



Paperikoneen ilmakeivaimen lämmöntalteenoton mitoitus

Simo Pesio

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2022

Konetekniikka
Koneautomaatio

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Koneautomaatio

PESIÖ, SIMO:
Paperikoneen ilmakeivaimen lämmöntalteenoton mitoitus

Opinnäytetyö 40 sivua
Huhtikuu 2022

Opinnäytetyön tarkoituksena oli paperikoneen ilmakeivaimen lämmöntalteenoton mitoitus toimeksiantajan UPM Communication Papers Kymin paperikoneelle. Opinnäytetyön tavoitteena oli mitoittaa lämmönvaihdin oikealla materiaalivalinnalla ja määrittää lämmöntalteenoton hyöty. Tutkimuksessa pyrittiin selvittämään lämmönvaihtimella saavutettava hyöty sekä lämmönvaihtimeen investoimisen taloudellinen kannattavuus. Tämän lisäksi tarkoituksena oli laatia lämmönvaihtimen vaihtosuunnitelma.

Työ aloitettiin perehtymällä paperikoneen ilmakeivaimen ja järjestelmään kuuluvien laitteiden toimintaan. Tuotantolaitoksella käytössä olevalta ohjelmistolta pystyttiin tutkimaan ilmakeivaimen sekä prosessin toimintaa. Ohjelmiston mittareilta saatiin tarvittavaa dataa lämmönsiirtimeen mitoitusta sekä hyödyn määrittämistä varten. Mitoituksessa hyödynnettiin olemassa olevan lämmönvaihtimen mittoja. Prosessin ainevirtojen huomattiin olevan korroosiota aiheuttavaa, minkä perusteella lämmönvaihtimen materiaalivalinta tehtiin.

Lämmönvaihtimen mitoituksessa päädyttiin luotettaviin tuloksiin. Lämmönvaihtimen lämpöteho ja sen avulla saavutettava lämpöenergian talteenotto saatiin määritettyä. Lämmönvaihtimen pintalämpöputkien halkaisija kasvoi ja siten myös lämmönsiirtopinta-ala. Materiaalivalinnassa päädyttiin korroosiota kestävään ruostumattomaan teräkseen. Lämmönvaihtimen painehäviö määritettiin pintalämpöputkien halkaisijan muuttumisen vuoksi.

Asiasanat: paperikone, ilmakeivain, lämmönvaihdin, pintalämpöputki

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Machine Automation

PESIÖ, SIMO:
Dimensioning The Heat Recovery Of Paper Machine Air Dryer

Bachelor's thesis 40 pages
April 2022

The purpose of the thesis was to dimension the heat recovery of a paper machine air dryer for a paper machine at UPM Communication Papers Kymi. The aim of the thesis was to dimension the heat exchanger with the right choice of material and to determine the benefit of heat recovery. Moreover, the goal was to find out the benefits of a heat exchanger and the economic viability of investing in a heat exchanger. Finally, the objective was to draw up a heat exchanger replacement plan.

The study was begun by getting acquainted with the operation of the air dryer of the paper machine and the equipment included in the system. By examining the software used at the production plant, it was possible to study the operation of the air dryer and the process. The necessary data was obtained from the software's gauges for the sizing of the heat exchanger, as well as for determining the benefit. The dimensions of the existing heat exchanger were utilized in the sizing. The material flows in the process were found to be corrosive and the material selection for the heat exchanger was made on basis of this finding.

Reliable results were obtained in the sizing of the heat exchanger. The heat output of the heat exchanger and the heat energy recovery achieved by it were determined successfully. The diameter of the surface heating tubes of the heat exchanger was increased and thus also the heat transfer area. The choice of material was based on corrosion-resistant stainless steel. The pressure drop of the heat exchanger was determined due to the change in the diameter of the surface heat pipes.

Key words: papermachine, air dryer, heat exchanger, surface heating tube

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	UPM KYMI	6
3	LÄMMÖNSIIRTO	7
	3.1 Johtuminen	7
	3.2 Konvektio	7
	3.3 Säteily	8
4	LÄMMÖNVAIHDIN.....	9
	4.1 Putkilämmönvaihdin	9
	4.2 Lämmönvaihtimen lämpötehon määrittäminen.....	12
5	ILMAKUIVAIMEN LÄMMÖNTALTEENOTTO	16
	5.1 Ilmakuivaimen lämmönvaihdin	16
	5.2 Lämmönvaihtimen tutkinta	17
	5.3 Lämmönvaihtimen lämpöteho	20
6	LÄMMÖNVAIHTIMEN MITOITUS.....	22
	6.1 Materiaalivalinta	22
	6.2 Lämmönvaihtimen rakenne	23
	6.3 Painehäviöt	24
	6.4 Lämpöteho	28
7	LÄMMÖNVAIHTIMEN KUSTANNUKSET	32
8	LÄMMÖNTALTEENOTON HYÖTY	33
	8.1 Lämpöenergian talteenotto	33
	8.2 Taloudellinen hyöty	33
	8.3 Takaisinmaksuaika.....	34
9	VAIHTOTYÖN SUUNNITELMA.....	36
	9.1 Vaihtimen erottaminen prosessista	36
	9.2 Vaihtimen runkorakenteiden mitoitus ja vaihtotyö	36
	9.3 Uuden vaihtimen liittäminen prosessiin	37
10	POHDINTA JA YHTEENVETO	38
	LÄHTEET	40

1 JOHDANTO

Tuotantolaitoksissa hyödynnetään nykypäivänä yhä enemmän lämpöenergian talteenottoa monissa erilaisissa kohteissa. Lämmöntalteenotolla vähennetään energian kulutuksen lisäksi myös hiilijalanjälkeä. Yleinen nimitys laitteelle, millä siirretään lämpöä ainevirrasta toiseen, on lämmönvaihdin. Lämmönvaihtimia käytetään hyvin laajasti erilaisissa ympäristöissä. Teollisuudessa käytettävät lämmönvaihdinratkaisut vaihtelevat yksinkertaisista kahden ainevirran välillä olevan tasaisen seinämän ratkaisusta monimutkaisempiin ratkaisuihin.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli paperikoneen ilmakeivaimen lämmöntalteenoton mitoitus toimeksiantajan UPM Kymen paperikoneelle. Lämmönvaihtimen fyysinen mitoitus toteutettiin järjestelmässä entuudestaan olevan lämmönvaihtimen pohjalta. Lämmönvaihtimelle pyrittiin löytämään olosuhteisiin sopiva materiaalivalinta.

Työssä laskennalla selvitettiin lämmönvaihtimen teho ja tämän avulla saavutettava hyöty. Lämpötehon määrittämisessä käytettiin reaaliajassa saatavaa dataa prosessin aineiden virtauksista sekä lämpötiloista. Tuloksia analysoimalla selvitettiin taloudellinen kannattavuus investoinnille sekä lämmönvaihtimen kokonaiskustannukset.

2 UPM KYMI

Tämä työ tehtiin toimeksiantona UPM-Kymmene Oyj:n Kymin paperitehtaalle. UPM on kansainvälinen toimija paperi- ja metsäteollisuusalla. UPM tuotevalikoimaan kuuluvat erikoispaperit graafiset paperit, sellu biopolttoaineet, tarramateriaalit, vaneri biokomposiitit, biokemikaalit ja biolääketieteen tuotteet (UPM, 2022).

UPM Kymi on Kouvolassa, Kuusankosken kaupunginosassa sijaitseva tuotantolaitos, jonka alueella toimii UPM Kymin sellutehdas ja UPM Communication Papers Oy:n paperitehdas. Alueella toimii myös Kymin voima Oy:n biovoimalaitos ja Schaefer Kalk Finland Oy:n karbonaattilaitos (UPM Kymi, 2022).

Kymin paperitehtaalla valmistetaan päällystettyjä ja päällystämättömiä hienopaperilajeja kahdella paperikoneella ja päällystyskoneella. Paperituotteisiin kuuluvat painopaperit, toimistopaperit ja erikoispaperit (UPM Kymi, 2022).

Paperitehdas Kuusankoskella perustettiin 1872 ja ensimmäinen paperikone käynnistyi 1873 (UPM Kymi, 2022).

3 LÄMMÖNSIIRTO

Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan lämpötilat eri aineiden välillä pyrkivät tasaantumaan, eikä lämpö koskaan itsestään siirry ilman ulkoista työtä kylmemmästä kappaleesta lämpimämpään (Fagerholm 1986. s. 255).

Lämmön siirtyminen voi tapahtua kolmella eri tavalla. Näitä ovat johtuminen, konvektio ja säteily. Lämmönsiirtymisen edellytyksenä on, että olemassa on lämpötilaero. Lämmön johtuminen tarkoittaa lämmön siirtymistä kiinteässä aineessa. Konvektiossa lämmön siirtyminen tapahtuu ainevirran välityksellä kiinteään aineeseen tai päinvastoin. Säteilylämmönsiirto on säteilyä, jota jokainen kappale lähettää pelkästään oman lämpötilansa perusteella (Fagerholm 1986. s. 255–258).

3.1 Johtuminen

Johtumisessa eli konduktiossa lämmön siirtyminen tapahtuu kiinteässä aineessa tai kiinteästä aineesta toiseen. Jokaisella materiaalilla on oma lämmönjohtavuus, mikä kuvaa aineen kykyä johtaa lämpöä (Fagerholm 1986. s. 255–263). Fourierin laki kuvaa johtumalla tapahtuvaa lämpövirtaa. Fourierin laki on esitettyä yksinkertaisimmassa muodossaan kaavassa (1).

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}, \quad (1)$$

missä q on lämpövirta, λ on materiaalin lämmönjohtavuus (W/mk), ΔT on lämpötilaero (K) ja Δx on materiaalin vahvuus (m).

3.2 Konvektio

Konvektiossa tapahtuva lämmön siirtyminen nesteestä tai kaasusta kiinteään aineeseen tai päinvastoin on virtaavissa aineissa lämmönsiirtymismekanismeista tärkein. Varsinaisen konvektion lisäksi lämpö siirtyy myös johtumalla tai säteilemällä kiinteästä aineen pinnasta lähellä olevaan nesteeseen tai kaasuun (Virtaustekniikka ja Lämmönsiirto 2019).

Lämmönsiirtoon vaikuttavat monet tekijät, kuten aineiden ominaisuudet sekä virtaavan aineen nopeus, mutta määrävänä tekijänä on virtauksen rajakerros. Laminaarisessa rajakerroksessa ei tapahdu sekoittumista, vaan virtaus on yhdensuuntaista. Tällöin lämmönsiirtyminen tapahtuu pääosin johtumalla rajakerroksen läpi. Turbulenttisessa rajakerroksessa tapahtuu virtausta myös pintaa vastaan (Fagerholm 1986. s. 255–273).

3.3 Säteily

Kaikki kappaleet lähettävät absoluuttisen nollapisteen yläpuolella lämpösäteilyä. Lämpösäteily on osa sähkömagneettista säteilyä, joka on riippumaton ulkoisista tekijöistä. Lämpösäteilyn aallonpituus on 0,1 µm-0,1 mm. Lämpösäteily voi siirtyä tyhjiössä, toisin kuin konvektio tai konduktio, jotka tarvitsevat siirtymiseen väliaineen. Kun säteily kohtaa vastaanottavan pinnan, osa säteilystä absorboituu vastaanottavaan aineeseen, osa heijastuu takaisin ja osa läpäisee pinnan. Usein säteilylaskelmissa käytetään absoluuttisen mustaa kappaletta, vaikka sellaista ei esiinny käytännössä (Virtaustekniikka ja Lämmönsiirto 2019).

Mustan pinnan säteilemisvoimakkuus eli emittanssi määritetään kaavalla (2) (Fagerholm 1986. s. 258):

$$M_m = \sigma T^4, \quad (2)$$

missä M_m on emittanssi, σ on Stefan-Boltzmannin vakio ja T on kappaleen pintalämpötila.

4 LÄMMÖNVAIHDIN

Lämmönvaihdin on laite, jolla siirretään lämpöenergiaa ainevirrasta toiseen. Lämmönsiirto voi tapahtua ainevirtojen välillä joko suoraan sekoittamalla tai johtamalla kiinteän seinämän läpi. Useimmissa teollisuudessa käytettävissä lämmönvaihtimissa ainevirrat ovat erotettu toisistaan seinämällä. Teollisuudessa käytettävät lämmönvaihdinratkaisut vaihtelevat yksinkertaisista kahden ainevirran välillä olevan tasaisen seinämän ratkaisusta monimutkaisempiin ratkaisuihin, joissa on useita tuloja, lähtöjä sekä ohjauslevyjä. Lämmönvaihtimia käytetään prosessiaineiden lämmityksessä sekä viilennyksessä. (Theodore, L. s. 257).

Lämmönvaihtimet, jossa virtausaineet eivät sekoitu keskenään, kutsutaan myös pintalämmönvaihtimiksi. Pintalämmönvaihtimet voidaan toimintaperiaatteeltaan jakaa kahteen ryhmään: rekuperaattorit ja regeneraattorit. Rekuperaattoreissa kulkee jatkuvasti kaksi ainevirtaa. Lämpö siirtyy kuumasta ainevirrasta kylmään seinämän läpi. Rekuperaattoreita ovat tavallisesti kaikki lämmittimet, lauhduttimet, höyrystimet ja jäähdyttimet. Rekuperaattorit erotellaan aineiden virtaussuunnan mukaisesti vasta-, myötä ja ristivirtalämmönvaihtimiin. Regeneraattoreissa ainevirrat kulkevat vuoron perään vastakkaisiin suuntiin. Ainevirrat ohjataan kulkemaan joko saman lämpöä varastoivan rakenteen läpi vuorotellen tai lämpöä varastoiva osa pyörii ainevirtojen kulkiessa eri osien läpi. Regeneraattorissa lämpö siirtyy ainevirrasta toiseen lämpöä varastoivat rakenteen läpi. Regeneraattoreita käytetään mm. kattilalaitoksen palamisilman esilämmittiminä (Fagerholm 1986. s. 289–293).

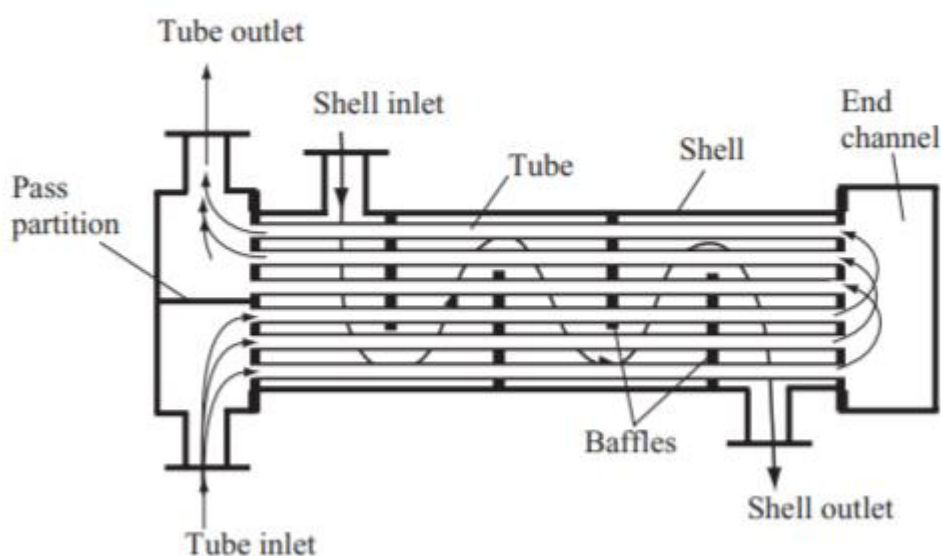
Tässä työssä käsitellään ainoastaan putkilämmönvaihtimia. Muita lämmönvaihtimia ovat levylämmönvaihtimet kaksoisputkilämmönvaihtimet, spiraalilämmönvaihtimet ja ilmajäähdyttimet.

4.1 Putkilämmönvaihdin

Putkilämmönvaihtimet ovat yleisimpiä teollisuudessa käytettäviä lämmönvaihtimia, sillä se on käyttöpaineen ja käyttölämpötilan suhteen laaja-alaisin. Eräs lämmönsiirtimiä käsittelevä organisaatio on TEMA. TEMA nimitys tulevat sanoista

Tubular Exchangers Manufacuting Associtation. TEMA on luokitellut lämmönvaihdintyyppit laiterakenteen perusteella sekä määrittänyt vaipoille ja päädyille omat kirjaintunnukset (Virtaustekniikka ja Lämmönsiirto 2019).

TEMA on luokitellut yli 280 erilaista putkilämmönvaihdintyyppiä. Yksinkertaisimmassa putkilämmönvaihtimessa on yksi vaippapuolen läpivienti ja yksi putkipuolen läpivienti. Lämmönvaihtimia numeroidaan kahdella numerolla siten, että ensimmäinen luku tarkoittaa vaippapuolen läpivientien lukumäärää ja jälkimmäinen tarkoittaa putkipuolen läpivientien lukumäärää. Putkilämmönvaihdin yhdellä vaippa- ja putkipuolen läpiviennillä, on 1–1 vaihdin. Putkilämmönvaihtimella voi olla useita läpivientejä kummallakin puolella. Kuvassa 1 on esitettyä 1–2 vaihdin, missä putket viedään kahteen kertaan vaipan läpi (Theodore, L. s. 315–322).



KUVA 1. Vaihdin 1–2 läpivienneillä. (HoSung. L. s. 273)

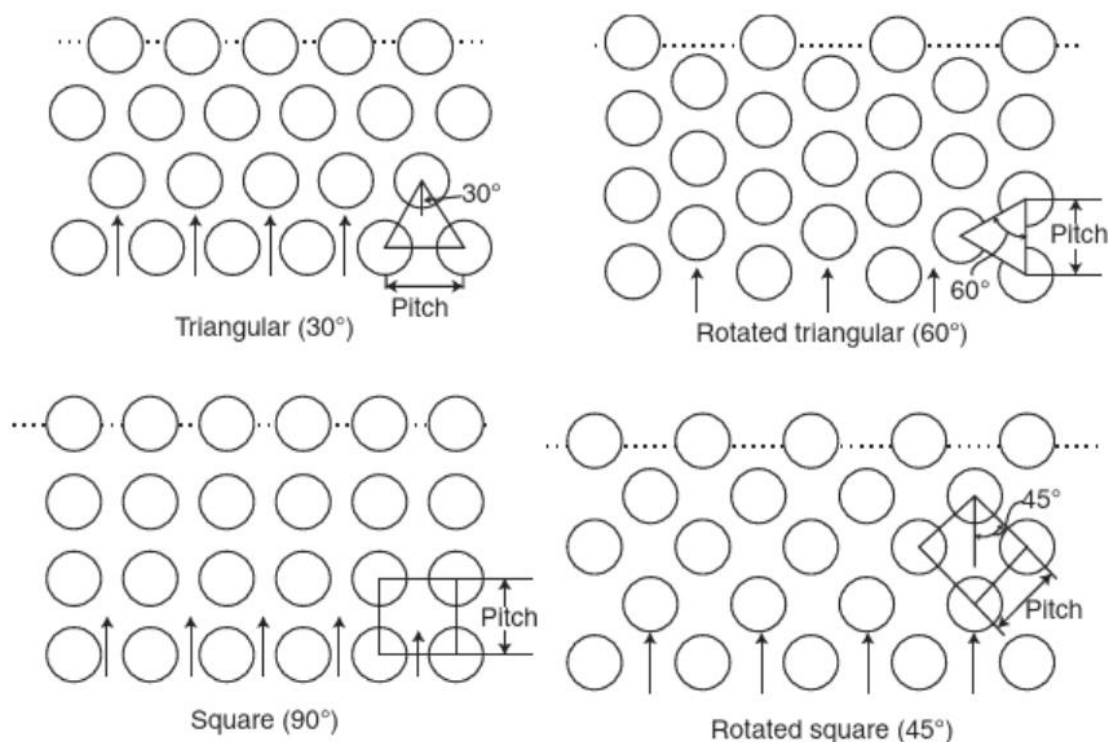
Putkilämmönvaihdin koostuu putkipaketista, vaipasta, päädyistä, ohjaus- ja väli-levyistä sekä vaihtimen ja prosessiputken väliin tulevista yhdyskappaleista. Putkipaketissa on useita putkia rinnakkain, jotka ovat kiinnitetty päistään putkilevyihin. Toinen aineista virtaa päädyistä sisään, putkia pitkin toiseen päähän ja toisesta päädyistä ulos. Toinen aineista virtaa vaipan ja putkipaketin välisessä tilassa. Kuvassa 1 näkyy vaipan ja putkipaketin välisessä tilassa ohjauslevyjä.

Näillä levyillä voidaan ohjata ainevirta useaan kertaan putkipaketin läpi sekä tuetaan vaihtimen ja putkipaketin rakennetta (Virtaustekniikka ja Lämmönsiirto 2019).

Putkilämmönvaihtimen suunnittelussa on otettava huomioon prosessissa virtaavat aineet, lämpötilat ja paine. Vaihdinta määritettäessä on hyvä tietää aineiden korroosiovaikutukset ja likaantuvuudet. Jos prosessissa on korroosiota aiheuttavia ainevirtoja, on suositeltavaa käyttää lämmönvaihtimessa materiaalia, jolla on hyvä korroosion sietokyky. Oikealla materiaalivalinnalla ehkäistään korroosion aiheuttamia vaurioita ja säästytään ylimääräisiltä kuluilta. Suuren korroosiovaikutuksen ja likaantuvuuden omaavat aineet suositellaan käytettäväksi putkipuolella. Vaippapuolella likaantuvat aineet voivat aiheuttaa virtauksen muutoksia lian kerääntyessä pintalämpöputken ulkopintaan. Pintalämpöputkien likaantuessa myös lämmönvaihtimen lämmönsiirtokyky heikkenee (Theodore, L. s. 315–322).

Pintalämpöputkien halkaisija useimmissa vaihtimissa on $\frac{3}{4}$ tuumasta 1 tuumaan. Suuremmalla putkihalkaisijalla voidaan pienentää putkipuolen painehäviöitä. Pintalämpöputkilla täytyy olla riittävä seinämävahvuus, että se kestää ainevirtojen aiheuttamat värähtelyt sekä vaippa- ja putkipuolen paineet. Ohjauslevyjä asettamalla voidaan estää putkia värähtelemästä tai taipumasta (Theodore, L. s. 315–322).

Putkijaolla tarkoitetaan putkilämmönvaihtimessa pintalämpöputkien asettelutapaa. Putkijaossa putkien etäisyys keskipisteestä toiseen ei pitäisi olla yli 1.25-kertainen putken ulkohalkaisijaan nähden. Yleiset jaot ovat kolmio- ja neliöjako. Kuvassa esiintyvät kulmat ovat putkijaon kulmia, jotka muodostuvat vierekkäisten putkien ja virtaussunnan välille (kuva 2). 30° ja 60° kolmiojaolla saadaan noin 15 % enemmän pintalämpöputkia samalle alalle kuin 45° ja 90° neliöjaolla. Jos vaippapuolella virtaava aine aiheuttaa likaantuvuutta pintalämpöputkiin, ei suositella kolmiojakoä käytettäväksi puhdistamisen vaikeuden vuoksi. Kun vaippapuolen virtaus on laminaarista, 45° neliöjaolla saavutetaan parempi lämmönsiirto ja pienempi painehäviö vaihtimen yli. 90° neliöjaolla saadaan parempi lämmönsiirto ja pienempi painehäviö, kun virtaus on turbulენტtista (Theodore, L. s. 315–322).



KUVA 2. Putkilämmönvaihtimessa käytettyjä putkijakoja (Theodore, L. s. 321)

4.2 Lämmönvaihtimen lämpötehon määrittäminen

Lämmönvaihtimen lämpöteho voidaan määrittää, jos tiedetään virtaavan aineen massavirta, sen ominaislämpökapasiteetti ja lämpötilanmuutos. Lämpöteho silloin määritetään kaavalla (3):

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \Delta T, \quad (3)$$

missä Q on lämpöteho (W), \dot{m} on virtaavan aineen massavirta (kg/s), c_p saman aineen ominaislämpökapasiteetti (J/(kgK)) ja ΔT on aineen lämpötilanmuutos (K).

Lämpöteho voidaan myös määrittää lämmönvaihtimen kokonaislämmönsiirtokerroimen sekä logaritmisen lämpötilaeron avulla. Tällöin lämpöteho voidaan määrittää kaavan (4) mukaan (Theodore, L. s. 328–329):

$$Q = UA\Delta T_{ln}, \quad (4)$$

missä U on lämmönvaihtimen kokonaislämmönsiirtokerroin (W/m²K), A on vaihtimen lämpöpinta-ala (m²) ja ΔT_{ln} on logaritminen lämpötilaero (K). Logaritminen

lämpötilaero määritetään myötä ja vastavirtalämmönvaihtimille kaavan (5) mukaan (Motiva Oy, 2016.):

$$\Delta T_k = \Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}, \quad (5)$$

missä ΔT_k on keskimääräinen lämpötilaero, ΔT_{ln} on logaritminen lämpötilaero, ΔT_1 on aineiden lämpötilaero vaihtimen alkupäässä, ΔT_2 on aineiden lämpötilaero vaihtimen loppupäässä.

Ristivirtavaihtimessa aineiden virtaukset eivät ole puhdasta myötä- tai vastavirtausta. Koska virtaukset ovat poikkisuuntaisia toisiinsa nähden, täytyy huomioida lämpötehoa määritettäessä logaritmissen lämpötilaeron korjauskerroin. Lämpöteho ristivirtavaihtimelle määritetään kaavan (6) mukaan (Theodore, L. s. 328–329):

$$Q = UAF\Delta T_{ln}, \quad (6)$$

missä Q on lämpöteho, U on kokonaislämmönsiirtokerroin, F on logaritmissen lämpötilaeron korjauskerroin ja ΔT_{ln} on logaritminen lämpötilaero.

Logaritmissen lämpötilaeron korjauskerroin on riippuvainen lämmönvaihtimen vaippa- ja putkipuolen läpivientien määrästä ja niiden virtausreiteistä. 1–1 tyyppisessä vaihtimessa logaritmissen lämpötilaeron korjauskerroin $F=1$. Putkilämmönvaihtimelle (1–2) voidaan määrittää korjauskerroin kaavan (7) mukaan (Bowman, 1940):

$$F = \frac{\sqrt{R^2 + 1}}{R - 1} \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - P}{1 - PR}\right)}{\ln\left(\frac{2 - P(R + 1 - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - P(R + 1 + \sqrt{R^2 + 1})}\right)}, \quad (7)$$

missä F on logaritmissen lämpötilaeron korjauskerroin sekä termit R ja P ovat suhdelukuja, jotka voidaan määrittää kaavojen (8 ja 9) mukaan (Bowman, 1940):

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (8)$$

ja

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1}, \quad (9)$$

missä T_1 on ensimmäisen aineen tulolämpötila, T_2 on ensimmäisen aineen lähtölämpötila, t_1 on toisen aineen tulolämpötila ja t_2 on toisen aineen lähtölämpötila.

Kokonaislämmönsiirtokerroin saadaan määritettyä kuin mikä tahansa sarjassa oleva vastus. Lämmönsiirto tapahtuu usean sarjassa olevan vastuksen läpi. Näitä ovat likakerrokset, molempien ainevirtojen konvektiolämmönsiirtokertoimet sekä putkimateriaalin lämmönjohtavuus. Kokonaislämmönsiirtokerroin pintalämpöputken sisähalkaisijaan perustuen määritetään kaavan (10) mukaan (Virtaustekniikka ja Lämmönsiirto 2019):

$$U_I = \frac{1}{\frac{1}{h_I} + \frac{x D_I}{k D_L} + \frac{1}{h_O} \frac{D_I}{D_O}}, \quad (10)$$

missä U_I on kokonaislämmönsiirtokerroin (W/m^2K), h_I on virtaavan lämmönsiirtokerroin (W/mK), h_O on virtaavan aineen lämmönsiirtokerroin (W/mK), x on putken seinämän paksuus (m), k on putkimateriaalin lämmönjohtavuus (W/mK). D_I on putken sisähalkaisija (m), D_O on putken ulkohalkaisija (m) ja D_L on putkien logaritminen keskihalkaisija (m), mikä on esitettyä kaavassa (11):

$$D_L = \frac{D_O - D_I}{\ln\left(\frac{D_O}{D_I}\right)}. \quad (11)$$

Ulkohalkaisijaan perustuen kokonaislämmönsiirtokerroin määritetään kaavan (12) mukaan:

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_i} \frac{D_o}{D_i} + \frac{x}{k} \frac{D_o}{D_L} + \frac{1}{h_o}}$$

(12)

Mikäli pintalämpöputken seinämä ei ole kovin paksu, saadaan yhtälöillä (10 ja 12) käytännössä lähes sama tulos (Virtaustekniikka ja Lämmönsiirto 2019). Kuvassa 3 on esitettyinä lämmönsiirtokertoimien taulukkoarvoja.

Mode	<i>h</i>	
	Btu/h · ft ² · °F	W/m · K
Forced convection		
Gases	5–50	25–250
Liquids	10–4000	50–20,000
Free convection (see next chapter)		
Gases	1–5	5–25
Liquids	10–200	50–1000
Boiling/condensation	500–20,000	2500–100,000

KUVA 3. Lämmönsiirtokertoimien arvoja. (Theodore, L. s. 134).

Kuvassa 4 on esitettyinä eri aineiden likaantuvuuskertoimia.

Fluid	Fouling resistance, $R_F \times 10^3 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
Engine lube oil	0.176
Fuel oil	0.9
Vegetable oil	0.5
Gasoline	0.2
Kerosene	0.2
Refrigerant liquids	0.2
Refrigerant vapor (oil-bearing)	0.35
Engine exhaust gas	1.8
Steam	0.1
Compressed air	0.35
Sea water	0.1–0.2
Cooling tower water (treated)	0.2–0.35
Cooling tower water (untreated)	0.5–0.9
Ethylene glycol solutions	0.352
River water	0.2–0.7
Distilled water	0.1
Boiler water (treated)	0.1–0.2
City water or well water	0.2
Hard water	0.5
Methanol, ethanol, and ethylene glycol	0.4
Natural gas	0.2–0.4
Acid gas	0.4–0.5

KUVA 4. Aineiden likaantuvuuskertoimia (HoSung, L s. 263).

5 ILMAKUIVAIMEN LÄMMÖNTALTEENOTTO

PowerDry-ilmakuivain on päällystetyn paperin koskemattomaan kuivatukseen suunniteltu kuivatinratkaisu, jossa kuumaa ilmaa puhalletaan kohti kosteaa paperirataa (Uusinnan ilmalaitteet. 2021.).

Puhaltamalla kuumaa ilmaa suuttimien kautta paperiradalle, ilma luovuttaa lämpöenergiaa paperissa olevalle vedelle. Lämmön vaikutuksesta vesi höyrystyy ympäröivään ilmaan ja kuuma kostea ilma imetään ilmakehän takaisin kiertoilmajärjestelmään. Kiertoilmajärjestelmässä olevaa kosteaa ilmaa poistetaan ilmakehän poistoilmalaitteilla ja tilalle tuodaan vastaava määrä kuivaa ilmaa halutun kosteustason ylläpitämiseksi (Uusinnan ilmalaitteet 2021.).

Kiertoilmajärjestelmässä oleva ilma lämmitetään kaasupolttimella haluttuun lämpötilaan, ennen kuin se puhalletaan kohti paperirataa. PowerDry-ilmakuivaimen puhalluslämpötilaa voidaan säätää polttimen kaasuventtiilillä automaattisesti asettamalla haluttu lämpötila (100–400 °C) ohjausjärjestelmään. Kaasupolttimen polttoaineena toimii maakaasu. Myös kaasupolttimelle syötetään erikseen prosessin ulkopuolelta korvausilmaa, että palotapahtuma olisi täydellinen (Uusinnan ilmalaitteet 2021.).

5.1 Ilmakuivaimen lämmönvaihdin

Ilmakuivaimen järjestelmään on jo aikaisemmin jälkiasennettu lämmönvaihdin. Lämmönvaihdin on sijoitettu poistoilmakanavaan, josta se ottaa lämpöenergiaa talteen kuumasta poistuvasta ilmasta. Kaasupolttimelle menevä korvausilma johdetaan ensin lämmönvaihtimen pintalämpöputkien läpi, jossa tapahtuu lämpöenergian siirtyminen korvausilmaan. Vaihtimessa kuuma poistuva ilma virtaa lämmönvaihtimen putkipuolella ja lämmitettävä korvausilma vaippapuolella. Esilämmitetty korvausilma johdetaan kiertoilmajärjestelmän kaasupolttimelle, missä se kuumennetaan kiertoilman kanssa ennen ilmakuivaimelle johtamista. Korvausilmaa esilämmittämällä säästetään polttoaineen kulutusta. Alla olevassa kuvassa ilmakuivaimen lämmönvaihdin (kuva 5).



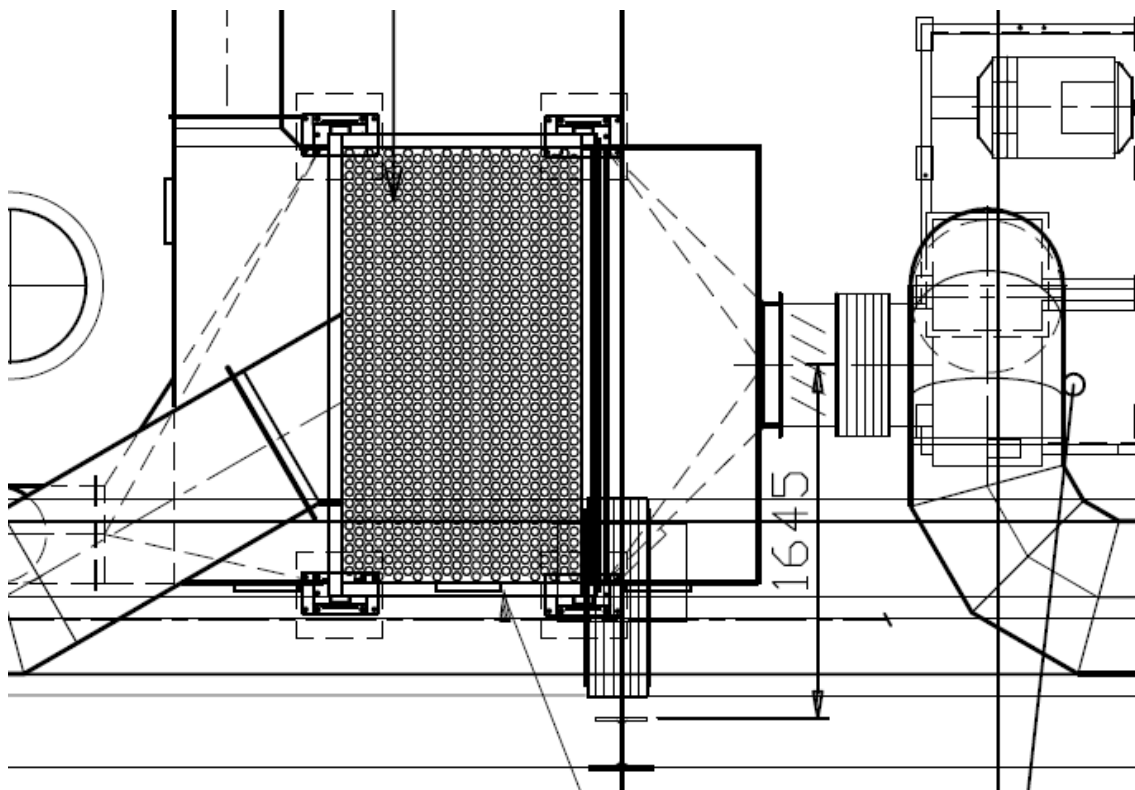
KUVA 5. Ilmakuivaimen lämmönvaihdin.

Lämmönvaihdin oli erotettu prosessista osittain. Lämmönvaihdin on väärän materiaalivalinnan vuoksi kärsinyt korroosion vaikutuksesta ja se on vaurioitunut. Vaurion vuoksi lämmönvaihtimelle oli tehty ohitus, koska ainevirrat pääsivät sekoittumaan keskenään ja poistuvan ilman kosteutta pääsi korvausilman mukana kaasupolttimelle, mikä aiheutti polttimen sammumisia ja syttymisvaikeuksia.

5.2 Lämmönvaihtimen tutkinta

Ilmakuivaimen lämmönvaihtimen tutkinta aloitettiin perehtymällä tuotantolaitoksen tietojärjestelmän kautta ilmakuivaimen prosessiin ja toimintaan. Lämmönvaihtimen rakennetta tutkimalla selvisi, että korvausilma johdetaan kahteen kertaan lämmönvaihtimen vaippapuolella putkipaketin läpi ja putkipuolella on yksi läpivienti. Eli kyseessä on 1–1 tyyppinen putkilämmönvaihdin, missä aineet virtaavat ristiin toisiinsa nähden. Tuotantolaitoksella käytössä olevalla tietojärjestelmällä pystyttiin ottamaan mittoja laitoksen teknisistä piirustuksista. Putkilämmönvaihtimessa on 24 kertaan 39:n putken riviä eli yhteensä 936 pintalämpöputkea.

Pintalämpöputkien ulkohalkaisijat ovat 40 mm. Putkilevyjen mitat ovat 2016 mm x 1120 mm. Putkilämmönvaihtimesta ei ollut muita kuvia.



KUVA 6. Lämmönvaihtimen tekninen piirustus.

Koska lämmönvaihdin oli osittain prosessissa, sitä päästiin lähemmin tutkimaan paperikoneen huoltoseisokissa. Tarkastelussa huomattiin useiden pintalämpöputkien olevan syöpynyt puhki (kuva 7). Putkipuolella virtaava aine aiheuttaa likaantumista ja korroosiota. Materiaalina vaihtimessa on käytetty terästä. Vaihtimessa käytetty putkijako on 30° kolmiojako. Kolmiojaossa putkien keskipisteiden etäisyydet toisistaan samalla rivillä olevilla putkilla ovat 51 mm. Putkirivien välillä etäisyydet putkien keskipisteiden välillä ovat 45 mm. Pintalämpöputkien keskipisteiden etäisyys toisistaan ylittää suositellun enintään 1,25 kertaa putken ulkohalkaisijan.



KUVA 7. Korroosion aiheuttamat vauriot putkilämmönvaihtimessa.

Lämmönvaihtimen runkorakenteita ei päästy mittaamaan, koska ne olivat eristeiden alla ja eristeiden purkua ei voida tehdä ennen kuin lämmönvaihdin on erotettu kokonaan prosessista. Pintalämpöputkien korkeudeksi saatiin 2400 mm ja pintalämpöputkien puolella välissä, eli 1200 mm korkeudessa putkilaipasta mitattuna on välilevy, mikä ohjaa vaippapuolen ainevirtauksen toiseen kertaan vaihtimen läpi (kuva 8). Välilevy myös tukee putkipakettia ja se on kiinnitetty runkorakenteisiin hitsaamalla. Samalla todettiin pintalämpöputkien pintojen olevan puhtaat ulkopuolelta, eli toinen ainevirroista ei aiheuta likaantumista. Pintalämpöputkissa ei havaittu ulkopuolella olevan korroosiota. Lämmönvaihtimen mitat on esitetty taulukossa 1.



KUVA 8. Vaippapuolen pintalämpöputket.

5.3 Lämmönvaihtimen lämpöteho

Ilmakuivaimen prosessia pystyttiin tutkimaan reaaliajassa tuotantolaitoksella käytössä olevalta ohjausjärjestelmästä. Ohjausjärjestelmästä saatiin anturidataa korvausilman lämpötilasta vaihtimen jälkeen, korvausilman massavirrasta, poistuvan ilman lämpötilasta vaihtimen jälkeen ja massavirrasta. Järjestelmässä päästiin myös tarkastelemaan monen vuoden takaa anturidatan historiaa. Koska lämmönvaihtimen oli ohitettu ennen työn aloitusta, päästiin historiasta tarkastelemaan korvausilman todellista lämpötilaa lämmönvaihtimen jälkeen ja samalla saatiin reaaliajassa tarkka lämpötila ennen vaihtimelle tuloa. Tästä oli todella paljon hyötyä lämpölaskuja tehdessä. Korvausilma kuitenkin ehtii lämmetä ennen vaihtimelle saapumista, eikä sille ole erikseen mittaria. Alla olevaan taulukkoon

on kirjattu lämmönvaihtimen mitat sekä ohjausjärjestelmästä saatujen ainevirtauksien ja lämpötilojen data (taulukko 1).

TAULUKKO 1. Vaihtimen tiedot.

Lämpötila	T (°C)	T(K)
Kylmän aineen lämpötila ennen vaihdinta	35	308,5
Kylmän aineen lämpötila vaihtimen jälkeen	119	392,15
Kuuman aineen lämpötila vaihtimen jälkeen.	155	428,15
Kuuman aineen ilman massavirta.	4,4	m(kg/s)
Kylmän aineen massavirta	3,36	m(kg/s)
Kuuman aineen virtausnopeus	13,2	m/s
Kylmän aineen virtausnopeus	8,6	m/s
Dimensiot		
Putkilaipan leveys	2016	mm
Putkilaipan pituus	1120	mm
Pintalämpöputkien pituus	2400	mm
Pintalämpöputkien lukumäärä	936	kpl
Pintalämpöputkien ulkohalkaisija	40	mm
Pintalämpöputkien sisähalkaisija	38	mm
Putkijako kolmiojako 30°		
Samalla rivillä keskipisteiden etäisyys	51	mm
Rivien välillä keskipisteiden etäisyys	45	mm

Taulukossa 1 kylmä aine tarkoittaa korvausilmaa ja kuuma aine poistuvaa ilmaa. Vaihtimessa virtaavan aineen eli ilmaseoksen ominaislämpökapasiteetti saatiin taulukkoarvosta (Tekniikan kaavasto 2022). Tietojen perusteella vaihtimen lämpöteho Q saadaan kaavalla (3):

$$Q = 3,36 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,01 \frac{\text{KJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} (392,15 \text{ K} - 308,15 \text{ K}) = 285 \text{ kW}.$$

6 LÄMMÖNVAIHTIMEN MITOITUS

Tässä kappaleessa käydään läpi uuden vaihtimen mitoituskäytännöt, materiaalivalinta ja esitetään niiden tulokset.

6.1 Materiaalivalinta

Kuten huomattiin, ilmakehän lämmönvaihtimen materiaalivalinta on ollut väärä tähän prosessiin. Uuden vaihtimen täytyy olla kosteutta ja lämpöä kestävä. Järjestelmässä virtaavissa aineissa ei ole muita syövyttäviä aineita kosteuden lisäksi.

Ruostumattomat teräkset soveltuvat hyvin muovattavuutta vaativiin sovelluksiin sen monimuotoisten mekaanisten ominaisuuksien ansiosta. Ruostumaton teräs soveltuu teollisuuden tuotteisiin hyvän ominaisuuksiensa vuoksi, joita ovat hyvä korroosion- ja lämmönkestävyys. Materiaaliksi ehdotetaan EN 1.4301/1.4307 (AISI 304/304 L) laatuista ruostumatonta terästä, joka on austeniittinen teräs sekä yleisin käytetty ruostumaton teräs markkinoilla. (Euro inox. 2022.).

Aisi 304 L on vähähiilinen vaihtoehto 304:stä. Materiaalilla on hyvä korroosion sietokyky sekä hitsattavuus. Kuvassa (kuva 9) on Aisi 304 fyysisiä ominaisuuksia (Thyssenkrupp. 2022.). Materiaalivalinta nostaa lämmönvaihtimen kustannuksia, mutta oikealla materiaalivalinnalla sen elinkaari on pidempi.

Property	Value
Density	8000.00 Kg/m ³
Melting Point	1450 °C
Thermal Expansion	17.2 x 10 ⁻⁶ /K
Modulus of Elasticity	193 GPa
Thermal Conductivity	16.2W/m.K
Electrical Resistivity	0.072 x 10 ⁻⁶ Ω .m

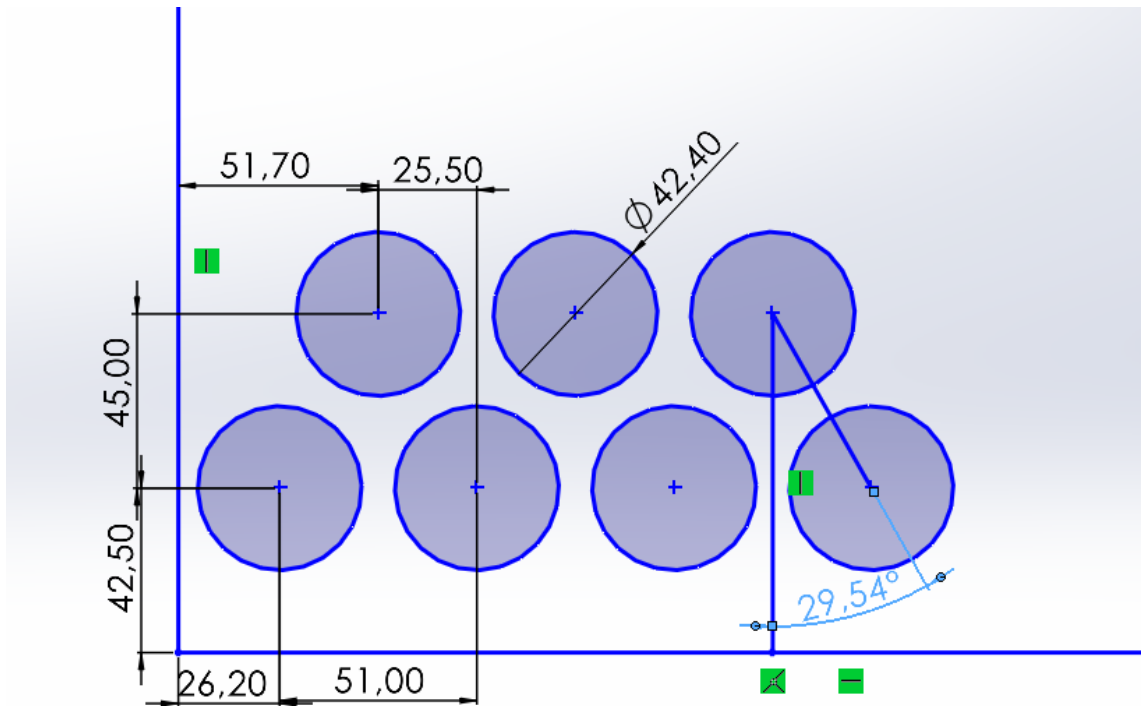
KUVA 9. Aisi 304 fyysisiä ominaisuuksia (Thysekruupp. 2022.).

6.2 Lämmönvaihtimen rakenne

Uusi lämmönvaihdin tehdään edellisen lämmönvaihtimen mitoitusten mukaan. Koska lämmönvaihtimen runkorakenteista ei ole otettu mittoja, täytyy ne mitata erikseen. Vanhan vaihtimen runkorakenteiden mitoituksia hyödyntämällä saadaan vaihtimen ja prosessiputkistojen väliin tulevat yhdyskappaleet oikeille sijainneilleen ja vältetään prosessiputkistojen muutoksilta, mikä nostaisi kustannuksia lisää. Putkilaippa on sama 2016 mm x 1120 mm ja putkilaippojen väli 2,4 m. Ohjauslevy putkilaipasta 1,2 m korkeuteen.

Pintalämpöputkien halkaisijaksi valitaan 42,4 mm x 2 mm. Nykyisessä lämmönvaihtimessa käytetty 40 mm putki ei ole standardikoko ja niiden hankinta voi kestää kauan. Materiaaliksi valitaan Aisi 304/304 L tai vastaava. Myös suuremmalla putkihalkaisijalla kasvatetaan lämmönvaihtimen lämmönsiirtopinta-alaa. Vaihtimen putkijako toteutetaan samalla 30° kolmiojaolla sekä samoilla etäisyyksillä. Pintalämpöputkien lukumäärä pysyy samana. Putkijaottelu ja etäisyydet on esitetty kuvassa 10. Putkijaon etäisyydet on määritelty siten, että putkipaketti tulee keskelle putkilaippaa. Putket asetellaan 39 putken riveihin ja rivimäärä on 24.

Joka toisessa rivissä putki tulee 26,2 mm päähän putkilaipan reunasta ja joka toisessa 51,7 mm päähän. Sama toistuu toisella puolella.



KUVA 10. Vaihtimen putkijako.

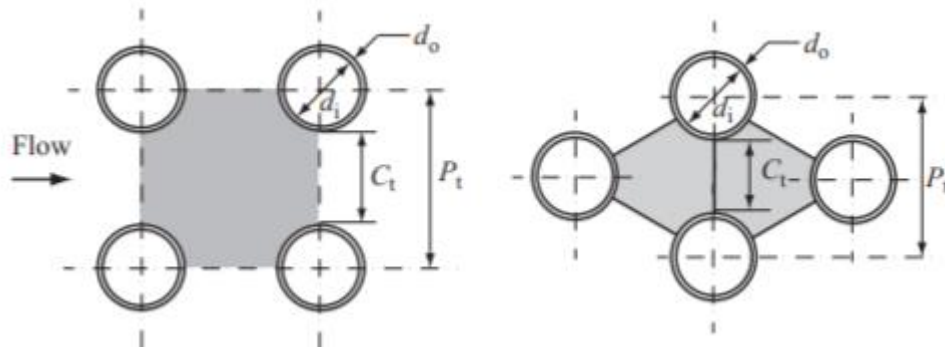
6.3 Painehäviöt

Koska putkilämmönvaihtimen pintalämpöputkien koko muuttuu, on syytä tarkastella lämmönvaihtimen painehäviöitä. Lämmönvaihdin yleisesti voidaan ottaa pumppu- tai putkistolaskennassa huomioon yksinkertaisimmillaan paikallisvastuksena. (Virtaustekniikka ja Lämmönsiirto 2019). Putkilämmönvaihtimen painehäviöiden määrittäminen täytyy tehdä molemmille virtauspuolille erikseen. Painehäviöiden määrittämiseen tarvitaan seuraavia tietoja:

- Pintalämpöputkien pituus.
- Pintalämpöputkien sisä- ja ulkohalkaisijat.
- Ohjauslevyjen lukumäärä sekä niiden välinen etäisyys.
- Läpivientien lukumäärä putkipuolella.
- Ainevirtojen massavirrat.
- Ainevirtojen virtausnopeudet.

- Vaipan halkaisija.

Putkilämmönvaihtimen painehäviöiden laskennassa täytyy ottaa huomioon myös putkijako. Kuvassa 9 on esitettyä putkijaosta tarvittavat mitat (HoSung, L. s. 272–278).



KUVA 11. Kolmio- ja neliöjaon mittoja (HoSung, L. s. 274).

Kuvassa 11 ja taulukossa 1 esitettyjen mittojen perusteella määritetään lämmönvaihtimen poikkivirtausalue (13) (HoSung, L. s. 272–278):

$$A_c = \frac{D_s C_t B}{P_t}, \quad (13)$$

missä A_c on poikkivirtausalue (m^2), D_s on vaipan halkaisija (m), C_t on pintalämpöputkien ulkopintojen etäisyys (m), B on ohjauslevyjen väli (m) ja P_t on pintalämpöputkien etäisyys toisistaan (m). Vaipan halkaisija D_s on =2,16 m eli sama kuin päätylaipan halkaisija. Ohjauslevyjen väli B on tässä tapauksessa päätylaipasta 1,2 m. Poikkivirtausalueeksi saadaan:

$$A_c = \frac{2,16 \text{ m} \cdot 0,0086 \text{ m} \cdot 1,2 \text{ m}}{0,051 \text{ m}} = 0,437 \text{ m}^2.$$

Ekvivalenttihalkaisija kolmiojaolle määritetään kaavalla (14) (HoSung, L. s. 272–278)

$$D_e = \frac{4 \left(\frac{\sqrt{3} P_t^2}{4} - \frac{\pi d_o^2}{8} \right)}{\frac{\pi d_o^2}{2}}, \quad (14)$$

missä D_e on ekvivalenttihalkaisija (m), P_t on pintalämpöputkien etäisyys toisistaan ja d_o on pintalämpöputken ulkohalkaisija. Ekvivalenttihalkaisijaksi saadaan:

$$D_e = \frac{4 \left(\frac{\sqrt{3} \cdot 0,051 \text{ m}^2}{4} - \frac{\pi 0,0424 \text{ m}^2}{8} \right)}{\frac{\pi 0,0424 \text{ m}^2}{2}} = 0,595 \text{ m.}$$

Virtaukset putkistoissa voi olla luonteeltaan laminaarista tai turbulenttista. Virtauksen luonne voidaan päätellä Reynoldsin luvusta R_e (Perttula, J. s. 65). Putkilämmönvaihtimessa Reynoldsin luku määritetään putki- ja vaippapuolelle erikseen. Reynoldsin luku määritetään putkipuolelle kaavan (15) mukaan (HoSung, L. s. 272–278):

$$R_e = \frac{m d_I}{A_c \mu}, \quad (15)$$

missä R_e on Reynoldsin luku, m on putkipuolen massavirta, d_I on pintalämpöputkien sisähalkaisija, A_c on poikkivirtausalue ja μ on virtaavan aineen dynaaminen viskositeetti (kg/sm). Dynaaminen viskositeetti kuvaa ainevirran sisäisiä kitkavoimia, jotka pyrkivät estämään muodonmuutoksia. Kaasujen viskositeetin lämpötilariippuvuus on melko vähäistä (Virtaustekniikka ja Lämmönsiirto 2019). Ilman dynaaminen viskositeetti on 34°C lämpötilassa on 18.95×10^{-6} kg/ms. Virtaavien aineiden massavirrat on esitetty taulukossa 1. Reynoldsin luku putkipuolelle:

$$R_e = \frac{4,4 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 0,0384 \text{ m}}{0,437 \text{ m}^2 \cdot 18,95 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 20403.$$

Jos Reynoldsin luku on $R_e < 2300$, virtaus on laminaarista. $R_e > 3200$ on virtaus turbulenttista. Lukujen 2300 ja 3200 välillä virtaus on olosuhteista riippuen laminaarista tai turbulenttista. Tätä kutsutaan transiioalueeksi (Virtaustekniikka ja

Lämmönsiirto 2019). Vaippapuolen Reynoldsin luku määritetään kaavalla (16) (HoSung, L. s. 272–278):

$$R_e = \frac{mD_e}{A_c\mu}, \quad (16)$$

missä R_e on Reynoldsin luku, m on vaippapuolen massavirta, D_e on ekvivalentti-halkaisija, A_c on poikkivirtausalue ja μ on virtaavan aineen dynaaminen viskositeetti. Vaippapuolen Reynoldsin luku:

$$R_e = \frac{3,36 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 0,595 \text{ m}}{0,437 \text{ m}^2 \cdot 18,95 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 241416.$$

Määritetään molempien puolien kitkakertoimet. Putkipuolen kitkakerroin määritetään kaavalla (17) (HoSung, L. s. 272–278):

$$f = (1,58 \ln(R_e) - 3,28)^{-2}, \quad (17)$$

saadaan:

$$f = (1,58 \ln(20403) - 3,28)^{-2} = 0,006505.$$

Vaippapuolen kitkakerroin määritetään kaavan (18) mukaan (HoSung, L. s. 272–278):

$$f = e^{(0,576 - 0,19 \ln(R_e))}, \quad (18)$$

missä e on Neperin luku. Vaippapuolen kitkakertoimeksi saadaan:

$$f = e^{(0,576 - 0,19 \ln(241416))} = 0,168822$$

Putkipuolen painehäviö määritetään kaavan (19) mukaan (HoSung, L. s. 272–278):

$$\Delta p = 4 \left(\frac{f \cdot L_t}{d_l} + 1 \right) N_p \frac{1}{2} \rho v^2, \quad (19)$$

missä Δp on painehäviö (Pa), f on putkipuolen määritetty kitkakerroin (17), L_t on pintalämpöputken pituus (m), d_l on pintalämpöputken sisähalkaisija, ρ on ainevirran tiheys (kg/m^3) ja v on ainevirran virtausnopeus (m/s). N_p kertoo, kuinka monta kertaa aine virtaa vaihtimen putkipaketin läpi. Aineiden virtausnopeudet ovat esitettyinä taulukossa 1. Putkipuolen painehäviöksi saadaan:

$$\Delta p = 4 \left(\frac{0,006505 \cdot 2,4 \text{ m}}{0,0384 \text{ m}} + 1 \right) 1 \frac{1}{2} \cdot 1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 8,59 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} = 268 \text{ Pa.}$$

Vaippapuolen painehäviö määritetään kaavalla (20) (HoSung, L. s. 272–278):

$$\Delta p = f \frac{D_s}{D_e} (N_b + 1) \frac{1}{2} \rho v^2, \quad (20)$$

missä Δp on painehäviö, f on vaippapuolen määritetty kitkakerroin (18), D_s on vaipan halkaisija, D_e on ekvivalenttihalkaisija, N_b on välilevyjen lukumäärä, ρ on virtaavan aineen tiheys ja v on aineen virtausnopeus. Kaavalla (20) vaippapuolen painehäviöksi saadaan:

$$\Delta p = 0,168822 \cdot \frac{2,16 \text{ m}}{0,595 \text{ m}} \cdot (1 + 1) \frac{1}{2} \cdot 1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 13,23 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} = 139 \text{ Pa.}$$

6.4 Lämpöteho

Lämpötehoa määrittäessä tarvitaan samoja mittareilta saatuja prosessiarvoja, kuin olemassa olevan lämmönvaihtimen lämpötehon määrittämisessä. Molempien ainevirtojen massavirrat, korvausilman lämpötila ennen lämmönvaihtimelle tuloa ja molempien lämpötilat vaihtimen jälkeen ovat tiedossa.

Kun tiedetään vaihtimen lämpöteho Q , virtaavan aineen massavirta ja virtaavan aineen lämpötila vaihtimen jälkeen, voidaan lämpötila ennen vaihdinta määrittää ratkaisemalla kaavan (3) T_{HI} :

$$Q = M_H \cdot C_H(T_{HI} - T_{HO}),$$

missä, Q on lämpöteho, M_H on poistuvan ilman massavirta (kg/s), C_H on poistuvan ilman ominaislämpökapasiteetti (J/kgK), T_{HI} on poistuvan ilman lämpötila (K) ennen vaihdinta ja T_{HO} on poistuvan ilman lämpötila lämmönvaihtimen jälkeen (K). Alaindeksit on lisätty selkeyttämään laskuprosessia. Ratkaistaan T_{HI} :

$$T_{HI} = \frac{Q}{m_H c_H} + T_{HO},$$

saadaan:

$$T_{HI} = \frac{285 \text{ kW}}{4,4 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}} + 428,15 \text{ K} = 492,3 \text{ K} = 219,15 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Kun lämpötilat on ratkaistu, voidaan lämmönvaihtimen todellinen lämpöteho määrittää. Alla olevaan taulukkoon on merkitty esitiedot laskentaa varten (taulukko 2). Taulukossa olevat poistuvan sekä korvausilman ilman lämmönsiirtokerroimet ovat esitettyinä kuvassa 3.

TAULUKKO 2. Lämpölaskennan esitiedot.

Nimitys	Tunnus	Yksikkö	Määrä
Lämpöteho	Q	kW	
Poistuvan ilman lämpötila ennen lämmönvaihdinta	T_{HI}	K	492,295
Poistuvan ilman lämpötila lämmönvaihtimen jälkeen	T_{HO}	K	428,15
Poistuvan ilman massavirta	M_H	kg/s	4,4
Poistuvan ilman ominaislämpökapasiteetti	C_H	kJ/kg·K	1,01
Korvausilman lämpötila ennen lämmönvaihdinta	T_{CI}	K	308,15
Korvausilman lämpötila lämmönvaihtimen jälkeen	T_{CO}	K	392,15
Pintalämpöputken sisähalkaisija	D_I	m	0,0384
Pintalämpöputken ulkohalkaisija	D_O	m	0,0424
Pintalämpöputken yhteenlaskettu sisäpuolen pinta-ala	A_I	m ²	271

Pintalämpöputken yhteenlaskettu ulkopuolen pinta-ala	A_o	m^2	299,2
Pintalämpöputken yhteenlaskettu pituus	L	m	2246,4
Pintalämpöputken lämmönjohtavuus	k	W/mK	16,2
Poistuvan ilman lämmönsiirtymiskerroin	h_i	W/m^2K	25
Korvausilman lämmönsiirtymiskerroin	h_o	W/m^2K	25
Likaantumiskerroin putken sisäpinnalle	R_{fi}		0,0002
Likaantumiskerroin putken ulkopinnalle	R_{fo}		0,0002

Lämmönsiirtokerroin kuvaa, kuinka paljon tehoa siirtyy pinta-alaa kohti. Väliaineen ja pinnan välillä täytyy olla lämpötilaero. Nesteillä on suurempi lämmönsiirtokerroin kuin kaasuilla (kuva 3).

Putkilämmönvaihtimen lämpöteho määritetään kaavalla (6). Koska kyseessä on putkilämmönvaihdin, täytyy ensin ratkaista vaihtimen logaritminen lämpötilaero sekä vaihtimen kokonaislämmönsiirtokerroin. Koska vaihdin on 1–1 tyypiltään, korjauskertoin $F=1$. Logaritminen keskilämpötilaero ΔT_{ln} ratkaistaan kaavalla (5). Sijoitetaan prosessin lämpötilat yhtälöön (5):

$$\Delta T_{ln} = \frac{(492,3K - 308,15 K) - (428,15 K - 392,15 K)}{\ln \left(\frac{492,3K - 308,15 K}{428,15 K - 392,15 K} \right)} = 90,76 K.$$

Jos halutaan ottaa likaantumiskertoimet huomioon, putkilämmönvaihtimelle kokonaislämmönsiirtokerroin määritetään kaavalla (21) (Theodore, L. s. 324):

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{fi}}{A_i} + \frac{\ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right)}{2\pi k L} + \frac{R_{fo}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o}, \quad (21)$$

jossa U on lämmönvaihtimen kokonaislämmönsiirtokerroin (W/m^2K), A on lämpöputkien pinta-ala (m^2), h_i on sisäpuolen lämmönsiirtymiskerroin (W/K), h_o on ulkopuolen lämmönsiirtymiskerroin (W/K), D_i on pintalämpöputken halkaisija (m), D_o on pintalämpöputken sisähalkaisija (m), L on pintalämpöputken kokonaispituus (m), A_i on pintalämpöputken yhteenlaskettu sisäpuolen pinta-ala (m^2), A_o on pintalämpöputken yhteenlaskettu ulkopuolen pinta-ala (m^2), R_{fi} on pintalämpöputken sisäpuolen likaantuvuuskerroin, R_{fo} on pintalämpöputken ulkopuolen likaantuvuuskerroin ja k on pintalämpöputken materiaalin lämmönjohtavuus.

Sijoittamalla arvot (taulukko 2) kaavaan (21) saadaan:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 271 \text{ m}^2} + \frac{0,0002}{271 \text{ m}^2} + \frac{\ln\left(\frac{0,0424 \text{ m}}{0,0384 \text{ m}}\right)}{2\pi \cdot 16,2 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \cdot 2246,4 \text{ m}} +$$

$$\frac{0,0002}{299 \text{ m}^2} + \frac{1}{25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 299 \text{ m}^2} = 3530,81 \frac{\text{W}}{\text{K}}.$$

Lämmönvaihtimen lämpöteho saadaan sijoittamalla logaritmisin lämpötilaeron sekä kokonaislämmönsiirtokertoimien tulokset lämpötehon kaavaan (6). Lämmönvaihtimen lämpötehoksi saadaan:

$$Q = 3530,81 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot 1 \cdot 90,76 \text{ K} = 320,5 \text{ kW}.$$

Taulukossa 3 on yhteenveto putkilämmönvaihtimen mitoituksista.

TAULUKKO 3. Mitoituksen yhteenveto.

Lämpöteho (Q)	320,5 kW
Painehäviö putkipuoli (Pa)	268
Painehäviö vaippapuoli (Pa)	139
Materiaali	Aisi 304/304 L
Pintalämpöputken halkaisija	42,4 mm x 2 mm
Pintalämpöputken lukumäärä	936 kpl
Lämpöpinta-ala	299m ²
Putkijako	kolmiojako 30° 45 x 51 mm
Putkilaipan leveys	2016 mm
Putkilaipan pituus	1120 mm

7 LÄMMÖNVAIHTIMEN KUSTANNUKSET

8 LÄMMÖNTALTEENOTON HYÖTY

Tässä kappaleessa esitetään mitoitettun lämmönvaihtimen vuotuinen energian talteenotto sekä saavutettava taloudellinen hyöty.

8.1 Lämpöenergian talteenotto

Lämpöenergian talteenotto halutulle ajalle määritetään kertomalla lämmönvaihtimen lämpöteho Q tuntimäärällä. Lämpöenergian talteenoton laskennassa on arvioitu paperikoneen vuotuinen käyntiaste. Alla olevassa taulukossa on määritetty lämpöenergian talteenotto yhdelle vuorokaudelle, kuukaudelle ja vuodelle (taulukko 5).

TAULUKKO 5. Lämpöenergian talteenotto.

Aika	Tuntimäärä (h)	Lämpöteho (kW)	Käyntiaste	Lämpöenergian talteenotto (MWh)
Vuorokausi	24	320,5	80 %	6,15
Kuukausi	720	320,5	80 %	184,6
Vuosi	8640	320,5	80 %	2 215,3

8.2 Taloudellinen hyöty

Talteen otetulla lämpöenergialla saavutettu taloudellinen hyöty määritetään kertomalla talteen otetun lämpöenergian määrä polttoaineen hinnalla. Kuvassa 12 on esitettynä maakaasun hintakehitys lähivuosina (Dutch TTF, 2022).



KUVA 12. Maakaasun hinnan kehitys lähivuosina (Dutch TTF, 2022).

Voidaan todeta, että maakaasun hintakehitys on ollut selvässä nousussa heinäkuun 2021 jälkeen. Maakaasun hinta on ollut alimmillaan vuoden 2020 huhtikuusta vuoden 2020 joulukuuhun, jolloin hinta vaihteli 14–16 €/MWh välillä. Toukokuussa 2021 hinta oli noussut 25 €/MWh. Vuoden 2021 viimeisenä päivänä hinta oli 68 €/MWh (Dutch TTF, 2022). Taulukossa 6 on määritetty lämpöenergian talteenotolla saavutettavat taloudelliset hyödyt edellä mainituilla polttoaineen hinnoilla.

TAULUKKO 6. Lämpöenergian talteenoton hyödyt.

Maakaasun hinta €/MWh	Hyöty kuukaudessa (€)	Hyöty vuodessa (€)
15	2769	33 230
25	4615	55 382
68	12553	150 640

8.3 Takaisinmaksuaika

Investoinnin takaisinmaksuaika on aika, jonka kuluessa investoinnin tuottamalla nettotuloilla saadaan kuitattua investoinnin määrä (Suomala, P.). Takaisinmaksuaika vuosina määritetään kaavan (22) mukaisesti:

$$Takaismaksu = \frac{\text{Investoinnin määrä}}{\text{Vuotuinen nettotuotto}}$$

(22)

Alla olevassa taulukossa on määritettyä investoinnin takaisinmaksuaika arvioitulle investoinnin kokonaiskustannuksille. Laskenta tehtiin edullisimmalle vaihtoehdolle. Taulukon nettotuottojen sarakkeella on eri polttoaineen hintojen perusteella määritetyt vuotuiset hyödyt (taulukko 7).

TAULUKKO 7. Investoinnin takaisinmaksuaika.

Vuotuiset nettotuotot €	Hankintameno €	Takaisinmaksuaika vuosina
33 230,00 €	x	x
55 382,00 €	x	x
150 640,00 €	x	x

Tarkkaa takaisinmaksuaikaa investoinnille on vaikea määrittää, koska lämmön talteenotto riippuu paperin kuivatustarpeesta ja maakaasun hinnan kehityksestä. Taulukko 7 antaa osviittaa siihen, mitä se todellisuudessa voisi olla ja missä ajassa takaisinmaksu voisi tapahtua korkeilla polttoaineen hinnoilla.

9 VAIHTOTYÖN SUUNNITELMA

Tässä osiossa esitetään ilmakeivaimen lämmönvaihtimen vaihtotyön toteutusvaiheet.

9.1 Vaihtimen erottaminen prosessista

Ensimmäisenä lämmönvaihdin täytyy erottaa muusta prosessista kokonaan. Vaihtimen eristeet täytyy irrottaa ja runkorakenteet on mitoitettava jatkotoimenpiteitä varten. Mitoitus sekä eristeiden irrottaminen ei tapahdu normaalin huoltoseisokin puitteissa, joten on syytä erottaa koko vaihdin prosessista. Lämmönvaihtimen vaippapuolen erotus on jo tehty tekemällä ohituskanava korvausilman kanavaan lämmönvaihtimen yli. Poistuvan ilman kanavaan on tehtävä samanlainen ohituskanava lämmönvaihtimen yli. Ohituskanavaan on liitettävä vaihtimen jälkeinen lämpötila-anturi.

Kun vaihdin on erotettu muusta prosessista, voidaan mitoitus sekä vaihtotyö tehdä käynnin aikana. Aikataulullisesti tämä on kannattavin vaihtoehto, koska koko vaihtotyö on töitten valmisteluineen erittäin työläs ja se voitaisiin muuten tehdä ainoastaan viikon mittaisessa huoltoseisokissa kunnollisella valmistautumisella. Tätä ennen täytyisi myös olla tiedossa runkorakenteiden mitoitukset sekä uusi vaihdin valmiina. Kokonaisuutena ja taloudellisesti kannattavampi vaihtoehto on tehdä vaihtotyö erottamalla ensin lämmönvaihdin muusta prosessista. Erottamalla vaihdin prosessista säästetään ajallisesti paljonkin aikaa. Mitä nopeammin päästään hyödyntämään lämmöntalteenottoa, sitä enemmän hyödytään taloudellisesti.

Ohituksen tekeminen vaatii työtasot ja itse ohitustyö on tehtävä huoltoseisokin aikana. Työaika on noin 48 tuntia. Ohitusta tehdessä on noudatettava UPM:n työturvallisuusstandardeja. Niihin kuuluvat tarvittavat turvallisuustoimenpiteet turvaerotusten, työtasojen ja paloturvallisuusriskien osalta. Erityisesti on huomioitava prosessilinjojen läheisyydessä olevat maakaasuputket.

9.2 Vaihtimen runkorakenteiden mitoitus ja vaihtotyö

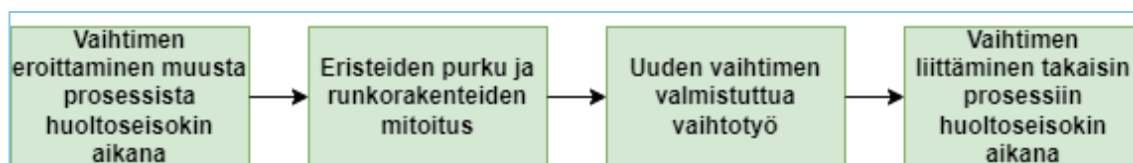
Vaihtimen ohituksen jälkeen voidaan irrottaa eristykset sekä yhdyskappaleet lämmönvaihtimesta. Eristysten irrottamista ja turvallista työskentelyä varten tarvitaan erikseen tehtäviä työtasoja. Eristeiden ja yhdyskappaleiden irrottamisen jälkeen voidaan runkorakenteet mitoittaa. Vaihtimen runkorakenteiden mittojen arvoja, kuten materiaalivahvuuksia ja yhdyskappaleiden sijainteja voidaan hyödyntää uudessa vaihtimessa. Runkorakenteiden mitoituksen jälkeen voidaan valmistaa lämmönvaihdin. Vaihtimen valmistusaika tarjousten perusteella on noin 5 kuukautta. Materiaalien hankinnassa voi kestää myös odotettua kauemmin.

Lämmönvaihtimen vaihtotyössä tarvitaan vaihtimen asennukseen erillistä nostovälinettä, koska lämmönvaihtimen läheisyydessä ei ole valmiita nostovälineitä, millä sen voisi asentaa oikealle paikalle. Siksi suositeltavaakin olisi tehdä vanhan vaihtimen irrotus sekä uuden asennus paikoilleen yhdessä vaiheessa. Asennustöiden valmistelut vie myös oman aikansa. Eristeiden ja yhdyskappaleiden irroituksessa sekä vaihtotyössä on muistettava turvalliset työskentelymenetelmät.

9.3 Uuden vaihtimen liittäminen prosessiin

Uuden vaihtimen prosessiin liittäminen voidaan tehdä ainoastaan huolto-
seisokissa. Jos uuden vaihtimen yhdyskappaleiden liitokset on oikeilla sijainneilla, ei tarvitse tehdä prosessiputkiston muutoksia. Prosessiin takaisin liittämistä varten tarvitaan työtasoja. Suositeltavaa olisi suunnitella ja valmistella työtasot ennen huolto-
seisokkia. Valmistelemalla työalue huolellisesti ennen huolto-
seisokkia, nopeutetaan työn suorittamista seisokin aikana ja säästetään tärkeää työaikaa.

Huolellinen työvaiheiden valmistelu sekä turvallisuustekijöiden huomioiminen on jokaisessa työvaiheessa ensiarvoisen tärkeää. Huolellisella työsuunnittelulla sekä työskentelyllä vältetään myös virheitä. Vaihtosuunnitelma esitettyinä vaiheittain kuviossa (kuvio 1).



KUVIO 1. Lämmönvaihtimen vaihtotyön työvaiheet.

10 POHDINTA JA YHTEENVETO

Työn tavoitteina oli mitoittaa uusi lämmönvaihdin oikealla materiaalivalinnalla ja määrittää sillä saavutettavat hyödyt sekä tehdä vaihtosuunnitelma.

Lämmöntalteenotolla vähennetään energian kulutuksen lisäksi myös hiilijalanjälkeä. Tuotantolaitoksissa hyödynnetään lämpöenergian talteenottoa monissa erilaisissa kohteissa ja uskon, että varmasti myös tulevaisuudessa energian talteenottoon kiinnitetään enemmän huomiota ja sitä hyödynnetään monella tapaa enemmän.

Uudessa lämmönvaihtimessa pintalämpöputken halkaisija kasvoi ja siten myös lämmönsiirtopinta-ala. Materiaalivalinta pohjustaa pidempää elinkaarta aikaisempaan verrattuna. Uudessa vaihtimessa rakenne on siis sama aikaisempaan verrattuna ja siinä hyödynnetään vielä aikaisemman vaihtimen yhdyskappaleita sekä runkorakenteita, jotta vältetään prosessilinjojen muutoksilta. Putkijako on sama 30° kolmiojako aikaisempaan verrattuna. Työssä määritettiin vielä putkijaon mitoitukset päätylipoissa, jotta putkipaketti saadaan keskitetysti paikalleen. Aikaisemman vaihtimen mukaan lämmitettävä ainevirta ohjataan kahteen kertaan putkipaketin läpi. Uuden putkikoon myötä selvitettiin vaihtimen painehäviö, mikä ei ollut kovinkaan suuri.

Mitoitetun lämmönvaihtimen lämpötilalaskuissa päästiin todenmukaiseen tulokseen. Useimmiten lämmönvaihtimen mitoituksissa ei tiedetä vaihtimen jälkeisiä lämpötiloja eli lämpötilojen muutoksia, vaan ne pyritään arvioimaan. Tässä tapauksessa oli jo valmista dataa lämmönvaihtimen tehokkuudesta ja järjestelmässä virtaavien aineiden lämpötilamuutoksista. Dataa hyödyntämällä logaritmi-
sen lämpötilaeron määrittämiseen lämmönvaihtimen yli antaa suhteellisen todenmukaisen lukeman, jota voidaan pitää luotettavana ja silloin myös lämpöteho on lähellä totuutta.

Mitoituslaskujen perusteella myös tutkittavaan kohteeseen lämmönvaihtimen asennus on kannattava sijoitus taloudellisesta näkökulmasta. Myös oikeanlaisella materiaalivalinnalla lämmönvaihtimen elinkaari saadaan pitkäksi sekä talou-

dellisestä näkökulmasta katsottuna investoinnilla saavutettavalla hyödyllä takaisinmaksuaikakaan ei ole liian pitkä. Myös nykyisen lämmönvaihtimen yhdyskappaleita ja runkorakenteita hyödyntämällä lasketaan projektin kokonaiskustannuksia, mikä vain nostaa kannattavuutta.

Vaihtosuunnitelmassa tuotiin esille vaihtimen prosessista erottamisen tärkeys. Erottamalla säästetään aikaa vaihtimen vaihtotyössä, kun voidaan käynnin aikana asettaa uusi vaihdin paikoilleen ja huoltoseisokissa liittää se takaisin prosessiin.

Toimeksiantajan puolelta annettiin tarvittavat työkalut ja välineet työn suorittamiseksi. Myös tukea sai tarvittaessa ja kyselyihin vastattiin. Oli hienoa, että toimeksiantajan puolelta haluttiin selvittää energian talteenoton hyötyjä ja tarjottiin tätä työtä opiskelijalle lopputyön aiheeksi. Toivon, että jatkossakin toimeksiantaja pyrkii löytämään kustannustehokkaita kohteita ja ratkaisuja energiankulutuksen vähentämiselle.

LÄHTEET

Bowman R. A., Mueller A. C. & Nagle W. M., 1940 Mean Temperature Difference In Desing.

Dutch TTF Gas Futures. 2022. Luettu 14.1.2022. <https://www.theice.com/products/27996665/Dutch-TTF-Gas-Futures/data?marketId=5336900&span=3>

Euro inox. 2022. Ruostumattoman teräksen muovaamisen mahdollisuudet. Saatavissa: https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/FormingPotential_FI.pdf

Fagerholm, Nils-Erik, 1986. Termodynamiikka. Jyväskylä. Otakustantamo.

HoSung, L. Thermal Desing Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells.

Motiva Oy, 2016. Energiatehokas lämmönsiirto. Luettu 11.1.2022. https://www.motiva.fi/files/11078/Energiatehokas_lammonsiirto_opas.pdf

Perttula, J. 2000. Energiatekniikka. Porvoo. WS Bookwell Oy.

Suomala, P., Manninen, O., Lyly-Yrjäläinen, J. 2011. Laskentatoimi Johtamisen tukena. Luettu 22.1.2022.

UPM. 2022. Liiketoiminnot. Luettu 4.1.2022 <https://www.upm.com/fi/liiketoiminnot/>

UPM. 2022. UPM Kymi. Luettu 4.1.2022 <https://www.upmpulp.com/fi/upm-kymi/>

Uusinnan ilmalaitteet 2021. UPM Kymi.

Tekniikan kaavasto. 16. painos. Tammertekniikka.

Theodore, L. Heat Transfer Applications for the Practising Engineer. John Wiley & Sons, Incorporated

Thyssenkrupp. 2022. Stainless steel 304 L. 1.4307. <https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/stainless-steel-304l-14307.html>

Virtaustekniikka ja Lämmönsiirto. 2019. Aalto University. Saatavissa <https://mycourses.aalto.fi/mod/folder/view.php?id=390168>