäjiensä mukaan. Rakenteeltaan läpivirtauskattila on kuin luonnon- tai pakkokiertokattila, mutta ilman niissä käytettävää lieriötä (Huhtinen 2000, 120.)

Koska läpivirtauskattilassa kaikki vesi höyrystetään eikä erotella lieriössä, voidaan tuottaa myös ylikriittistä höyryä, eli yli 221 bar paineeltaan olevaa höyryä. Kaiken veden höyrystyessä, myös epäpuhtaudet kerääntyvät nopeasti kattilaan. Siksi läpivirtauskattila vaatii puhtaamman syöttöveden kuin kiertokattilat. (Huhtinen 2000, 120.)

### 2.4.5 Höyrykattilan polttoaineet

Veden lämmittäminen, höyrystäminen ja höyryn tulistuminen vaativat energiaa, jota höyrykattila voi tuottaa käyttämällä polttoaineenaan mm. puuperäisiä polttoaineita, turvetta, hiiltä, öljyä ja kaasuja.

Tavallisimmin teollisuuslaitoksissa kattiloissa käytetään fossiilisia polttoaineita, kuten kivihiiltä, öljyä tai maakaasua niiden suuren energiatihedyn vuoksi. Enemmän energiaa pienessä tilassa tarkoittaa vähemmän kuljetuskustannuksia. Polttoöljyä ja maakaasua on myös helppo kuljettaa putkia pitkin, minkä ansiosta kuljetukseen ei tarvita työvoimaa. Öljyn ja kaasun etuna on myös se, että niillä voidaan helposti vastata nopeisiin muutoksiin tehontarpeessa. Tilastokeskuksen mukaan maakaasun hinnat liikkuvat 30 – 40 €/MWh välillä vuonna 2016. Maakaasun hinta on ollut laskussa muutaman viime vuoden ajan, mutta pidemmällä aikavälillä hinta on ollut nousussa (kuvio 1).



KUVIO 1. Voimalaitospolttoaineiden hinnat lämmöntuotannossa. (Tilastokeskus)

Puuperäisillä polttoaineilla kuten puuhakkeella tai pelleteillä tuotetaan energiaa usein voimalaitoksissa ja lämmöntuotantolaitoksissa. Puupolttoaineilla on vaikeampi vastata nopeisiin muutoksiin tehontarpeessa, minkä vuoksi niitä käytetään usein kohteissa, joissa tuleva tehontarve on helpompi ennustaa. Puuhakkeen etuna on halpa hinta (kuvio 1), noin 20 €/MWh. Puupelletit ovat hinnaltaan lähes maakaasun tasolla, mutta niiden etuna hak-



keeseen verrattuna on helpompi käsiteltävyys. Pelletit tehdään tasalaatuisiksi koon, muodon ja tiheyden kannalta, joten niiden kuljetus onnistuu putkia pitkin helposti. Pelletit aiheuttavat myös vähemmän ongelmia kattilassa tasalaatuisuutensa vuoksi. Hakepalaset voivat olla selvästikin eri muotoisia ja kokoisia.

## **2.5 Höyryn käyttökohteet ja syyt**

Höyryä käytetään tavallisesti teollisuuden nesteiden ja kaasujen lämmitykseen kohteissa, joissa tarvitaan tehokasta lämmitystä. Höyryn tiivistyessä vapautuu runsaasti energiaa. Tämä olotilan muutos mahdollistaa paljon tehokkaamman lämmityksen, kuin pelkällä kuumalla vedellä voitaisiin saavuttaa. Höyryä on myös usein valmiiksi saatavilla tai sitä on helposti tuotettavissa.

Höyryä on onnistuneesti korvattu monissa käyttökohteissa teollisuudessa esimerkiksi kuumalla vedellä. Useissa kohteissa höyryn mahdollistama maksimaalinen lämmönsiirto ei todellisuudessa ole tarpeen ja käyttämällä muita menetelmiä, voidaan saavuttaa säästöjä. Hitaan lämmityksen tai ainoastaan lämpöä ylläpitävän lämmityksen riittäessä kuuma vesi muodostuu taloudellisemmaksi lämmitystavaksi. Höyryn tuottaminen on kalliimpaa kuin kuuman veden ja käytettäessä höyryä, joudutaan myös käsittelemään syntyvät lauh-teet.

### 3 MITOITTAMINEN

Lämmönvaihdin toimii tehokkaasti, silloin kun se on oikein käyttötarkoitukseen mitoitettu. Alimitoitaminen johtaa alhaiseen lämmönsiirtoon ja ylimitoitus voi aiheuttaa esimerkiksi nopeamman likaantumisen. Tässä kappaleessa on käsitelty laskennallisuuden teoriaa liittyen lämmönsiirtoon ja aineiden termodynaamisiin ominaisuuksiin.

#### 3.1 Lämmönvaihtimen lämpötekninen mitoitus

Lämmönvaihtimen mitoittamiseksi on tiedettävä siirrettävä lämpöteho, sekä virtaavien aineiden lämpötilat ennen ja jälkeen lämmönsiirron. Tarvittavan lämmönsiirtopinta-alan kannalta on oleellista, kuinka suuri lämpötilaero käytettävien aineiden välillä on ja kuinka suuri lämmönläpäisykerroin vaihtimen lämmönsiirtopinnalla on. (Huhtinen 2000, 201.)

Tarvittava lämmönsiirtopinta-ala voidaan laskea kaavalla (1)

$$A = \frac{\Phi}{k \cdot \Delta T} \quad (1)$$

, jossa  $A$  = pinta-ala ( $\text{m}^2$ ),  $k$  = lämmönläpäisykerroin ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ),  $\Phi$  = teho (W) ja  $\Delta T$  = lämpötilaero (K) (VDI Heat Atlas 1993)

Virtaavien aineiden keskimääräinen lämpötilaero voidaan laskea joko aritmeettisesti tai logaritmisesta. Logaritminen tapa vastaa paremmin todellista tilannetta ja se voidaan laskea kaavalla (2).

$$\Delta T_{\text{logaritminen}} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (2)$$

, jossa  $\Delta T_1$  on lämpötilaero lämmönvaihtimen yhdessä päässä,  $\Delta T_2$  = lämpötilaero toisessa päässä ja  $\ln$  merkitsee luonnollista logaritmia. (VDI Heat Atlas 1993)

Aritmeettinen tapa on yksinkertaistettu tapa laskea keskimääräinen lämpötilaero, mutta se ei vastaa yhtä hyvin todellista tilannetta. Aritmeettisesti lämpötilaero voidaan laskea kaavalla (3). (Huhtinen 2000, 204.)

$$\Delta T_{\text{aritmeettinen}} = \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{2} \quad (3)$$

Logaritmista laskentatapaa voidaan soveltaa sekä vasta-, että myötävirtaa käyttävissä lämmönvaihtimissa. Ristivirtausta käytettäessä kaavaa täytyy muuttaa korjauskertoimella. (Huhtinen 2000, 204.)

Lämmönvaihtimen läpi siirtyvä lämpöteho voidaan laskea kaavalla (4).

$$\Phi = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = U \cdot \Delta T_{ln} \quad (4)$$

, jossa  $\phi$  on lämpöteho [kW],  $\dot{m}$  on jommankumman virtaavan aineen massavirta [kg/s],  $c_p$  on saman aineen ominaislämpökapasiteetti [J/(kgK)],  $\Delta T$  on saman ainevirran tulo- ja menolämpötilojen erotus [K] ja  $U$  on lämmönvaihtimen kokonaislämmönsiirtokerroin. (VDI Heat Atlas 1993)

Lämmönvaihtimen tehokkuutta voidaan kuvata rekuperaatioasteella, joka kertoo, paljonko lämpöä voidaan saada siirrettyä teoreettiseen maksimiin nähden. Rekuperaatioaste voidaan laskea kaavalla (5).

$$\varepsilon = \frac{\Delta T_{max}}{\theta_0} \quad (5)$$

, jossa  $\varepsilon$  = rekuperaatioaste,  $\Delta T$  = suurempi virtaavilla nesteillä tapahtuvista lämpötilanmuutoksista ja  $\theta_0$  = suurimman ja pienimmän lämpötilan erotus. (VDI Heat Atlas 1993)

### 3.2 Likaantumisen vaikutusten arvioiminen

Likaantumisen vaikutusta kokonaislämmönsiirtoon voidaan arvioida matemaattisesti kaavalla (6).

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_s} + R_{f,s} \frac{r_s \cdot \ln\left(\frac{r_u}{r_s}\right)}{\lambda} + \frac{A_s}{A_u} \cdot \left(R_{f,u} + \frac{1}{\alpha_u}\right) \quad (6)$$

, jossa  $\alpha_s$  ja  $\alpha_u$  ovat putken sisä- ja ulkopuolinen lämmönsiirtokerroin,  $R_{f,s}$  ja  $R_{f,u}$  ovat putken sisä ja ulkopinnan likavastus,  $r_u$  ja  $r_s$  ovat putken sisä- ja ulkosäde,  $\lambda$  on putkimateriaalin lämmönjohtavuus ja  $A_s$  ja  $A_u$  ovat putken sisä- ja ulkopinnan pinta-ala. (Hammo 1994, Motivan 2016 mukaan.)

Kaavan (6) perusteella likakerroksen paksuuden vaikutus lämmönsiirtokertoimeen on lineaarinen. Siis kahden millimetrin likakerros heikentää lämmönsiirtoa kaksi kertaa niin paljon kuin yhden millimetrin likakerros.

Likavastuksen suuruuteen vaikuttavat sekä siirtimeen kertyneen likakerroksen paksuus, että likakerroksen lämmönjohtavuus. Likavastuksen  $R$  lukuarvo voidaan laskea kaavalla (7).

$$R = \frac{\delta}{\lambda} \quad (7)$$

, jossa  $\delta$  on likakerroksen paksuus, ja  $\lambda$  on likakerroksen lämmönjohtavuus.

### 3.3 Lämpömäärän laskeminen

Tässä kappaleessa on käsitelty työssä tarvittavia aineiden lämpötilamuutoksiin liittyviä laskukaavoja. Tärkeitä käsitteitä laskettaessa lämmönsiirtoa eri aineiden ja olomuotojen välillä ovat ominaislämpökapasiteetti, sulamislämpö ja höyrystymislämpö.

Ominaislämpökapasiteetti  $c$  kertoo, kuinka paljon lämpöenergiaa tarvitaan kilogrammaa kohti muuttamaan tietyn aineen lämpötilaa yhden celsiusasteen verran. Ominaislämpökapasiteetin yksikkö on  $J/kgK$ . Aineen lämpötilamuutoksessa sitoutuva tai vapautuva energia voidaan siis laskea kaavasta (8).

$$E_{\text{lämpö}} = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (8)$$

, jossa  $c$  on ominaislämpökapasiteetti,  $m$  on massa, ja  $\Delta T$  on lämpötilan muutos. (Tammertekniikka 2005, 107.)

Höyrystyslämpö  $Q_h$  kertoo, kuinka paljon lämpöenergiaa tarvitaan höyrystämään yksi kilogramma tiettyä ainetta. Kun kiehumispisteessä olevaan aineeseen lisätään lämpöenergiaa, aine ei kuumene ennen kuin kaikki aine on ensin höyrystynyt. Esimerkiksi vedellä höyrystyslämpö on huomattava verrattuna ominaislämpökapasiteettiin. Energia joka tarvitaan höyrystämään kilo vettä, on noin viisi kertaa suurempi kuin energia, joka vaaditaan lämmittämään vesikiloa sata astetta. Aineen höyrystymisessä sitoutuva energia (tai tiivistymisessä vapautuva energia) voidaan laskea kaavasta (9).

$$E_{\text{lämpö}} = Q_h \cdot m \quad (9)$$

, jossa  $Q_h$  on höyrystyslämpö ja  $m$  on massa. (Tammertekniikka 2005, 107.)

Tässä työssä tärkeimpiä arvoja ovat veden ominaislämpökapasiteetti ja höyrystyslämpö, sekä suolahapon ominaislämpökapasiteetti. Veden ominaislämpökapasiteetti on  $4186 J/kgK$  ja höyrystyslämpö  $2260 kJ/kg$ . Veden tiheys on  $4^\circ C$  lämpötilassa  $1000 kg/m^3$  ja muissa lämpötiloissa se on pienempi. Normaali paineessa vesi on kevyimmillään sadan celsiusasteen lämpötilassa, jossa se on  $958,05 kg/m^3$ .

Suolahappoa käytetään teollisuudessa erivahvaisina vesiliuoksina. Käytetyn suolahapon ominaisuudet riippuvat kyseisen liuoksen väkevyydestä. Suolahapon ominaisuuksia eri väkevyyksillä liuoksilla taulukossa (2).

TAULUKKO 2. Suolahappoliuoksen ominaisuuksia (hydro-land)

HCl m-%	Tiheys (kg/dm <sup>3</sup> )	Ominaislämpökapasiteetti (J/kgK)
10	1,048	3,47
20	1,098	2,99
30	1,149	2,60
32	1,159	2,55
34	1,169	2,50
36	1,179	2,46
38	1,189	2,43

#### 4 KENTTÄTUTKIMUS

Tässä kappaleessa on käsitelty tehtaalla tehtyjä kenttätutkimuksia. Tutkimuksen tavoitteena oli paikantaa kohteet, joissa höyryä käytetään tai tuotetaan. Tarkoituksena oli myös selvittää missä määrin PI-kaaviot vastaavat todellista tilannetta. Osa kaavioista ei ole päivitetty vuosiin, joten linjoissa tehdyt muutokset eivät välttämättä niissä näy. Taulukossa (3) on listattu tehtaan höyryntuottajat ja kuluttajat.

TAULUKKO 3. Tehtaan höyrynkuluttajat ja -tuottajat

Alue	Laite	Tuotto/kulutus (kW)	Huomioita
Kattilalaitos			
	Kattila 1	+20 000	
	Kattila 2	+20 000	
	KL-vaihdin 1	-12 000	
	KL-vaihdin 2	-8 000	
Sinkityslinja 3			
	Talteenottokattila	+7 000	
	Pesuosan säiliöt	- ?	
	Pesuosan kuivain	-165	
	Tornin kuivain	-463	
	Valssin kuivain	-346	
	VOK:in kuivain	-346	
	Passivoinnin kuivain	-800	
Maalipinnoituslinja			
	Talteenottokattila	+4 000	
	Pesu 1	-350 <sup>*)</sup>	
	Huuhtelu 1		
	Huuhtelu 2		
	Pesu 2		
	Huuhtelu 3		
	Huuhtelu 4		
	Fosfatointi		Ei käytössä
	Alkaalinen passivointi		Ei käytössä
	Huuhtelu 5		Ei käytössä
	Huuhtelu 6		
	Huuhtelu 7		
Peittäus			
	Allas 1 lämmönvaihtimet	-2x2300	
	Allas 2 lämmönvaihtimet	-2x900	
	Allas 3 lämmönvaihtimet	-2x900	
	Höyrypatterikuivaimet	-2 x 163	

Öljykellari			
	Temper morgoil-järjestelmä	-1 000 <sup>*)</sup>	
	Temper vaihdejärjestelmä		
	Tandem morgoil-järjestelmä		
	Tandem vaihdejärjestelmä		
	Emulsion varastosäiliöt		
	Jäteöljyn lämmitys		
	Valssausöljyn varastosäiliö		
	Emuls. huurunpoist. pisara-	0	Poistettu
Sinkityslinja 1			
	Höyrypatteri kuivaukselle	-165?	
Emulsionhajo-			
	Emulsionhajotussäiliöt	-1000 <sup>*)</sup>	
	Jäteöljyn varastosäiliöt	-1000 <sup>*)</sup>	

\*) Öljykellarin, maalauslinjan ja emulsionhajotuksen säiliölämmitysten tehoina on lisätty kyseisten järjestelmien nimellisteho PI-kaaviosta. Todellinen käyttö on huomattavasti vähäisempää.

Taulukossa höyryn tuottajat on kuvattu plusmerkein ja kuluttajat miinusmerkein. Kysymysmerkillä on merkitty kohteita, joiden teholumemat ovat arvioituja tai tuntemattomia. Kaikki arvot ovat laitteiden nimellisiä teholukuja, eivätkä laitteet aina tai välttämättä koskaan toimi tällä teholla. Taulukon laitteista on kerrottu tarkemmin seuraavissa alakapitelissa.

#### 4.1 Höyryn tuotanto tehtaalla

Höyryä tuotetaan tehtaalla sinkityslinja 3:n ja MAPI:n (maalipinnoituslinjan) prosesseissa syntyvän lämmön avulla. Tämä höyry on siis tehtaalle ”ilmaista”. Kattilalaitoksella höyryä tuotetaan vain, jos Sinkki 3 ja MAPI eivät tuota sitä tarpeeksi.

Kattilalaitoksella höyryä tuotetaan kahdella 20MW höyrykattilalla, ja kaukolämmöksi sitä muutetaan kahdella putkilämmönvaihtimella. Mikäli kattilalaitoksella tuotetaan höyryä, sitä tuotetaan vain tehtaan tarpeisiin. Vaikka tehtaalla on mahdollisuus myydä kaukolämpöä kaupungin verkkoon, ei ole mielekästä tuottaa höyryä yli oman tarpeen ja käyttää sitä kaupungille myytävän kaukolämmön tuottamiseen. Kuitenkin jos prosessien jäte- lämmöllä tuotetaan ylimääräistä kaukolämpöä, kannattaa se säästösyistä siirtää kaupungin verkkoon.



Mainittakoon, että maakaasun verotus on riippuvainen käyttökohteesta. Mikäli maakaasua poltettaessa liekki tai palamiskaasut koskettavat tuotetta, on verotus alhaisempaa kuin muissa tilanteissa.

#### **4.1.1 Kattilalaitos**

Suurin höyryntuotantokapasiteetti tehtaalla on kattilalaitoksella. Kattilalaitoksella höyryä tuotetaan kahdella luonnonkiertokattilalla, joista kumpikin on teholtaan 20 MW. Alun perin kattilat ovat käyttäneet polttoaineenaan polttoöljyä, mutta myöhemmin niitä on modifioitu ja nykyään polttoaineena toimii maakaasu. Maakaasun etuina ovat sen helppo kuljetettavuus putkia pitkin, sekä mahdollisuus muuttaa höyryntuotannon tehoa nopeastikin vaihtelevan tarpeen mukaan. Maakaasun huonona puolena on sen hintakehitys. Vaikka muutaman viime vuoden aikana hinta on ollut laskussa (Tilastokeskus), voivat muutokset tulevaisuudessa olla arvaamattomia.

Muulla tehtaalla olevat jätelämpökattilat ovat ensisijaisia höyryntuottajia, jotka tuottavat höyryä jatkuvasti suurimmalla mahdollisella teholla. Mutta silloin kun höyryn kulutus ylittää niiden tuotantokapasiteetin, aletaan höyryä tuottaa myös kattilalaitoksella. Tavallisesti kesäisin lämmitystarpeen ollessa pientä tai olematonta kattilalaitoksen käyttötarve on riippuvainen peittäuslinjasta. Peittäuslinja on tehtaan suurin yksittäinen höyrynkuluttaja ja sen käynnissä ollessa tehtaan jätelämpökattiloiden tuotantoteho ei riitä. Kylmemmän sään aikaan, jolloin kattilalaitoksen höyryä tarvitaan jatkuvasti, huomattava osa kattiloiden käyttötarpeesta muodostuu kaukolämmön tuotannosta.

Kattilalaitos vastaa höyryntuotannon hienosäätelystä ja joutuu vastaamaan nopeisiinkin höyryntarpeen muutoksiin. Peittauksen käynnistyessä höyryntuotannon tehontarve voi muuttua jopa 20 MW:lla lyhyessä ajassa.

#### **4.1.2 Sinkityslinja 3**

Sinkityslinja 3:lla teräsnauhaa kuumennetaan uunissa ennen nauhan kastamista sinkkisolunaan. Tämän yli 700 asteisen uunin jätelämpöä hyödynnetään höyryn tuotannossa. Kattilavettä kierrätetään putkissa, joiden ohi uunin maakaasupolttimien savukaasut ohjataan.

Vesi jäädyttää uunista poistuvia savukaasuja kiertäessään putkissa. Savukaasut poistuvat jäädytyksen jälkeen noin 200 asteisena. Jätelämpökattilan teho on 7 MW. LTO-kattila (Lämmön talteenottokattila) on pakkokiertokattila, jossa vesi kiertää lieriössä ja lämpöä talteenottavissa putkissa.

Höyryn runkoverkon paineen noustua ylärajalleen menee sinkityslinja 3:n höyrykattila ohitukselle. Tällöin uunin savukaasuja ei ohjata lämmön talteenottoon, vaan ne kulkeutuvat suoraan ulkoilmaan. Näissä tilanteissa ulosohjautuva lämpö on menetettyä energiaa. LTO-kattilassa on myös kuivakiehuntasuoja, joka laittaa kattilan ohitukselle lieriön veden pinnan laskiessa liian alas. Lisäksi LTO-kattilalla on sulkuventtiili, joka estää savukaasujen pääsyn LTO:oon järjestelmän ylösajon aikana tai mikäli kattilaveden lämpötila nousee liian korkeaksi. Linjan tuottaman höyryn määrää tarkkaillaan Vortex-mittauksella. Mittaus perustuu putkessa olevaan esteeseen ja sen aiheuttaman turbulenssin mittaamiseen (Energiateollisuus ry. 2006, 525).

#### **4.1.3 Maalipinnoituslinja**

Maalipinnoituslinjalla höyryä tuotetaan kuivausuunin jätelämmöllä, sekä kemikaalihuuru-rujen poltosta syntyvällä lämmöllä. Tuotantolinjassa pinnoitetun nauhan pinta kuivataan kahdessa kuivausuunissa. Kuivausuuneissa nauhan pinnoitteesta syntyy huuruja, jotka kuljetetaan jälkipolttimille. Jälkipolttimilla poltetaan kemikaalihuurut maakaasuliekeillä. Maalipinnoituslinjan höyrykattila ja tulistin tuottavat höyryn linjan uunien ja kemikaalien palamisen tuottamalla lämmöllä.

Polttimiin kulkeutuvat kemikaalihuurut täytyy hävittää joka tapauksessa ja tällä tavalla niistä saadaan energiaa hyötykäyttöön. Maalipinnoituksen lämmön talteenotto pystyy tuottamaan höyryä 4 MW:n teholla.

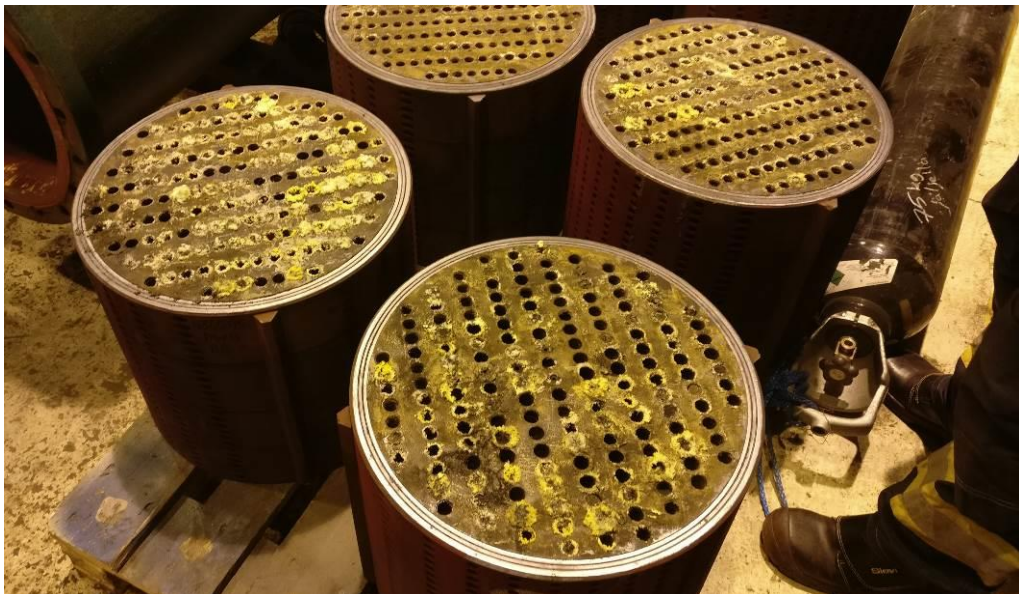
Kuten sinkityslinjalla, myös maalipinnoituksella kattila menee ohitukselle, mikäli runkoverkon paine ylittää raja-arvonsa. Tilanteen jossa kattilalaitos tuottaisi höyryä sinkityslinjan tai MAPI:n kattiloiden ollessa ohituksella, ei pitäisi olla mahdollinen. Kattilat menevät ohitukselle vain höyrynpaineen noustessa liian suureksi. Kun höyrynpaine nousee suureksi, myös kattilalaitoksen kattilat lopettavat höyryntuotannon.

## 4.2 Höyrynkulutus

Höyryä käytetään tehtaalla sekä prosesseissa, että kaukolämmön tuottamiseen tehtaan lämmittämiseksi. Tässä kappaleessa on käsitelty eri höyryn kuluttajia sekä höyryn kulumääriä.

### 4.2.1 Peittaus

Suurin höyrynkuluttaja on peittauslinja, jossa höyryä käytetään suolahapon lämmittämiseen ja nauhakuivauksiin. Suolahappo lämmitetään noin 86 asteiseksi ulkoisilla lämmönvaihtimilla. Suolahappo pumpataan kuuteen grafiittilämmönvaihtimeen, joissa käytetään höyryä. Lämmönvaihtimet koostuvat sylinterin muotoisesta kuoresta, jonka sisällä on useita lyhyempiä grafiittilohkoja. Grafiittilämmönvaihtimet ovat käytössä niiden haponkestävyyden ja huollettavuuden vuoksi. Haponkestävällä teräkselläkin on vaikeuksia kestää lämmitetty 19% happo. Jos grafiittilämmönvaihdin vioittuu, riittää yleensä vain yhden lohkon vaihtaminen eikä koko laitetta tarvitse uusida. Grafiittivaihtimet ovat kuitenkin kalliita. Lämmönvaihtimiin kertyy runsaasti karstaa haposta, sillä järjestelmässä ei ole kunnollista suodatusta (kuva 10).



KUVA 10. Grafiittilämmönvaihtimien lohkoja odottamassa puhdistusta.

Linjalla on kolme allasta, joissa nauhaan ruiskutetaan lämmönvaihtimien kautta kulkenutta happoa. Käytetty happo laskeutuu säiliöön, josta se pumpataan uudelleen lämmönvaihtimille ja osa siirtyy seuraavaan säiliöön kohti linjan alkupäätä. Linjan ensimmäiseltä altaalta säiliöstä pumpataan käytettyä happoa elvytettäväksi. Elvytetty happo pumpataan kolmannen altaan säiliölle, josta se aloittaa taas kiertonsa kohti linjan alkupäätä. Linjan lopussa happo on siis aina väkevimmillään. Kolmen pesualtaan tehontarpeet on listattu PI-kaaviossa seuraavasti: Allas 1: 3600 kW, Allas 2: 1600 kW ja Allas 3: 700 kW.

Jokaisella altaalla on kaksi grafiittilämmönvaihdinta. Eri altaiden vaihtimet on mitoitettu lämmitystarpeen mukaan siten, että ensimmäisen altaan vaihtimet ovat suurimmat ja muilla altailla pienemmät vaihtimet.

Linjan ensimmäisen pesuvaiheen allas 1:n energiantarve on suurin, sillä linjaan tuleva nauha jäähtyy käyttettyä suolahappoa huomattavasti. Jäähtyminen on erityisen suurta talvella, sillä keloja on kuljetettu pakkasessa, eivätkä ne ehdi kunnolla lämmitä ennen peittausta. Ensimmäisellä altaalla myös lämmönvaihtimien likaantuminen on suurempi ongelma kuin muilla altailla. Teräksen pinnasta irtoaa epäpuhtauksia ja myös itse terästä happoon. Kuljettuaan altaiden 3 ja 2 kautta lopulta ensimmäiseen altaaseen, on happo kerännyt itseensä huomattavasti epäpuhtauksia, jotka tukkivat lämmönvaihtimen nopeasti. Lisäksi linjan loppupäässä höyryä kuluttaa nauhakuivaus, joka on toteutettu kahdella 163 kW:n höyrylämmitteisellä ilmakuivaimella.

Peittauslinja on vuodessa arviolta 1000 tuntia seisakissa. Kesäaikaan kaukolämmön tarpeen ollessa pientä, sinkityslinja 3:n ja maalipinnoituksen kattilat ovat ohituksella peittauslinjan seistessä. Tämä tarkoittaa karkeasti arvioituna, että 500 h vuodessa kaksi kattilaa on osittain tai kokonaan ohituksella ja energiaa menee hukkaan.

## 4.2.2 Öljykellari

Öljykellarissa höyryä käytetään öljy- ja emulsiosäiliöiden lämmitykseen, jotta niiden sisältö pysyy juoksevana. Kulutus tähän tarkoitukseen on kuitenkin melko pientä, sillä lämmitys on ainoastaan ylläpitävää ja ajonaikana käytettäviä säiliöitä ei tarvitse lämmittää ollenkaan. Lämmitys on toteutettu säiliössä kiertävällä höyryputkikiepillä. Öljykellarin PI-kaavion mukaan lämmitettäviä kohteita ovat:

Temper morgoil-järjestelmä

Temper vaihdejärjestelmä

Tandem morgoil-järjestelmä

Tandem vaihdejärjestelmä

Emulsiosäiliöt 1, 2, 3 ja 4

Jäteöljyn lämmitys

Valssausöljyn varastosäiliö

Emulsion huurunpoiston pisaraerotin

Kenttätutkimuksen perusteella PI-kaavio piti muuten paikkansa, mutta emulsion huurunpoiston pisaraerotinta ei kellarissa ollut. Kaavion mukaisessa järjestyksessä höyryputkea seurattessa kyseisen säiliön kohdalla oli runkoputkessa haara, josta ei kuitenkaan lähtenyt putkea. Alueella oli myöskin pesunestesäiliö, jossa oli kyljessä liitännät höyryputkille. Oletettavasti kyseinen säiliö on aiemmin ollut emulsion huurunpoiston pisaraerottimena käytössä ja toimii nykyään pesuainesäiliönä ilman höyrylämmitystä.

## 4.2.3 Sinkityslinja 1

Sinkki 1:llä höyryä käytetään nauhakuivaukseen. Puhallin kuivaa nauhaa joko ennen passivointia tai märkävalssauksen jälkeen. Kuivauskohdetta vaihdetaan venttiilillä, joka ohjaa ilmavirran jompaankumpaan vaihtoehtoista. Kuivausta tarvitaan lähes aina linjalla ja poikkeuskeloja, joilla kuivausta ei tarvita lainkaan, ajetaan yksittäisiä silloin tällöin. Kuivausta ei yleensä sammuteta silloinkaan, kun sitä ei tarvittaisi, koska sen pois unohtuminen olisi suurempi vahinko. Huoltojen ajaksi kuivaus kuitenkin otetaan pois päältä.

Kuivain on ilmapuhallin, joka pumppaa ilmaa pienehkön noin 200 kW höyrypatterin läpi putkeen. Putki haarautuu siten, että sillä voidaan tarvittaessa johtaa ilmaa joko passivoimille tai valssaukselle.

#### **4.2.4 Sinkityslinja 2**

Sinkityslinja 2:lla on aiemmin ollut passivointilaite ja sen vuoksi höyrylämmitteinen kuivaus. Passivointilaite näkyy myös sinkityslinja 2:n PI-kaaviossa, jota on päivitetty vuonna 2000. Passivointilaitetta ei kuitenkaan ole ollut linjassa enää muutamaan vuoteen.

Linjassa ei myöskään ole pesuosaa, minkä vuoksi höyrykuivaus on tarpeetonta. Tällä hetkellä linja ei käytä höyryä lainkaan, mutta höyryn runkoputkisto on yhä olemassa tulevaisuuden tarpeen varalta. Sinkki 2:lla on myös lämmön talteenottojärjestelmä. Järjestelmä tuottaa kuitenkin kaukolämpöä, eikä höyryä sinkki 3:n tavoin.

#### **4.2.5 Sinkityslinja 3**

Linjan alussa sijaitsee pesuosa, jossa teräsnauha pestään kemikaaleilla ja huuhdellaan lopuksi demivedellä. Pesuosan lopussa sijaitsee ilmapuhallin ja 165 kW höyrypatteri. Höyrypatteriin menevät höyryputket on kuitenkin katkaistu ja sokeoitu, joten kuivaus tapahtuu ainoastaan ilmapuhaltimen voimin. Pesuosaan kuuluu kolme pesunestesäiliötä, sekä yksi huuhteluvesisäiliö, joiden sisältö pidetään lämpimänä höyryllä.

Huomionarvoista on, että tietyillä teräslaaduilla kuivauksen jälkeen nauhan pintaan ruis-  
kutetaan demivettä uunin liian kuivuuden vuoksi. Ratkaisu on väliaikainen, sillä uuni on liian kuiva loppupäässä eikä alkupäässä, missä vettä lisätään. Linjalle on tulossa pysyvämpi ratkaisu lähitulevaisuudessa.

Sinkkipadan jälkeen teräsnauha kulkee jäähdytystorniin. Tornista alas tullessaan nauha kulkee paksuusmittarin läpi vesijäähdyttimeen, jossa nauha upotetaan suoraan veteen. Jäähdytyksen jälkeen linjassa on höyrypatterilla varustettu kuivain. Kenttätutkimuksen tarkasteluhetkellä patteri oli käytössä ja lämpötilana oli 152 astetta. Huomionarvoista on,

että kuuma kuivain sijaitsee suoraan paksuusmittarin alapuolella. Paksuusmittari puolestaan on jäädytetyssä tilassa. Linjassa on siis päällekkäin tila, jota kuumennetaan, ja tila jota yritetään pitää viileänä. Mittarihuoneen viileänä pitäminen on ollut haasteellista.

Jäädytystornin jälkeen nauha kulkeutuu pintavalssaimen sekä VOK:in (venytysoikaisukoneen) läpi. Valssin jälkeen on ilma kuivaus 346 kW höyrypatterilla. Valssauksessa käytetään valssausemulsiota, joka kuivataan, ettei se päätyisi VOK:in teloihin. VOK:illa puolestaan käytetään pelkkää vettä, joka pitää myös kuivata ennen passivointia. VOK:illa on aikaisemmin ollut käytössä myös 346 kW höyrypatteri, mutta kenttätutkimuksen aikaan höyrypatteri oli poistettuna ja putket olivat sokeoituina. Kuivaimen ilmapuhallin oli kuitenkin käytössä.

Seuraavaksi nauha passivoidaan, eli pintaan ruiskutetaan kemikaalia, joka kuivataan suurella puhaltimella ja 800 kW höyrypatterilla. Passivoinnin jälkeinen kuivaus on pakollinen, jotta passivointikemikaali ei kulkeutuisi juoksevana nauhan pinnalla eteenpäin. Tarkasteluhetkellä passivoinnin kuivauksen lämpötila oli 98°C ja kuivaimen kapasiteetista oli käytössä 76%.

Vaikuttaisi siltä, että minkään linjan kuivauksen elintärkeyttä ei ole selvitetty, vaan kuivauksissa käytetään höyryä ikään kuin varmuuden vuoksi. Kaksi linjan kuivauksista on toiminnassa ilman höyrylämmitystä laiterikkoutumisten tai muiden syiden takia. Lämmityksen puuttumisesta huolimatta tuote on ollut laadultaan hyvää. On mahdollista, että jotkin muutkin kuivauksista olisivat riittävät kaukolämmöllä tai kokonaan ilman lämmitystä.

#### 4.2.6 Maalipinnoitus

Maalipinnoituslinjalla höyryä käytetään useiden kemikaalisäiliöiden lämmittämiseen. Seuraavassa taulukossa (4) on listattu lämmitettävät säiliöt, siinä järjestyksessä, kuin ne linjassa ovat.

TAULUKKO 4. Maalipinnoituslinjan höyrynkulutuskohteet.

Säiliö	Rinnakkaisten höyrykierukoiden lkm.	Lämpötila (°C)	Huomioitavaa
Pesu 1	6	57	
Huuhtelu 1	2	60	
Huuhtelu 2	2	50	
Pesu 2	4	57	
Huuhtelu 3	2	54	
Huuhtelu 4	2	55	
Fosfatointi	4	-	Poistettu käytöstä
Alkaalinen passiivointi	8	-	Poistettu käytöstä
Huuhtelu 5	2	30	Ei lämmitettynä
Huuhtelu 6	2	51	
Huuhtelu 7	2	49	

Osa kaavioissa näkyvistä laitteistoista oli poistettu käytöstä pysyvästi, eikä niitä enää näkynyt valvomoiden kuvakkeillakaan, vaikka laitteet olivat vielä linjassa. Huuhtelu 5 oli toistaiseksi poistettuna käytöstä, joten siinä ei ollut lämmitystä. Kuumimmat lämpötilat säiliöissä olivat 60°C tietämällä, joten säiliöiden lämmittämiseen voisi soveltaa myös kaukolämpöä. Säiliöiden lämmitys on toteutettu höyrykierukoilla, jotka kiertävät altaissa ja lauhde tulee toiselta puolelta ulos. Järjestelmä olisi verrattain yksinkertainen muokattavaksi käyttämään kaukolämpöä höyryn sijasta.



#### 4.2.7 Kattilalaitos

Talvisin kaukolämmön tuottamiseen kuluu myös huomattava määrä höyryä. Kuukausi-ilmoitusten perusteella talvikuukausina kattilalaitoksen höyryä voi kulua enemmän kaukolämmön tuotantoon kuin muualla tehtaalla yhteensä. Tammikuussa 2016 kaukolämpöön käytettiin kattilalaitoksella tuotetusta höyrystä yli kaksi kolmannesta.

Osa kaukolämmöstä saadaan tuotettua sinkki 2:n jätelämmöstä. Kuitenkin joissain tilanteissa kaukolämpövedettä joudutaan jäähdyttämään ennen sen käyttämistä linjan jäähdytykseen, missä energiaa menee hukkaan.

Kattilalaitoksella höyryä tuotetaan kahdella putkilämmönvaihtimella. Yksi vaihtimista on teholtaan 12 MW ja toinen on 8 MW

#### 4.2.8 Emulsionhajotus

Emulsionhajotuslaitoksella on käytössä kaksi emulsionhajotussäiliötä, joita lämmitetään suoralla höyrylämmityksellä. Emulsionhajotus on panosprosessi, jossa hajotettava annos laitetaan säiliöön, siihen lisätään happoa ja lämmitetään sitä sumuttamalla höyryä suoraan seokseen. Suoran lämmityksen ansiosta kaikki höyryn energia siirtyy lämmitettävään aineeseen. Laitoksella on myös kolme jäteöljysäiliötä, joita lämmitetään höyryllä. Lämmitysjärjestelynä on höyrykierukka, joka kiertää säiliöiden sisällä.

Laitoksen ulkopuolella on suuri 32 m<sup>3</sup> lipeän varastosäiliö, jota on aiemmin lämmitetty höyryllä ja sähkölämmityksellä. Nämä menetelmät tuottivat erilaisia ongelmia, joten nykyään säiliössä on käytössä kaukolämpöön perustuva lämmitys. Säiliöllä on oma lämmitysnestekierto, jota lämmitetään lämmönvaihtimessa kaukolämpövedellä.

## 5 OPTIMOINTIMAHDOULLISUUDET

Tietyissä kohteissa höyryn käyttö ei ole välttämättäärkevin tapa siirtää lämpöä. Myös höyryn kuljetuksessa ja lauhteenpoiston mukana häviää energiaa. Tässä kappaleessa on esitetty Hämeenlinnan tehtaalle potentiaalisesti sopivia korvaavia ratkaisuja tai optimaalisempia tapoja käyttää höyryä siellä, missä sitä jo aikaisemmin käytetään.

### 5.1 Peittaus

Peittauksessa höyryn käyttäminen hapon lämmitykseen on yleinen käytäntö alalla ja grafiittilämmönvaihtimet ovat suosittuja tähän tarkoitukseen lämmönsiirtokykynsä ja haponkestävyytensä puolesta. Kuitenkin tämä on suurin höyryn kuluttaja tehtaalla, joten pienikin optimointi mahdollistaisi kohtuullisen suuria säästöjä.

Suolahapon suodattaminen ennen lämmönvaihdinta vähentäisi vaihtimien huoltotarvetta. Puhtaana pysyvät vaihtimet pystyisivät myös tehokkaammin siirtämään lämmön happoon.

Vaihtoehtoinen menetelmä suolahapon lämmittämiseksi höyryllä on suora höyrylämmitys. Kyseinen menetelmä on myös käytössä maailmalla. Suorassa lämmityksessä höyryä sumutetaan suuttimilla suoraan happoon, jolloin lämmönvaihtimen likaantumisongelmaa ei olisi. Samoin menetelmässä ei olisi häviöitä lämmönsiirrosta lämmönsiirtomateriaalin kautta, vaan kaikki höyryn energia siirtyisi happoon. Haittapuolena menetelmässä on hapon laimeneminen. Happoon lisätty höyry tiivistyy vedeksi ja siten laimentaa jatkuvasti käytettävää happoa. Laimenemista voitaisiin kompensoida käyttämällä rinnakkain höyrylämmönvaihtimia ja suoralämmitystä.

Kenttätutkimuksen aikaan peittauksen Allas 1:n säiliön lämpötila oli noin 60 celsiusastetta. Lämmönvaihtimissa happoa joudutaan siis lämmittämään noin 30 astetta ennen nauhaan suihkuttamista. Tämän perusteella voidaan laskea, kuinka paljon höyryä tarvittaisiin lämmittämään happoa 30 astetta ja kuinka paljon syntynyt lauhde laimentaisi happoa. Peittaus pyrkii käyttämään 8-9 m<sup>3</sup> happoa tunnissa. Laskuissa on käytetty tämän perusteella happomäärää 8,5 m<sup>3</sup>. Laimenemisen kannalta ei ole merkitystä paljonko happoa

todellisuudessa käytetään, sillä tarvittava höyryn määrä kasvaisi samassa suhteessa. Laskuissa on huomioitu ainoastaan höyryn tiivistymisessä vapautuva energiamäärä. Höyryn jäähtymisen vapauttava energia ei vaikuta merkittävästi lopputulokseen ja höyryn lämpötila verkossa ei ole vakio, joten tarkka laskeminen olisi hankalaa. 20 % suolahapon ominaislämpökapasiteetti on 2,99 kJ/kgK. Hapon laimentuessa ominaislämpökapasiteetti nousee. 10 % suolahapolla ominaislämpökapasiteetti on 3,47 kJ/kgK. Laskuissa on käytetty 10 % suolahapon arvoa, sillä ennen elvytystä käytettävän suolahapon väkevyys laskee 10 % alapuolelle.

Veden höyrystymislämpö = 2260 kJ/kg

10 % suolahapon ominaislämpökapasiteetti,  $c = 3,47$  kJ/kgK

Tunnissa lämmitettävän suolahapon tilavuus =  $8,5$  m<sup>3</sup>

Suolahapon tiheys =  $1048$  kg/m<sup>3</sup>

Tarvittava lämpötilan muutos altaalla 1,  $\Delta T = 30$  K

Tunnissa lämmitettävän suolahapon massa:

$$8,5 \text{ m}^3 \cdot 1048 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 8908 \text{ kg}$$

Suolahapon lämmittämiseen tarvittava energia:

$$3,47 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 8908 \text{ kg} \cdot 30 \text{ K} = 927322,8 \text{ kJ} \approx 927,3 \text{ MJ}$$

Höyrymäärä, josta tarvittava energia on saatavilla tiivistymisestä:

$$\frac{927322,8 \text{ kJ}}{2260 \text{ kJ/kg}} = 410,319 \dots \text{ kg} \approx 410 \text{ kg}$$

Kuinka paljon 410 kg lauhdetta vaikuttaisi hapon väkevyyteen:

$$\frac{\text{alkuperäinen puhtaan HCl massa}}{\text{alkuperäinen koko liuoksen massa} + \text{lisätyn lauhteen massa}}$$

$$= \frac{890,8 \text{ kg}}{8908 \text{ kg} + 410,319 \dots \text{ kg}} = 0,095596 \dots \approx 9,56 \%$$

Siis lämmitettäessä 10 % suolahappoa suoraan höyryllä 30 astetta, lisätty lauhde laimentaa happoa 0,44 %. Jos suora höyryn lisääminen otettaisiin käyttöön kaikilla linjan altailla, laimenemista tapahtuisi luonnollisesti enemmän. Lauhtumisen lisäksi energiaa vapautuu tulistetun kaasun jäähtymisestä, joten todellisuudessa höyryä ei tarvita aivan niin paljoa kuin laskun mukaan kuluisi, mutta ero on kuitenkin pieni.

Suuri tekijä peittauksen lämmitystarpeessa on viileä tai jopa kylmä teräsnauha, joka jäädyttää käytettävää happoa nopeasti. Happolämmönvaihtimien likaantumisherkkyyden vuoksi lämmittäminen sillä menetelmällä ei ole optimaalista. Lämmönvaihtimien lämmityskuorman vähentämiseksi teräsnauha voitaisiin esilämmittää linjan alussa. Esimerkiksi märkävaraston lämpötilaa kohottamalla linjaan menevä teräs saataisiin kuumemmaksi ja se jäädyttäisi happoa vähemmän. Märkävarastoa voitaisiin lämmittää esimerkiksi suoraan höyryllä sumuttamalla sitä altaan pohjalta tai kaukolämmöllä, joka olisi taloudellisempi ratkaisu, mutta tilanpuute voisi muodostua ongelmaksi.

Kenttätutkimuksen aikana selvisi, että linjan alkupäähän on suunnitteilla uusittu järjestelmä. Märkävarasto poistuu ja varastointi toteutetaan saman tyyppisellä nauhavarastolla kuin muualla tehtaalla on käytössä. Märkävaraston tilalle olisi myös tulossa niin sanottu nolla-allas, johon Allas 1:llä käytetty happo vielä siirretään ennen elvyttämölle pumpausta. Allas toimisi samaan aikaan ylimääräisenä esipuhdistuksena ja esilämmityksenä.

Toinen suunniteltu uudistus on tantaalipäällysteiset putkilämmönvaihtimet, joita tullaan kokeilemaan grafiittilämmönvaihtimen korvaajaksi. Tantaali on erittäin inertti metalli melko korkeisiin lämpötiloihinkin mentäessä. Tantaalilämmönvaihtimet ovat lämmönsiirrotaan tehokkaampia ja huoltovapaampia, kuin esimerkiksi teflonpinnoitteiset lämmönvaihtimet, joita myös hapon lämmitykseen käytetään. Toinen mahdollinen ratkaisu olisi tantaalipäällysteiset höyrykierukat happosäiliöihin (Ti Anode Fabricators Pvt. Ltd.)

Vaikka uudistukset parantaisivat tehokkuutta, hapon suodatus on erittäin tärkeää. Mikäli happoa ei suodatettaisi, epäpuhtaudet päätyisivät lopulta elvyttämölle. Tällä hetkellä allas 1:llä on jo suodatus sivukiertona. Säiliöltä kierrätetään happoa korisuodattimen läpi, millä on saatu vähennettyä järjestelmässä kiertävää likaa. Kaikki happo ei kuitenkaan kulje suodattimen läpi, joten runsaasti likaa jää suodattamatta. Kaiken hapon kuljettaminen suodattimien läpi vaatisi suodatukseen suuremmat putket ja kesken ajon huollettavan suodatusratkaisun, kuten kaksi suodatinta, joista toinen on aina kerrallaan käytössä. Altaiden 2 ja 3 suodatus ei ole yhtä tärkeää, sillä niillä happo on vielä suhteellisen puhdasta. Näillä alueilla ei myöskään ole juuri tilaa asentaa suodattimia.

## **5.2 Hörylämmitteiset säiliöt**

Tehtaalla on useita alueita, joissa kemikaali-, öljy- tai emulsiosäiliöitä lämmitetään höyryllä. Monesti nämä säiliöt pidetään alle 60 asteen lämpötilassa. Tällaisia säiliöitä on esimerkiksi valssauslinjan öljykellarissa, maalauslinjalla ja emulsionhajotuslaitoksella.

60 asteisten säiliöiden lämmitys jopa 200 asteisella höyryllä on liioittelua. Vaikka monissa tapauksista höyrynkulutus on hyvin pientä suuriin kulutuskohteisiin verrattuna, mahdollistaisi kaukolämmön käyttöön siirtyminen silti säästöjä höyryn kalliin hinnan vuoksi.

Esimerkiksi takapihan vesilaitoksen vieressä sijaitseva lipeän varastosäiliö (kuva 11.) on ollut aikaisemmin sähkö- ja höyrylämmitteinen. Molemmilla näistä menetelmistä oli tiettyjä ongelmia kyseisessä kohteessa ja nykyään säiliö lämmitetään kaukolämmöllä. Lämmitykseen käytetään samoja putkia, joissa aiemmin kiersi lämmityshöyry. Säiliön lämmitysvesi kiertää omassa toisiopiirissään, jottei kaukolämpöverkko vaarantuisi vuodon sattuessa.



KUVA 11. Lipeän varastosäiliö, johon on toteutettu lämmitys kaukolämmöllä.

Samanlainen ratkaisu voitaisiin ottaa käyttöön muillakin lämmitetyillä säiliöillä. Esimerkiksi öljykellarin kaikille säiliöille voisi tehdä yhteisen lämmitysvesikierron, jota lämmitettäisiin levylämmönvaihtimissa kaukolämpövedellä Suljetun lämmitysvesikierron lisähyötynä olisi lauhdeongelman poistuminen. Nykyisin lauhteet valuvat kellarissa viemäriin. Suljetussa kierrossa energiaa ei poistuisi.

### 5.3 Sinkityslinja 1

Sinkityslinja 1:llä höyryä käytetään vain yhteen jaettuun kuivaukseen. Tilanteesta riippuen kuivauksen ilma johdetaan toiseen kahdesta kohteesta. Aikaisemmin tehtaalla tehdyn tarkistuksen ohessa huomattiin kuivauksen höyrypatterin olevan lähes täysin tukossa vuosien puhdistamattomuuden johdosta. Kuitenkin kuivaus on ollut riittävää. Patterin lämmitysteho on ollut huomattavasti alentunut. Tämän perusteella vaikuttaisi siltä, että nauhan kuivaus riittäisi täysin ilman höyryäkin. Patterin poistamalla puhaltimen ilman saisi kulkemaan esteettömänä tehokkaammin kuivattaviin kohteisiin. Ennen poistamista voisi kuitenkin kokeilla kuivausta nykyiseen tapaan, mutta poistamalla höyry käytöstä.

Tukkoisuuden huomaamisen aikaan linjalla oli käytössä eri passivointikemikaali, kuin nykyään. Alkuperäinen passivointikemikaali vaati säilytykseenkin lämmityksen ja lisäksi lämmityksen kuivaukseen. Myöhemmin passivointikemikaali vaihdettiin toiseen, jolle ei tarvittu säiliölämmitystä. Tämän kemikaalin aikaan patterin huomattiin olevan tukkeutunut. Nykyinen kemikaalikaan ei tarvitse erillistä lämmitystä säilytyksessä. Säilytyslämpötila on 0-40 astetta.

### 5.4 Sinkityslinja 3

Sinkityspadan jälkeen linjassa olevat vesijäähdytys, höyrypatterikuivaus ja paksuusmittaus ovat ongelmallisesti asemoituina. Kuivaus tuottaa huomattavasti lämpöä, joka kulkeutuu ylöspäin kohti paksuusmittaria, jota yritetään samalla viilentää. Tämä lisää paksuusmittauksen tarvitsemaa viilennystä.

Kokeilunarvoista olisi, riittäisikö nauhan kuivaus pelkällä ilmapuhaltimella vesijäähdytyksen jälkeen. Nauhassa on kuitenkin vielä omaakin lämpöä jäljellä. Tällöin järjestys voisi jäädä nykyiselleen. Jos kuivausteho riittäisi tässä kohtaa ilman höyrylämmitystä, se vähentäisi myös yläpuolella paksuusmittauksen jäähdytyksessä tarvittavaa energiaa.

Myös kaikille muille linjan kuivauksille on sovittu testattavaksi kuivaus ilman höyryä. Kahdessa kohtaa linjaa kuivauksista on jäänyt ajan saatossa lämmitys pois syystä tai toisesta ja linja on kuitenkin pystynyt jatkamaan tuotantoa normaalisti. Linjan henkilöstön

mukaan VOK:illa on ollut jonkin verran pito-ongelmia, joten valssin kuivauksen höyrylämmityksen poistaminen ei olisi suotavaa. Ensisijaisesti höyryn poistamista tai vähentämistä kannattaisi kokeilla tornin kuivauksessa ja passivoinnin kuivauksessa. Testaus ei todennäköisesti ehdi toteutua ennen tämän opinnäytetyön valmistumista. Testien perusteella voidaan kuitenkin arvioida, onnistuisiko osa kuivauksista ilman lämmitystä, tai esimerkiksi kevyemmällä lämmityksellä, joka voitaisiin toteuttaa kaukolämmöllä.

## 5.5 Kattilalaitos

Tällä hetkellä kattilalaitos käyttää kahta 20 MW maakaasukäyttöistä kattilaa höyryntuotantoon ja höyryn kautta myös kaukolämmön tuotantoon. Maakaasu on ollut käytössä vaihtelevan tehontarpeen vuoksi. Voima- ja lämmöntuotantolaitoksissa käytetään usein esimerkiksi puupellettejä tai haketta energian tuotantoon niiden edullisuuden vuoksi verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin.

SSAB:n tilanteeseen tällaiset biopolttoaineet eivät itsessään sovi, sillä pelletti/hakekattilalla ei pystyttäisi vastaamaan peittauslinjan käynnistymisen/pysähtymisen aiheuttamaan tehontarpeen muutokseen. Hakkeen käyttö voisi kuitenkin tulla kysymykseen, mikäli höyryä voitaisiin varastoida enemmän, kuin nykyisillä lieriöillä on mahdollista. Kattilan vastatessa tehontarpeen muutokseen, voitaisiin höyryn tarve tyydyttää varastosta, joka pyrittäisiin pitämään jatkuvasti täytenä.

Toinen vaihtoehto olisi kaksi kattilaa tai yhdistelmäkattila. Erityisesti talvella höyryntuotannolla on jatkuvasti tietty pohjakuorma kaukolämmön tuotannon vuoksi. Kylmän aikaan toisen kattilan koko teho kuluu tehtaan lämmitykseen. Siispä pohjakuorma voitaisiin tyydyttää käyttäen edullisempaa energianlähdettä, kuten haketta. Höyryntarpeen nopeasti muuttuvaan osuuteen voitaisiin jatkaa maakaasun käyttöä sen varmuuden vuoksi.



Hake on pellettejä edullisempi polttoaine. Pellettien etuna puolestaan on suurempi energiatiheys, mikä tarkoittaa käytännössä pienempää tarvittavaa varastotilaa. Pellettien käsittely on myös helpompaa. Pelletit ovat tasalaatuisempia, joten niitä voidaan siirtää helpommin putkia pitkin, ja niiden käyttäytyminen kattilassa on yhdenmukaista. Hakkeessa palojen koko ja muoto voivat vaihdella huomattavasti, mikä hankaloittaa käsittelyä.

Kaukolämmön tuotanto kuluttaa suurimman osan kattilalaitoksen ottamasta maakaasusta. Tuottamalla pohjakuorma edullisemmalla menetelmällä voitaisiin saavuttaa merkittäviä säästöjä. Taloudellisten etujen lisäksi maakaasun käytön vähentäminen toisi positiivista julkisuutta SSAB:lle.

## 5.6 Muita optimointikeinoja

Tehtaalla on useita alueita, joilla höyryn runkoverkossa tai höyryn käyttökohteissa syntyvää lauhdevettä ei hyödynnetä. Usein lauhteet valuvat suoraan viemäriin. Tällainen tilanne on esimerkiksi öljykellarissa. Noin sata asteinen vesi kuljettaa mukanaan yli 10% höyryssä olleesta käyttökelpoisesta energiasta mukanaan.

Peittauslinjalla lauhteet kulkeutuvat huuhtelualtaaseen, joka sijaitsee pesualtaiden jälkeen. Lauhteille olisi putket myös linjan alussa sijaitsevaan märkävarastoon, mutta lauhteita ei lasketa sinne kemikaaliturvallisuuden vuoksi. Lämmönvaihdivien rikkoutuessa lauhteiden mukana voisi märkävarastoon päästä suolahappoa ja altaasta happo voisi kulkeutua viemäriin. Sinkityslinja 3:lla on käytössä lauhteen talteenotto, jossa lauhteet kulkeutuvat kahteen lauhdesäiliöön.

Tämän lisäksi lauhteenpoistimet eivät toimi 100% varmuudella. Poistimet voivat vuotaa, minkä vuoksi lauhteita ei saada täysin talteen edes siellä, missä lauhteille on talteenottojärjestelmä. Useiden lauhteenpoistimien kunnossapito ei ole kenenkään vastuulla, vaan niitä huolletaan tuotannon ilmoittaessa vioista. Ongelmana on se, että tuotannon väki ei välttämättä edes tiedä, mikä lauhteenpoistin on, eikä siten osaa ilmoittaa vuodosta. Lauhteenpoistin voi siis olla epäkunnossa pitkiäkin aikoja kenenkään tietämättä.

Lauhteiden hyödyntämistä tulisi harkita myös niillä alueilla, joissa sitä ei vielä tehdä. Vaikka kyseisten lauhteen aiheuttamien häviöiden suuruusluokka on tehtaan koko höyrynkäytön mittakaavassa hyvin pieni, on se kuitenkin jatkuva lisäkustannus. Lauhteiden talteenotolla voitaisiin saavuttaa säästöjä polttoainekuluissa ja lisäveden käytössä. (Harju 2016, 7) Lauhde voidaan hyödyntää esimerkiksi uudelleen höyryntuotantoon.

## 6 POHDINTA

Opinnäytetyön toteutus oli onnistunut. Työlle asetetut tavoitteet saavutettiin: höyryverkko kartoitettiin ja sitä ehdotettiin optimoitavaksi useassa kohteessa. PI-kaaviot vastasivat höyryverkon nykyistä tilaa, lukuun ottamatta öljykellarista poistettua säiliötä, muokattua lipeän varastosäiliötä, sinkityslinja 3:n höyrypattereita ja sinkityslinja 2:ta, josta höyryä käyttävä laitteisto on poistettu. Maalipinnoituslinjan käytöstä poistettu laitteisto oli vielä toistaiseksi paikallaan, mutta kaavioiden muokkaus tulee ajankohtaiseksi laitteistoa poistettaessa. Kenttätutkimus osoitti myös, että poistettujen laitteiden merkinnässä olisi parannettavaa, sillä usein linjojen henkilöstö ei edes tiennyt laitteiden puuttumisesta.

Työssä esitetään useita mahdollisia optimointikeinoja. Suurimpana optimointikohteena on peittauksen hapon lämmityksen muuttaminen. Tehtyjen laskujen perusteella hapon lämmitys suoraan höyryllä olisi varteenotettava vaihtoehto. Happo ei laimenisi tällä menetelmällä liikaa. Lisäksi tärkeitä esitettyjä muutoksia ovat säiliöiden höyrylämmitysten korvaaminen vesilämmityksillä, höyrykuivausten tarpeellisuuden selvittäminen, sekä lauhteiden hallinta. Lauhteiden hallinnan optimointiin kuuluvat lauhteiden talteenotto niillä alueilla, joilla sitä ei vielä tehdä ja lauhteenpoistimien kunnossapito kaikilla alueilla. Höyryntuotantoa voitaisiin optimoida höyrykattilatekniikkaa päivittämällä, mikä on joka tapauksessa jossain vaiheessa tehtävä.

Opinnäytetyössä esitetyt muutokset ja koeajot ovat hyvä alku höyrynkulutuksen vähentämiseksi. Höyryverkon tutkimista ehdotetaan kuitenkin jatkettavaksi uusien optimointikohteiden löytämiseksi.

## LÄHTEET

Alfa Laval Ab. Alfa Laval Gasketed Heat Exchangers <http://www.thermaltransfersystems.com/pdf/alfa-laval-gasketed-heat-exchangers.Pdf> luettu 20.5.2017

Briant, C. L.; Banerji, S. K. Embrittlement of Engineering Alloys. 1983. New York, Academic Press

Energiateollisuus ry. 2006. Kaukolämmön käsikirja

Gilman, G.F. Boiler Control Systems Engineering. 2005. ISA – The Instrumentation, Systems and Automation Society. ISBN 1-55617-907-3

Harju, Petteri. 2016. Voimalaitoksen lauhdejärjestelmän kartoittaminen ja kehittäminen

Rotary Heat Exchangers for Heat Recovery in Ventilation Systems. Handbook for Design, Installation and Operation. 2005. Hoval

Hammo, Simo. 1994. Lämmönsiirtimien likaantuminen. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. ISBN 951-763-923-6.

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

Hydro-land <http://hydro-land.com/e/ligne-en/doc/HCl.html> luettu 20.4.2017

Industrial Boiler & Mechanical (<http://www.industrialboiler.com/boilers/firetube-boilers.aspx>)

Kakaç, Sadik; Liu, Hongtan; Pramuanjaroenkij, Anchasa. 2012. Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design, Third Edition. CRC Press

Kolmetz, Karl. 2015. Kolmetz Handbook of Process Equipment Design. Plate Heat Exchanger Selection and Sizing. KLM Technology Group

Lampinen, Markku J.: Fagerholm, Nils-Erik; Wikstén, Ralf. 2005 Lämmönsiirtimien mitoitus. Luennot ja opetusmateriaali keväällä 2005. Teknillinen korkeakoulu, Helsinki.

Mills, A.F. 1999. Basic Heat & Mass Transfer, Second Edition. New Jersey, Prentice Hall

Motiva. 2016. Energiatehokas lämmönsiirto. [http://www.motiva.fi/energiatehokas\\_lammonsiiirto](http://www.motiva.fi/energiatehokas_lammonsiiirto) luettu 15.4.2017

Mäkelä, Mikko; Soininen, Lauri; Tuomola, Seppo; Öistämö, Juhani. 2005 Tampere, Tammermekaniikka

Padleckas H. 2006. Kuva putkilämmönvaihtimen halkileikkauksesta. Wikipedia

Thomasnet.com. Types of Heat Exchangers. <http://www.thomasnet.com/articles/process-equipment/heat-exchanger-types> luettu 20.5.2017

Ti Anode Fabricators Pvt. Ltd. [http://www.tianode.com/Steel\\_Processing.htm](http://www.tianode.com/Steel_Processing.htm) luettu 18.5.2017

Tietopaketti titaanista. <http://periodictable.com/Elements/022/data.html> luettu 15.3.2017

Tomia 2007. Kuva pyörivästä lämmönvaihtimesta. Wikipedia

Vahterus. Plate & Shell Heat Exchanger <http://www.vahterus.com/en/products/plate-shell> luettu 22.5.2017

VDI-Heat Atlas. 1993. ISBN-978-3-540-77876-9