

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Kandidaatintyö

# **LÄMPÖPUMPPU PAPERIKONEEN POISTOILMAN LÄMMÖNTALTEENOTOSSA**

Tuuli Outinen  
Lappeenrannassa 28.5.2021

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Tuuli Outinen

### **Lämpöpumppu paperikoneen poistoilman lämmöntalteenotossa**

Kandidaatintyö 2021

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Antti Uusitalo

25 sivua, 4 kuvaa, 6 taulukkoa

Hakusanat: paperikone, paperitehdas, energiatehokkuus, lämpöpumppu, lämmöntalteenotto, ylijäämlämpö

Tässä kandidaatintyössä perehdytään lämpöpumpun soveltuvuuteen paperitehtaan lämmöntalteenotossa. Paperin valmistus on energiantensiivinen prosessi, jonka sivutuotteena syntyy suuri määrä matalalämpöistä ylijäämlämpöä. Työn tarkoitus on tutkia voiko paperikoneen kuivatusosalta tulevaa matalalämpöistä poistoilmaa hyödyntää prosessin muiden kohteiden lämmittämässä nostamalla sen lämpötilaa lämpöpumpulla, ja näin parantaa paperitehtaan energiatehokkuutta.

Työn teoriaosassa selvitetään lämpöpumpun toimintaperiaate yleisesti ja esitellään ylijäämlämmön lähteitä ja hyödyntämistapoja. Lisäksi perehdytään lämpöpumpun etuihin ylijäämlämmön hyödyntämisessä.

Tapauskohtaisessa tarkastelussa laskettiin paperikoneen kuivatusosan poistoilmasta lämpöpumpun avulla saatava maksimilämpöteho ja selvitettiin lämmön hyödyntämisen kannattavuutta paperikoneen AHR-vesikierrossa. Kohteeseen soveltuva lämpöpumppu mitoitettiin tehtaan järjestelmistä saatavan tiedon perusteella ja laskenta tehtiin aikaisempien vuosien arvoihin perustuen. Lämpöpumppuinvestoinnin kannattavuusarvioinnin perusteella takaisinmaksuaika kasvaa liian pitkäksi, koska lämpöpumpun käyttöaika kyseisessä kohteessa jää suhteellisen lyhyeksi. Tästä johtuen hanketta ei todettu kannattavaksi toteuttaa.

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## SISÄLLYSLUETTELO

## SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO.....	5
1.1	Toimeksiantaja.....	6
1.2	Paperikone.....	6
1.3	Tavoitteet.....	6
2	LÄMPÖPUMPPU.....	8
2.1	Toimintaperiaate ja rakenne.....	8
2.2	Carnot'n kierto ja hyötysuhde.....	8
2.3	Todellinen lämpöpumppu.....	9
2.4	Lämpöpumppujen jako.....	11
3	LÄMPÖPUMPPU LÄMMÖNTALTEENOTOSSA.....	13
3.1	Ylijäämälämpö.....	13
3.2	Ylijäämälämmön hyödyntäminen.....	13
3.3	Lämpöpumpun hyödyntäminen lämmöntalteenotossa.....	15
3.4	Esimerkkejä lämpöpumpun hyödyntämistavoista lämmöntalteenotossa.....	15
4	LÄMPÖPUMPUN HYÖDYNTÄMINEN PAPERIKONEEN POISTOILMAN LÄMMÖNTALTEENOTOSSA.....	18
4.1	Tapauksen esittely.....	18
4.2	Lämpöpumpun valinta.....	19
4.3	Lämpöpumpun sijoittaminen prosessiin.....	20
5	LASKENTA.....	22
5.1	Tapauskohtainen tarkastelu.....	22
5.2	Kannattavuuslaskelmat.....	26
6	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	30
7	YHTEENVETO.....	31
8	LÄHTEET.....	32

## SYMBOLILUETTELO

### Roomalaiset aakkoset

$c_p$	Ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgK]
$h$	Entalpia	[kJ/kg]
$I$	Investointi	[€]
$P$	Teho	[W]
$p$	Paine	[bar]
$q_m$	Massavirta	[kg/s]
$Q$	Lämpömäärä	[J, Wh]
$T$	Lämpötila	[C, K]
$W$	Työ	[J, Wh]

### Kreikkalaiset aakkoset

$\Delta$	Muutos	[-]
$\phi$	Lämpöteho	[J, Wh]
$\eta$	Hyötysuhde	[%]

### Dimensiottomat luvut

COP	Lämpökerroin	[-]
-----	--------------	-----

### Alaindeksit

H	Höyrystin
L	Lauhdutin
m	Massavirta

### Lyhenteet

COP	coefficient of performance, lämpöpumpun hyötysuhde
LTO	lämmöntalteenotto
AHR	aqua heat recovery

## 1 JOHDANTO

Euroopan komission julkaisemiin EU:n ilmasto- ja energiapolitiikan tavoitteisiin kuuluu kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen 40 prosentilla vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoteen 1990. Tavoitteiden saavuttamiseksi on lisättävä uusiutuvan energian osuutta energiantuotannossa ja parannettava energiatehokkuutta. Teollisuuden näkökulmasta ilmasto- ja energiapolitiikan tavoitteisiin pyrkiminen tulee nostamaan kasvihuonepäästöoikeuksien ja sähkön hintaa (PTT. 2014) ( Euroopan komissio).

Metsäteollisuus on suurin energiankuluttaja Suomen teollisuudessa. Vuonna 2019 paperi- ja kartonkituotteiden valmistamiseen kului energiaa lähes 290 TJ, mikä on yli puolet koko Suomen teollisuuden kuluttamasta energiasta (Tilastokeskus. 2019). Suuren energiankulutuksen seurauksena metsäteollisuuden prosesseissa tyypillistä ovat sivutuotteina syntyvät suuret lämpöenergia- ja sivutuotevirrat, jotka soveltuvat energian tuotantoon (Paperi ja puu. 2019).

Paperin valmistuksessa energian hinta on noin 15-30 % tuotantokustannuksista paperilajista riippuen (Kuusisto, M. 2014). Tehostamalla energiatehokkuutta ja lämmöntalteenottoa, voidaan tuotantokustannuksia pienentää merkittävästi.

Tässä kandidaattityössä selvitetään lämpöpumpun soveltuvuutta ylijäämälämmön hyödyntämisessä osana lämmöntalteenottoa paperitehtaalla. Tapauskohtaisessa tarkastelussa tutkitaan lämpöpumpun soveltuvuutta paperikoneen kuivatusosan poistoilman lämmöntalteenotossa. Lämpöpumppuratkaisulla on tarkoitus siirtää poistoilman lämpöenergia tehtaan eri kohteita lämmittävään AHR-vesikiertoon ja siten korvata viileinä vuodenaikoina höyryn käyttöä. Ylijäämälämmön tehokkaalla hyödyntämisellä voidaan parantaa tehtaan energiatehokkuutta ja vähentää kokonaisenergian kulutusta. Tapauskohtaisen tarkastelun lisäksi työssä esitellään lämpöpumpun toimintaperiaatteet ja sen soveltumiskohteita erilaisissa lämmöntalteenoton tilanteissa.

## 1.1 Toimeksiantaja

Työn toimeksiantajana toimii paperitehdas, jolla valmistetaan päällystettyä ja päällystämätöntä paperia. Tässä työssä keskitytään tehtaan yhden paperikoneen energiatehokkuuden parantamiseen.

Tehtaan ohessa oleva höyryvoimalaitos tuottaa höyryä tehtaan prosesseihin hyödyntämällä tuotantolaitoksen sivuvirtoja, esimerkiksi puun kuorta. Voimalaitoksen pääkattilana on sivuvirtoja hyödyntävä leijupetikattila ja lisäksi tarvittaessa apuna käytetään maakaasua käyttäviä varakattiloita.

## 1.2 Paperikone

Paperin valmistukseen kuuluu useita eri prosesseja ja työvaiheita, usein useissa eri laitoksissa ja osastoilla. Paperi valmistetaan paperikoneella, jonka toiminta voidaan jakaa perälaatikkoon, viiraosaan, puristinosaan, kuivatusosaan ja rullaimen. Perälaatikossa valmistellaan nestemäinen paperimassa, joka suihkutetaan paperikoneen viiraosalle. Viiraosalla paperimassa levitetään koko koneen leveydelle paperirainaksi. Viiraosan tarkoitus on poistaa paperirainasta vettä, niin että se voidaan viedä puristinosalle. Viiraosan jälkeen paperiraina sisältää noin 20% kuiva-ainetta. Puristinosalla rainasta poistetaan edelleen vettä, niin että kuiva-ainepitoisuus on noin 50 %. Vettä poistetaan mekaanisesti puristamalla telojen avulla. Näin paperi saadaan myös tiivistettyä haluttuun paksuuteen. Puristinosalta paperirata siirtyy kuivatusosaan, jossa paperi kuivataan johtamalla se kuumien sylintereiden pintoja pitkin. Sylintereihin johdetaan kuumaa matalapainehöyryä, joka haihduttaa paperista kosteutta. Kosteaa ilma ohjataan ulos prosessista poistoilmana. Lopulta kuivunut paperi ohjataan kalanteroinnin kautta rullaimelle, josta sen matka jatkuu jälkikäsitteilyyn (Saari, J. 2019). Tässä kandidaatin työssä keskitytään erityisesti vain paperikoneen kuivatusosaan.

## 1.3 Tavoitteet

Työn tavoitteena on selvittää, voidaanko paperikoneen kuivatusosan matalalämpöisen poistoilman energiaa hyödyntää AHR-vesikierron lämmittämiseen, kun sen lämpötilaa nostetaan lämpöpumpun avulla. Ylijäämälämmön energiaa hyödyntämällä voitaisi näin

korvata lisänä käytetyn kattilahöyryn kulutusta. Arvioitaessa lämpöpumpun soveltuvuutta tähän prosessiin, selvitetään lämpöpumpun COP eli tehokerroin, investointikustannukset ja ratkaisusta syntyvät mahdolliset säästöt. Arvioinnissa on otettava huomioon myös se, ettei lisähöyryä tarvita vesikierron lämmittämisessä ympärivuotisesti.

Mikäli lämpöpumppu todetaan kannattavaksi ratkaisuksi AHR-kierron lämmittämiseen, tehtaan kokonaisenergiankulutus pienenee ja energiatehokkuus paranee, kun ylijäämälämpö saadaan hyödynnettyä. Lisänä käytetty kattilahöyry tuotetaan tällä hetkellä maakaasulla, jolloin ylijäämälämmön hyödyntäminen suunnitellussa kohteessa toisi taloudellisia säästöjä ja vähentäisi kasvihuonekaasupäästöjä.



## 2 LÄMPÖPUMPPU

### 2.1 Toimintaperiaate ja rakenne

Lämpöpumppu eli lämpövoimakone on laite, jota käytetään lämmön siirtämiseen. Lämpöpumppu ottaa lämpöenergiaa matalalämpöisestä lämmönlähteestä ja luovuttaa energian korkeammassa lämpötilassa. Sen pääkomponentit ovat höyrystin, kompressori, lauhdutin ja paisuntaventtiili sekä prosessissa kiertävä kylmäaine. Todelliset lämpöpumput koostuvat pääkomponenttien lisäksi myös muista osista, tarvittavista ominaisuuksista riippuen.

Lämpöpumpuiksi luetaan useita erilaisia prosesseja, joista kaikkien teoria kuitenkin perustuu Carnot`n prosessiin, joka on ideaalinen kuvausmalli lämpövoimakoneelle.

### 2.2 Carnot`n kierto ja hyötysuhde

Carnot`n kierto koostuu neljästä vaiheesta, häviöttömästä isentrooppisesta puristuksesta ja paisunnasta, sekä vakiolämpötilassa tapahtuvasta isotermisestä lämmöntuonnista- ja poistosta (Aittomäki, A. 2008). Carnot`n kiertoon perustuvan lämpövoimakoneen hyvyttä voidaan mitata sen hyötysuhteen  $\eta$  avulla.

$$\eta = \frac{\text{saatu työ}}{\text{käytetty lämpö}} \quad (1)$$

Tarkasteltaessa lämpövoimakonetta lämpöpumpuna, sen tehokkuutta voidaan kuvata lämpökertoimen avulla. Lämpökertoimesta voidaan myös käyttää nimeä COP (coefficient of performance). COP kertoo, miten moninkertaisen määrän lämpöä pumppu tuottaa itse kuluttamaansa energiamäärään verrattuna (Perälä, R. 2009). Ideaalisen Carnot`n kierron COP määritetään tuotetun lämpötehon suhteena käytettyyn tehoon.

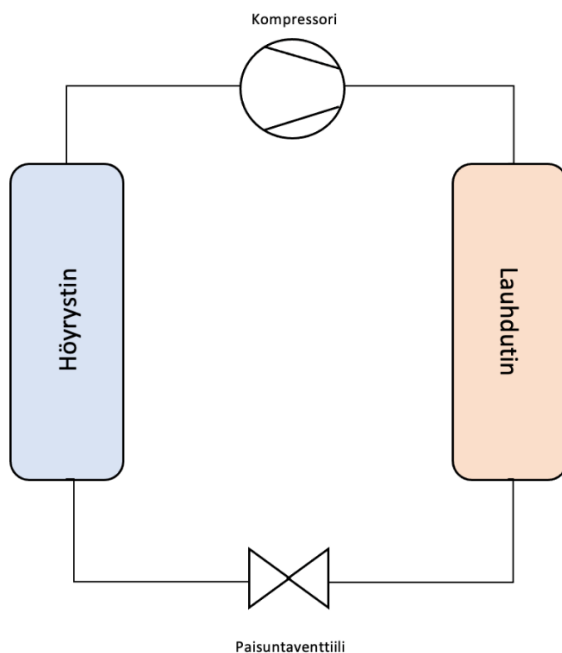
$$COP = \frac{\text{saatu lämpö}}{\text{tehty työ}} = \frac{Q_L}{Q_L - Q_H} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} \quad (2)$$

, jossa  $Q_L$  on lauhduttimessa poistuva lämpömäärä  
 $Q_H$  on höyrystimessä tuotu lämpömäärä

COP on näin ollen riippuvainen prosessin tulo- ja loppulämpötiloista. Mitä korkeampi on tulolämpötila ja pienempi lähtölämpötila, sitä suurempi on COP.

### 2.3 Todellinen lämpöpumppu

Lämpöpumpun toiminta perustuu kylmäaineen kiertoon pumpun putkistossa höyrystimen ja lauhduttimen välillä. Höyrystimessä alhaisessa paineessa ja lämpötilassa olevan kylmäaineen annetaan kerätä itseensä lämpöä ympäristöstä eli systeemin ulkopuolelta, jolloin se höyrystyy. Tämän jälkeen kylmäaine puristetaan kompressorilla korkeaan paineeseen, tällöin kylmäaineen lämpötila kasvaa ja se tulistuu. Kuumentunut kylmäaine ohjataan lauhduttimeen, jossa kylmäaineen tulistus poistetaan ja se luovuttaa lämpöä ulos systeemistä. Jäähdytynyt kylmäaine ohjataan tämän jälkeen paisuntaventtiiliin, jossa sen annetaan paisua taas alhaisempaan paineeseen. Jäähdytneen ja matalapaineisen kylmäaineen matka päättyy höyrystimelle, mistä kierto alkaa taas alusta (Perälä, R. 2009).



Kuva 1. Lämpöpumpun yksinkertaistettu rakenne.

Lämpöpumpun energiatase voidaan kirjoittaa (Räsänen, J. 1996)

$$\phi_L + P = \phi_H \quad (3)$$

, jossa  $\phi_L$  on höyrystimessä vastaanotettu lämpöteho  
 $\phi_H$  on lauhduttimessa luovutettu lämpöteho  
 P on kompressorin mekaaninen teho

Höyrystimen ja lauhduttimen lämpötehot voidaan määritellä tarkemmin yhtälöllä

$$\phi = q_m c_p \Delta T \quad (4)$$

, jossa  $\phi$  on lämpöteho  
 $q_m$  on massavirta  
 $c_p$  on ominaislämpökapasiteetti  
 $\Delta T$  on lämpötilan muutos

Todellisessa prosessissa syntyy useita häviöitä, jotka aiheuttavat poikkeaman teoreettisesta prosessista. Todellisissa lämpöpumpuissa puristus kompressorissa ei ole isentrooppinen eli häviötön, mikä lisää kompressorin tekemää työtä. Puristuksessa kompressorista myös usein poistuu lämpöä ympäristöön aiheuttaen häviöitä. Lisäksi kompressorin venttiileissä, pumpun putkistossa, höyrystimessä ja lauhduttimessa syntyy myös usein painehäviöitä, jotka on syytä ottaa huomioon (Aittomäki, A).

Todellisen lämpöpumpun COP voidaan laskea todellisen saadun lämpötehon ja systeemiin tehdyn työn avulla. Systeemiin tehty työ voidaan olettaa olevan yksinkertaisissa tapauksissa sama kuin kompressorin teho

$$COP = \frac{\phi_L}{W_{tehty}} \quad (5)$$

, jossa  $W_{tehty}$  on systeemiin tehty työ

$\phi_L$  on lauhduttimessa luovutettu lämpöteho

Eri lämpötiloissa toimivien lämpöpumppujen vertailu keskenään pelkästään COP:n avulla on mahdotonta. Lämpöpumpun hyvyttä voidaan arvioida helpommin Carnot'n hyvyyskertoimen  $\eta_c$  avulla, joka ottaa huomioon myös lämpöpumpussa syntyvät häviöt. Yleensä kerroin vaihtelee 0,4-0,6 välillä ja se paranee lämpöpumpun tehon kasvaessa (Räisä, J. 2013).

$$\eta_c = \frac{COP_{todellinen}}{COP_{ideaalinen}} \quad (6)$$

## 2.4 Lämpöpumppujen jako

Lämpöpumppu koneistot- ja prosessit voidaan jaotella prosessin kytkeytymisen ja käyttöenergian perusteella (Aittomäki, A. 2009). Lämpöpumput voidaan jakaa kahteen pääkategoriaan, avoimen kierron ja suljetun kierron lämpöpumppuihin. (Motiva. 2014)

### Avoimen kierron systeemit

Avoimella kierrolla toimivat lämpöpumput eivät tarvitse varsinaista kiertoainetta systeemiin vaan työaineena käytetään prosessin omia virtauksia esimerkiksi vesihöyryä (Ratalahti, H. 2019).

Avoimiin lämpöpumppu kiertoihin kuuluvat mekaaniset komprimointilaitteet sekä termokompressorit. Komprimointilaitteissa kaasumaisessa olomuodossa olevan prosessiaineen painetta ja lämpötilaa nostetaan mekaanisella sähkö-, höyry- tai kaasumoottorikäyttöisellä kompressorilla. Termokompressoreissa höyryn paineen ja lämpötilan nousu saadaan aikaan dynaamisesti sekoittamalla höyryyn korkeampipaineista höyryä ejektorissa. Ejektorin on lämpökäyttöinen kompressori. (Motiva. 2014) (Aittomäki, A. 2009).

### Suljetun kierron systeemit

Suljetulla kierrolla toimivissa lämpöpumpuissa kiertää kiertoaine, jonka paine- ja lämpötilavaihteluiden avulla voidaan siirtää lämpöä höyrystimeltä lauhduttimelle ja näin

hyödyntää sitä tarvittavassa kohteessa. Suljetun kierron lämpöpumpuissa kiertoaine on eristetty systeemistä, eikä poistu kierron missään vaiheessa. Kiertoaineena systeemissä toimivalta aineelta vaaditaan suurta höyrystymislämpöä, pientä viskositeettiä ja hyvää lämmönjohtavuutta prosessin tehokkaaseen toimitaan. Turvallisen käytön takaamiseksi sen tulee olla myös stabiili, palamaton ja myrkytön (Aittomäki, A. 2009). Yleisesti käytössä olevia kiertoaineita on esimerkiksi R134a, isobutaani, R245fa, Ammoniakki ja CO<sub>2</sub>.

Suljettuihin lämpöpumppukiertoihin kuuluvat kompressorilämpöpumppujärjestelmät sekä absorptiolämpöpumput. Kompressorilämpöpumppujen toimintaperiaate on yksinkertainen, siinä kiertoaineen lämpötilaa nostetaan lämmönlähteen yhteydessä olevassa höyrystimessä ja painetta korotetaan mekaanisella sähkö- tai kaasumoottorikäyttöisellä kompressorilla. Absorptiolämpöpumpuissa lämmöntuottaminen perustuu työaineparin kykyyn luovuttaa ja vastaanottaa lämpöä. Absorptiolämpöpumpuissa ulkoista lämmönlähdettä, esimerkiksi prosessikaasua, hyödynnetään halutun virtauksen lämpötilan nostamisessa (Motiva. 2014).

## **3 LÄMPÖPUMPPU LÄMMÖNTALTEENOTOSSA**

### **3.1 Ylijäämälämpö**

Ylijäämälämmöstä voidaan käyttää erilaisia termejä, esimerkiksi hukkalämpö tai jätelämpö. Tässä työssä käytetään termiä ylijäämälämpö ja sillä tarkoitetaan teollisuus- tai sähköntuotantolaitoksissa tai palvelualalla sivutuotteena väistämättä syntyvää lämpöä, joka katoaisi käyttämättömänä ilmaan tai veteen (Uusiutuvan energian direktiivi 2018).

Ylijäämälämpöä voi syntyä teollisuudessa esimerkiksi prosessi- ja savukaasuista, jäte- ja jäähditysvesistä sekä koneellisen jäähtytyksen lauhdelämmöstä. Ylijäämälämmön tehokas hyödyntäminen säästää muita energialähteitä ja ympäristöä. Kun teollisuuslaitoksen prosessin ylijäämälämpöä pystytään hyödyntämään omassa prosessissa, saadaan laitoksen energiatehokkuutta parannettua. Sen tehokas hyödyntäminen on yritykselle myös taloudellisesti kannattavaa (Fortum. 2021). Arvioidaan, että koko Suomen teollisuuden käyttämästä energiasta reilusti yli kolmasosa karkaa vuosittain ylijäämälämpönä ympäristöön (Motiva. 2014).

Eniten ylijäämälämpöä syntyy teollisuuden aloilla, joissa energiankulutus on suurta. Metsäteollisuus on Suomen teollisuusaloista suurin energian kuluttaja (Tilastokeskus. 2019).

### **3.2 Ylijäämälämmön hyödyntäminen**

Ylijäämälämpöä voi syntyä nesteinä tai höyrynä useassa eri lämpötilatasoissa teollisuuskohteesta ja prosessista riippuen. Jotta lämpö voidaan hyödyntää, tulee kohdetta tarkastella yksityiskohtaisesti huomioiden lämpötilataso ja lämpöteho eli entalpiavirta, lämpövirran väliaine ja faasi sekä sen kemialliset ominaisuudet ja puhtaus (Motiva. 2014). Näiden ominaisuuksien perusteella voidaan arvioida kyseisen ylijäämälämmön hyödyntämisen tapaa ja kannattavuutta.

Taulukossa 1 on esimerkkejä yleisimmistä ylijäämälämmön lähteistä ja lämpötilatasoista.

Taulukko 1. Ylijäämälämmön lähteitä ja lämpötilatasoja (Motiva. 2014).

Lämpötilataso	Ylijäämälämmön lähteet
< 50 °C	<i>Prosessien jäähdytysvedet</i> <i>Koneellisen jäähdytyksen lauhde-energia</i> <i>Prosesseihin liittyvät poistoilmavirrat</i>
50 °C- 100 °C	<i>Prosessien jäähdytysvedet</i> <i>Höngät</i>
>100 °C	<i>Savukaasut</i> <i>Prosessien kuumat poistokaasut</i>

Ylijäämälämpöä kannattaa ensisijaisesti hyödyntää tuotantolaitosten omissa prosesseissa ja pyrkiä korvaamaan sillä kokonaisenergian kulutusta. Kannattavinta ylijäämälämmön käyttö on kohteissa, joissa lämmön synty ja käyttö ovat samanaikaisia ja sijaitsevat lähellä toisiaan. Näin ylijäämälämmön hyödyntämisellä on suurin potentiaali, sillä mitä kauemmas lämpöä siirretään, sitä enemmän syntyy häviöitä. Matalilla lämpötilatasoilla lämmönvarastointi voi olla vaikeaa ja kannattamatonta, myös käyttö- ja investointikustannukset voivat kasvaa merkittävästi (Motiva. 2014).

Jos ylijäämälämmön hyödyntäminen omassa prosessissa on mahdollista niin, että sen lämpötila ei vaadi nostoa, voidaan lämpöä hyödyntää suoraan erilaisten lämmönsiirrinten avulla. Tilanteissa, missä ylijäämälämmön lämpötila ei sellaisenaan riitä prosessiin, voidaan lämpötilaa kasvattaa ja lämpöä siirtää lämpöpumppujen avulla. Kannattavinta primäärienergialla tuotetun lämmön korvaaminen ylijäämälämmöllä on erityisesti silloin, kun primäärienergian hinta on korkea, ratkaisun käyttöaika pitkä, teho suuri ja investointikustannus pieni (Motiva. 2014). Näitä tekijöitä tämän työn prosessikohteeseen arvioidaan myöhemmin.

Ylijäämälämpöä voidaan hyödyntää myös laitoksen ulkopuolella, mikäli sen hyödyntämiselle omassa prosessissa ei ole tarvetta. Yksi vaihtoehto tällöin on sopia sen myymisestä esimerkiksi energiayhtiölle lämmittämään kaukolämmön paluueden lämpötilaa. Lämpö voidaan myös muuntaa sähköksi käyttäen ORC-prosessia, jolloin sen siirtäminen on tehokkaampaa (Motiva. 2019). Tässä työssä keskitytään kuitenkin erityisesti ylijäämälämmön hyödyntämiseen tehtaassa omassa prosessissa.

### **3.3 Lämpöpumpun hyödyntäminen lämmöntalteenotossa**

Lämmöntalteenotossa lämpöpumppu sopii erityisesti niihin tilanteisiin, missä ylijäämälämmön lämpötila ei riitä suoraan hyödynnettäväksi. Lämpöpumppujen avulla voidaan hyödyntää matalalämpötilaista ylijäämälämpöä nostamalla sen lämpötilatasoa ja siirtää lämpöä haluttuun kohteeseen alkuperäistä korkeammassa lämpötilassa (Motiva. 2014).

Parhaiten lämpöpumppu sopii prosessiin, jossa haluttava lämpötilatason nosto on pieni. Tällöin lämpöpumpun tehokerroin on suurin. Lämpötilaväli, jolle lämpöpumpun sopii on noin 10-100 °C astetta. Uuden teknologian lämpöpumpuilla voidaan päästä hyvinkin korkeisiin, jopa yli 100 °C asteen lämpötiloihin. Teollisten lämpöpumppujen COP voi vaihdella välillä 2,5-7 (Motiva. 2014).

Lämpöpumppu kuluttaa energiaa suhteellisen vähän tuotettua lämpötehoa kohden, joten sitä voidaan pitää kannattavana lämmöntuotantotapana. Erityisen kannattava lämpöpumppu on kohteissa, joissa primäärienergian tuottamiseen käytetään ostoenergiaa, esimerkiksi kattilahöyryä tai maakaasua. Lämpöpumpun kannattavuutta lämmöntalteenotossa voi huonontaa sähkön korkea hinta ja lämpöpumpun lyhyt käyttöaika. Ratkaisun hyvyttä arvioitaessa tulee myös huomioida, ettei lämpöpumpulla tuotettu lämpö korvaa jo olemassa olevia lämmöntalteenottoratkaisuja ja siten huononna energiatehokkuutta, esimerkiksi kasvattamalla prosessista poistettavien lämpövirtojen lämpötiloja. Lämpöpumpun soveltuvuutta prosessiin voidaan arvioida esimerkiksi Pinch-analyysin avulla (Motiva. 2014).

### **3.4 Esimerkkejä lämpöpumpun hyödyntämistavoista lämmöntalteenotossa**

Ylijäämälämmön hyödyntämISRatkaisuissa lämpöpumppua voi hyödyntää monessa eri kohteessa. Prosessiteollisuudessa syntyy ylijäämälämpöä useassa eri muodossa. Seuraavaksi käsitellään kolme esimerkkiä lämpöpumpputekniikan käytöstä hyödynnettäessä paperitehtaan ylijäämälämpöjä.



### **Kuumalämpöpumppu huuvan poistoilman lämmöntalteenotossa (Lähteenaro, P. Diplomityö 2019)**

Paperikoneen kuivatusosalla, eli huuvasa, paperin kuivaus voi tapahtua esimerkiksi sylinterikuivauksella, jossa paperiraina ajetaan kuumien sylintereiden ulkopintoja pitkin. Sylinterit lämmitetään johtamalla niiden sisään matalapaineista höyryä, joka luovuttaa lämpöä lauhtuessaan sylinterin pinnalle. Höyryn lämpötila on noin 130 °C astetta ja paine noin 2 baaria. Lauhtuessaan ilman kosteus nousee liian suureksi kuivattaakseen paperia ja se poistetaan huuvasasta ja korvataan kuivemmalla ilmalla. Poistoilma lähtee kuivatusosassa yleensä noin 90 °C asteen lämpötilassa, jonka jälkeen se usein ohjataan erilaisten lämmöntalteenottoratkaisujen jälkeen pois prosessista matalammassa lämpötilassa.

Prosessista poistettavaa ylijäämälämpöä on mahdollista hyödyntää kuumalämpöpumpun lämmönlähteenä asentamalla lämpöpumpun höyrystin esimerkiksi poistoilmakanavaan. Uuden kuumalämpöpumpputeknologian myötä lämpöpumpulla voidaan tuottaa 130 °C asteista matalapainehöyryä, joka voidaan johtaa takaisin paperikoneen kuivatusosaan ja näin pienentää tehtaan polttotekniikalla valmistetun höyryn kulutusta (Lähteenaro, P. 2019) (Calefa. 2018).

Diplomityössä on tarkasteltu vastaavanlaisen järjestelmän kannattavuutta ja todettu, että mikäli tehtaalla tuotettu höyry valmistetaan ostosähköllä tai maakaasulla, voisi hanke olla kannattava. Tilanteessa, jossa tehdas tuottaa höyryn biomassaa tai prosessien sivuvirtoja polttamalla, ei kuumalämpöpumpun käyttö kuitenkaan ole kannattavaa, pumpun korkean hinnan ja polttoaineen halpuuden vuoksi (Lähteenaro, P. 2019).

### **Lämpöpumppu kuorimon sulatusveden lämmityksessä (Ratalahti, H. Opinnäytetyö 2019)**

UPM- Jämsänkoskelle tehdyssä opinnäytetyössä tarkasteltiin lämpöpumpun soveltuvuutta kuorimon sulatusveden lämmityksessä, käyttäen lämmönlähteenä paperikoneelta tulevia jätevesiä. Tehtaalle tulevaa kuitupuuraaka-ainetta joudutaan usein säilömään ulkokentillä joitakin aikoja ennen sen hyödyntämistä, etenkin talvisin kuitupuun pinta pääsee usein jäätymään, jolloin se tarvitsee sulatusta ennen kuorintaa. Kohteessa kuorimolle tulevia kuitupuita sulatettiin käyttämällä matalapainehöyryllä lisälämmitettyä vesivirtaa. Myös kuorimon sisätilojen lämmityksessä käytetään höyryä kyseiseltä höyrylinjalta. Työssä tutkittiin paperikoneen jätevesien käyttömahdollisuuksia lämpöpumpun lämmönlähteenä niin, että lämpöpumppuratkaisulla voitaisiin korvata matalapainehöyryn käyttö. Käyttämällä jäteveden ylijäämälämpö hyödyksi, myös sen poistolämpötila alenisi ennen vesistöön päästöä.

Ongelmaksi selvityksessä nousi lämmöntarpeen jatkuva vaihtelu, sillä lämmitystarve oli riippuvainen ulkolämpötilasta. Lämpöpumppu tulisi kuitenkin mitoittaa huippukuormituksen mukaan, jolloin haitaksi nousisivat suuret investointikustannukset, jotka pidentävät takaisinmaksuaikaa. (Ratalahti, H. 2019)

### **Lämpöpumppu poistoilman ylijäämälämmön siirtämisessä kaukolämpöverkkoon (Celsius 2020)**

Tanskassa Skjernin paperitehtaalla on otettu lämpöpumppu käyttöön paperikoneen kuivatusosan poistoilman lämmön hyödyntämisessä. Aikaisemmin matalalämpötilainen poistoilma poistettiin prosessista ympäristöön ylijäämälämpönä. Poistoilman suuren ylijäämälämpöpotentiaalin tajuamisen jälkeen tehtaan lämmöntalteenottoon keksittiin ratkaisu, jossa ylijäämälämpö saatiin hyödynnettyä tehtaalle asennettujen kolmen lämpöpumpun avulla. Lämpöpumppujen avulla saatu lämpö myydään paikalliselle kaukolämpöyhtiölle. Lämpöpumppujen yhteisteho ratkaisussa on 4 MW ja ne toimivat 6.9 COP:illa. Lämpöpumppuratkaisu oli kallis ja sen takaisinmaksu aika oli 5 vuotta. Projekti toteutettiin yhdessä paperitehtaan ja kaukolämpöyhtiön kesken (Celsius. 2020).

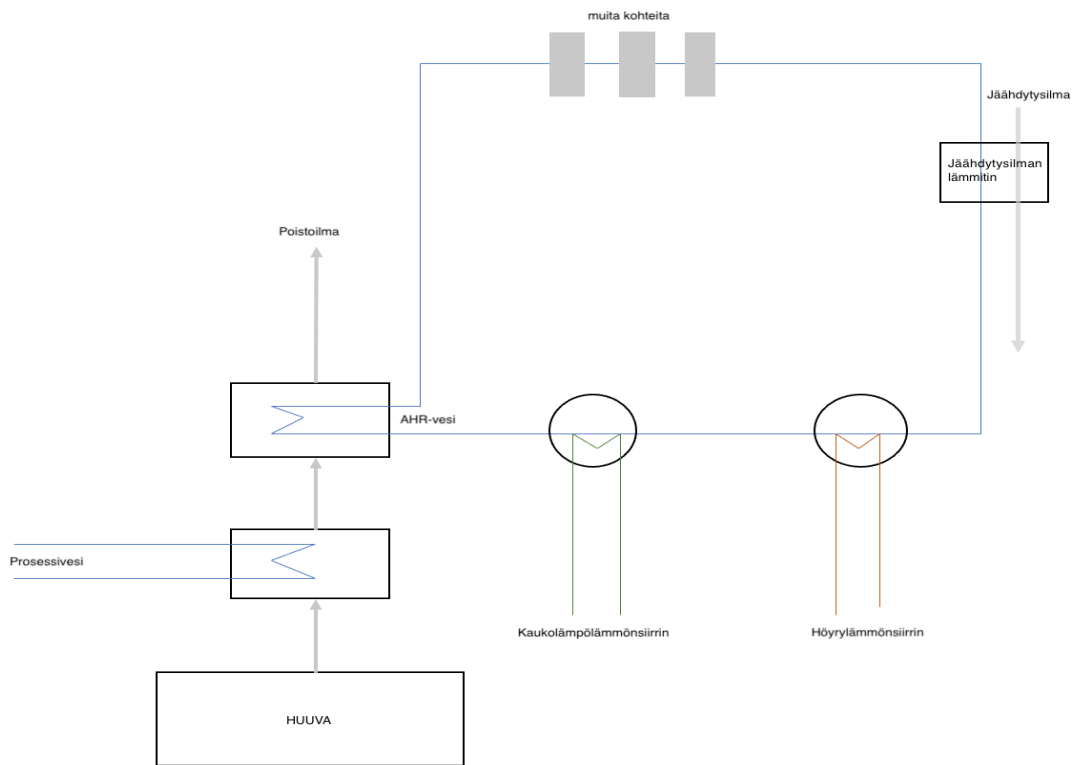
## 4 LÄMPÖPUMPUN HYÖDYNTÄMINEN PAPERIKONEEN POISTOILMAN LÄMMÖNTALTEENOTOSSA

### 4.1 Tapauksen esittely

Paperikoneen kuivatusosasta poistoilman lämpötila, virtaama ja ilman kosteus vaihtelevat paperikoneen ajotilanteen ja paperilajien mukaan. Keskiarvoisesti voidaan olettaa, että poistoilman lämpötila on yli 80 °C astetta. Poistoilma ohjataan ensin ilma-vesilämmönvaihtimiin eli LTO- kennoihin, jotka ottavat poistoilmasta lämpöä talteen prosessivesien lämmitykseen. LTO-kennojen jälkeen jäähtynyt yli 50 °C asteinen ilma ohjataan AHR- kennoihin, jotka lämmittävät AHR-vesikiertoa. AHR-vesikierto eli Aqua Heat Recovery on glykoli-vesiseoskierto, jonka tarkoituksena on ohjata lämpöä tehtaan eri kohteisiin (Puunjalostusinsinöörit. 2009). AHR-kennojen jälkeen poistoilma on jäähtynyt noin 45 °C asteeseen ja se ohjataan ulos prosessista ylijäämälämpönä. Lähtiessään huuvasta poistoilman kosteus on noin 90 g/kgi, ajotilanteesta riippuen.

AHR- vesikierron tavoitelämpötila on noin 55 °C astetta ja sillä lämmitetään muun muassa konosalin sisäilmaa ja tasavirtamoottoreiden jäähdytysilmaa. Lämmitettävä ilma otetaan ulkoa, joten sen lämpötila riippuu siis täysin vallitsevasta ulkolämpötilasta. Tavoitelämpötila esimerkiksi tasavirtamoottoreiden lämmitysilmalle on 30 °C astetta, jolloin etenkin pakkaspäivinä lämmitystarve nousee kohtuullisen suureksi.

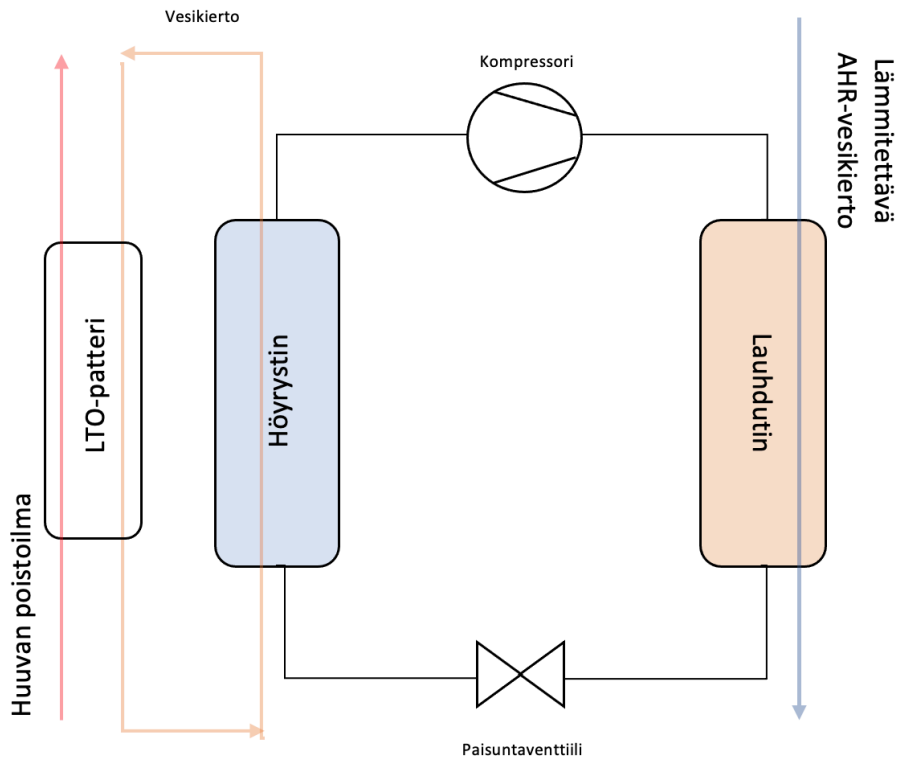
AHR-kiertoon viedään lämpöä pääasiassa AHR- kennojen kautta kulkevan poistoilman avulla. Tämän lisäksi kiertoa lämmitetään myös kaukolämmönsiirtimellä tehdasprosessien sivutuotteena syntyvällä lämmöllä. Kesäisin poistoilman lämmitysteho riittää hyvin kaikkien kierron kohteiden lämmittämiseen, eikä lisälämmitystä juurikaan tarvita. Kun ulkolämpötila laskee, lämmitetään kaukolämpövettä lisähöyryllä, lisäksi kiertoon tuodaan suoraan lämpöä myös erillisellä höyrylämmönsiirtimellä.



Kuva 2. Prosessikaavio AHR-vesikierto.

## 4.2 Lämpöpumpun valita

Poistoilman ylijäämälämpöä voidaan tässä tapauksessa hyödyntää lämmitysvesikierrossa joko ilma-vesi-lämpöpumpun tai vesi-vesi-lämpöpumpun avulla. Ilma-vesilämpöpumppua käytettäessä poistoilman lämpöteho saataisiin siirrettyä suoraan vesikiertoon, mutta ratkaisussa tulisi lämpöpumpun höyrystin sijoittaa poistoilma kanavaan. Höyrystimen sijoittaminen kanavaan tulisi todennäköisesti kuitenkin kalliimmaksi, sillä ratkaisusta tulisi näin monimutkaisempi erään lämpöpumpputoimittajan mukaan. Toisena vaihtoehtona on asentaa poistoilmakanavaan LTO-patteri, jonka jälkeen lämpöä voidaan siirtää vesi-vesi-lämpöpumpun avulla. Alustavasti vesi-vesi-lämpöpumpun käyttäminen prosessissa olisi järkevämpää, sillä ratkaisu on huomattavasti yksinkertaisempi. Myös laitetoimittaja Calefa esittää nettisivuillaan paperikoneen kuivatusosan poistoilman lämmöntalteenottoratkaisuksi vastaavanlaista LTO-patteri-vesi- järjestelmää (Calefa).



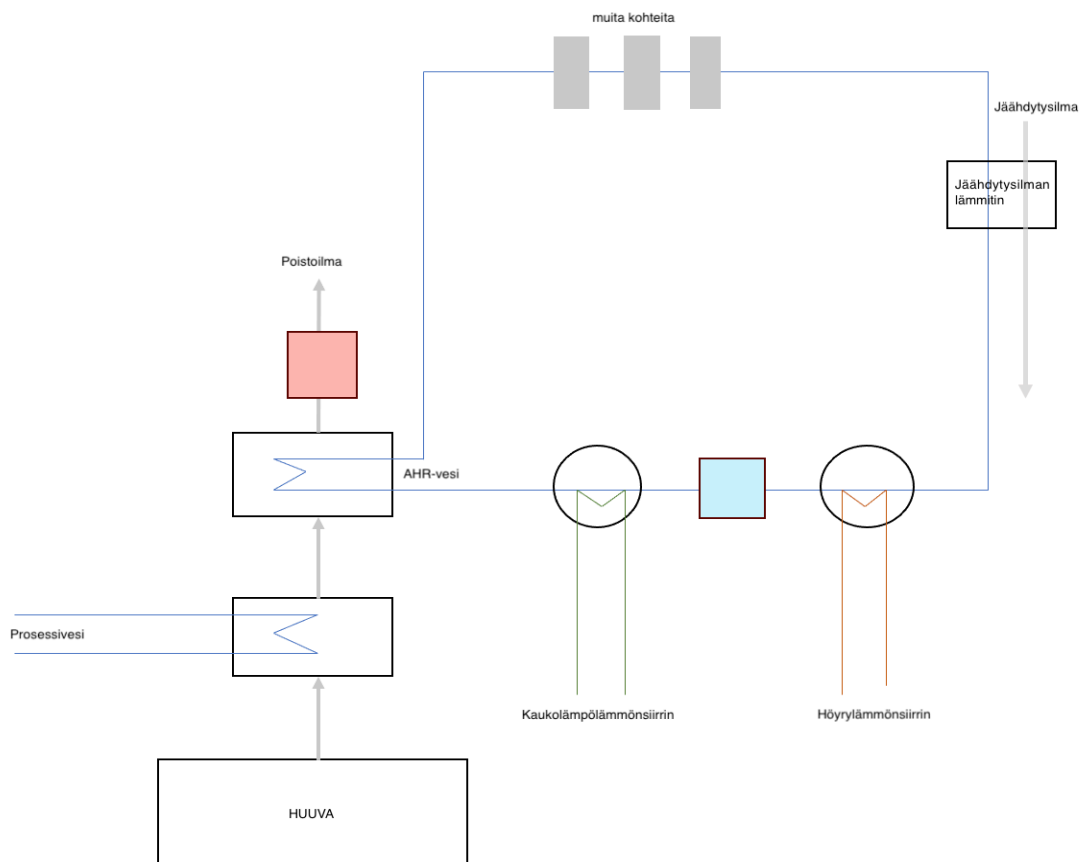
Kuva 3. Vesi-vesi lämpöpumpun toiminta periaate, poistoilmakanavaan sijoitettu LTO-patteri.

Valittavan lämpöpumpun tulisi ottaa energiaa noin  $46\text{ °C}$  asteisesta kosteasta poistoilmasta. Poistoilman loppulämpötilaa rajoittaa osittain se, että lämmöntalteenottopatterin koko kasvaa LTO-tehon kasvaessa. Sopiva poistoilman loppulämpötila arvioitiin olevan  $35\text{ °C}$  astetta. Matalammissa lämpötiloissa lämmityspatterin koko kasvaa suureksi ja samalla lisää asteisuutta ja siten huonontaa saavutettavaa COP:ta (Lähtenaro, P. 2019). Poistoilman loppulämpötilaa voidaan laskea alle  $35\text{ °C}$ , ottamalla siitä enemmän tehoa. Tällöin on kuitenkin huomioitava kasvava sähkötehon tarve johtuen lämpöpumpun matalammasta tehokertoimesta. Tähän prosessiin soveltuvaa optimaalista loppulämpötilaa ja COP:ta arvioidaan työssä myöhemmin.

### 4.3 Lämpöpumpun sijoittaminen prosessiin

Lämpöpumpulla voidaan luoda säästöjä, jos sillä voidaan kustannustehokkaasti korvata primäärienergian kulutusta. Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaisesti lämpöä siirrettäessä on huomioitava, että prosessiin siirrettävän lämpötilan on oltava suurempi kuin

koko kierron tavoitelämpötila. Toisaalta paras hyötysuhde lämpöpumpulle saadaan, kun sen tuottama lämpötilaero on mahdollisimman pieni. Tällöin lämpöpumppu kannattaa sijoittaa niin, että sen tuottama lämpötila on mahdollisimman alhainen. AHR-lämmönsiirrin kennojen jälkeen kiertoa lämmitetään lisäksi kaukolämmöllä, joka syntyy massanvalmistuksen sivutuotteena. Lämpöpumppu on siis sijoitettava niin, ettei se korvaa kaukolämmöllä tuotua lämpöä. Tällöin lämpöpumpun lauhduttimen (kuvassa 3 sininen neliö) paikka valikoitui sijoitettavaksi kaukolämmönsiirtimen jälkeen, ennen höyrylämmönsiirrintä.



Kuva 4. Prosessikaavio lämpöpumpun sijoittamisesta.

## 5 LASKENTA

### 5.1 Tapauskohtainen tarkastelu

#### Poistoilman lämpöteho

Poistoilmasta hyödynnettävissä olevan lämpötehon laskenta suoritetaan kolmessa eri lähtölämpötilassa, jotta voidaan huomioida tehon ja lämpöpumpun COP:n muutokset. Lämpöpumpun höyrystimen poistoilmasta ottama teho voidaan arvioida poistoilman virtaaman ja lämpötilan muutoksen avulla (yhtälö 4). Poistoilman virtaamaksi oletetaan 66 kg/s. Koska poistoilman absoluuttinen kosteus on noin 90 g/kgi poistuessaan huuvesta noin 80 °C asteen lämpötilassa, voidaan tulkita kostean ilman Mollier- piirroksesta, että vastaavasti 48 °C asteen lämpötilassa poistoilma on kylläistä (Tuomi, T. 2021, Liite 7.). Mollier-piirroksesta voidaan myös lukea poistoilman entalpiat lämpöpumpun tulo ja lähtölämpötiloissa.

$$\phi_H = q_{m,poistoilma} (h_2 - h_1) \quad (7)$$

jossa  $q_{m,poistoilma}$  on poistoilman virtaama

$h_1$  on tuloilman entalpia

$h_2$  on lähtöilman entalpia

Alla laskennassa saadut tulokset taulukoituna (taulukko 2). Poistoilman lämpötilat pystysarakkeella, joista  $T_1$  on poistoilman alkulämpötila, ja  $T_2$  on poistoilman lämpötila lämpöpumpun jälkeen. Lämpöpumpun jälkeisen lämpötilan vaikutus tehoon on huomioitu ottamalla kolme eri vertailulämpötilaa.

Taulukko 2. Poistoilman lämpöteho eri loppulämpötiloille.

	T [°C]	h [kJ/kg]	$\phi_H$ [MW]
$T_1$	48	250	
$T_{2.1}$	35	130	7,9
$T_{2.2}$	30	100	9,9
$T_{2.3}$	25	80	11,2

Lämpöpumpun taseen mukaan kompressorin teho on lauhduttimelta vapautuvan ja höyrystimen ottaman lämpövirran erotus (yhtälö 3).

$$P = \phi_L - \phi_H$$

Yhtälö voidaan sijoittaa COP:n lausekkeeseen (yhtälö 5), jolloin lauhduttimelta vapautuva lämpövirta voidaan laskea COP:n arvion perusteella. Lämpöpumpun COP arvot eri loppulämpötiloissa on arvioitu lähteisiin perustuen, olettaen että vesikierto lämmitetään 60 C asteeseen (Calefa, Oilio).

$$COP = \frac{\phi_L}{\phi_L - \phi_H}$$

Taulukko 3. Lämpöpumpulla poistoilmasta saatava lämpöteho.

T <sub>loppu</sub>	COP	Ø <sub>L</sub> [MW]	P <sub>K</sub> [MW]
T <sub>2.1</sub>	6,2	9,9	2,0
T <sub>2.2</sub>	5,7	12,0	2,1
T <sub>2.3</sub>	5,2	13,9	2,7

Ylläolevasta taulukosta nähdään poistoilman lämpötehon potentiaali, eli suurin mahdollinen määrä lämpöenergiaa, joka lämpöpumpulla kiertoön voitaisiin tuoda.

### **AHR-kierron tarvitsema lisälämmitysteho**

Jotta lämpöpumpulla saatuja säästöjä voidaan arvioida, on tiedettävä sillä korvattavan energiamäärän suuruus. AHR-kierto ei tarvitse kokoaikaista lisälämmitystä, sillä lähes kaikkien sen lämmityskohteiden vaatima lämmitysteho riippuu ulkolämpötilasta. Lämpimillä keleillä kiertoa ei tällöin tarvitse lämmittää juuri ollenkaan. Tietoa ajasta, jolloin AHR-kierron lämmittämiseen jouduttiin käyttämään lisähöyryä höyrylämmönsiirtimen ja kaukolämmön lisälämmityksen kautta, voitiin hakea tehtaan järjestelmistä.



Paperikoneen ajotilanne vaikuttaa kierron vaatimaan lämmitystehoon. AHR-kierto saa lämpöenergiaa ensisijaisesti kuivatusosan poistoilmasta AHR-lämpökennon kautta. Tästä johtuen vesikiertoon ei myöskään voida siirtää lämpöä poistoilmasta niillä ajan jaksoilla, joilla paperikone ei ole käytössä, eli katko- tai seisokkitilanteissa. Näissä tilanteissa vesikiertoa lämmitetään pelkästään höyryllä. Höyryn korvaaminen lämpöpumpun avulla ei näissä tilanteissa onnistu, sillä kuivatusosalta ei saada myöskään poistoilmaa. Dataa tarkasteltaessa huomattiin, että myös kesällä höyrylämmönsiirrin on ollut käytössä. Lopullisen lämmitystehon selvittämiseksi datan hakemisessa rajattiin pois katkotilanteiden lisäksi myös kesäaika.

Lisähöyryn käyttöaika kahden vuoden ajalta jäi rajausten jälkeen näin ollen noin 763 tuntiin. Tälle ajalle lisähöyryn teho voitiin määrittää laskemalla yhteen kaukolämpösiirtimelle tullut lisähöyryteho ja höyrylämmönsiirtimen lämpömäärä. Keskimääräiseksi kokonaistehoksi saatiin noin 3 MW.

Vaadittava teho on huomattavasti alhaisempi, kuin aikaisemmin määritetty teho, joka voitaisiin tuoda kiertoon lämpöpumpun avulla kun hyödynnettäisiin koko poistoilman potentiaali. Ylimääräinen kierron lämmittäminen ei kuitenkaan ole kannattavaa, joten rajataan lämpöpumpun teho 3 MW:een. Kun lämpöpumpun teho on 3 MW, joudutaan lisälämmitystä silti käyttämään jos vaadittu lämmitysteho nousee 3 MW:n yläpuolelle. Lähtökohtaisesti ratkaisulla saadaan kuitenkin suurin höyrynkulutus poistettua ja myös lämpöpumpun investointikustannukset pidettyä mahdollisimman alhaisina.

3 MW:n teholla toimivan lämpöpumpun jälkeinen poistoilman lämpötila saadaan laskettua yhtälön 9 mukaisesti käyttämällä hyödyksi kostean ilman Mollier-piirrosta (Tuomi, T. 2021, liite 7). Laskennan kautta voidaan määrittää, että 3 MW:a vastaava entalpiaero on noin 45 kJ/kg. Mollier-piirroksista voidaan tulkita entalpiaeroa vastaavan loppulämpötilan olevan noin 44 °C astetta.

### **Investointikustannukset**

Noin 3 MW:n lämpöpumppuratkaisun investointikustannus on arvioitu eri toimittajilta saatujen tietojen perusteella. Erään lämpöpumpputoimittajan kannattavuuslaskurin perusteella voidaan

arvioida vastaavaa lämpötilaeroa ja tehoa vastaavan lämpöpumpun kustannusten olevan asennettuna noin 800 000 €.

Lämpöpumppuratkaisu voidaan laskea energiatehokkuutta edistäväksi investoinniksi, joten siihen on haettavissa tukea Business Finlandilta. Suurille yrityksille enimmäistukitaso vastaavissa hankkeissa on 30% investoinnin hinnasta (Business Finland. 2021). Saatava tuki voi näin vaikuttaa oleellisesti investoinnin kannattavuuteen.

### Lämpöpumpun sähkön kulutus

Lämpöpumpun sähkönkulutus voidaan laskea yhtälöstä 5, kun lauhttimen luovuttama teho on 3 MW ja COP:ksi oletetaan 6.9 perustuen lämpöpumppuvalmistajilta saatuihin pumppukohtaisiin tietoihin kyseiselle teholuokalle ja lämpötilaerolle.

$$P_K = \frac{\phi_L}{COP}$$

$$P_K = 435 \text{ kW}$$

Koska työ perustuu lähteiden avulla tehtyihin arvioihin, perustuvat tehtävät laskelmat myös arvioihin. Lämpöpumpun hypoteettinen vuosittainen käyttöaika vaihtelee sääolosuhteiden mukaan. Aikaisempien vuosien mittauksiin perustuen voidaan käyttöajaksi arvioida noin 400 tuntia vuodessa. Koska lämpöpumpun tehoksi valittiin keskiarvoinen teho 3 MW, voidaan päätellä, että lämpöpumpulta vaadittu teho on alle 3 MW noin puolet sen käyttöajasta. Ajalla, jolla lämpöpumppu toimii alhaisemmalla teholla, sen sähkön kulutuskaan ei ole niin suuri.

Esimerkkilaskut tehdään olettaen, että vuoden ulkolämpötila pysyy suhteellisen tasaisena eli huippupakkasten ja erityisen lämpöisten päivien määrä pysyy pienenä. Arvioidaan, että pumppua käytetään 200 tuntia vuodessa 3 MW:n teholla ja 200 tuntia vuodessa 1,5 MW:n teholla. Oletukset tehdään laskennan yksinkertaistamiseksi. Sähkönkulutus olisi tällöin vastaavassa tilanteessa laskettavissa yhtälöllä 8.

$$P_{sähkö} = P_K t \quad (8)$$

jossa  $P_k$  on kompressorin vaatima teho  
 $t$  on käyttöaika

$$P_{sähkö} = 0,44 \text{ MW} \cdot 200 \text{ h} + 0,22 \text{ MW} \cdot 200 \text{ h}$$

$$P_{sähkö} = 132 \text{ MWh/a}$$

### **Korvattavan höyryn vuosittainen kulutus**

Korvattavan energian vuosittainen kulutus saadaan yhtälön 7 mukaisesti huomioimalla kiertoontuotu höyryn lämpöteho.

$$P_{höyry} = 3 \text{ MW} \cdot 200 \text{ h} + 1,5 \text{ MW} \cdot 200 \text{ h}$$

$$P_{höyry} = 900 \text{ MWh/a}$$

## **5.2 Kannattavuuslaskelmat**

### **Korvattavan energian vuosittaiset kustannukset**

Lämpöpumppuratkaisun tarkoitus olisi korvata tai vähentää höyrylämmönsiirtimen käyttöä kylmillä ajanjaksoilla (noin 400 tuntia vuodessa). Korvattava energia on polttoaineella tuotettu höyry, jonka keskiarvoinen teho käyttöaikana on 3 MW. Korvattavan höyryn hinnan arvioimiseksi tarvitaan höyryn valmistukseen käytettävän ja korvattavan marginaalisen polttoainejakeen hinta sekä arvio käytetyn kattilan kattilahyötysuhteesta. Korvattavan energian hinta vaihtelee energian markkinahinnan mukaan. Tämän vuoksi hinnat ovat arvioitu lähteisiin perustuen (Energiavirasto. 2021). Vertailun ja hinnan vaihtelun vuoksi laskentaan käytetään polttoainejakeelle kahta eri hintaa.

Lisähöyry valmistetaan maakaasua käyttävässä varakattilassa. Varakattilan kattilahyötysuhteeksi voidaan yleisesti olettaa 90%.

Korvattavan energian kustannukset voidaan laskea alla olevalla yhtälöllä 9.

$$Kustannukset = \frac{\Phi \cdot H}{\eta} \quad (9)$$

, jossa  $\Phi$  on lämmitysenergia  
 $H$  on polttoaineen hinta  
 $\eta$  on kattilahyötysuhde

Taulukko 4. Höyryn tuotannosta syntyvät vuosittaiset kustannukset.

Polttoainejakeen hinta [€/MWh]	Lämmitysenergia [MWh]	Kattila hyötysuhde $\eta$	Vuosittaiset kustannukset [€/a]
30	900	0,9	30000
40	900	0,9	40000

### Lämpöpumpun käyttökustannukset

Lämpöpumpun käytöstä syntyvät kustannukset aiheutuvat pääsääntöisesti sen kompressorin kuluttaman sähkön hinnasta. Sähkön hinnassa esiintyy vaihtelua, joten käyttökustannukset voidaan laskea käyttämällä kolmea eri esimerkkihintaa (Nordpool. 2021). Lämpöpumpun käyttämän sähkön vuosittaiset kustannukset saadaan käyttämällä yhtälöä 8, huomioimalla että kattilahyötysuhdetta ei tässä tapauksessa tarvita.

Taulukko 5. Lämpöpumpun käytöstä aiheutuvat vuosittaiset kustannukset.

Sähkön hinta [€/MWh]	Sähköenergia [MWh]	Vuosittaiset kustannukset [€/a]
40	132	5280
50	132	6600
60	132	7920

### Investoinnin kannattavuus

Investoinnin kannattavuutta voidaan arvioida esimerkiksi takaisinmaksuajalla. Takaisinmaksuaika kertoo millä ajalla investointi maksaa itsensä takaisin. Jos investoinnin korkoa ei tarvitse huomioida, saadaan takaisinmaksuaika jakamalla investoinnin hankintamenot siitä saatavilla vuosituloilla (Ranta, T. 2020). Vuositulot kertovat investoinnista vuosittain koituvat säästöt. Lämpöpumppuratkaisun vuositulot voidaan laskea vähentämällä höyryn käytön vuosittaisista energiakustannuksista lämpöpumpun kuluttaman sähkön vuosittaiset kustannukset.

Taulukko 6. Vuositulot yksikössä €/vuosi.

Sähkön hinta	Polttoainejakeen hinta	
	30 €/MWh	40 €/MWh
40 €/MWh	24720	34720
50 €/MWh	23400	33400
60 €/MWh	22080	32080

Parhaimmillaan lämpöpumpun avulla voidaan saada noin 34 700 euron vuosittaiset säästöt polttoaineen kulutuksen vähentymisen seurauksena (taulukko 6). Laskennassa voidaan käyttää keskiarvoista vuosittaista säästöä, joka saadaan yllälaskettujen säästöjen keskiarvona. Keskiarvoiseksi vuosisäästökseksi saadaan 28 400 euroa.

$$\textit{Takaisinmaksuaika} = \frac{\textit{investointikustannus}}{\textit{vuosittaiset säästöt}} \quad (10)$$

*Takaisinmaksuaika on noin 28 vuotta.*

Takaisinmaksuajaksi saatiin vastaavilla käyttötunneilla 28 vuotta. 28 vuotta on investoinnin takaisinmaksuaikana aivan liian pitkä, eikä lämpöpumppu hankinta tällöin ole kannattava. Takaisinmaksuaikaan vaikuttavat vuosittaiset säästöt, jotka jäävät alhaisiksi investoinnin vuosittaisen käytön vähyyden vuoksi. Kohteeseen asennettavalle lämpöpumpulle järkevä takaisinmaksuaika voisi olla noin 5 vuotta. Yhtälön 10 mukaisesti, 5 vuoden takaisinmaksuaika voidaan saavuttaa jos vuosittaiset säästöt olisivat noin 160 000 € vuodessa.

Jotta takaisinmaksuajaksi saataisiin 5 vuotta, pitäisi investoinnin vuosittaista käyttöaika kasvattaa. Tavoitteellinen vuosittainen käyttöaika voidaan selvittää ottamalla vuosittaisten säästöjen tavoitearvoksi 160 000 euroa. Tähän tavoitearvoon pääsemisessä sähkön ja polttoaineen hinnalla on paljon vaikutusta. Lisäksi laskennan helpottamiseksi oletetaan, että käyttöaika pitenee niin että lämmityskierron keskiarvoinen teho pysyy 3 MW:ssa.

Vaadittava vuosittainen käyttöaika voidaan laskea aikaisemmin mainittuja menetelmiä ja excelin goal seek toimintoa käyttäen. Vertailun vuoksi laskenta voidaan suorittaa kahdelle eri tapaukselle. Vuosittaiset säästöt ovat pienimmät, kun sähkön hinta on vertailuarvoista korkein ja polttoaineen hinta matalin. Tällöin 5 vuoden takaisinmaksuaikaan voitaisiin päästä jos vuosittainen käyttöaika olisi noin 2900 tuntia eli noin 121 päivää. Vastaavasti matalimmalla sähkön hinnalla ja korkeimmalla polttoaineen hinnalla eli suurimmilla vuosittaisilla säästöillä käyttöaika olisi noin 1840 tuntia vuodessa, mikä vastaa noin 77 päivää. Hankinnan takaisinmaksuajaksi saataisiin 5 vuotta keskimääräisesti noin 2370 vuosittaisella käyttötunnilla, mikä vastaisi noin 99 päivää.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tapauskohtaisessa tarkastelussa laskettiin paperikoneen kuivatusosan poistoilmasta lämpöpumpun avulla saatava lämpöteho ja selvitettiin lämmön hyödyntämisen kannattavuutta paperikoneen AHR-vesikierrossa.

Paperikoneen AHR-kierron, eli kohteen lämpönielun tehon tarve arvioitiin tehtaan keskimääräisiin mittauksiin perustuen olevan noin 3 MW, jonka mukaan lämpöpumppu mitoitettiin. Poistoilman lämpöteho voidaan hyödyntää lämpöpumpulla, jonka COP vaihtelee 5,5-7 välillä, loppulämpötilasta ja tehosta riippuen. Koska mitoitus perustuu keskiarvoon, tultaisiin jatkossa tarvitsemaan vielä lisähöyryä kierron lämmityksessä. Lämpöpumppuratkaisulla voitaisiin kuitenkin saada suurin kierron lämmityksestä koitua höyrynkulutus poistettua. Tehtaan järjestelmistä saatavan tiedon arvioinnissa huomattiin lisähöyryn käyttöajan olevan suhteellisen pieni, vain noin 400 tuntia vuodessa. Lämpöpumpun käyttöaika jäisi siis tästä johtuen myös pieneksi, mikä nostaa investoinnin takaisinmaksuaikaa.

Kohteeseen sopivaa teollisuuslämpöpumppua etsittäessä, ongelmaksi nousee sen korkea hinta ja lyhyt käyttöaika. Vastaavan kokoluokan lämpöpumppujen hinta asennuksineen ja LTO-pattereineen tulisi todennäköisesti nousemaan noin 800 000 € tasolle tehdyn alustavan arvioinnin mukaan. Vaikka lämpöpumpulla saadaan kohtuullisen hyvät vuosittaiset säästöt polttoaineen käytön vähenemisen seurauksena, nostavat investointikustannus ja tarkastellun kohteen lämpöpumpun lyhyt vuotuinen käyttöaika takaisinmaksuaikaa liian pitkäksi. Kohteeseen saisi valtiolta energiatukea, mutta tuki ei muuttaisi pitkää takaisinmaksuaikaa ratkaisevasti. Tämän takia voidaan todeta, että lämpöpumpun asentaminen kohteeseen ei ole taloudellisesti järkevää. Järkevän takaisinmaksuajan saamiseksi vaadittaisiin lämpöpumpun vuosittaiseksi käyttöajaksi keskimääräisesti noin 2370 tuntia. Poistoilmakanavan ylijäämälämmön potentiaali kannattaa kuitenkin pitää mielessä muita pidempiaikaista lämmitystä vaativia lämpönieluja silmällä pitäen.

## 7 YHTEENVETO

Tämän kandidaatin työn tavoitteena oli tutkia lämpöpumpun käyttömahdollisuuksia paperitehtaan lämmöntalteenotossa. Työssä esiteltiin lämpöpumpun toimintaperiaatetta ja sen etuja lämmöntalteenotossa. Työssä esiteltiin myös esimerkkejä paperinvalmistusprosessin kohteista, missä lämpöpumppua on sovellettu tai voitaisiin soveltaa. Kohteita tarkasteltaessa huomattiin, että vaikka lämpöpumppu pystyy tuottamaan ylijäämälämmöstä energiaa hyvällä hyötysuhteella, vaikuttaa investoinnin hinta, sekä ratkaisun lyhyt vuotuinen käyttöaika usein negatiivisesti hankkeen kannattavuuteen.

Tapauskohtaisessa tarkastelussa tutkittiin lämpöpumpun soveltuvuutta kuivatusosan poistoilman lämmöntalteenotossa. Lämpöpumppuratkaisun oli tarkoitus siirtää poistoilman lämpöenergiaa tehtaan eri kohteita lämmittävään AHR-vesikiertoon ja siten korvata kausittaista kattilahöyryn käyttöä. Tapausta tarkasteltaessa huomattiin, että vuosittainen lisähöyryn käyttöaika kierrossa on lyhyt, jolloin myös lämpöpumpun käyttöaika jäisi lyhyeksi. Lyhyt käyttöaika laskee ratkaisusta saatuja vuosittaisia säästöjä. Lämpöpumppuratkaisun hinta sekä ratkaisun lyhyt vuotuinen käyttöaika tekevät hankinnasta kannattamattoman tähän kohteeseen.

Lämpöpumpputeknologia on teollisuudessa vielä suhteellisen uutta teknologiaa ja etenkin paperin- ja kartongin valmistuksessa tulee sen lämpötilatasolle suuri määrä otollista ylijäämälämpöä prosessien sivuvirtoina. Tämän takia lämpöpumppujen käyttöön tehtaiden lämmöntalteenotossa tulee perehtyä tulevaisuudessa enemmän. Sopivassa tilanteessa lämpöpumppuratkaisulla saadaan tuotettua edullisesti lämpöä tehtaan prosesseihin ja samalla parannettua tehtaan energiatehokkuutta.



## 8 LÄHTEET

Aittomäki, A. 2008. Kylmäteknikka. 3. painos. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy

Business Finland. Energiatuki. 2021. [verkkodokumentti].[viitattu 20.2.2021]. Saatavissa: <https://www.businessfinland.fi/suomalaisille-asiakkaille/palvelut/rahoitus/energiatuki>

Calefa. Kannattavuuslaskuri. Saatavissa: <http://www.calefa.fi/fi/kannattavuuslaskuri/>

Calefa. Ratkaisut, paperiteollisuus. [verkkodokumentti].[viitattu 20.2.2021]. Saatavissa: <http://www.calefa.fi/fi/ratkaisut/teollisuuden-hukkalampo/teollisuus/paperiteollisuus/>

Calefa. Suomessa kehitetty kuumaämpöpumppu mullistaa teollisuuden energiantuotannon. 2018. [verkkodokumentti]. [viitattu 12.3.2021]. Saatavissa: <http://www.calefa.fi/fi/ajankohtaista/suomessa-kehitetty-kuumalampopumppu-mullistaa-teollisuuden-energiantuotannon/>

Celsius. Heat recovery from a local papermill in Skjern, Denmark. 2020. [verkkodokumentti]. [viitattu 31.3.2021]. Saatavissa: <https://celsiuscity.eu/heat-recovery-from-local-paper-mill-in-skjern-denmark/>

Energiavirasto. Maakaasun hinta tilasto. 2021. [viitattu 12.4.2021]. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/maakaasun-hintatilastot>

Euroopan komissio. Vuoteen 2030 ulottuvat ilmasto- ja energiatavoitteet kilpailukykyiselle varmalle ja vähähiilisel EU:n taloudelle. 2014. [verkkodokumentti]. [viitattu 30.3.2021]. Saatavissa: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fi/IP\\_14\\_54](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fi/IP_14_54)

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2018. Uusiutuvan energian direktiivi. Verkkodokumentti. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN>

Fortum. Avoin kaukolämpö, Mitä on hukkalämpö?. [viitattu 1.3.2021]. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisöille/lammitys-ja-jaahdytys/kaukolampo/avoin-kaukolampo>

Kuusisto, M. Pöyry. Energiätehokkaan suunnittelun esimerkkejä teollisuuskohteissa. 2014. [verkkodokumentti]. [viitattu 27. 2. 2021]. Saatavissa: [https://www.lut.fi/documents/10633/333534/Kuusisto\\_Energiatehokas+suunnittelu\\_Pöyry.pdf/bcbfd417-6b42-4e95-b2ca-4bea0cf3052;jsessionid=6402316892BBDEABAAD7806F7C8936A2.wwwlut2?version=1.0](https://www.lut.fi/documents/10633/333534/Kuusisto_Energiatehokas+suunnittelu_Pöyry.pdf/bcbfd417-6b42-4e95-b2ca-4bea0cf3052;jsessionid=6402316892BBDEABAAD7806F7C8936A2.wwwlut2?version=1.0)

Lähteenaro, P.2019. Kuumalämpöpumppujen sovelluskohteet ja potentiaali metsäteollisuudessa. Diplomityö. Lappeenrannassa: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. [verkkodokumentti]. [viitattu 30.2.2021]. Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159906/Kuumalämpöpumpun%20sovelluskohteet%20metsäteollisuudessa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Motiva. Tuotannon hukkalämpö hyödyksi. 2014. [verkkodokumentti]. [viitattu 3.2.2021]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon\\_hukkalampo\\_hyodyksi.pdf](https://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.pdf)

Motiva. Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa. 2019. [verkkodokumentti]. [viitattu 1.3 2021]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys\\_-\\_Ylijaamalammon\\_potentiaali\\_teollisuudessa.pdf](https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys_-_Ylijaamalammon_potentiaali_teollisuudessa.pdf)

Motiva. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen. 2014. [verkkodokumentti]. [viitattu 1.3.2021]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/13515/Ylijaamalammon\\_taloudellinen\\_hyodyntaminen\\_Ylijaamalampoenergia-analysit.pdf](https://www.motiva.fi/files/13515/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Ylijaamalampoenergia-analysit.pdf)

Nordpool. Price development. 2021. [viitattu 1.4.2021]. Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com>

Paperi ja puu. Artikkelit, energiätehokkuutta sivutuotteena. 2019. [verkkodokumentti]. [viitattu 30.3.2021]. Saatavissa: <https://paperijapuu.fi/energiatehokkuutta-sivutuotteena/>

Perälä, R. 2009. Lämpöpumput, Suomalainen käsikirja aikamme lämmitysjärjestelmästä. Tallinna: Alfamer

PTT. Energia- ja ilmastopolitiikan aiheuttama kustannuspaine teollisuudelle ja kotitalouksille. 2014. [verkkodokumentti]. [viitattu 30.3.2021]. Saatavissa: <https://www.ptt.fi/media/liitteet/tp159.pdf>

Puunjalostusinsinöörit. Paperin ja kartongin valmistus, AHR-lämmöntalteenotto. 2009. [verkkodokumentti].[viitattu]. Saatavissa: <https://www.puunjalostusinsinöörit.fi/biometsateollisuus/innovaatiot/4-paperin-ja-kartongin-valmistus/4.28-ahr-lammontalteenotto/>

Ranta, T. 2020. Energiatalouden johdantokurssi, investointilaskelmat, luentomateriaali. Lappeenranta: Lappeenannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT.

Ratalahti, H. 2019. Lämpöpumpputekniikan hyödyntäminen paperitehtaan energiavirtojen hallinnassa. Opinnäytetyö. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. [verkkodokumentti]. [viitattu 3.3.2021]. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/167037/Opinnäytetyö.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Räsä, J. 2013. Maalämpöpumppulaboratorio oppimisympäristönä. Opinnäytetyö. Mikkelin ammattikorkeakoulu. [verkkodokumentti][viitattu 29.5.2021]. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/59560/Opinnäytetyö%2016052013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Räsänen. J. 1996. Mekaanista massaa käyttävän paperitehdasintegraatin pinch-analyysi. Diplomityö. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.

Saari, J. 2019. Paperikone 1:n huuuvan optimointi. Diplomityö. Tampere: Tampereen yliopisto. [verkkodokumentti]. [viitattu 6.3.2021]. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/117431/SaariJoona.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Tilastokeskus. Teollisuuden energiankäyttö, teollisuuden energiankäyttö toimialoittain. 2019. [verkkodokumentti]. [viitattu 30.2.2021]. Saatavissa: [https://www.stat.fi/til/tene/2019/tene\\_2019\\_2020-11-12\\_kuv\\_003\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/tene/2019/tene_2019_2020-11-12_kuv_003_fi.html)

Tilastokeskus. Teollisuuden energiankäyttö, teollisuuden energiankäyttö toimialoittain 2019. [verkkodokumentti]. [viitattu 30.2.2021]. Saatavissa: [https://www.stat.fi/til/tene/2019/tene\\_2019\\_2020-11-12\\_tau\\_002\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/tene/2019/tene_2019_2020-11-12_tau_002_fi.html)

Tuomi, T. 2021. Kuitusementtilevytehtaan (cembrit production oy) hukkalämmön hyödyntäminen. Diplomityö. Lappeenranta: Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. [verkkodokumentti].[viitattu 20.3.2021]. Saatavissa: [https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/162244/diplomityo\\_Tuomi\\_Tero.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/162244/diplomityo_Tuomi_Tero.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

