

Lämpöpumpputekniikan hyödyntäminen paperitehtaan energiavirtojen hallinnassa

Henna Ratalahti

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2019
Tekniikan ja liikenteen ala
Insinööri (AMK), Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Ratalahti, Henna	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Huhtikuu 2019
	Sivumäärä 59	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Lämpöpumpputekniikan hyödyntäminen paperitehtaan energiavirtojen hallinnassa		
Tutkinto-ohjelma Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Marjukka Nuutinen, Hannariina Honkanen		
Toimeksiantaja(t) UPM Kymmene Oyj		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Lämpöpumppujen hankinnan esiselvitys UPM Jämsänkosken paperitehtaalalle tuli ajankoh- taiseksi kartoitettaessa energiansäästökohteita tuotantolaitoksella. Paperinvalmistuksessa syntyneet hukkalämpövirrat ovat merkittävän suuria ja niiden hyödyntäminen uudelleen prosesseissa vähentäisi tehtaan primäärienergiankulutusta oleellisesti.</p> <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, miten lämpöpumpputekniikkaa pystyttäisiin hyö- dyntämään paperitehtaan prosesseissa parantaen energiataloutta. Tavoitteena oli vähentää energiankulutusta ja lämpökuormitusta ympäristölle sekä selvittää, millaista lisäarvoa Suo- men sähköverkon säätösähköreservi saisi, jos lämpöpumput liitettäisiin siihen osaksi.</p> <p>Esiselvityksessä kartoitettiin kolme erilaista kohdetta, joihin suunniteltiin asennettavaksi lämpöpumput. Kohteiden lämpötilatasot ja virtausmäärät poikkesivat toisistaan, jotta saa- tiin mahdollisimman kattava kuva paperiteollisuuden oheen soveltuvista erilaisista laiterat- kaisuista. Lämpöpumppujen toimittajat valittiin saatujen suositusten perusteella ja haastat- telut suoritettiin Jämsänkoskella perehtyen kohteisiin myös fyysisesti. Tietoa haettiin myös kirjallisuudesta, erilaisista tutkimusraporteista ja Internetistä.</p> <p>Lopputuloksena saatiin ratkaisuehdotukset valittuihin kohteisiin, niiden kustannusarviot sekä takaisinmaksuajat. Kohteiden 1 ja 2 lämpöpumppuinvestointien havaittiin olevan rea- listisia ja kustannustehokkaita investointikohteita. Lisäksi selvityksen myötä löytyi potenti- aalinen laitetoimittaja järjestelmille. Saatavat energiansäästöhyödyt olisivat merkittäviä ja opinnäytetyö antoi hyvät lähtökohdat investointihankkeiden viemiselle eteenpäin.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Energiatehokkuus, hukkalämpö, lämpöpumppu, teollisuuden lämpöpumput, UPM		
Muut tiedot (Salassa pidettävät liitteet)		

Author(s) Ratalahti, Henna	Type of publication Bachelor's thesis	Date April 2019
	Number of pages 59	Language of publication: Finnish
		Permission for web publication: X
Title of publication Utilizing heat pump technology in energy flows of paper mill		
Degree programme Degree Programme in Energy and Environmental Technology		
Supervisor(s) Marjukka Nuutinen, Hannariina Honkanen		
Assigned by UPM Kymmene Oyj		
<p>Abstract</p> <p>The preliminary report for purchasing heat pumps for UPM Jämsänkoski paper mill became topical in mapping energy savings at the plant. The waste heat streams from papermaking are remarkably large and their reuse in the processes would substantially reduce the primary energy consumption at the plant.</p> <p>The purpose of the thesis was to determine how heat pump technology could be utilized in paper mill processes to improve energy economy. The aim was to reduce energy consumption and heat load for the environment, and to study what added value the Finnish electricity grid would gain if the heat pumps were to be incorporated into it.</p> <p>In the preliminary study, three different target locations to install the heat pumps at. The objects were chosen so that their temperature levels and flow rates differed from each other to obtain the most comprehensive picture of the various equipment solutions suitable for the paper industry. The heat pump suppliers were selected based on the recommendations received and interviews were conducted physically in Jämsänkoski. Information was also sought from literature, various research reports and the Internet.</p> <p>The results were suggestions for the selected objects, their cost estimates and payback times. Investing in heat pump in options 1 and 2 were found to be realistic and cost-effective. In addition, the survey found a potential device supplier for the systems. The resulting energy saving benefits would be significant and the thesis provided a good starting point for the investment projects.</p>		
Keywords (subjects) Energy efficiency, waste heat, heat pump, industrial heat pumps, UPM		
Miscellaneous (Confidential information)		

Sisältö

Lyhenteet ja termit	4
1 Johdanto	5
1.1 Työn lähtökohdat.....	6
1.2 Työn tavoite ja tutkimuskysymykset	6
1.3 Aiheen valinta ja rajaus	7
1.4 Tutkimusmenetelmät ja aineiston keruumenetelmät.....	8
2 Toimeksiantaja	9
2.1 Paperiteollisuuden energiankäyttö	10
2.2 Jämsänkosken voimalaitos	11
2.2.1 Höryverkko.....	12
2.2.2 Kaukolämpö.....	12
2.2.3 Sähkönkäyttö.....	13
2.2.4 Kysyntäjousto	13
3 Lämpöpumput.....	14
3.1 Toimintaperiaate	19
3.2 Suljetun kierron järjestelmät.....	19
3.2.1 Kompressorilämpöpumppu.....	20
3.2.2 Sorptiolämpöpumppu	22
3.3 Kiertoaineet	25
3.4 Avoimen kierron järjestelmät.....	28
3.4.1 Mekaaninen höyryn komprimointilämpöpumppu	28
3.4.2 Termokompressorilämpöpumppu.....	29
3.5 Tehokkuuslaskenta	29
3.6 Vaikutukset sähköverkkoon	32

4 Kohde 1 – Kuorimo	33
4.1 Sulatusveden lämmitys	33
4.2 Lämpöpumppuratkaisu	34
5 Kohde 2 – Hiertämö	37
5.1 Kohteen kuvaus	37
5.2 Lämpöpumppuratkaisu	37
6 Kohde 3 – Kaukolämpö	39
6.1 Kohteen kuvaus	40
6.2 Lämpöpumppuratkaisu	40
7 Yhteenveto tuloksista	42
8 Pohdinta ja johtopäätökset.....	44
8.1 Luotettavuuden arviointi.....	44
8.2 Jatkotoimenpiteet ja kehitysehdotukset	45
9 Lähteet.....	47
10 Liitteet.....	52
Liite 1 Teollisuuden energiankäyttö toimialoittain 2017	52
Liite 2 Korkeisiin lämpötiloihin sopivien lämpöpumppujen kylmäaineiden ominaisuuksia	53
Liite 3 Eri toimijoiden tekemiä referenssikohteita korkean lämpötilan lämpöpumppuratkaisuista.....	53
Liite 4 Kuorimon puun sulatusprosessin valvomonäyttö	54
Liite 5 Kuorimolle tuleva höyryvirtaus. Vuoden aikajakso	54
Liite 7 PK 5:n kiertovesitornilta lähtevä jätevesivirtaus	55
Liite 6 Hiertämön kiertovesiprosessin valvomonäyttö.....	55
Liite 8 Kaukolämpöveden kiertopiiri	56
Kuviot	
<i>Kuvio 1 Paperin ja kartongin tuotannon kehitys Suomessa</i>	<i>9</i>

<i>Kuvio 2 Sellun tuotannon kehitys Suomessa</i>	10
<i>Kuvio 3 Energiankulutus Suomen paperiteollisuuden eri prosesseissa</i>	11
<i>Kuvio 4 Lämpöpumppujen kategoriat</i>	17
<i>Kuvio 5 Eri lämpöpumpputyypin ominaisuuksia</i>	18
<i>Kuvio 6 Mekaaninen lämpöpumppuprosessi.....</i>	20
<i>Kuvio 7 Ammoniakki-vesi -työparilla toimivan absorptiolämpöpumppuprosessin toimintaperiaate</i>	24
<i>Kuvio 8 Eri kylmäaineiden paineen muutos lämpötilan kasvaessa</i>	26
<i>Kuvio 9 Kylmäaineiden tunnuksista saadaan selville yhdisteiden koostumuksia</i>	26
<i>Kuvio 10 Hiertämölle suunnitellun lämpöpumppujärjestelmän esimerkkikaavio.</i>	38
<i>Kuvio 11 Kaukolämpöveden oheen liitetyn lämpöpumppuprosessin esimerkkivirtauskaavio.....</i>	41

Lyhenteet ja termit

COP	(Coefficient of Performance) Lämpöpumpun lämpökerroin, tehokerroin
EER	(Energy Efficiency Ratio) Kylmäkerroin
GWP	(Global Warming Potential) Luku, joka kertoo, kuinka paljon suurempi on kyseessä olevan kylmäaineen vaikutus ilmaston lämpenemiseen 100 vuoden aikana kuin vertailuarvona käytettävän hiilidioksidin (CO ₂)
HP	(Heat Pump) Lämpöpumppu
HTHP	(High Temperature Heat Pump) Korkean lämpötilan lämpöpumppu
HKP	Korkeapainehöyry
HMP	Matalapainehöyry
HVP	Välipainehöyry
KL	Kaukolämpö
MVR	(Mechanical Vapour Recompression) Mekaaninen höyryn komprimointi -prosessi
PK, PM	Paperikone, paper machine
TMP	(Thermomechanical Pulp) Kuumahierre
Primäärienergia	Jalostamatonta energiaa eli energialähteiden sisältämää energiaa niiden neitseellisessä muodossa

1 Johdanto

Energiatehokkuuden tehostaminen vaatii kokonaisvaltaista ja systemaattista ajattelutapaa. Yhden prosessin jäte voi olla toisen resurssi. Tätä ajatusta tulisi tarkastella nykyistä suuremmissa kohteissa ja soveltaa erilaisiin kohteisiin. Esimerkiksi siellä, missä tuotetaan jäähdytystä, syntyy sivutuotteena lämpöä. Vastaavasti lämpöä tuotettaessa saadaan ylimääräistä jäähdytysenergiaa. Yhdistämällä prosessien energiavirtauksia pystyttäisiin vähentämään kokonaisenergiantarvetta ja hukkaan menevän energian määrää.

Lämpöpumput ja kylmäkoneet mahdollistavat lämmönsiirron kohteesta toiseen sähköenergian avulla. Yleensä järjestelmässä on käytössä työaine, joka tehostaa lämmön siirtymistä. Tämä on useimmiten tehokkain tapa tuoda tai poistaa lämpöenergiaa kohteesta, etenkin saataessa samalla kertaa tarvittava lämmitys- ja jäähdytysenergia. Yhtäaikainen lämmitys- sekä jäähdytyskäyttö lähes kaksinkertaistaa lämpöpumppujen lämpökertoimenä käytettävän COP-arvon. Teollisuudessa, jossa energiamäärät ovat merkittävän suuria, hukkalämmön valjastaminen hyötykäyttöön ja ohjaaminen uudelleen prosessiin säästäisi huomattavia määriä tuotantolaitoksen primäärienergian käyttöä. Ongelmaksi muodostuu kuitenkin usein prosessien vaatimat korkeat lämpötilat, jotka ovat olleet aiemmin haaste lämpöpumppujen tekniikalle.

Teollisuuden lämpöpumppujen kehitystyössä on otettu onneksi suuria harppauksia, jotta päästäisiin tavoitteeseen säästää merkittävästi teollisuuslaitosten kokonaisenergiankulutuksessa. Kylmäaineiden ja kompressorien kehittäminen on ollut suurimmassa roolissa lämpöpumppujen tehokkuuden parantumisessa. Lisäksi esimerkiksi erilaiset välijäähdytykset käytettävälle työaineelle on havaittu tehostavan oleellisesti aineen kykyä siirtää lämpöenergiaa, joten tämän kaltaiset sovellutukset lämpöpumppujärjestelmissä ovat yleistyneet.

Globaalisti käynnissä olevassa energiamurroksessa uusiutuvan energiantuotannon rooli on merkittävä. Sähköntuotantoa hajautetaan esimerkiksi tuulivoima- ja

aurinkosähköjärjestelmien avulla ja niiden kasvu moninkertaistuu vuosi vuodelta. Myös ydinvoiman osuus Suomen sähköntuotannossa on kasvamassa. Tuotantotapojen muuttuessa sähköverkon tehotasapainon ylläpitoa ei enää ole järkevää toteuttaa säätämällä tuotantoa kulutuksen mukaisesti, koska se on teknisesti ja taloudellisesti kannattamatonta sääriippuvaisten uusiutuvien energiantuotantomuotojen sekä tasaisesti ajettavan ydinvoiman takia. Kysyntäjouston tavoitteena onkin saada ylläpidettyä sähköverkon tehotasapaino säätämällä kulutusta tuotannon mukaan. Sen toteutuminen perustuu sähkönkäytön vapaaehtoiseen ja tilapäiseen sopeuttamiseen. Sähkönkäyttäjien rooli korostuu varsinkin teollisuuden kohteissa, joissa sähkönkulutus on merkittävän suurta.

1.1 Työn lähtökohdat

Matalalämpöistä jätelämpöä syntyy paperinvalmistuksen monessa eri vaiheessa ja vaikka lämpöenergia otettaisiin talteen, ei sille löydy kannattavia hyödyntämiskohteita sellaisenaan. Paperitehdas kerää nykyisellään lämmöntalteenottojärjestelmällä jonkin verran ylijäävää prosessilämpöä, jota käytetään pääsääntöisesti tilojen lämmitykseen.

Tuotantolaitoksen oma biovoimalaitos tuottaa höyryä tehtaan prosesseihin ja hyödyntää myös tuotantolaitoksen sivutuotteina saatua kuorta sekä lietettä höyryn valmistuksessa. Höyrynvalmistuksessa käytettävät liete ja kuori ovat ylijäämätuotteita, joten ne ovat ilmainen energianlähde voimalaitokselle. Tämä alentaa huomattavasti höyryn hintaa.

Suomen sähkön markkinahinta on vaihdellut viime vuosina ja varsinkin talviajalla sähköpulan riski on ollut korkealla. Tähän on eniten vaikuttanut luonnonolosuhteet ja vesivoiman heikko saatavuus tuontisähkön osuudessa. Tilannetta helpottaa tulevaisuudessa lisääntyvä ydinvoima ja tuulivoima, jolloin tuontisähkön osuutta pystytään vähentämään. (Kuittinen 2018.)

1.2 Työn tavoite ja tutkimuskysymykset

Opinnäytetyön tavoitteena oli parantaa paperitehtaan energiataloutta, hyödyntää syntyneitä hukkalämpövirtoja sekä selvittää lämpöpumppujen roolia sähköverkon

kysyntäjoustopuolella. Tarkoituksena oli kartoittaa lämpöpumpputekniikan mahdollisuudet kokonaisenergiankulutuksen vähentäjänä paperitehtaalla. Opinnäytetyössä etsittiin ratkaisua havaittuun ongelmaan, jossa ylijäämäenergiaa jätetään hyödyntämättömäksi. Tutkimuksen tavoitteena oli myös selvittää, miten Jämsänkosken paperitehdas vastaa kysyntäjoustopuolelle lisäamiseen myös tulevaisuudessa.

Tutkimuskysymykset:

- Miten hukkaan menevää lämpöenergiaa voitaisiin hyödyntää tuotantolaitoksen prosesseissa?
- Millaisia lämpöpumppuja markkinoilla on teollisuuden tarpeisiin ja onko niiden hankinta taloudellisesti perusteltua?
- Mikä olisi lämpöpumppujen rooli kysyntäjoustopuolelle toteuttamisessa?

1.3 Aiheen valinta ja rajaus

Ajankohtaisuus, mielenkiinto ja suuri energiansäästöpotentiaali on ohjannut valitsemaan tämän työn aiheen. Toimeksiantajan ongelmana on ollut suuret hukkalämpövirrät, joiden tehokkaampaan hyödyntämiseen ei ole lämpöpumpputekniikan avulla aiemmin löydetty kustannustehokasta ratkaisua.

Vastaavantyyppisiä investointeja on viime vuosina tehty saman kokoisissa tai jopa suuremmissa kohteissa teollisuudessa. Niistä saadut tulokset ovat innostaneet miettimään, kuinka suuren hyödyn paperitehdas voisi lämpöpumppuinvestoinneista saada.

Opinnäytetyössä keskityttiin teollisuuden käyttöön soveltuviin lämpöpumppuihin. Pääpaino oli suljetun kierron järjestelmissä, koska niiden mahdollisia hyödyntämiskohteita on paperitehtaan prosesseissa huomattavasti enemmän kuin avoimen kierron järjestelmillä.

Työssä ei tarkasteltu eri lämpöpumppujärjestelmiä teollisuuskäytön ulkopuolella. Selvitettäessä opinnäytetyön kohteisiin sopivia lämpöpumppuratkaisuja, ei ole otettu huomioon asennusteknisiä asioita tai sijoittelua kohdetiloihin. Työssä tarkasteltiin vain

hukkaenergian hyödyntämistä lämpöenergiana, vaikka esimerkiksi ORC-tekniikka (Organic Rankine Cycle) mahdollistaisi ylijäämälämmön hyödyntämistä sähköenergiantuotannossa orgaanisen kiertoaineen avulla (Kauppinen 2018, 53.)

1.4 Tutkimusmenetelmät ja aineiston keruumenetelmät

Opinnäytetyö tehtiin empiirisenä tutkimustyönä eli havainnoivana tutkimuksena. Työssä sovellettiin niin kvantitatiivista kuin kvalitatiivista tutkimusta, joten puhutaan triangulaation hyödyntämisestä. Tutkimuksessa käytettiin useampaa tutkimusmenetelmää tavoiteltaessa luotettavampia tutkimustuloksia.

Kvantitatiivisessa eli määrällisessä tutkimusmenetelmässä on käytetty yleistettävissä olevaa tietoa, joka voidaan määritellä tilastollisematemaattiseksi. Siinä ei huomioida subjektiivisia tulkintoja kohteesta, vaan pikemminkin havaintojen sijoittumista suhteessa koko joukkoon nähden. Tätä tutkimusmenetelmää on hyödynnetty esimerkiksi koottaessa teoreettista tietoperustaa opinnäytetyössä.

Kvalitatiivisen tutkimuksen eli laadullisen tutkimusmenetelmän tunnuspiirteitä ovat kohteen kokonaisvaltainen ymmärtäminen sen laadun, ominaisuuksien ja merkitysten kannalta. Määrällisestä tutkimustavasta poiketen kvalitatiivisessa tutkimuksessa ei voida suhteuttaa selvitettyjä tuloksia keskiarvoihin tai yleistyksiin. Siinä on lähestytty tutkimuskohdetta monelta eri kantilta ja tavoitteena on luoda yksilöllinen ja selkeä käsitys tutkitusta kohteesta. Kvalitatiivisen menetelmän käyttö näkyy varsinkin sovellettaessa parhaita lämpöpumppuratkaisuja työn kolmeen kohteeseen. (Heikkilä 2014, 12-15; Kananen 2017, 32-45.)

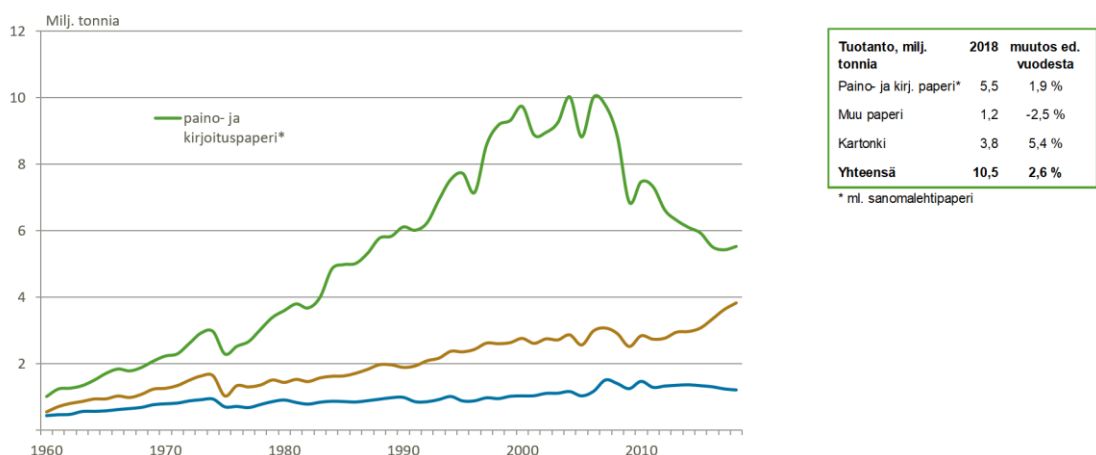
Aineistoa kerättiin niin kotimaisista kuin ulkomaisista tietolähteistä, kirjallisuudesta, tutkimusraporteista, Internetsivustoista sekä asiantuntijoiden ja työntekijöiden haastatteluista. Lisäksi prosessien mittausdataa saatiin Metso DNA - automaatiojärjestelmästä ja muista UPM:n tuotantolaitoksen käyttämistä tietojärjestelmistä.

2 Toimeksiantaja

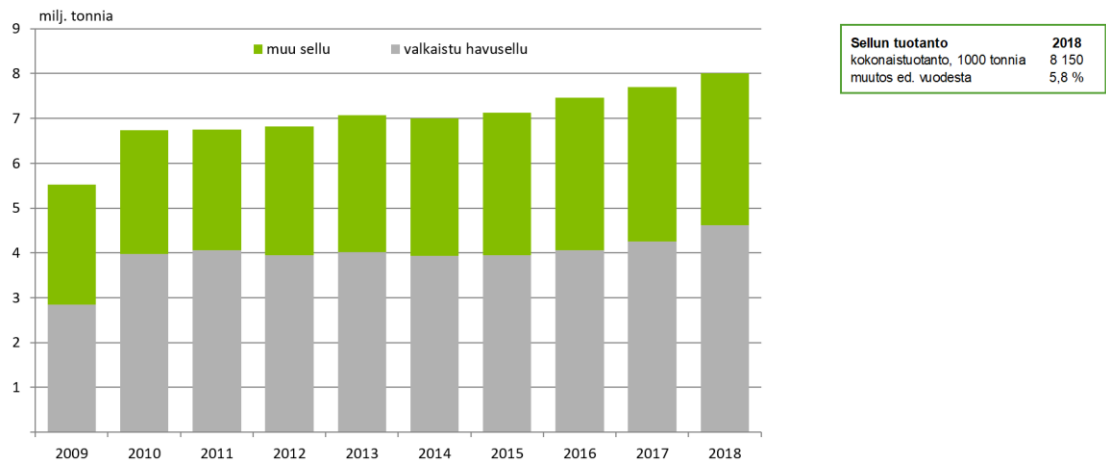
Opinnäytetyön toimeksiantaja toimi UPM Kymmene Oyj Jämsänkosken paperitehdas. Tuotantolaitos sijaitsee Jämsässä Keski-Suomessa ja yhdessä Kaipolan paperitehtaan kanssa ne muodostavat Jokilaakson tehdasintegraatin. Jämsänkoskella valmistetaan päälylystämätöntä aikakausilehtipaperia sekä tarra- ja pakkauspaperia. Aikakausilehtipaperien raaka-aineena käytetään mekaanista massaa, joka on kuusipuusta valmistettua hierrettä. Tarra- ja pakkauspaperien pääraaka-aine puolestaan on markkinasellu.

Tehdasyksikköön kuuluvat paperikoneiden lisäksi kuorimo, kuumahiertämö, vesilaitos, biologinen jätevedenpuhdistamo ja voimalaitos. Prosesseihin tarvittava lämpö ja osa sähköstä pystytään tuottamaan omalla voimalaitoksella, jonka polttoaineena käytetään turvetta, metsäenergiaa ja omista prosesseista saatavaa kuorta ja lietettä. Tehtaan tarvitsema vesi saadaan vieressä olevasta Koski-Keskisestä. (Jokilaakson ympäristö- ja yhteiskuntavastuu 2017, 2018.)

Vaikka paperiteollisuuden tilanne on globaalisti ollut viime vuosikymmenen ajan epävarmalla pohjalla, on UPM pystynyt nostamaan liikevaihtoaan vuodesta 2017 viisi prosenttia ylöspäin vuoteen 2018 mennessä (UPM 2019.) Kuvioista 1 ja 2 nähdään paperin ja kartongin sekä sellun tuotannon kehitystä viime vuosilta.



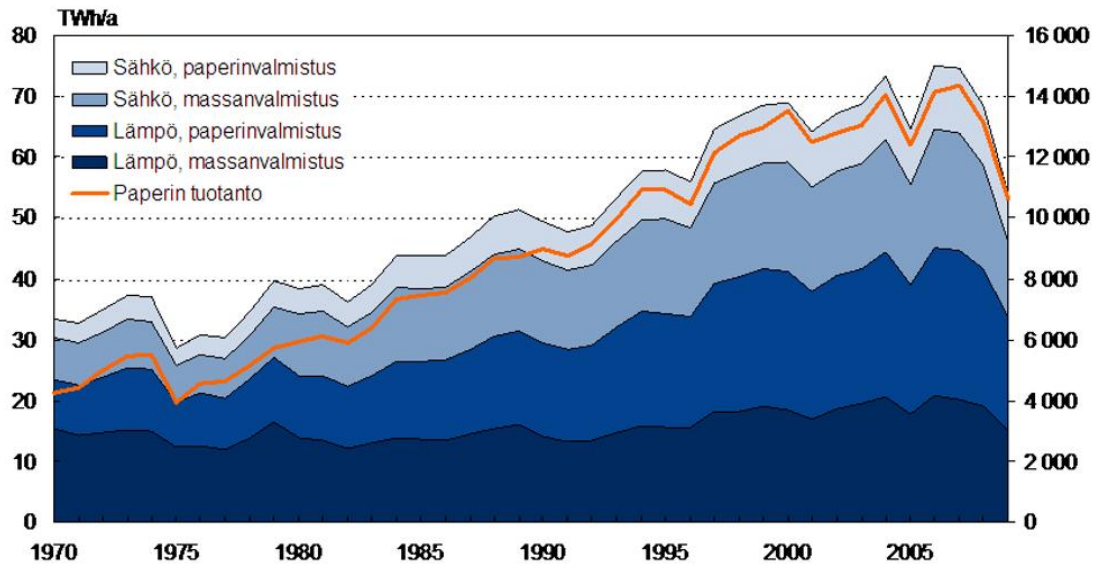
Kuvio 1 Paperin ja kartongin tuotannon kehitys Suomessa (Metsäteollisuus ry 2019.)



Kuvio 2 Sellun tuotannon kehitys Suomessa (Metsäteollisuus ry 2019.)

2.1 Paperiteollisuuden energiankäyttö

Metsäteollisuus on suurin teollisuuden sähkönkuluttaja Suomessa. Pelkästään paperi- ja kartonkituotteiden valmistukseen kuluu reilu 30 % teollisuudessa käytettävästä sähköenergiasta (ks. liite 1.) Energian kokonaiskulutus on noussut tuotannon voimakkaan kasvun myötä 1970-luvulta vuoteen 2005 asti. Graafisten paperien kysynnän laskiessa 2000-luvun alkupuolella myös energiankulutus on laskenut (kuvio 3). Energiankulutus tuotettua paperitonnia kohden on kuitenkin ollut laskusuunnassa pitkään uusien energiatehokkaampien ajotapojen, järjestelmien ja laitteistojen ansiosta. Tekniikoiden kehittymisen myötä paperinvalmistukseen tarvittavaa energian määrää pystyttäisiin laskemaan vielä paljon, mutta investointien korkeat kustannukset ja markkinoiden epävakaus hidastavat niiden käyttöönottoa. (Metsäteollisuus.)



Kuvio 3 Energiankulutus Suomen paperiteollisuuden eri prosesseissa (Kuusisto 2014.)

Kuten liitteestä 1 voidaan havaita, vuonna 2018 metsäteollisuuden kuluttaman sähköenergian osuus Suomen sähkön kokonaiskulutuksessa oli 23% (Tilastokeskus 2018.) Johtavassa asemassa olevalta teollisuusosalta saadut energiansäästöt näkyisivät positiivisessa valossa koko Suomen sähköenergiakulutuksessa.

2.2 Jämsänkosken voimalaitos

Paperitehtaan yhteydessä toimiva voimalaitos tuottaa paperinvalmistusprosessien tarvitseman höyryn sekä osan sähköstä. Lisäksi voimalaitos toimittaa höyryä lähellä sijaitsevalle DuPontin omistamalle entsyymitehtaalle ja kaukolämpöä Jämsässä toimittavalle Jämsän Aluelämmölle. Voimalaitoksen pääkattilana on kupliva leijukerroskattila, jonka maksimi lämpöteho on 185 MW_{th} . Sillä pystytään tuottamaan maksimissaan höyryä 70 kg/s 533 °C lämpötilassa. Varakattiloina on kaksi öljykäyttöistä apukattilaa, joiden yhteenlaskettu teho on 87 MW_{th} .

Voimalaitoksella on käytössä myös vastapaineturbiini, jolla tuotetaan sähköä tehtaan omaiin prosesseihin. Sillä saadaan katettua kuitenkin vain osa tehtaan tarvitsemasta sähköenergian kokonaistarpeesta. Turbiinin nimellisteho on 46 MW_e ja siinä käytettävät väliottopaineet ovat 20 bar, 10 bar sekä 3,5 bar. Voimalaitoksen

polttoaineina ovat jysinturve, ostobio, metsätähdehake sekä kuorimolta saatu kuori ja jätevedenpuhdistamolta tuleva liete. Käynnistyksessä ja varakattiloiden polttoaineena käytetään raskasta polttoöljyä. (Jämsänkosken voimalaitos 2017.)

2.2.1 Höyryverkko

Höyryverkon tehtävänä on siirtää tuotettu höyry kulutuskohteisiin. Jämsänkosken tuotantolaitoksen voimalaitoksen pääkattilassa tuotettu höyry on paineeltaan 110 bar ja varakattiloissa 20 bar. Höyryjärjestelmä on laaja ja eri painetasoja on neljä, johtuen kulutuskohteiden määrittämisestä vaatimuksista sekä pääkattilan ja varakattiloiden ominaisuuksista. Tehtaalla käytössä oleva korkeapainehöyry on 110 bar, välipainehöyry 20 ja 10 bar sekä matalapainehöyry 2,5 bar. Turbiinissa käytetään korkeapaineista höyryä. Höyrytukit eli höyryn jakotukit eri painetasoilla sijaitsevat voimalaitoksella, josta höyrylinjat jakaantuvat eri käyttökohteisiin.

Korkeapaineinen höyry muutetaan matalampiin painetasoihin reductioventtiilien, ruiskutusveden tai turbiinin avulla. Eniten käytetty höyry on matalapaineista 2,5 bar:n höyryä, jota myös toimitetaan viereiselle entsyymitehtaalle. Konelinjojen seisokit ja muut tuotannolliset poikkeustilat vaikuttavat suuresti kattilan höyrykuormiin. Onneksi nämä osataan useimmiten ennakoida, jolloin pystytään välttämään laajemmat tuotantohävikit.

Mietittäessä uusia investointeja tehtaalle, on otettava huomioon myös höyryverkoston rakenteellisia asioita. Esimerkiksi putkikoot on mitoitettu tarkasti höyryvirtauksien mukaisesti. Ylimoitettut putkistot keräävät lauhdetta suuremman lämpöhäviön takia ja näin lisäävät kustannuksia. Alimitoitus puolestaan nostaa painehäviöitä, aiheuttaa ongelmia kulutuskohteissa riittämättömän virtauksen vuoksi sekä alentaa koko laitoksen tehoa. Tästä syystä muutokset virtausmäärissä velvoittaa selvittämään tarvittavat muutostyöt tarkasti myös höyryverkoston osalta.

2.2.2 Kaukolämpö

Tuotantolaitoksen biovoimalaitokselta saatavalla matalapainehöyryllä lämmitetään myös Jämsän seudun kaukolämpöverkostoa, jonka omistaa Jämsän Aluelämpö Oy.

Matalapaineisesta 2,5 bar:n höyrystä saatavaa lämpöenergiaa ohjataan höyrylämmönsiirtimen kautta kaukolämpövedeen. Lämmitettävä vesivirtaus on keskimäärin noin 40 l/s ja haluttu lämpötila 115°C riippumatta vuodenajasta. Ennen höyrylämmönsiirintä on kolme muuta lämmönsiirintä, jotka hyödyntävät muualta prosesseista saatavaa ylijäämälämpöä. Näiden lämmöntalteenottojärjestelmien avulla kaukolämpöveden lämpötila saadaan nostettua noin 30 astetta. Matalapainehöyryä käyttävä 10 MW:n tehoinen höyrylämmönsiirrin huolehtii lämpötilan nostosta asetusarvoon asti. Palatessaan paluuputkistossa Jämsänkosken paperitehtaalle vesivirtauksen lämpötila on 50-60°C.

2.2.3 Sähkönkäyttö

Paperinvalmistus kuluttaa sähköenergiaa huomattavan paljon. Esimerkkinä merkittävimmistä osaprosesseista, jotka käyttävät paperintuotannossa eniten sähköä, ovat jauhatus, pumppaukset ja linjakäyttöjen sähkömoottorit. Paperikoneita pyritään ajamaan ympärivuorokautisesti mahdollisimman vähillä seisokkijajoilla.

Jämsänkosken tehtaan suurin yksittäinen sähkönkulutuskohte on kuumahierto-prosessi. TMP-hierre (thermomechanical pulping) on paperikone kuuden käyttämää pääraaka-ainetta, jonka valmistuksessa suuri sähköenergian tarve johtuu mekaanisen työn aikaansaavien sähkömoottoreiden tehontarpeesta. Puuraaka-aine syötetään hakkeena levyjauhimen pyörivien kiekkojen väliin, jossa tapahtuu mekaanista rasiutusta ja puun kuituuntumista. Prosessissa vapautunutta lämpöenergiaa kerätään talteen hyödyntäen sitä muissa prosesseissa ja tilojen lämmityksessä.

2.2.4 Kysyntäjousto

Kysyntäjousto tarkoittaa sähkön kulutuksen ja tuotannon tasapainottamista sähköverkossa. Kantaverkkoyhtiö Fingrid vastaa sähkön siirrosta Suomen sähköjärjestelmässä ja sen tehotasapainon ylläpitämisestä. Suomessa verkon taajuus eli kulmanopeus sallitaan vaihtelevan 49,9 ja 50,1 Hz välillä. Taajuus pysyy vakiona, kun kulutus ja tuotanto ovat yhtä suuria. Epästabiilisuus tuottaa ongelmia

sähkölaitteiden toiminnassa ja luo turvallisuusriskejä, joten kulutuksen on pystyttävä vastaamaan tuotannon määrään ajantasaisesti. (Fingrid.)

Suomen sähköverkon toiminta on murrosvaiheessa uusien energiamuotojen tullessa voimakkaammin osaksi sähköntuotantoa. Sähkön pientuotanto ja hajautettu tuotanto luovat tilanteen, jossa sähkön tuotanto ja kulutus eivät ole jatkuvassa tasapainossa. Uusiutuvan energian tuotanto on jossain tapauksissa myös riippuvainen luonnon olosuhteista, esimerkiksi tuulen voimakkuudesta tai auringon säteilyvoimakkuudesta. Tällöin ei ole ennustettavissa tarkkoja määriä tulevista tuotantomääristä.

Sähköenergian varastointi on haasteellista ja suuremman koon akkuteknologia on vielä nykyisinkin kehitysvaiheessa. Sähkön varastoiminen on kallista ja hyötysuhdetta on vaikea pystyä pitämään kannattavissa lukemissa. Tämän takia helpoin ratkaisu on pyrkiä ohjaamaan sähkön kulutusta tuotannon kapasiteetin mukaisesti. Tasapainon ylläpitämiseksi suuret energiankäyttäjät, kuten teollisuuden toimijat, tekevät vahvaa yhteistyötä Suomen sähköverkon haltijan Fingridin kanssa.

Suuret sähkönkuluttajat, kuten teollisuuden toimijat, ovat jo suurelta osin integroitu osaksi kysyntäjoustojärjestelmää. Säädetävällä kuormalla ylläpidetään häiriöreserviä ja varmistetaan stabiilius. Tällöin korkean kulutuksen ja hinnan tunteina kevennetään sähkönkulutusta kysyntäjoustosopimukseen kuuluvissa kohteissa, jotta taajuus ei pääse laskemaan alle asetettujen rajojen. Sama toimii myös sähköntuotannon ollessa voimakkaampaa kuin kulutuksen, jolloin kulutusta lisätään taajuuden tasaamiseksi. Tällä hetkellä Suomen sähkönjakeluverkossa nopeasti saatavissa olevaa (korkeintaan 15 minuutin vasteaika) reserviä on noin 0,8 GW. (Marttila ym. 2017.)

3 Lämpöpumput

Lämpöpumppu on vanha keksintö. Idea perustuu termodynaamiseen kiertoprosessiin, joka esiteltiin jo vuonna 1824. Ensimmäiset lämpöpumput rakennuksiin tulivat 1920-luvulla ja suurempaan suosioon ne nousivat vasta toisen maailmansodan aikana, jolloin oli keksittävä vaihtoehtoisia ratkaisuja lämmitykseen. Suosio on aaltoillut lämmityksessä käytettyjen polttoaineiden hintojen mukaan. Tällä hetkellä

ympäristöön vaikuttavien päästöjen tarkkailusta ja fossiilisten polttoaineiden hintojen noususta on seurannut jälleen uusi kiinnostus lämpöpumppuja kohtaan. (Perälä 2013, 27.)

Lämpöpumppu voidaan luokitella järjestelmäksi, jota kutsutaan stationääriseksi virtaussysteemiksi. Tämä tarkoittaa, että siihen virtaa aina yhtä paljon ainetta sisään kuin siitä tulee ulos. Ainemäärät pysyvät tällöin jatkuvasti vakiona. Systeemin energiatase voidaan merkitä seuraavassa muodossa:

$$h_1 + \frac{1}{2}w_1^2 = h_2 + \frac{1}{2}w_2^2 \quad (1)$$

Jossa

$$h = \text{entalpia, kJ/kg}$$

$$w = \text{nopeus, m/s}$$

Tässä tapahtuu virtausta aukon läpi, jolloin paine alenee. Tasetilavuus on eristetty ja siihen ei tuoda akselityötä.

Tilanmuutokseen tarvittava lämpömäärä määräytyy prosessin toteutustavan mukaan, jotta saavutetaan haluttu tasetila. Kiertoprosessi, jossa systeemiin tai ympäristöön ei jää mitään pysyviä muutoksia, vaan se pystyy palaamaan alkutilaansa, kutsutaan palautuvaksi prosessiksi. Vaatimuksena on jatkuva tasapainotila. Palautuvassa prosessissa pystytään halutut tasetilan tilasuureiden muutokset määrittämään lämpömäärien mukaan. Teknillisen termodynamiikan kaksi tärkeää prosessia ovat tilavuuden ja paineen oleminen vakiona. Nämä ilmoitetaan seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p \quad (2)$$

$$C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_v \quad (3)$$

Jossa

$C_p =$ lämpökapasiteetti vakioaineessa, kJ/kgK

$C_v =$ lämpökapasiteetti vakiotilavuudessa, kJ/kgK

$\partial =$ osittaisderivaatta

$H =$ entalpia, kJ/kg

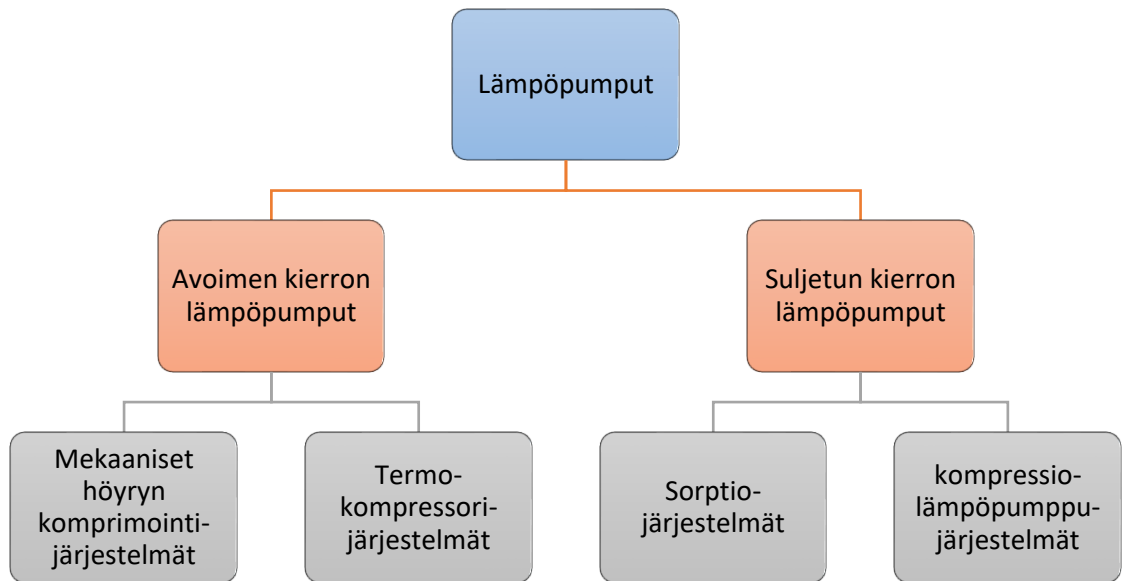
$U =$ sisäenergia, kJ

$T =$ termodynaaminen lämpötila, K

Yhtälöistä selviää, kuinka paljon lämpöä tarvitsee tuoda tasetilan ylläpitämiseksi, jotta saadaan haluttu lämpötilaero. Tällöin tuotu lämpö on sama kuin muutos tasetilan sisäenergiassa. (Wikstén 2009, 10-15.)

Tätä ideaalista, häviötöntä rajatapausta ilman kitkaa tai lämpöhäviöitä voitaisiin kutsua ikiliikkujaksi, mikä olisi termodynamiikan sääntöjen vastainen. Sen avulla voidaan kuitenkin havainnoida vastaaventyyppisten kiertoprosessien toimintarajoja ja määrittää ylä- ja alarajoja vaadittavalla työlle. Suurin mahdollinen hyötysuhde saadaan Carnot-prosessilla. Todellisissa lämpöpumppprosesseissa tapahtuu aina paine- ja lämpöhäviöitä, jolloin ne ovat palautumattomia. Vaikka kierto mahdollistaa palautumisen samaan lähtötilaan, on kiertoprosessi aiheuttanut muutoksia ympäristöönsä systeemin tilasuureiden arvojen pysyessä muuttumattomina. (Napari & Vehkamäki 2013, 32; Wikstén 2009, 3.)

Lämpöpumput voidaan jakaa toimintansa perusteella suljettuihin ja avoimiin lämpöpumpputyyppeihin ja siitä edelleen alakategorioihin käytetyn energialähteen perusteella (kuvio 4). Suljetuissa järjestelmissä käytetään erillistä kiertoainetta ja avoimessa lämpöpumppuprosessissa käytetään prosessin omia virtauksia. Kuviossa 5 on vertailtu eri lämpöpumpputyyppeiden ominaisuuksia ja mahdollisia käyttökohteita.



Kuvio 4 Lämpöpumppujen kategoriat (mukaillen Maaskola & Kataikko 2014.)

	Mekaaninen lämpöpumppu	Absorptio-lämpöpumppu	Absorptio-lt:n muunnin	Höyryn komprimointi	Termo-kompressori
Käyttöenergia	sähkö	kuuma vesi tai höyry	lämpö	sähkö	höyry
Max. luovutus-lt.	95 (120) °C	95 °C	150 °C	200 °C	180 °C
Lämpötilan nosto	20–90 °C	30–65 °C	30–50 °C	5–30 °C	5–20 °C
Max. teho	Lähes rajoittamaton sarjaan kytketyillä järjestelmillä	Lähes rajoittamaton	Lähes rajoittamaton	Lähes rajoittamaton	Lähes rajoittamaton
COP	2,6–7,5	1,5–1,7	0,4–0,5	3–30	1,5–5
Kiertoaaine	halogenoidut hiilivedyt, ammoniakki, hiilivedyt, CO ₂	vesi/litium-bromidi, ammoniakki/vesi	vesi/litium-bromidi	vesihöyry, hiilivetyhöyry	vesihöyry
Sisäinen korroosioherkk.	ei esiinny	seurattava	seurattava	seurattava	seurattava
Sisäinen likaantuminen	ei esiinny	ei esiinny	seurattava	seurattava	seurattava
Melu	+/-	++	++	+/-	--
Edut	<ul style="list-style-type: none"> • luotettava 	<ul style="list-style-type: none"> • luotettava, yksinkertainen • vähän ylläpitoa • säädettävyyys • 0 -100 % • kestävyys 	<ul style="list-style-type: none"> • yksinkertainen • vähän ylläpitoa • säädettävyyys • kestävyys 	<ul style="list-style-type: none"> • pieni lämmönsiirto-pinta-ala 	<ul style="list-style-type: none"> • yksinkertainen • edullinen • ei liikkuvia osia • ei likaantumisongelmia
Haitat	<ul style="list-style-type: none"> • ei sovi korkeille lämpötiloille • nopea käynnistys • 0→100 % ~2 min • säädettävyyys haastavissa mitoitusolosuhteissa 	<ul style="list-style-type: none"> • suuri sis. lämmönsiirto-pinta-ala • suhteellisen hidas käynnistys • 0 →100 % ~ 10 min • tyhjän varmistus • tarvitaan kerran viikossa 	<ul style="list-style-type: none"> • suuri sis. lämmönsiirto-pinta-ala • hidas käynnistys • suuri tarvittava ylijäämä-lämpövirtaus 	<ul style="list-style-type: none"> • pieni dT • sopii vain tietyille höyryille 	<ul style="list-style-type: none"> • pieni dT • vain tietyille höyryille • melu

Kuvio 5 Eri lämpöpumpputyyppeiden ominaisuuksia (Maaskola & Kataikko 2014.)

Teollisuudessa on useita kohteita, joissa lämpötilatasot ovat normaalia korkeammat. Kun lämpöpumpulla tuotetaan yli 80 °C, voidaan se luokitella korkean lämpötilan lämpöpumpuksi (HTHP – high temperature heat pump). Korkeammat lämpötilat luovat haasteita komponenteissa käytetyille materiaaleille ja vaativat kiertoaineen ominaisuuksilta enemmän. Komponenteissa olevissa liikkuvissa osissa käytetään usein öljyjä voiteluaineina, joiden toiminnan tehokkuus laskee huomattavasti kuumissa olosuhteissa. Jatkuvan tutkimustyön tuloksena on kuitenkin saatu onnistuneita ratkaisuja (ks. liitteet 2 & 3) ja löydetty soveltuvia voitelu- ja kylmäaineita näihin lämpötilatasoihin (Arpagaus ym. 2017.) Oleellisena syynä lämpöpumppujen

soveltavuudesta kuumempiin lämpötiloihin on vaikuttanut komponenttien materiaalikehitys.

3.1 Toimintaperiaate

Lämpöpumppujen toiminta perustuu termodynamiikan toiseen pääsääntöön, jossa lämpö siirtyy korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Luonnollisissa olosuhteissa lämmönsiirto ei koskaan tapahdu pienemmän lämpöenergian omaavasta kappaleesta suuremman lämpöenergian omaavaan kappaleeseen. Lämpö voi siirtyä kolmella tavalla, eli johtumalla, säteilemällä tai konvektion avulla. Useimmiten lämmönsiirto tapahtuu näiden yhdistelmänä. Johtumisessa tapahtuu lämmön hajautumista materiaalin sisällä tai siirtymistä materiaalista toiseen. Johtavan materiaalin lämmönjohtavuuskerroin, pinta-ala ja kappaleiden välinen lämpötilaero on suoraan verrannollinen lämpövirtauksen määrään. Säteilyn avulla lämmönsiirto puolestaan tapahtuu täysin ilman väliainetta. Säteilylämpö etenee suoraviivaisesti kappaleen pinnalta sähkömagneettisena säteilynä. Konvektiossa tapahtuu lämmön kulkeutuminen virtaavan aineen mukana. Se on lämmönsiirtymisen ilmiö, jossa lämpöenergia siirtyy molekyylien massan liikkeen ansiosta. (Giancoli ym. 2005)

Lämpöpumpuissa termodynamiikan pääsääntö toimii käänteisesti, jolloin lämpöä otetaan kylmemmästä lähteestä ja siirretään kuumempaan kohteeseen. Lämmönsiirto on mahdollista mekaanisesti toimivissa lämpöpumpuissa kompressiokoneen ansiosta, joka muuttaa paine-erosta johtuvan virtauksen työksi. (Wikstén 2009)

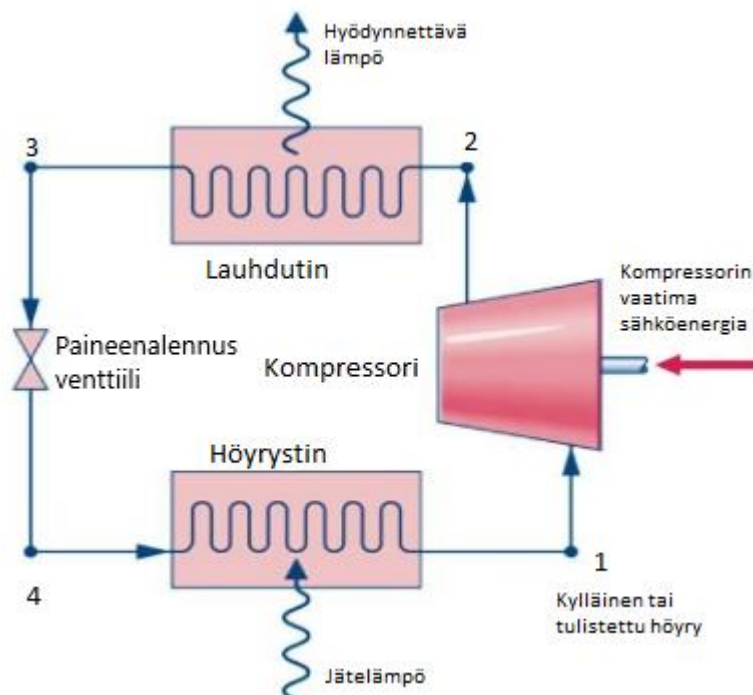
3.2 Suljetun kierron järjestelmät

Suljetun kierron lämpöpumput käyttävät erillistä työainetta, jonka olomuoto-, paine- ja lämpötilavaihteluiden avulla saadaan siirrettyä lämpöenergiaa kohteesta toiseen. Kierrossa oleva työaine on eristetty muusta prosessista.

3.2.1 Kompressorilämpöpumppu

Mekaanisesti toimivat kompressorilämpöpumput ovat yleisimpiä tällä hetkellä olevista lämpöpumpuista. Kytkenältään ne ovat yksinkertaisempia kuin esimerkiksi absorptiolämpöpumput. Lämpöpumpun tekemä työ on mekaanista työtä, jonka energia saadaan sähkötoimisen moottorin avulla. Ne ovat tyypiltään suljettuja järjestelmiä, joissa kiertoaaine on eristetty muusta prosessista. Tavanomaisesti COP-arvo on 2-7 välillä.

Kuviossa 6 on esitetty kompressorilämpöpumpun toimintaperiaate. Käänteisen lämmönsiirron mahdollistaa kompressori, jolla pakotetaan kierrossa käytettävän kylmäaineen paineen nousu. Se muuttuu tällöin kuumaksi höyryksi, jonka jälkeen vapauttaa lämpönsä ja tiivistyy takaisin nesteeksi lauhduttimessa. Sieltä se ohjataan paisuntaventtiiliin. Paisuntaventtiilin tehtävänä on alentaa painetta ja siirtää lauhtunut neste höyrystimeen, jossa tapahtuu jäähtymistä ja voimakasta kaasuuntumista. Tämän jälkeen kylmäaine kerää itseensä saatavilla olevaa lämpöä ja kierto alkaa uudestaan. (Seppänen 1995, 377; Sabharwall, Wendt & Utgikar 2013)



Kuvio 6 Mekaaninen lämpöpumppuprosessi

Kompressorilämpöpumpulla on neljä pääkomponenttia, jotka kierrättävät työainetta suljetussa kierrossa.

Työaine

Lämpöpumppuprosessissa toimivasta työaineesta käytetään myös termejä kierto- ja kylmäaine. Sen tehtävänä on toimia väliaineena lämmön siirtämisessä. Työaineiden käyttö perustuu niiden kykyyn muuttaa olomuotoa nestemäisen kaasumaisen välillä. Olomuodon muutoksen avulla pystytään sitomaan ja siirtämään suuria lämpökuormia suhteellisen pienellä massavirralla työainetta. Käytettävillä lämpötiloilla ja paineilla on suuri vaikutus aineen ominaisuuksiin. (Kapanen 2017.) Kiertoaineista on kerrottu enemmän kappaleessa 3.3.

Kompressori

Kompressorin tehtävänä on nostaa kiertoaineen painetta, jotta lauhtumislämpötila kasvaisi. Tällöin kiertoaine on kaasumaisessa olomuodossa. Lämpöpumppujen kompressorityyppi valitaan tilanteen mukaan, sillä erilaisilla komprimointilaitteilla on omat etunsa. Esimerkkejä eri tyypeistä ovat ruuvi-, mäntä-, keskipako ja turbokompressorit. Suurimpina tekijöinä kompressorien valintaan vaikuttaa käytetty kylmäaine, siitä johtuva painetaso sekä lämpöpumppulaitteiston koko.

Lauhdutin

Lämpöpumpun lämmönsiirtimenä toimiva lauhdutin luovuttaa lämpöenergian kohteeseen kylmäaineessa tapahtuneen olomuotomuutoksen avulla. Lauhtumisessa kaasu muuttuu kaasusta nesteeksi ja faasimuutoksessa vapautunut lämpö ohjataan lauhduttimen rakenteen avulla hyödynnettäväksi muualle. Lauhduttimen lämpöteho on vastaava kuin kompressorin ja höyrytimen tehojen summa.

Paineenalennusventtili

Venttiilin tehtävä on nimensä mukaisesti alentaa työaineen painetta rajoittamalla virtausta. Tämä johtaa siihen, että paine-ero höyrystimen ja lauhduttimen välillä kasvaa ja saadaan ylläpidettyä prosessikiertoa.

Höyrystin

Höyrystin toimii toisena lämmönsiirtimenä. Siinä työaine sitoo itseensä höyrystimen vastakkaisella puolella olevasta lähteestä lämpöä ja höyrystyy lauhtumista alhaisemmassa lämpötilassa. (Wikstén 2009, 137.)

3.2.2 Sorptiolämpöpumppu

Sorptiolämpöpumpun toiminta perustuu käytettävän työaineen kykyyn luovuttaa ja vastaanottaa lämpöenergiaa, eli hyödynnetään eksotermisiä ja endotermisiä reaktioita. Sorptioprosesseihin perustuvat lämpöpumput voidaan jakaa kahteen tyyppiin, absorptio- ja adsorptiolämpöpumppuihin. Näiden eroavaisuus on siinä, että toisessa järjestelmässä kaasu liukenee nesteeseen ja toisessa kiinteään aineeseen. Kaasun liuetaessa nesteeseen tapahtuu absorptio ja kiinteään aineeseen puolestaan adsorptio. Desorptio tarkoittaa reaktiota, joka tapahtuu kaasun vapautuessa nesteestä tai kiinteästä aineesta.

Sorptiolaitteita käytetään yleisesti jäähdytystarkoituksiin ja ilmastointiin, mutta myös lämpöpumppukäyttöön niillä on houkuttelevia ominaisuuksia. Luotettavuus, korkea lämpötilannostokyky sekä hyvä säädettävyys ovat laitteiston etuja. Vaatimuksena on kuitenkin usein korkeassa lämpötilassa oleva lämmönlähde, jonka vuoksi sorptiojärjestelmän soveltuvuus on rajattua. (Maaskola & Kataikko 2014.)

Tyypillinen COP-arvo on yhdestä kahteen. Hyötysuhde ei laske juurikaan käytettäessä osakuormia ja tehonsäätö tapahtuu portaattomasti muuttamalla prosessiin syötettävää käyttölämmön lämpötehoa.

Työaineen aiheuttama reaktio tuottaa käyttövoiman prosessiin, joten erillistä kompressoria ei yleensä tarvita. Sorptiolämpöpumppujen rakenne on kuitenkin yksilöllinen ja kohteesta riippuvainen. Jossain tapauksissa sorptiojärjestelmässä on

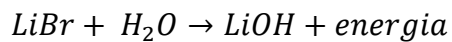
mukana kompressori nostamassa kiertoaineen painetta, mutta se ei ole yhtä merkittävässä roolissa kuin mekaanisesti toimivissa järjestelmissä. Sähköenergian tarve on huomattavasti vähäisempää verrattuna kompressiolämpöpumppuihin.

Useimmiten absorptioprosessissa käytetään litiumbromidin ja veden tai ammoniakin ja veden yhdistelmiä. Adsorptioprosessissa puolestaan yleisimmin on käytössä silikageeli-vesi -työpari. Absorptiojärjestelmissä tapahtuneet kemialliset reaktiot ovat seuraavanlaisia:

Ammoniakki-vesi -työpari:

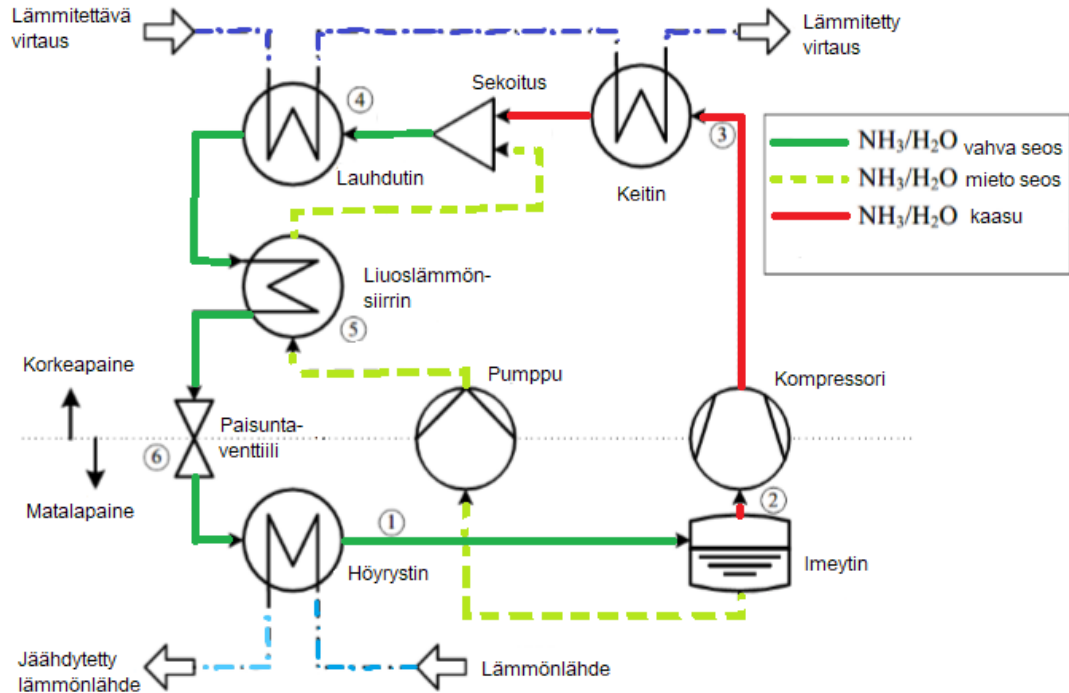


Litiumbromidi-vesi -työpari:



(Bakhtiari 2009; Industrial heat pumps.)

Kuviossa 7 on havainnoitu ammoniakki-vesi -kiertoaineparilla toteutettu absorptiojärjestelmän prosessikuvaus. Esimerkissä on käytetty ammoniakki-vesi -aineparia. Prosessi on monimutkainen ja käytettävien aineiden ominaisuudet ja niiden aiheuttamat ongelmat tulee huomioida tarkasti.



Kuvio 7 Ammoniakki-vesi -työparilla toimivan absorptiolämpöpumpun toimintaperiaate (mukaillen Reinholdt 2017.)

Höyrystimen (1) vastapuolella on prosessiin otettava lämmönlähde, joka määrittää kiertoaikkeen höyrystymislämpötilan ja -paineen. Imeyttimelle (2) virrannut höyrystynyt kylmäaine absorboituu liuottimeen, absorbenttiin. Liukenemisessa ja siinä tapahtuneessa lauhtumisessa tapahtuu energian sitoutumista, jonka takia imeytin tarvitsee jäähdytystä. Tiedettäessä höyrystymispaine, joka on sama kuin imeyttimen paine, saadaan sen ja absorption loppulämpötilan arvon perusteella selvitettyä imeyttimeltä lähtevän liuoksen konsentraatio. Käytännössä kuitenkin liuoksen pitoisuus on alhaisempi poistuttaessa imeyttimeltä, jonka vuoksi se joudutaan pumpaamaan kompressorin avulla korkeampaan paineeseen ennen keitintä (3). Keittimessä kaasumuotoinen kylmäaine vapautetaan, jolloin tapahtuu desorptio.

Keittimeltä lähtenyt kaasu yhdistetään miedompaan, nestemäiseen seokseen, joka on imeyttimeltä tullutta lauhdetta. Lauhduttimessa (4) kylmäaine luovuttaa lämpönsä vastapuolella olevaan virtaukseen. Vahva liuos kulkeutuu lauhduttimelta liuoslämmönsiirtimeen (5), jossa imeyttimeltä tullut lauhdevirtaus ottaa talteen

saatavilla olevan lämpöenergian. Liuos kulkeutuu paisuntaventtiin (6) kautta jälleen höyrystimelle ja jatkaa kiertoa uudelleen. (Koljonen & Sipilä 1998.)

3.3 Kiertoaineet

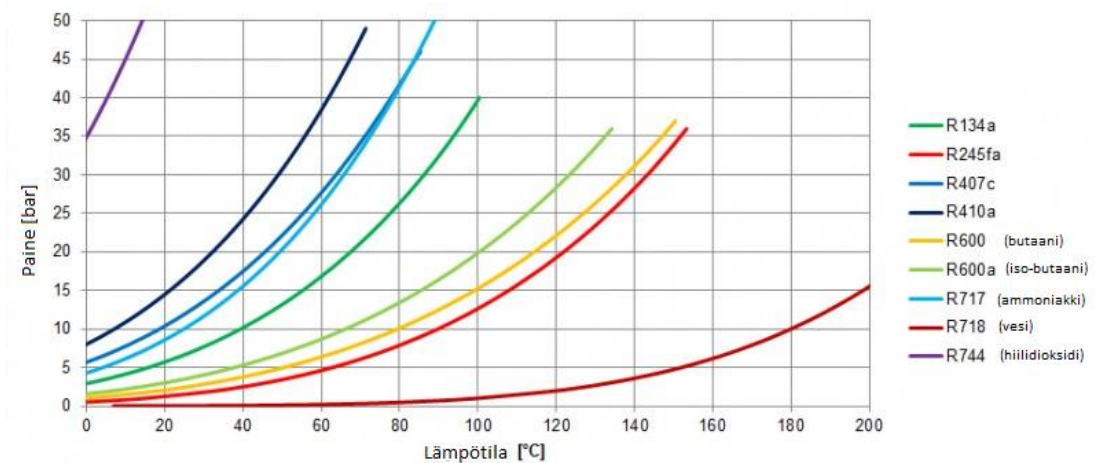
Lämpöpumpussa käytettävät työaineet voidaan jakaa kahteen ryhmään: luonnollisiin kylmäaineisiin (esim. butaani, ammoniakki ja hiilidioksidi) ja synteettisiin kylmäaineisiin (esim. R134A, R407C, R410A). Useimmat synteettiset kylmäaineet ovat voimakkaita kasvihuonekaasuja, joiden vaikutus kasvihuoneilmiöön vuotojen ilmaantuessa voi olla 3000-kertainen verrattuna hiilidioksidin vaikutuksiin. Aineisiin on usein merkitty GWP-arvo (Global Warming Potential), joka kertoo sen vaikutuksesta ilmaston lämpenemiseen 100 vuoden aikana suhteessa hiilidioksidiin. Myrkyllisyyden ja ilmastohaittojen johdosta EU on tiukentanut lainsäädäntöä kylmäaineiden kohdalla, jolloin hinnat ovat nousseet ja saatavuuksia on alettu säännöstelemään. Uusia aineita pyritään kehittämään jatkuvasti. (Kapanen 2017.)

Sorptioprosesseissa käytettävät kiertoaineet valitaan aina pareittain ja valintaan vaikuttaa niiden keskinäisten reaktioiden sopivuus järjestelmän toimintaan nähden.

Kylmäaineen valinta määräytyy muun muassa prosessin kokoluokan ja käyttölämpötilojen mukaan. Vaadittuja ominaisuuksia kiertoaineille ovat:

- Sopiva painetaso
- Termodynaamiset ominaisuudet
- Fysikaaliset ominaisuudet
- Kemialliset ominaisuudet
- Myrkyttömyys
- Palamattomuus
- Käyttäytyminen öljyjen kanssa
- Ympäristövaikutukset

Valitun työaineen painetaso määrittelee myös merkittävästi lämpöpumppulaitteiston komponenttien valintoja. Kuviossa 8 on nähtävillä eri kiertoaineiden paineen suuruuksia suhteessa lämpötilaan. Korkeat paineet lisäävät haasteita komponenttien suunnittelussa ja kestävyiden varmentamisessa.



Kuvio 8 Eri kylmäaineiden paineen muutos lämpötilan kasvaessa (Industrialheatpumps.nl.)

Kylmäaineet merkitään koodeilla, jotka alkavat kirjaimella R (refrigerant). Koodit on luokiteltu sarjoihin, joista pystyy päättelemään kylmäaineen koostumusta (Darment.)

Sarja	Kuvaus
R000	Kemialliset yhdisteet, metaanipohjaiset.
R100	Kemialliset yhdisteet, etaanipohjaiset.
R200	Kemialliset yhdisteet, propanipohjaiset.
R300	Sykliset orgaaniset yhdisteet.
R400	Tseostrooppiset yhdisteet. Niissä ei ole haihtumispistettä, vaan haihtumisalue. Kylmäaineiden lämpötilassa tapahtuu muutoksia höyrystymisen ja lauhtumisen aikana.
R500	Atseotrooppiset yhdisteitä, joiden höyrystyminen ja lauhtuminen tapahtuu vakio­lämpötilassa.
R600	Orgaaniset yhdisteet.
R700	Epäorgaaniset yhdisteet.
R1000	Tyydyttymättömät orgaaniset yhdisteet.

Kuvio 9 Kylmäaineiden tunnuksista saadaan selville yhdisteiden koostumuksia (Darment.)

Pääsääntöisesti käytössä olevat kylmäaineet ovat hiilivetyjä ja ne jaetaan niiden halogeenimolekyylien perusteella seuraaviin ryhmiin:

CFC-kylmäaineet	Täysin halogenoituja hiilivetyjä, jotka sisältävät klooria, fluoria ja hiiltä, muttei lainkaan vetyä (eng. Chloro-Fluoro-Carbon). Suuren otsoni- ja merkittävän kasvihuonehaitallisuuden omaavia kylmäaineita.
HCFC-kylmäaineet	Osittain halogenoituja hiilivetyjä, jotka sisältävät klooria, fluoria, hiiltä ja vetyä (eng. Hydro-Chloro-Fluoro-Carbon). Pienen otsoni- ja merkittävän kasvihuonehaitallisuuden omaavia kylmäaineita.
HFC-kylmäaineet	Osittain halogenoituja hiilivetyjä, jotka sisältävät fluoria, hiiltä ja vetyä (eng. Hydro-Fluoro- Carbon). Otsonihaitattomia, mutta merkittävän kasvihuonehaitallisuuden omaavia kylmäaineita
PFC-kylmäaineet	Täysin halogenoituja hiilivetyjä, jotka sisältävät ainoastaan fluoria ja hiiltä (eng. Per-Fluoro-Carbon). Otsonihaitattomia, mutta merkittävän kasvihuonehaitallisuuden omaavia kylmäaineita.
HFO-kylmäaineet	Osittain halogenoituja hiilivetyjä, jotka sisältävät fluoria, hiiltä ja vetyä (eng. Hydro-Fluoro- Olefin). Otsonihaitattomia ja alhaisen kasvihuonehaitallisuuden omaavia kylmäaineita

Kuvio 10 Kylmäaineiden ryhmittely (Kapanen 2017.)

EU:n asettaman F-kaasuasetuksen tavoitteena on vähentää fluorattuja kasvihuonekaasuja ja poistaa portaittain joitain nykyisellään laajassa käytössä olevia kylmäaineita niiden haitallisuuden vuoksi. (EUR-Lex 2014.) F-kaasuiksi luokitellaan HFC- ja PFC-yhdisteet sekä rikkiheksafluoridit ja typpitrifluoridit. Ongelmia on kehittää -40 - +20 asteessa höyrystyviä kylmäaineita, jotka eivät ole myrkyllisiä, vaarallisia, helposti syttyviä tai korrodoivia. Lisäksi niiden tulisi olla valmistettavissa teollisessa mittakaavassa kohtuukustannuksilla.

Luonnonmukaisia kylmäaineita (natural refrigerants) ovat mm. puhtaat hiilivedyt, ammoniakki ja hiilidioksidi. Niiden vaikutus kasvihuoneilmiön lisääntymiselle on mitätön eivätkä ne ole haitallisia ilmakehän otsonikerrokselle. Niiden käyttö luo kuitenkin omat haasteensa järjestelmille. (Kapanen 2017.)

Ammoniakkikäyttöisiä lämpöpumpputjärjestelmiä on teollisuudessa jonkin verran ja niiden tehokkuus on erittäin korkealla tasolla (Industrial heat pumps.) Ammoniakin käyttöön liittyy kuitenkin riskitekijöitä, koska se aiheuttaa vaaraa ihmisille ja ympäristölle vuotojen ilmaantuessa. Lisäksi sen korkeat painetasot luovat haasteita laitteistoille (Ammoniakin turvallisuusohjeet.)

3.4 Avoimen kierron järjestelmät

Avoimilla piireillä toimivat lämpöpumput eivät tarvitse erillistä kiertoainetta. Kytkenät ovat usein huomattavasti yksinkertaisempia verrattuna suljettuihin lämpöpumpputjärjestelmiin, joten myös investointikustannukset ovat edullisempia. Avoimella piirillä toimivat lämpöpumput ovat kuitenkin jokseenkin harvinaisia ja vähäisesti hyödynnettyjä. Työaineena käytetään prosessin omia virtauksia ja työaineena toimii useimmiten vesihöyry. (Maaskola & Kataikko 2014.)

3.4.1 Mekaaninen höyryn komprimointilämpöpumppu

Mekaanisessa komprimoinnissa (mechanical vapour recompression – MVR) kaasufaasissa olevan virtauksen painetasoa muutetaan, jolloin prosessin virtauksen energiataso muuttuu. Paineen nousu toteutetaan puristamalla höyryä kokoon mekaanisesti, jonka jälkeen se johdetaan lämmönsiirtimeen. Siellä höyry lauhtuu höyrystäen samalla siirtimen toisella puolella olevan prosessiaineen. Kuten avoimen piirin järjestelmissä yleisestikin, on tärkeää, että virtaukset ovat puhtaita lämmönsiirtimien mahdollisimman tehokkaan toimimisen varmistamiseksi.

Mekaanista höyryn komprimointia on tyypillisesti hyödynnetty osana höyrystinprosessia. Normaaliajossa on mahdollista saada höyrystimen vaatima energia kokonaan mekaanisesti toimivan kompressorin tekemästä työstä. Kompressorin voi toimia sähkö-, höyry- tai kaasumootorilla. COP on yleensä 3-30 väliltä ja yksivaiheisella komprimointilämpöpumpulla voidaan saada jopa 40 lämpötilasteen nousu.

3.4.2 Termokompressorilämpöpumppu

Termokompressoinnissa höyryvirtauksen paine ja lämpötila saadaan nousemaan dynaamisesti sekoittamalla ejektorissa korkeampipaineista höyryä joukkoon. Höyryejektori jää hyötysuhteeltaan noin kolmasosaan mekaanisesta kompressorista, mutta edullisuus ja käyttövarmuus tekevät siitä järkevän valinnan erityisesti metsäteollisuuden parissa. Termokomprimoinnin sovellutukset sopivat yleensä kohteisiin, joissa on käytössä edullista, matalapaineista ja kyläistä höyryä. COP vaihtelee 1,5-5 välillä (Maaskola & Kataikko 2014.)

3.5 Tehokkuuslaskenta

Lämpöpumppuprosessin tehokkuuden laskennassa käytetään lämpökerrointa eli tehokerrointa, josta käytetään lyhennettä COP (Coefficient of Performance). COP kertoo, kuinka monin kertaisena otettu sähköenergia tuottaa lämpöenergiaa. Vertailuna voi miettiä suoraa sähkölämmitystä, joka muuttaa kaiken ottamansa sähköenergian lämpöenergiaksi. Tällöin arvo on siis yksi. Kuten lämpökertoimen laskemiseen käytettävistä kaavoista voidaan johdatella, on COP-arvo yleisesti sen parempi, mitä pienempi lämpötilanosto kohdevirtaukseen tarvitaan. Kymmenen asteen vähäisempi lämpötilanosto saattaa parantaa COP-luvun arvoa yhdellä (Porkka 2019.)

Mekaanisissa kompressorilämpöpumpuissa lämpökerroin on käytännössä lauhduttimen luovuttaman lämpövirran ja kompressorin ottaman tehon suhde. COP:n laskennassa ei huomioida lämpöpumpun ottamaa lämpöenergiaa Q_{in} , koska sen oletetaan olevan hukkalämpöenergiaa, joka muutoin menisi hyödyntämättömänä ulkoilmaan tai luonnonvesiin. Huomioitava on myös se, että kaikissa COP:n laskentakaavoissa ei huomioida apulaitteiden vaatimaa energiaa (puhaltimet, pumput jne.). Tämän vuoksi on tärkeää selvittää, millä laskentatavalla COP-arvo on laskettu.

Lämpökertoimen laskentaan käytetään yhtälöä:

$$COP = \frac{Q_{out}}{W_{in}} \quad (4)$$

Jossa

$$COP = \text{lämpökerroin}$$

$$Q_{out} = \text{Lämpöpumpun luovuttama lämpöenergia, kJ}$$

$$W_{in} = \text{Lämpöpumpun tarvitsema työ, kW}$$

Jos lämpöpumpppu-prosessi olisi täysin palautuva, kompressorin tarvitsema teho voitaisiin laskea suoraan lauhduttimessa ja höyrystimessä olevista lämpötiloista. Lauhduttimessa ja höyrystimessä vallitsevien lämpötilojen avulla laskettu COP-arvo antaa ideaalisen tehokertoimen:

$$COP_{ideal} = \frac{T_L}{T_L - T_H} \quad (5)$$

Jossa

$$COP_{ideal} = \text{Lämpöpumpun ideaalinen lämpökerroin}$$

$$T_L = \text{kylmäaineen lämpötila lauhduttimessa, K}$$

$$T_H = \text{kylmäaineen lämpötila höyrystimessä, K}$$

Lämpötilojen mukaan laskettu COP olisi siis ideaali, täysin suljettu ja kitkaton systeemi. Todellisessa prosessissa tapahtuu aina häviöitä, joten ideaalinen COP-arvo antaa ainoastaan maksimaaliset toimintarajat prosessille. Tästä kaavasta voidaan kuitenkin myös havainnoida, että COP-arvo nousee höyrystimen ja lauhduttimen lämpötilaeron pienentyessä. Sama pätee myös todellisessa prosessissa. (Seppänen 1995, 278.)

Eri lämpötiloissa toimivien lämpöpumpppujen toimintaa ei voida vertailla keskenään COP-arvon perusteella. Tämän vuoksi käytetään Carnot'n hyötysuhdetta η_C , joka

vertailee COP-arvon ja ideaalisen COP-arvon välistä suhdetta. Se on vertailukelpoisempi vertailtaessa eri lämpötiloissa toimivia pumppuja. Carnot'n hyötysuhde saadaan laskettua seuraavalla kaavalla:

$$\eta_c = \frac{COP}{COP_{ideal}} \quad (6)$$

COP-luku tai Carnot'n hyötysuhde ei kuitenkaan kerro koko totuutta lämpöpumpun tehokkuudesta. Jos lämpöpumpun ottama lämpöenergia saadaan hukkalämmöstä, joka tulisi jäähdyttää ennen ohjaamista esimerkiksi luonnonvesiin tai ulkoilmaan, olisi todellinen tehokerroin tällöin korkeampi.

Käytettäessä lämpöpumppua ensisijaisesti jäähdytystarkoitukseen, lasketaan sen antama jäähdytysteho sisään otettavan lämpöenergian avulla (Hakala & Kaappola 2007.) Lämpöpumpulla saatavaa jäähdytystehoa kutsutaan kylmäkertoimeksi EER (Energy Efficiency Ratio) ja sen laskemiseksi käytetään seuraavanlaista kaavaa:

$$EER = \frac{Q_{in}}{W_{in}} \quad (7)$$

Jossa

$$EER = \text{Lämpöpumpun kylmäkerroin}$$

$$Q_{in} = \text{Lämpöpumpun ottama lämpöenergia, kJ}$$

$$W_{in} = \text{Lämpöpumpun tarvitsema työ, kW}$$

Jos lämpöpumppua käytetään sekä jäähdytys- että lämmitystarkoitukseen, voidaan COP-luvun laskennassa huomioida otetun sekä luovutetun lämpöenergian määrä. Tällöin COP-luvun arvo lähes kaksinkertaistuu.

$$COP_{overall} = \frac{Q_{in} + Q_{out}}{W_{in}} \quad (8)$$

Jossa

$$COP_{overall} = \text{Lämpöpumpun lämpökerroin}$$

$$Q_{in} = \text{Lämpöpumpun ottama lämpöenergia, kJ}$$

$$Q_{out} = \text{Lämpöpumpun luovuttama lämpöenergia, kJ}$$

$$W_{in} = \text{Lämpöpumpun tarvitsema työ, kW}$$

3.6 Vaikutukset sähköverkkoon

Lämpöpumput tarvitsevat toimiakseen sähköenergiaa pumppauksen ja/tai kompressoinnin toteuttamiseksi. Vaikka lämpöpumpun toiminta saattaa alentaa kokonaisenergiantarvetta, lisääntyy sähkönkulutus usein paikallisesti huomattavasti. Lisäksi lämpöpumpun tarvitsema käynnistysvirta on moninkertainen verrattuna käytön aikaiseen sähköntarpeeseen, joten järjestelmän käynnistäminen saattaa aiheuttaa merkittäviä kulutuspiikkejä sähköverkossa.

Kansallinen tehoreservijärjestelmä takaa Suomen sähköverkon vakauden kaikissa tilanteissa. Mitä enemmän tehoreserviin saadaan yhdistettyä erilaisia laitoksia ja laitteita, sen luotettavammin sähköverkko pystyy toimittamaan energiaa kuluttajille. Lämpöpumppujen rooli sähkön kysyntäjouston toteuttamisessa on yleisesti helposti järjestettävissä, koska laitteistot ovat tekniikaltaan usein nopeasti käynnistettävissä tai ajettaessa alas. (Känsälä & Hammar 2018.)

Sen lisäksi lämpöpumppujen, varsinkin mekaanisesti toimivien kompressorilämpöpumppujen, sähkönkulutus on huomattavaa. Niiden panos sähkönverkon säädössä olisi tervetullutta, mikäli se on prosessien kannalta järkevästi toteutettavissa. Usein lämpöpumpun käyntiaika on täysin riippuvainen prosessin toiminnasta. Tällöin sähkönkulutusta ei voida määritellä sähköverkon kuormituksen mukaisesti, vaan prosessin tarve ohjaa käyttöä. Mikäli kuitenkin lämpöenergiaa

pystytään varastoimaan esimerkiksi vesitorneihin, pystyttäisiin lämpöpumppujen kulutusta ohjaamaan kysyntäjoustop tarpeiden mukaisesti. Esimerkkinä toimii kappaleessa 5 esitelty kohde 2. Siinä kohteen vesivirtausmäärien vaihtelut sallitaan laajalti, joten lämpöpumppuprosessin ottamaa sähkötehoa voidaan säätää sähköverkon taajuuden tasapainon edesauttamiseksi.

4 Kohde 1 – Kuorimo

Paperikone 6:n pääraaka-aineena käytetään tuoreesta kuusikuitupuusta kuumahierrettyä mekaanista massaa. Jämsänkoskella on käytössä yksi kuorinta- ja haketuslinja. Kuori, jonka osuus kuitupuusta on noin 10%, hyödynnetään polttoaineena voimalaitoksella. Kuorinnan ja haketuksen jälkeen puumassa menee kuumahierteen valmistukseen hiertämölle.

Vaikka ihannetilanteessa kaikki tehtaalle saapuva puutavara pyritään syöttämään suoraan prosessiin, joudutaan osa kuitupuusta välivarastoimaan tuotantolaitoksen puukentille. Varastointi ja Suomen ilmasto aiheuttavat omat haasteensa puuraaka-aineen laadun säilymiselle. Talviolosuhteissa kuitupuun pinta on usein jäässä ja se vaatii sulatuksen ennen kuorintaprosessia. (Propuu n.d.)

Jämsänkoskella sulatukseen käytetään alle neljäkymmentä asteista vettä, jolla saavutetaan puun pinnan tarvittava lämpeneminen ja puhdistuminen vaadittavan kuorimisasteen varmistamiseksi. Lämpö voitaisiin ajaa suoraan myös höyrynä suoraan sulatusrumpuun, mutta tällöin puiden sulaminen voisi olla epätarkkaa ja höyryhäviöiden määrä kohtuuttoman suurta. Lämpimän veden käyttö on kustannustehokkaampaa ja siksi perusteltu ratkaisu. (Virkola 1983, 181.) Sulatus tapahtuu ennen kuorintarumpua syöttökuljettimella (ks. liite 4.)

4.1 Sulatusveden lämmitys

Kuorimolla höyryn suurin kulutuskohde on kuitupuiden sulatukseen käytettävän vesivirran lämmittäminen (ks. liite 4.) Kiertovesialtaasta tuleva vesi on lämpötilaltaan 32°C ja puuraaka-aineen sulatusta varten sen lämpötila nostetaan noin 38°C:een.

Vaadittava lämpötilan nosto tehdään nykyisin voimalaitokselta tulevan matalapainehöyryn avulla ohjaamalla höyry sulatusveteen, jossa se luovuttaa lämpöenergiaansa.

Kuorimolle tulevaa matalapaineista höyryä käytetään vain sulatusveden lämmitykseen sekä kuorimon sisätilojen lämmitykseen. Höyryn maksimivirtaus on 3 kg/s. Liitteestä 5 voidaan havaita kuorimolle tulevan höyryn suuret virtausvaihtelut. Kuorimislinja on käytössä keskimäärin kahdeksan tuntia päivästä, jolloin myös höyryntarve on suurempi. Kuorimon tilojen lämmitys vie noin 0,2 kg/s ja se on käytössä pääasiassa vain kylminä ajanjaksoina.

4.2 Lämpöpumppuratkaisu

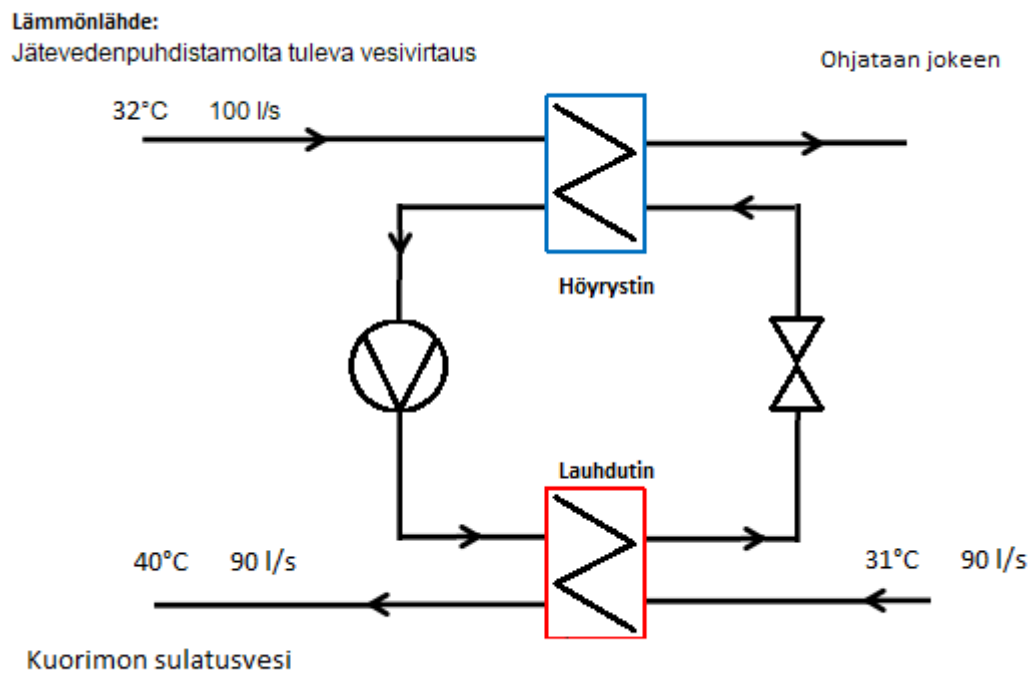
Kuorimolle asennettavan lämpöpumppuratkaisun tavoitteena oli vähentää höyrynkulutusta kohteessa. Ideaalisessa ratkaisussa kuorimolle tulevaa höyrylinjaa ei tarvittaisi jatkossa lainkaan, vaan puiden sulatuksessa sekä kohteen sisätilojen lämmityksessä tarvittava lämpöenergia saataisiin otettua lämpöpumpun avulla hukkaenergiasta. Lisähyötynä saataisiin lämmönlähteenä toimivan virtauksen lämpötilan alentuminen. Lämmönlähde eli lämpöenergiaa luovuttava virtaus oli jätevedenpuhdistamolta luonnonvesiin ohjattava vesivirtaus.

Ongelmaksi muodostui lämmöntarpeen jatkuva vaihtelu prosessin luonteen ja ulkolämpötilan vaihteluiden vuoksi sekä huipunkäyttöajan pieni osuus. Tällöin lämpöpumppu joudutaan mitoittamaan huippukuormituksen mukaan, vaikka suurimman osan ajasta se toimisi huomattavasti alhaisemmalla teholla. Ylimittauksen haittana on korkeammat investointikustannukset sekä mahdollisesti laitteiston elinkaaren lyhentymisen ja hyötysuhteen alentuminen.

Valitussa lämpöpumppuratkaisussa ei luovuttaisi matalapaineisesta höyrylinjasta kuorimolle, vaan se pidettäisiin varalla, kunnes lämpöpumpun kyky tuottaa järkevästi kaikki tarvitsema lämpöenergia pystyttäisiin varmistamaan.

Kuviossa 11 on havainnollistettu suunniteltu lämpöpumppuprosessi sulausvesien lämmitykseen. Lämmönlähteenä toimisi jätevedenpuhdistamolta lähtevä puhdistettu

vesi, joka kulkeutuu nykyisin yli 30°C:n lämpötilassa jokeen. Veden sisältämä lämpöenergia siirrettäisiin suunnitelman mukaan lämpöpumpun avulla sulatusvesiin, jonka seurauksena suora höyrytys voitaisiin lopettaa. Samalla jokeen menevän veden lämpötila saataisiin alennettua huomattavasti nykyistä alhaisemmalle tasolle. Lämmönlähteen virtausmäärä voitaisiin säätää tarvittavalle tasolle, jotta saatu lämpöenergiamäärä olisi riittävä lämpöpumpun toiminnan kannalta.



Kuvio 11 Sulatusvesien lämmityksen lämpöpumpppu prosessi

Lämpöpumpputjärjestelmäksi järkevin valinta olisi mekaanisesti toimiva kompressorilämpöpumppu. Kohteessa ei vaadita suurta paineenkorotusta, mutta lämpötehon vaihtelut ovat suuria. Tämän vuoksi soveltuvin kompressorityyppi olisi turbokompressori, jonka suurimpana etuna muihin kompressorityyppeihin on taloudellinen ja helppo tehonsäätö. Sen ominaispiirteitä on pystyä ylläpitämään hyötysuhde hyvänä, vaikka laitteisto toimisi osatehoilla. Portaattomassa tehonsäädössä hyötysuhde pysyisi vakiona tehoalueella 5...100%. Tehdyssä lämpöpumpputratkaisussa tuotettaisiin 42°C vettä, mutta tarvittaessa päästäisiin jopa 50°C:en asti. Kylmäaineena tämän tyyppiseen laitteistoon soveltuvin vaihtoehto olisi

R513A, joka on ympäristöystävällisempi vaihtoehto kuin lähes samat ominaisuudet omaava R134a.

Arvioitu COP-arvo voidaan olettaa olevan erittäin hyvä, jopa 10. Tähän vaikuttaa pieni tarvittava lämpötilan nosto sulatusvedessä sekä lämmönlähteestä saatavan energiamäärän helppo säädettävyys.

Lämpöpumpun tehoksi riittäisi alle 1MW, jolla pystyttäisiin kattamaan sekä sulatusvesien että kuorimon sisätilojen lämmitysenergiatarve. Turbokompressorin magneettilaakeroinnit mahdollistaisivat öljyttömyyden, joten laitteiston huoltokustannukset olisivat minimaaliset.

Lämpöpumpun koko	850 kW
Kompressorityyppi	Turbokompressori
COP	8 - 10
Kylmäaine	R513a

Yhteistyössä laitetoimittajien kanssa selvitettiin myös arviot lämpöpumpputoimittajien hankinnan kustannuksista sekä sen tuottamista säästöistä. Hinnat pohjautuvat keskiarvohintoihin, joita käsiteltiin eri lämpöpumpputoimittajien kanssa. Arvioiden pohjalla on käytetty hintana sähköenergialle 70€/MWh ja höyrylle 25€/MWh.

Investointikustannus	500 000 €
Vuosittainen säästö	125 000 €
Takaisinmaksuaika	~4 vuotta

Vaikka COP onkin huomattavan suuri, on oletettu takaisinmaksuaika jopa neljä vuotta. Syynä tähän on lämmitystarpeen suuret vaihtelut, jolloin käyttötunnit jäävät vähäisemmiksi.

5 Kohde 2 – Hiertämö

Paperitehtaan hiertämö vastaanottaa kuljettimilla tulevan hakkeen ja valmistaa paperimassan ennen sen ohjaamista paperikoneen perälaatikolle. Yhtenä massanvalmistuksen osana on mekaanisen massan valkaisu peroksidilla, johon vaaditaan käytettävältä vedeltä korkeita lämpötiloja.

5.1 Kohteen kuvaus

Valkaisuprosessissa tarvittavaa kiertovettä varastoidaan kahteen kiertovesitorniin, joista vesivirtausta ohjataan tuotannon vaatimusten mukaisesti prosessiin (ks. liite 6). Tornien yhteenlaskettu tilavuus on 4500 m^3 ja veden tavoitelämpötila on $80\text{--}85^\circ\text{C}$. Kiertovesitorneihin menevää kirkassuodosvirtausta lämmitetään nykyisin matalapaineisen höyryn avulla erillisen kiertopiirin kautta. Kiertopiirin tehtävänä on estää lämmönvaihtimien turha likaantuminen. Kirkassuodos sisältää epäpuhtauksia, jotka aiheuttaisivat lämmönvaihtimen hyötysuhteen alentumista ja lisääntyneitä kunnossapitokustannuksia.

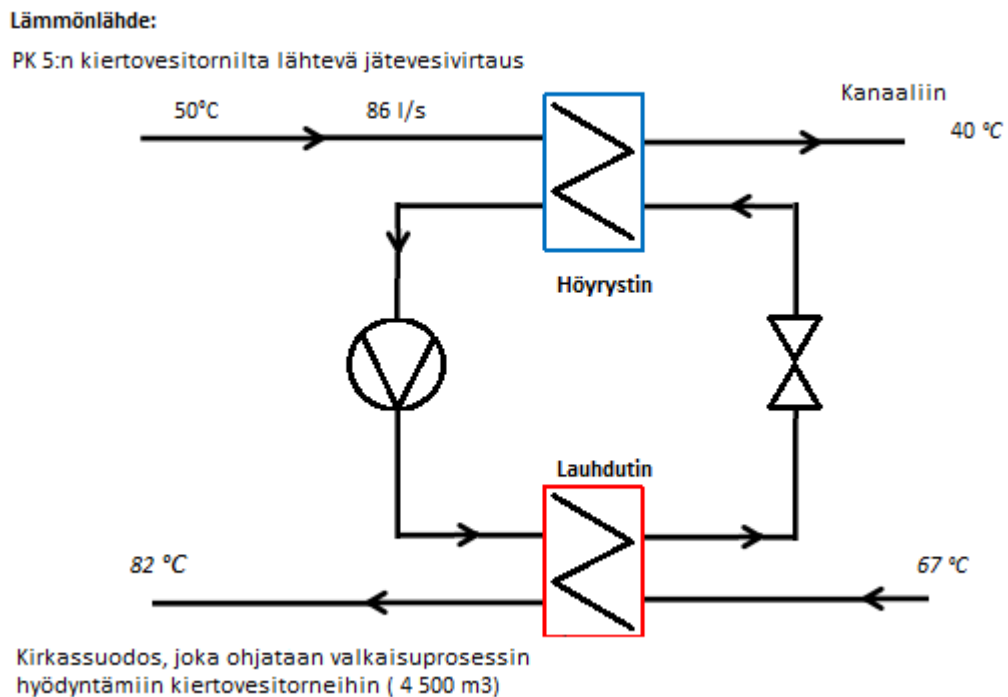
Lämmönlähteenä suunniteltiin käytettäväksi PK5:n kiertovesitornilta lähtevää jätevesivirtausta, jota nykyisellään jäähdytetään ennen kanaaliin ohjaamista erillisillä lämmönvaihtimilla (ks. liite 7.) Virtauksen lämpötila on jopa yli 50°C , joten sen sisältämä lämpöenergiamäärä olisi merkittävän suuri. Lisäksi virtausmäärää pystyttäisiin ohjaamaan tarpeen mukaan.

5.2 Lämpöpumppuratkaisu

Hiertämölle asennettavan lämpöpumppuratkaisun tavoitteena oli vähentää höyrynkulutusta hiertämön alueella, nostaa valkaisuissa käytettävän prosessiveden lämpötilaa ja vastaavasti jäähdyttää jätevesivirtauksen lämpötilaa. Koska valkaisuprosessissa tarvittava vesi varastoidaan torneihin, kohde voisi toimia lämpöpumpun suuren sähkönkäytön takia myös säätövoiman reservinä. Tällöin lämpöpumpun käyttämää sähkönkulutusta voitaisiin ohjata kysyntäjouaston asettamien määritysten mukaisesti. Käytännössä tämä tarkoittaisi sitä, että

lämpöpumpun ottamaa sähkötehoa nostetaan silloin, kun sähköverkon taajuus nousisi yli 50Hz:n. Taajuuden laskiessa alle 50Hz:n, vähennettäisiin sähkönkulutusta säätämällä lämpöpumppu pois käytöstä tai pienentämällä ottotehoa.

Kuviossa 10 on esitetty yksinkertaistettu virtauskaavio suunnitellun lämpöpumppujärjestelmän toiminnasta.



Kuvio 10 Hiertämölle suunnitellun lämpöpumppujärjestelmän esimerkkikaavio.

Tässä kohteessa lämpöpumppujärjestelmän valinnassa on ollut tarve kiinnittää huomiota erityisesti kuumempiin lämpötilatasoihin. Lisäksi lämpöpumpulta vaadittaisiin suurempaa paineennostokykyä lämpötilaerojen ollessa kauempana toisistaan. Soveltuvin lämpöpumppujärjestelmä olisi mekaanisesti toimiva kompressiolämpöpumppu, jonka kompressorina käytettäisiin ruuvikompressoria. Työaineena järkevin vaihtoehto olisi HFO-kaasuihin kuuluva R1234ze, jonka GWP on <10.

Lämpöpumpun tehoksi arvioitiin 2,5MW. Ruuvikompressorit ovat yleisesti helppohuoltoisia suhteellisen yksinkertaisen tekniikkansa ansiosta, vaikkakin vaativat säännöllistä huoltoa öljyvoitelunsa takia. COP:n arvoksi arvioitiin saatavaksi yli 5 ja laitteiston aikaansaama jäähdytyskyky olisi merkittävä. Suunnitelman mukaisesti lämpöpumppulaitteistolla tuotettaisiin 82°C vettä, mutta sillä päästäisiin aina 85°C:en asti. Tehonsäätö tämän tyyppisellä laitteistolla olisi portaaton tehoalueella 25...100 %.

Lämpöpumpun koko	2 500 kW
Arvioitu lämmöntarve	13 000 MWh/vuosi
Kompressorityyppi	Ruuvikompressori
COP	5,5
Kylmäaine	R1234ze

Yhteistyössä laitetoimittajien kanssa selvitettiin myös arviot lämpöpumppujärjestelmän hankinnan kustannuksista sekä sen tuottamista säästöistä. Hinnat pohjautuvat keskiarvohintoihin, joita käsiteltiin eri lämpöpumpputoimittajien kanssa. Arvioiden pohjalla on käytetty hintana sähköenergialle 70€/MWh ja höyrylle 25€/MWh.

Investointikustannus	400 000 €
Vuosittainen säästö	150 000 €
Takaisinmaksuaika	~2-3 vuotta

Lämpöpumppujärjestelmän budjettihintaan vaikuttaa oleellisesti laitteiston koon lisäksi laitteiston tyyppi. Olosuhteiden vuoksi lämpöpumpputekniikka on toteutettavissa melko yksinkertaisella tekniikalla, joten hinta-arvio saatiin suhteelliseen alhaiselle tasolle.

6 Kohde 3 – Kaukolämpö

UPM:n tuotantolaitos Jämsänkoskella myy Jämsän Aluelämpö Oy:lle lämpöenergiaa kaukolämpöveden (kl-veden) lämpötilan nostamiseksi. Kl-vesiputkistoon viety

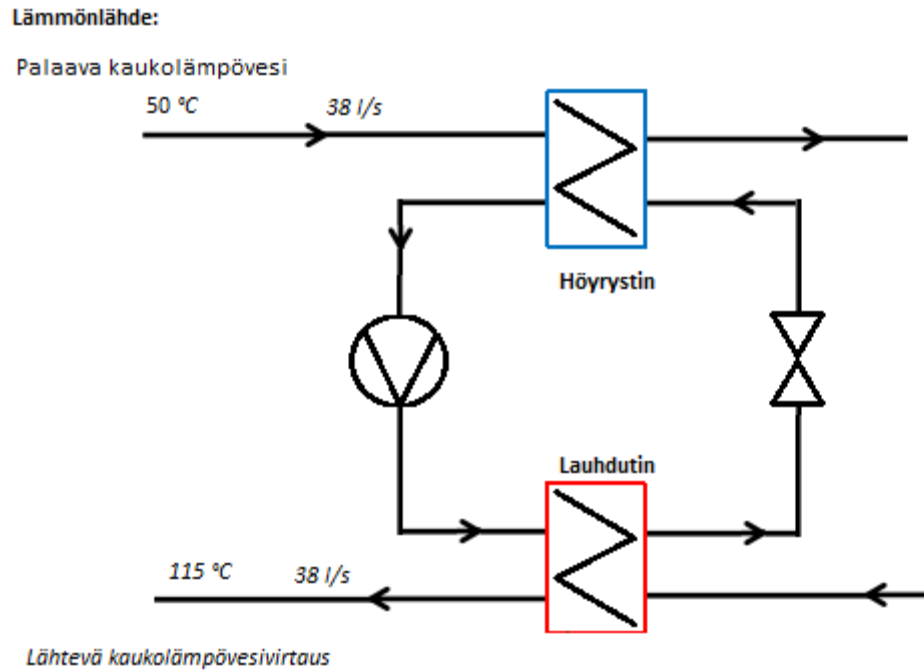
lämpöenergia saadaan nykyisin tehtaan lämmöntalteenottojärjestelmistä sekä matalapaineisesta höyrystä höyrylämmönsiirtimien avulla.

6.1 Kohteen kuvaus

Lähtevän kaukolämpöveden lämpötila ja virtausmäärä tulee pysyä Jämsän Aluelämpö Oy:n asettamissa raja-arvoissa. Lähtevän kl-veden lämpötila on asetettu 115°C:een, jonka stabiiliudesta huolehtii 10MW:n höyrylämmönsiirrin. Ennen höyrylämmönsiirrintä palaavan kl-veden lämpötilaa nostetaan mahdollisuuksien mukaisesti muilla lämmönsiirtimillä, jotka saavat energiansa prosessilämmöistä. Näiden lämmönsiirtimien tehot ovat muuttuvia ja riippuvaisia muiden prosessien toiminnoista.

6.2 Lämpöpumppuratkaisu

Kaukolämmön oheen asennettavan lämpöpumpun tavoitteena oli nostaa kaukolämpöveden lämpötilaa hukkalämmöstä saatavan lämpöenergian avulla sekä pienentää höyrylämmönsiirtimen tekemää työtä. Samalla pystyttäisiin tehostamaan lämmöntalteenottojärjestelmään kytkettyjen lämmönsiirtimien tehokkuutta ja hyödyntää sieltä kautta saatua ylimääräistä lämpöenergiaa entistä paremmin. Yksinkertaistettu virtauskaavio on esitetty kuviossa 11. Ennen lauhdutinta olevan vesivirtauksen lämpötila on riippuvainen prosessin välillä olevien lämmönsiirtimien luovuttamista energiamääristä.



Kuvio 11 Kaukolämpöveden oheen liitetyn lämpöpumppprosessin esimerkkivirtauskaavio.

Suunnitellun lämpöpumppprosessin lämmönlähteenä toimisi palaava kaukolämpövesi, jonka lämpötila on keskimäärin 50°C ja virtaus 38 l/s. Saatava lämpöenergia siirrettäisiin samaan linjaan, 1. vaiheen LTO-siirrin JAVO 2:n ja höyrylämmönsiirrin JAVO 3:n väliin (ks. liite 8). Virtausmäärä pysyy koko linjan matkalta samana, mutta lämpötilataso, mihin lämpöpumpun tuottama energia siirrettäisiin, on riippuvainen kolmen välissä sijaitsevan lämmönsiirtimen tehokkuudesta. Nämä kolme lämmönsiirrintä hyödyntävät talteen saatua hukkalämpöä muualta prosesseista. Ideana olisi alentaa palaavan kl-veden lämpötilaa alhaisemmaksi, jolloin välissä olevien lämmönsiirtimien tehokkuudet kasvaisivat. Koska lähtevän kl-veden lämpötilatason olisi oltava stabiili, huolehtisi matalapaineista höyryä käyttävä lämmönsiirrin JAVO 3 virtauksen lämpötilan nostosta tavoitelämpötilaan asti.

Tähän kohteeseen ei saatu selkeää ratkaisukokonaisuutta, ainoastaan suurpiirteiset arviot tarvittavan lämpöpumpplaitteiston koosta ja mahdollisesti saatavista

hyödyistä. Arvioitiin kuitenkin, että kaukolämpöveden korkeasta lämpötilatasosta ja suurista virtausmääristä johtuen lämpöpumpun teho tulisi olla noin 4MW. Mahdollisesti käytettävä työaine olisi ammoniakki ja laitteistona mäntäkompressorilämpöpumppu. Arvioitu COP-arvo olisi noin 3,5, jolloin se jäisi vääjäämättä alhaisemmaksi kuin tässä työssä aiemmin käsitellyt 1 ja 2. Syitä tähän olisi lämpötilaeron olevan huomattavan suuri ja lämmönlähteestä saatavan lämpöenergian määrän rajallisuus.

Lämpöpumppujen toimittajien kanssa käytyjen selvitysten perusteella kaukolämpöveden lämmityksen oheen liitettävän lämpöpumppujärjestelmän kustannukset nousisivat huomattavasti korkeammalle kuin kahden aiemmin kohteen. Sähköenergian hintana on laskemissa käytetty 70€/MWh ja höyryn hintana 25€/MWh. Järjestelmän kustannusarviot perustuvat laitetoimittajilta saatujen tietojen keskiarvoihin.

Investointikustannus	1 200 000 €
Vuosittainen säästö	200 000 €
Takaisinmaksuaika	~6 vuotta

Korkeisiin investointikustannuksiin vaikuttaisi tarvittavan laitteiston suuri tehontarve ja huomattava lämpötilan nostotarve. Kustannuksia lisäävät myös kuumat olosuhteet, jolloin voiteluaineiden käyttö ja materiaalien kestävyys luovat omat haasteensa käytettävälle tekniikalle.

7 Yhteenveto tuloksista

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksista lämpöpumpputekniikan avulla Jämsänkosken paperitehtaalla. Selvitettiin myös, olisiko se taloudellisesti kannattavaa sekä millainen rooli lämpöpumpuilla olisi sähköverkon kysyntäjoustossa.

Opinnäytetyön tuloksina saatiin budjettilaskelmat valittuihin kolmeen kohteeseen. Kohteessa 1 sulatusvesien ja tilojen lämmittäminen lämpöpumppujen avulla

osoittautui järkeväksi ja realistiseksi. Lämpöpumppulaitteiston COP-arvo saataisiin arvioiden perusteella houkuttelevan korkeaksi, mutta lämmitystarpeen suuret vaihtelut alentaisivat oleellisesti investoinnin kustannustehokkuutta. Kysyntäjouaston tarpeen mukaan laitteiston käyttö ei olisi mahdollista. Myös jäähdytyskyky jää vähäiseksi, koska prosessi toimisi lähinnä viileinä ajanjaksoina. Suorahöyrytyksen käytön poisto kokonaan kuorimolta olisi mahdollinen ja siitä saatavat hyödyt olisi hyvä kartoittaa erillisessä tutkimuksessa. Suunniteltu ratkaisu olisi yksinkertainen ja suhteellisen helposti toteuttavissa jo pelkästään tämän esiselvityksen tietojen pohjalta. Virtausmäärien helppo säädettävyys, pieni lämpötilannosto ja alhaiset lämpötilatasot olisivat lämpöpumpulla vaivattomasti toteutettavissa.

Kohteesta 2 saatavat hyödyt olisivat kaikista selkeimpiä ja tarkastelun kohteena olleista tutkimuskohteista kaikista kustannustehokkain. Kohtuullinen lämpötilannosto ja säädettävissä olevat virtausmäärät helpottaisivat lämpöpumppulaitteistolle asetettuja vaatimuksia. Jatkuvasti toiminnassa oleva prosessi antaisi myös jäähdytyksestä saatavaa hyötyä jätevesivirran viilennykseen. Tässä kohteessa olisi mahdollisuus liittää järjestelmä osaksi säätösähköreserviä, mutta tutkimustyössä perusteellisempi tarkastelu liittämisen hyödyistä jäi suppeaksi. Tähän vaikutti ajankäytön rajalliset resurssit ja epävarmuus arvioidessa lämmönsiirtoprosessin todellisista säätömahdollisuuksista. Lisäksi saatavat hyödyt olisivat riippuvaisia sähköverkkoyhtiö Fingridistä, joten asia tulisi selvittää yhteistyössä heidän kanssaan.

Kolmannessa kohteessa lämpötilatasot olivat jo huomattavasti korkeammat. Lämpöpumpputekniikalle tämä ei kuitenkaan olisi ollut ongelma, vaan hyötysuhde oltaisiin saatu pidettyä kohtuullisen hyvällä tasolla tarkasti mietityn lämpöpumppuvalinnan ansiosta. Suunniteltu lämmönsiirtoprosessi olisi vaikuttanut muiden laitteistojen toimintaan oleellisesti, joten saatujen hyötyjen laskeminen osoittautui mahdottomaksi annettujen resurssien rajoissa. Lisäksi mahdollisuutena voisi olla kaukolämpöveden lämpötilatason laskeminen, joten kaukolämpöveden lämmityksen toteuttaminen UPM:n tehtaalla tulisi kartoittaa kokonaan uudestaan ja vertailla järkevimät toimenpiteet ennen lämpöpumppujärjestelmän hankintaselvityksiä. Tarkempia lämpöpumppuratkaisuja ei haluttu tuoda sellaisenaan

esille, koska tiedot olisivat saattaneet antaa vääristyneen kuvan lämpöpumpun mahdollisuuksista kohteessa.

Työn aikana tehtyjen selvitysten perusteella kaikissa kolmessa käsitellyssä kohteessa lämpöpumppujen investointi tuottaisi kuitenkin lisäarvoa tuotantolaitokselle. Kaukolämpöveden lämmittämisen yhteyteen suunniteltu lämpöpumppujärjestelmä jäi näistä kolmesta kohteesta epävarmimmaksi ja sen huolellisempi tarkastelu olisi syytä ottaa käsittelyyn uudelleen.

Saatujen tulosten perusteella toimeksiantajan kannattaisi harkita kohteiden 1 ja 2 investointien viemistä eteenpäin. Hyödyt ovat selkeästi havaittavissa ja vastaavantyyppisiä hukkalämmön hyödyntämiskohteita olisi muuallakin, joihin voisi hyödyntää näistä kohteista saatuja selvitystietoja.

8 Pohdinta ja johtopäätökset

Esiselvityksen myötä saadut laskelmat energiankulutuksen vähentymisestä ja takaisinmaksuaikojen kohtuullisuuksista ovat herättäneet mielenkiintoa lisätä suunniteltuja kohteita sekä viedä investointisuunnitelmia eteenpäin.

Tutkimustyön aihe oli laaja, kuten ennen työn aloittamista oltiin epäiltykin. Suunnitteluvaiheessa tehty tarkempi rajausta osoittautui selkeäksi ja mahdollisti työn tekemisen huolellisesti annettujen resurssien puitteissa. Investointisuunnitelmiin ei pureuduttu syväälle, vaan tavoitteena oli kartoittaa pääpiirteet lämpöpumppujen hankinnoista ja niiden potentiaali todellisia investointiselvityksiä varten.

Työn tulosten selvittämiseksi yhteistyö lämpöpumpputoimittajien kanssa oli ensisijaisen tärkeää. Heidän mielenkiintonsa tutkimustyötä kohtaan oli positiivista ja antoi paljon tietoa, mitä ei ollut saatavilla muista tietolähteistä.

8.1 Luotettavuuden arviointi

Tietoperustan lähdeaineistona on käytetty paljon eri toimijoiden selvitysraportteja. Teollisuuden lämpöpumppuratkaisut ovat suhteellisen uusi alue, joten kirjallisuutta tai

täysin puolueettomia tutkimuksia on niukasti saatavilla. Tämä johti siihen, että työssäni olen joutunut olemaan lähdekriittinen ja tarkastelemaan aineistojen reliabiliteettia tarkasti. Suuren kokoluokan lämpöpumppuratkaisuista ei ole juurikaan julkisessa jaossa tarkempia selvityksiä teknisistä ominaisuuksista, kytkentätavoista ja käytetyistä työaineista. Opinnäytetyötäni varten saadut tiedot pohjautuvat tämän osalta haastatteluista saatuihin tietoihin.

Työssäni käytettyjen mittausten ja prosessisuureiden oikeellisuus ovat luotettavalla tasolla. Aineisto on kerätty toistetusti ja monesta eri lähteestä. Mittaustavoista tai antureiden toiminnasta johtuneet mittavirheet ovat mahdollisia, mutta virhemarginaali on hyvin pieni. Lämpöpumpun optimaaliseen toimintaan ei vaikuta lyhytaikaiset poikkeamat mittaustuloksissa. Tuloksissa on käytetty sähkön hintana 70€/MWh, joka on jokseenkin korkeampi hinta-arvio kuin tuotantolaitoksen keskimäärin ostama sähköenergian hinta todellisuudessa. Investointeja varten tehtävissä suunnitelmissa hinta-arvio tulisi huomioida tarkemmin ja tarkastella sähkön markkinahintaa laajemmin.

Kustannuksien kokonaismäärään vaikuttaa merkittävästi lämpöpumppujärjestelmän asentaminen ja kunnossapito. Arvioidut kustannukset näiden osuksista ovat pohjautuneet laitetoimittajien antamiin esimerkkiarvoihin. Tarkempaa tiedonkeruuta asennukseen vaadittavista toimenpiteistä ja kunnossapidon toteuttamisesta ei ole tämän opinnäytetyön puitteissa tehty rajallisen ajan takia. Tästä syystä takaisinmaksuajan arviot eivät ole täysin luotettavia, ainoastaan suuntaa antavia. Työssä käytetyt kustannusarviot perustuvat valittujen laitetoimittajien antamiin hintatietoihin.

8.2 Jatkotoimenpiteet ja kehitysehdotukset

Jatkotoimenpiteenä olisi hyvä tehdä tarkka toimintasuunnitelma lämpöpumppujen hankinnoista, asennuksista, käytön optimoinnista sekä kunnossapidosta. Työssä olleita kohteita voitaisiin käyttää esimerkkeinä kartoittaessa muita mahdollisia lämpöpumpuille soveltuvia sijoituskohteita, joista saataisiin energiansäästöhyötyä.

Kohteissa 1 ja 2 saadut ratkaisut toimisivat hyvänä pohjana suunnitella tarkemmat investointiesitykset lämpöpumppujen hankintoihin. Esiselvityksen ratkaisussa mukana toiminut laitetoimittaja olisi vartenotettava yhteistyökumppani. Kysyntäjoustopuutteen lisäämisessä tulisi olla yhteydessä sähköverkkoyhtiö Fingridiin ja tehdä tarkempi selvitys kohteen 2 lämpöpumppujärjestelmän liittämistä säätövoimareserviin.

Työn laskelmien perusteella lämpöpumput vähentäisivät höyrynkulutusta merkittävästi. Koska Jämsänkosken biovoimalaitosta ei ole järkevää ajaa nykyistä pienemmällä kuormalla, tulisi höyrynkulutuksen vähentyessä miettiä uusia ratkaisuja voimalaitoksen toimintaan. Yhtenä vaihtoehtona olisi lisätä sähköntuotannon osuutta voimalaitoksen kapasiteetista. Tällöin tuotantolaitoksen ostosähkön määrää voitaisiin vähentää ja parantaa omavaraisuutta, sillä nykyisellään tuotantolaitos pystyy tuottamaan vain osan omasta sähköenergiastaan. Selvitys ORC-tekniikan mahdollisuuksia olisi mielestäni hyödyllistä, koska saatavilla on edullisia biopolttoainelajeja. Lisäksi ORC-laitoksiin voidaan saada energia- tai syöttötariffitukea, joka voisi lisätä UPM:n halukkuutta investointien toteuttamiseen.

9 Lähteet

Ammoniakin turvallisuusohjeet. N.d. Gea Refrigeration Technologies. Viitattu 16.1.2019.

https://www.gea.com/docnav/Product%20Documents/Grasso%20Piston%20Compressor%20V/0089298fin_si_km_nh3_fin.pdf

Arpagaus, C., Bless, F., Schiffmann, J & Bertsch, S. 2017. syksyllä 2017 Nürnbergissä pidetyn Euroopan lämpöpumppukokouksen yhteenvetoraportti. Viitattu 14.2.2019.

Saatavilla osoitteessa

https://www.ntb.ch/fileadmin/NTB_Institute/IES/bilder/Projekte_TES/91_SCCER-EIP/2017-10-24_11-

[45Uhr_Review_on_High_Temperature_Heat_Pumps_Arpagaus.pdf](https://www.ntb.ch/fileadmin/NTB_Institute/IES/bilder/Projekte_TES/91_SCCER-EIP/2017-10-24_11-45Uhr_Review_on_High_Temperature_Heat_Pumps_Arpagaus.pdf)

Bakhtiari, B. 2009. Process Intergration of Absorption Heat Pumps. Montrealin teknillisen yliopiston väitöskirja. Saatavilla osoitteessa:

https://publications.polymtl.ca/200/1/2009_BahadorBakhtiari.pdf

Darment. N.d. Kylmäaineinfo. Kylmäalan tukkuliikkeen tietoartikkelit kylmäaineista Internetsivustolla. Viitattu 16.1.2018. <https://www.darment.fi/kylmaaine-info/>

Demir, H. Ağra, Ö & Atayılmaz, Ö. 2011. Economical analysis of a chemical heat pump system for waste heat recovery. Ruotsalaisanalyysi uusiutuvan energian kongressista. Viitattu 14.1.2019.

http://www.ep.liu.se/ecp/057/vol7/009/ecp57vol7_009.pdf

Energiavuosi 2018. 2019. Energiateollisuuden selviysraportti. Viitattu 28.1.2019.

https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/tilastot/sahkotilastot

EUR-Lex. 2014. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetusjulkaisu N:o 517/2014 fluoratuista kasvihuonekaasuista. Viitattu 14.2.2019. Saatavilla osoitteessa:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:32014R0517>

Fingrid. N.d. Kantaverkkoyhtiö Fingridin Internetsivujen esittelyartikkelit. Viitattu 29.1.2019. <https://www.fingrid.fi/sivut/ytio/esittely/>

Giancoli, D.C., Whatley, K.M., Beck, J.A., Bennhold, C. & Feldman, G. 2005. Physics: principles with applications. 6. painos

Hakala, P. & Kaappola, E. (2007). Kylmälaitoksen suunnittelu. 2. painos, Helsinki: Opetushallitus.

Heikkilä, T. 2014. Tilastollinen tutkimus. Edita Publishing Oy.

Industrial heat pumps. N.d. Hollantilaisen energiakonsultointiyrityksen De Kleinin tuote-esittely Internetsivuilta. Viitattu 16.1.2019.

http://industrialheatpumps.nl/en/how_it_works/refrigerants/

Jokilaakson ympäristö- ja yhteiskuntavastuu 2017. 2018. UPM:n sellu- ja paperitehtaiden ympäristöselonteon 2017 tehdasliite. UPM:n sisäinen verkon esittelymateriaali.

Jämsänkosken voimalaitos. 2017. Esittelymateriaali voimalaitoksesta. UPM:n sisäinen verkkomateriaali. Viitattu 31.1.2019.

Kananen, J. 2017. Kehittämistutkimus interventiotutkimuksen muotona: opas oppinäytetyön ja pro gradun kirjoittajalle. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kauppinen, J. 2018. Turbiinitekniikka. Käyttö, huolto ja kunnossapito. 1. painos, Tampere: Tammertekniikka.

Kapanen, M. 2017. Kylmäainetilanne. Suomen kylmäyhdistys ry:n kylmäaineselvitys. Viitattu 1.2.2019. Saatavilla osoitteessa:

<http://www.skll.fi/yhdistys/www/att.php?type=2&id=175>

Kato, Y. 2011. Possibility of Chemical Heat Pump Technologies. Tokion tekniikkalaitoksen selvitysraportti. Viitattu 14.1.2019. <https://www.arpa-e.energy.gov/sites/default/files/documents/files/Kato.pdf>

Koljonen, T. & Sipilä, K. 1998. Uudemman absorptiojäähdytstekniikan soveltaminen kaukojäähdytyksessä. VTT energian julkaisu. Saatavilla osoitteessa:

<https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1998/T1926.pdf>

Kuittinen, M. 2018. Sähkön markkinakatsaus. Lännen Omavoiman ajankohtaisartikkeli. Viitattu 5.3.2019. Saatavilla osoitteessa:

<https://omaavoimaa.fi/markkinakatsaus/sahkon-markkinahinta-on-pysynyt-ylhaalla-mutta-riittaako-sahkoa-suomeen-talvipakkasilla>

Kuusisto, M. 2014. Energiatehokkaan suunnittelun esimerkkejä teollisuuskohteissa. Pöyryn suunnittelupalvelun tutkimusraportti. Saatavilla osoitteessa:

https://www.lut.fi/documents/10633/333534/Kuusisto_Energiatehokas+suunnittelu_P%C3%B6yry.pdf/bcbfd417-6b42-4e95-b2ca-4beea0cf3052;jsessionid=6402316892BBDEABAAD7806F7C8936A2.wwwlut2?version=1.0

Känsälä, K. & Hammar, K. 2018. Säättövoimaa tulevaisuuden sähkömarkkinoille. VTT:n tutkimusraportti. Saatavilla osoitteessa:

https://www.vtt.fi/Documents/uutiset/Tulevaisuuden%20s%C3%A4hk%C3%B6markkinat_mediatilaisuus_K%C3%A4ns%C3%A4l%C3%A4.pdf

Laitinen, A., Rämä, M. & Airaksinen, M. 2016. Jäähdytyksen teknologiset ratkaisut. VTT:n jäähdytysteknologiaselvitys. Saatavilla osoitteessa:

https://energia.fi/files/1359/Jaahdytysteknologiaselvitys_VTT_221216.pdf

Maaskola, I. & Kataikko, M. 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen. Motivan selvitysraportti. Saatavilla osoitteessa:

https://www.motiva.fi/files/13513/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Lampopumppu- ja_ORC-sovellukset.pdf

Marttila, T., Rask, M. & Savolainen K. 2017. Sähkön kysyntäjousto. Smart Energy Transition 2030 -energiaturrosalueen yhteenvetoraportti. Saatavilla osoitteessa: <http://www.smartenergytransition.fi/tiedostot/murrosareena-polku2-sahkon-kysyntajousto.pdf>

Metsäteollisuus ry. 2019. Tuotannon kehityksen tilastot. Viitattu 18.2.2019. Saatavilla osoitteessa: <https://www.metsateollisuus.fi/tilastot/massa-ja-paperiteollisuus/>

Napari, I & Vehkamäki, H. 2013. Termofysiikan perusteet. Helsingin yliopiston verkkomateriaali. Viitattu 15.1.2019.

http://www.courses.physics.helsinki.fi/fys/termo/termofysiikka2013_hv.pdf

Perälä, R. 2013. Lämpöpumput. Suomalainen käsikirja aikamme lämmitysjärjestelmästä. 3. uud. p. Tallinna: Alfamer/Karisto.

Porkka, A. 2019. Calefa Oy:n myyntipäällikkö. Haastattelu 26.2.2019.

Propuu. N.d. Puualan yhdistyksen PuuProffa -informaationsivusto. Viitattu 5.2.2018.

http://www.puuproffa.fi/PuuProffa_2012/7

Reinholdt, L. 2017. International Workshop on High Temperature Heat Pumps.

Tanskan teknologiainstituution julkaisema selvitysraportti. Saatavilla osoitteessa:

http://orbit.dtu.dk/files/138357883/Collection_of_Presentations_International_Workshop_on_High_Temperature_Heat_Pumps.pdf

Sabharwall, P. Wendt, D. Utgikar, V. 2013. Application of Chemical Heat Pumps for Temperature Amplification in Nuclear Hybrid Energy Systems for Synthetic Transportation Fuel Production, Yhdysvaltalaisen energiaosastolaitoksen INL:n selvitysraportti. Saatavilla osoitteessa:

<https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/5821839.pdf>

Satmon, J. 2017. Chemical heat pump (CHP) simulation, energy and energy analysis.

International journal of new technology and research (IJNTR) -tutkimusraportti.

Saatavilla osoitteessa: https://www.ijntr.org/download_data/IJNTR03010042.pdf

Seppänen, O. 1995. Rakennusten lämmitys. Jyväskylä: Suomen LVI-yhdistysten liitto.

Tilastokeskus. 2018. Teollisuuden energiankäyttö vuonna 2017. SVT:n verkkojulkaisu. Saatavilla osoitteessa: https://www.stat.fi/til/tene/2017/tene_2017_2018-11-19_tau_002_fi.html

UPM. 2019. Pörssitiedote vuodesta 2018. UPM-Kymmene Oyj:n tilinpäätösjulkaisu yrityksen Internetsivuilla. Viitattu 18.2.2019. Saatavilla osoitteessa: <https://www.upm.com/fi/tietoa-meista/medialle/tiedotteet/2019/01/upmn-tilinpaatostiedote-2018-upm-teki-ennatystuloksen-2018-hyvät-lahtokohdat-vuodelle-2019/>

UPM:n vuosikertomus 2017. 2018. Yrityksen liiketoiminnan vuosikatsaus. Saatavilla osoitteessa: https://www.upm.com/siteassets/asset/investors/2017/upm_vuosikertomus_2017.pdf? t_id=1B2M2Y8AsgTpgAmY7PhCfg%3d%3d& t_g=vuosikertomus& t_tags=lang_uage:fi%2csiteid:6e31604e-3028-4557-87b4-50166b7ce536& t_ip=193.24.70.133& t_hit.id=Solita_Epi_Web_Business_ContentTypes_Files_GenericFile/ e362dd07-f353-44aa-a9e9-bdbb1bbd8aba& t_hit.pos=5

Virkola, N-E. 1983. Puumassan valmistus. Suomen paperi-insinöörien yhdistyksen oppi- ja käsikirja 2, osa 1. 2. uudistettu painos. Turku: Serioffset.

Wikstén, R. 2009. Lämpövoimaproessit. Lämpötekniikan oppikirja. 4. painos. Helsinki: Otatieto.

10 Liitteet

Toimiala	Polttoaineet, TJ	Sähkö (netto), TJ	Lämpö (netto) TJ	Yhteensä, TJ
05 Kivihiilen ja ruskohiilen kaivu	-	-	-	-
06 Raakaöljyn ja maakaasun tuotanto	-	-	-	-
07 Metallimalmien louhinta	400	4 285	149	4 834
08–09 Muu kaivostoiminta ja louhinta sekä kaivostoimintaa palveleva toiminta	991	901	21	1 913
10 Elintarvikkeiden valmistus	4 039	6 072	4 849	14 960
11 Juomien valmistus	188	566	931	1 685
12 Tupakkatuotteiden valmistus	-	-	-	-
13 Tekstiilien valmistus	172	277	139	587
14 Vaatteiden valmistus	47	70	22	138
15 Nahan ja nahkatuotteiden valmistus	33	45	18	96
16 Sahatavaran sekä puu- ja korkkituotteiden valmistus (pl. huonekalut); olki- ja punontatuotteiden valmistus	9 437	5 541	9 290	24 268
17 Paperin, paperi- ja kartonkituotteiden valmistus	228 141	38 637	11 548	278 325
18 Painaminen ja tallenteiden jäljentäminen	136	747	271	1 154
19 Koksen ja jalostettujen öljytuotteiden valmistus	33 709	4 450	5 453	43 611
20 Kemikaalien ja kemiallisten tuotteiden valmistus	16 708	15 171	9 052	40 931
21 Lääkeaineiden ja lääkkeiden valmistus	22	341	354	717
22 Kumi- ja muovituotteiden valmistus	738	3 098	1 001	4 837
23 Muiden ei-metallisten mineraalituotteiden valmistus	9 948	2 906	547	13 402
24 Metallien jalostus	46 833	19 245	4 394	70 472
25 Metallituotteiden valmistus (pl. koneet ja laitteet)	823	3 654	1 232	5 708
26 Tietokoneiden sekä elektronisten ja optisten tuotteiden valmistus	27	971	365	1 364
27 Sähkölaitteiden valmistus	65	1 128	509	1 702
28 Muiden koneiden ja laitteiden valmistus	698	1 865	1 076	3 638
29 Moottoriajoneuvojen, perävaunujen ja puoliperävaunujen valmistus	234	470	407	1 112
30 Muiden kulkuneuvojen valmistus	250	668	531	1 450
31 Huonekalujen valmistus	182	225	87	495
32 Muu valmistus	93	241	119	453
33 Koneiden ja laitteiden korjaus, huolto ja asennus	117	532	622	1 270
Yhteensä	354 032	112 107	52 987	519 126

Liite 1 Teollisuuden energiankäyttö toimialoittain 2017. (Tilastokeskus 2018.)

Research projects in the field of HTHPs

with information on the organization, project partners, heat pump cycle, compressor type, refrigerant, heating capacity and sorted by the sink temperature

Organisation, Project partners	Cycle	Compressor type	Refrigerant	Source and supply temperatures [°C]							Heating capacity [kW]	Reference	
				20	40	60	80	100	120	140			160
Austrian Institute of Technology (AIT), Wien, Chemours, Bitzer	IHX	piston	R1336mzz-Z									12	(Helming et al., 2016)
Austrian Institute of Technology (AIT), Wien, Chemours, Bitzer	1-stage	piston	R1336mzz-Z									12	(Fleckl et al., 2015a, 2015b)
PACO, University Lyon, EDF Electricité de France	flash tank	double screw	H ₂ O (Wasser)									300	(Chamoun et al., 2014, 2013, 2012a, 2012b)
Institut für Luft- und Kältetechnik (ILK), Dresden	1-stage	n.a.	HT 125									12	(Noack, 2016)
Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Siemens	IHX	piston	LG6									10	(Reißner, 2015; Reißner et al., 2013a, 2013b)
Alter ECO, EDF Electricité de France	IHX and subcooler	double scroll	ECO3 (R245fa)									50-200	(Bobelin et al., 2012; IEA, 2014a)
Tokyo Electric Power Company, Japan	1-stage	screw	R601									150-400	(Yamazaki and Kubo, 1985)
Austrian Institute of Technology (AIT), Wien, Edtmayer, Ochsner	economizer	screw	ÖKO1 (R245fa)									250-400	(Wilk et al., 2016b)
Kyushu University, Fukuoka, Japan	1-stage	double rotary (2-stage)	R1234ze(Z)									1.8	(Fukuda et al., 2014)
Johnson Controls, EDF Electricité de France	economizer and IHX	double screw centrifugal turbo	R245fa									300-500 900-1'200	(IEA, 2014a)

Liite 2 Eri toimijoiden tekemiä referenssi kohteita korkean lämpötilan lämpöpumpuratkaisuista (Arpagaus ym. 2017.)

Properties of refrigerants for HTHPs

Refrigerant	Description	Chemical formula	T _{crit} [°C]	p _{crit} [bar]	ODP [-]	GWP ₁₀₀ [-]	SG	Bp. [°C]	M [g/mol]
Ethane line									
R113	1,1,2-Trichloro-1,2,2-trifluoroethane	CCl ₂ FCF ₂	214.0	33.9	0.8	4800	A1	47.6	187.4
R114	1,2-Dichloro-1,1,2,2-tetrafluoroethane	CClF ₂ CCF ₂	145.7	32.6	1	9800	A1	3.8	170.9
R134a	1,1,1,2-Tetrafluoroethane	CH ₂ FCF ₃	101.1	40.6	0	1430	A1	-26.1	102.0
R152a	1,1-Difluoroethane	CH ₃ CHF ₂	113.3	45.2	0	124	A2	-24.0	66.1
Propane line									
R245ca	1,1,2,2,3-Pentafluoropropane	CHF ₂ CF ₂ CHF ₂	174.4	39.3	0	693	n.v.	25.1	134.0
R245fa	1,1,2,2,3-Pentafluoropropane	CHF ₂ CF ₂ CF ₃	154.0	36.5	0	858	B1	14.9	134.0
R236fa	1,1,1,3,3,3-Hexafluoropropane	CF ₃ CF ₂ CF ₃	124.9	32.0	0	9810	A1	-1.4	152.0
R227ea	1,1,1,2,3,3,3-Heptafluoropropane	CF ₃ CHF ₂ CF ₃	101.8	29.3	0	3220	A1	-15.6	170.0
R290	Propane	CH ₃ CH ₂ CH ₃	96.7	42.5	0	3	A3	-42.1	44.1
R1270	Propene	CH ₃ CH=CH ₂	91.1	45.6	0	2	A3	-47.6	42.1
Butane line									
R365mfc	1,1,1,3,3-Pentafluorobutane	CF ₃ CH ₂ CF ₂ CH ₃	186.9	32.7	0	804	A2	40.2	148.1
SES36	Pentafluorobutane	R365mfc/PPF65/35	177.6	28.5	0	3125	A2	35.6	184.5
Hydrocarbons									
R601	Pentane	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₃	196.6	33.7	0	20	A3	36.1	72.2
R600	Butane	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₃	152.0	38.0	0	20	A3	-0.5	58.1
R600a	Isobutane	CH(CH ₃) ₂ CH ₃	134.7	36.3	0	3	A3	-11.8	58.1
Refrigerant mixtures									
R410A	R32/R125 (50/50)	CH ₂ F ₂ /CHF ₂ CF ₃	72.6	49.0	0	2088	A1	-51.5	72.6
Hydro Fluoro Olefines (HFOs)									
R1336mzz-Z	1,1,1,4,4,4-Hexafluoro-2-butene	CF ₃ CH=CHCF ₂ (Z)	171.3	29.0	0	2	A1	33.4	164.1
R1233zd(E)	Tetrafluoropropene	CF ₃ CH=CHCl(trans)	166.5	36.2	0.0003	1	A1	18.0	130.5
R1234ze(Z)	cis-1,3,3,3-Tetrafluoro-1-propene	CF ₃ CH=CHF(cis)	150.1	35.3	0	1	A2	9.8	114.0
R1234ze(E)	trans-1,3,3,3-Tetrafluoro-1-propene	CF ₃ CH=CHF(trans)	109.4	36.4	0	7	A2L	-19.0	114.0
R1234yf	2,3,3,3-Tetrafluoro-1-propene	CF ₃ CF=CH ₂	94.7	33.8	0	4	A2L	-29.5	114.0
DR-14	n.a.	n.a.	111.6	39.6	0	380	A1	-20.5	n.v.
DR-12	n.a.	n.a.	137.7	30.0	0	32	1	7.5	n.v.
LG6	n.a.	n.a.	165.0	n.a.	0	1	n.a.	n.a.	n.a.
MF2	n.a.	n.a.	145.0	n.a.	0	10	n.a.	n.a.	n.a.
Others									
E170	Dimethyl ether	CH ₃ OCH ₃	127.2	53.4	0	1	A3	-24.8	46.1
R718	Water	H ₂ O	373.9	220.6	0	0	A1	100.0	18.0
R717	Ammonia	NH ₃	132.3	113.3	0	0	B2L	-33.3	17.0
R744	Carbon dioxide	CO ₂	31.0	73.8	0	1	A1	-78.5	44.0

T_{crit} = critical temperature

p_{crit} = critical pressure

ODP = Ozone Depletion Potential (R11=1.0)

GWP = Global Warming Potential (CO₂=1.0, 100 years EU F-Gas regulation 517/2014)

SG = Safety group (according to DIN EN 378-1, 2008, ASHRAE 34)

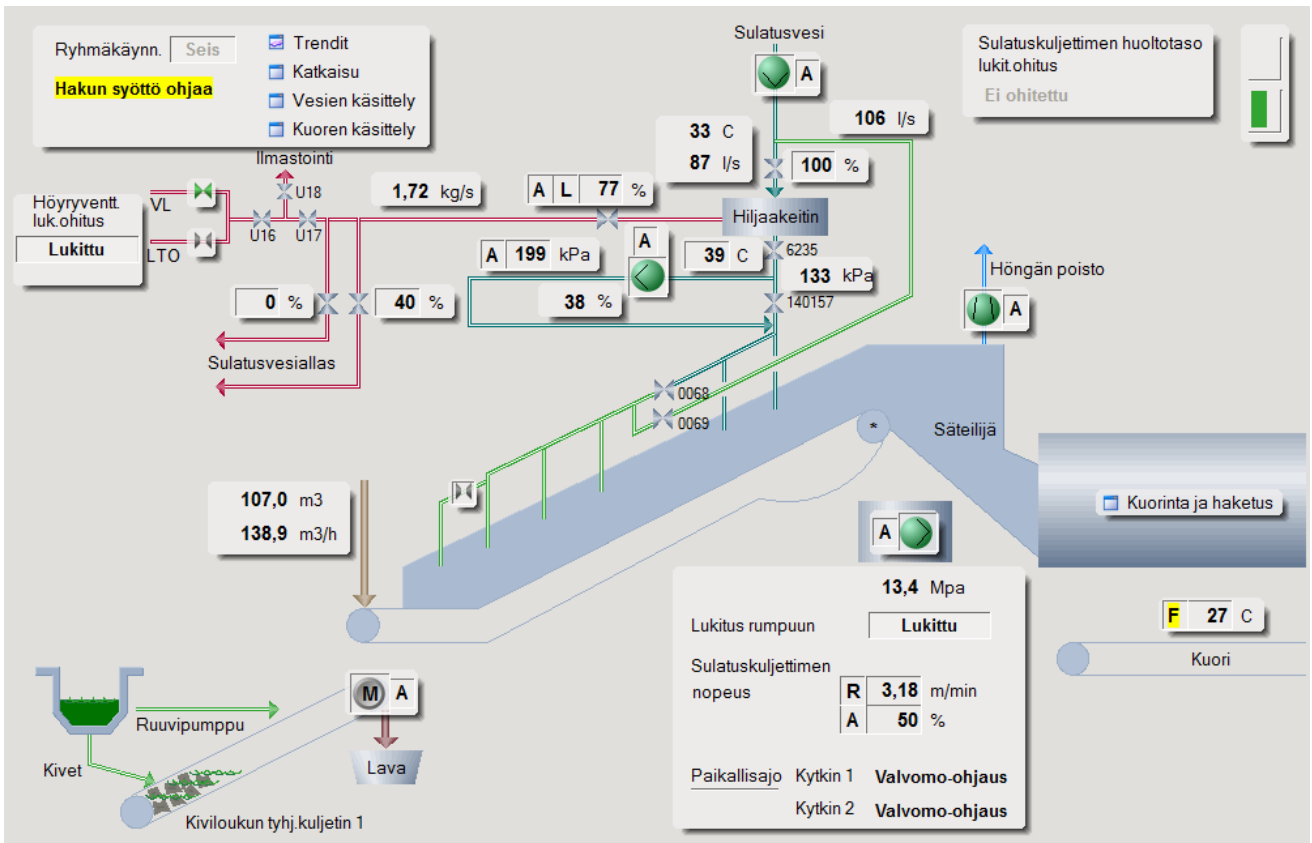
Bp. = Boiling point at 1.013 bar

M = Molecular weight

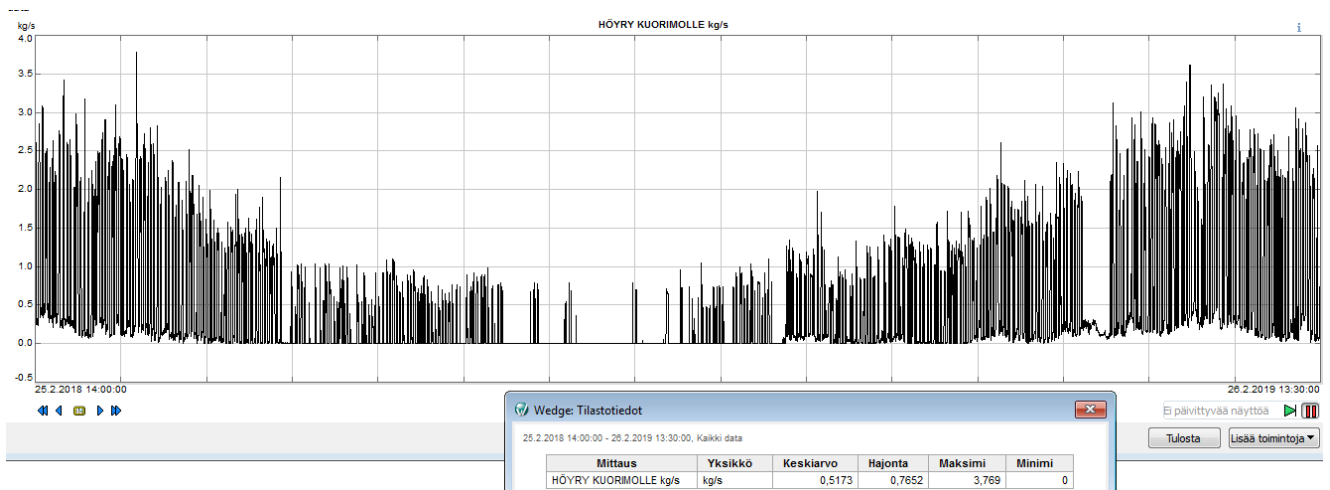
 excluded

 suitable

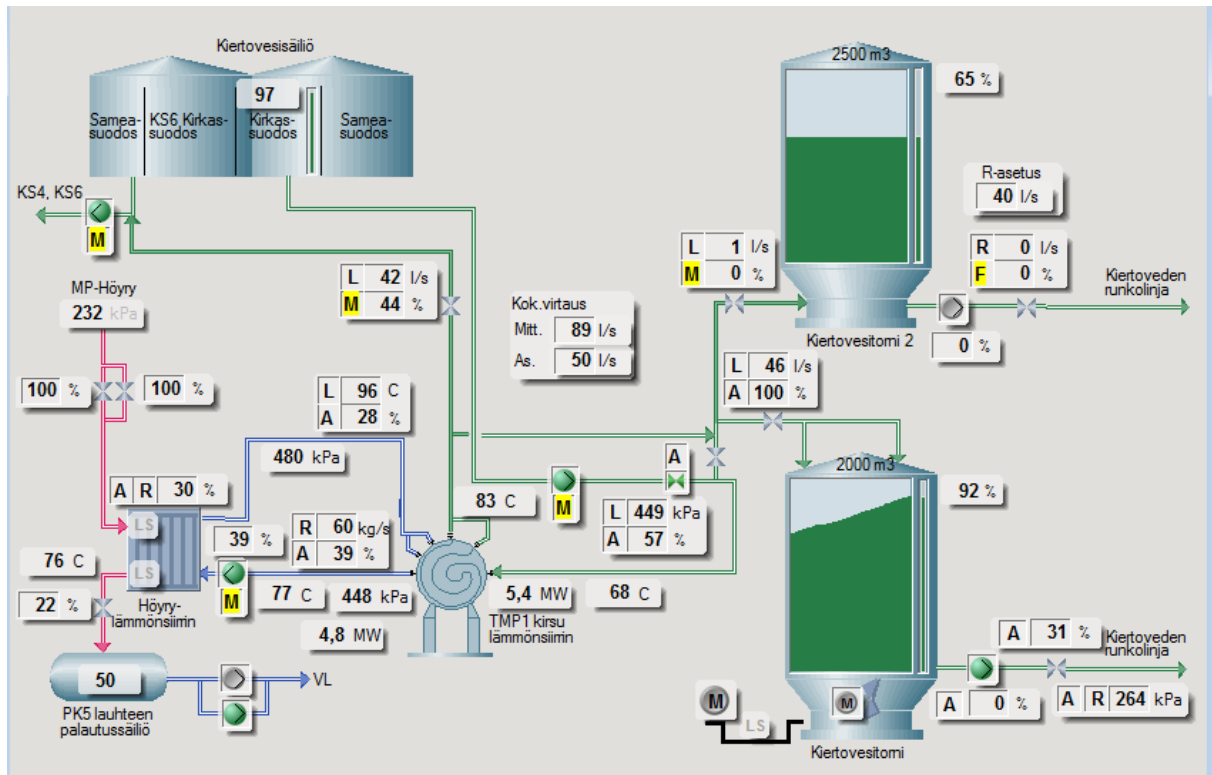
Liite 3 Korkeisiin lämpötiloihin sopivien lämpöpumppujen kylmäaineiden ominaisuuksia (Arpagaus ym. 2017.)



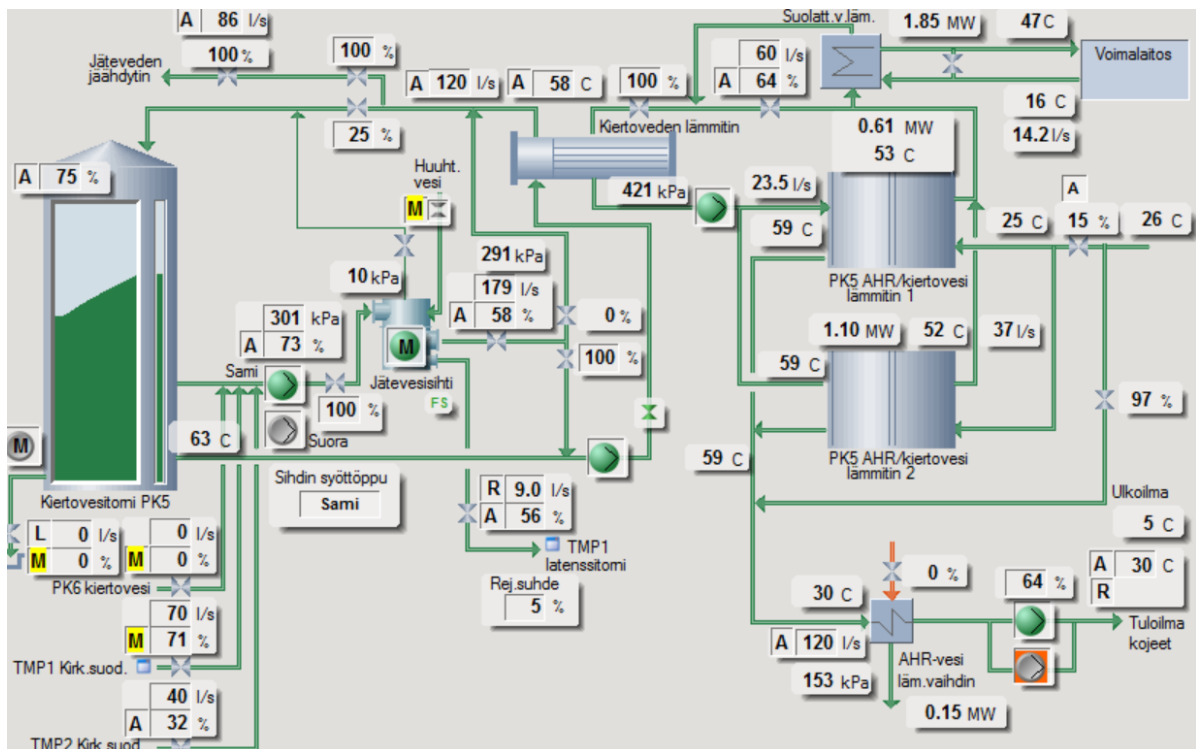
Liite 4 Kuorimon puun sulatusprosessin valvomonäyttö (MetsoDNA -automaatiojärjestelmän kuvakaappaus.)



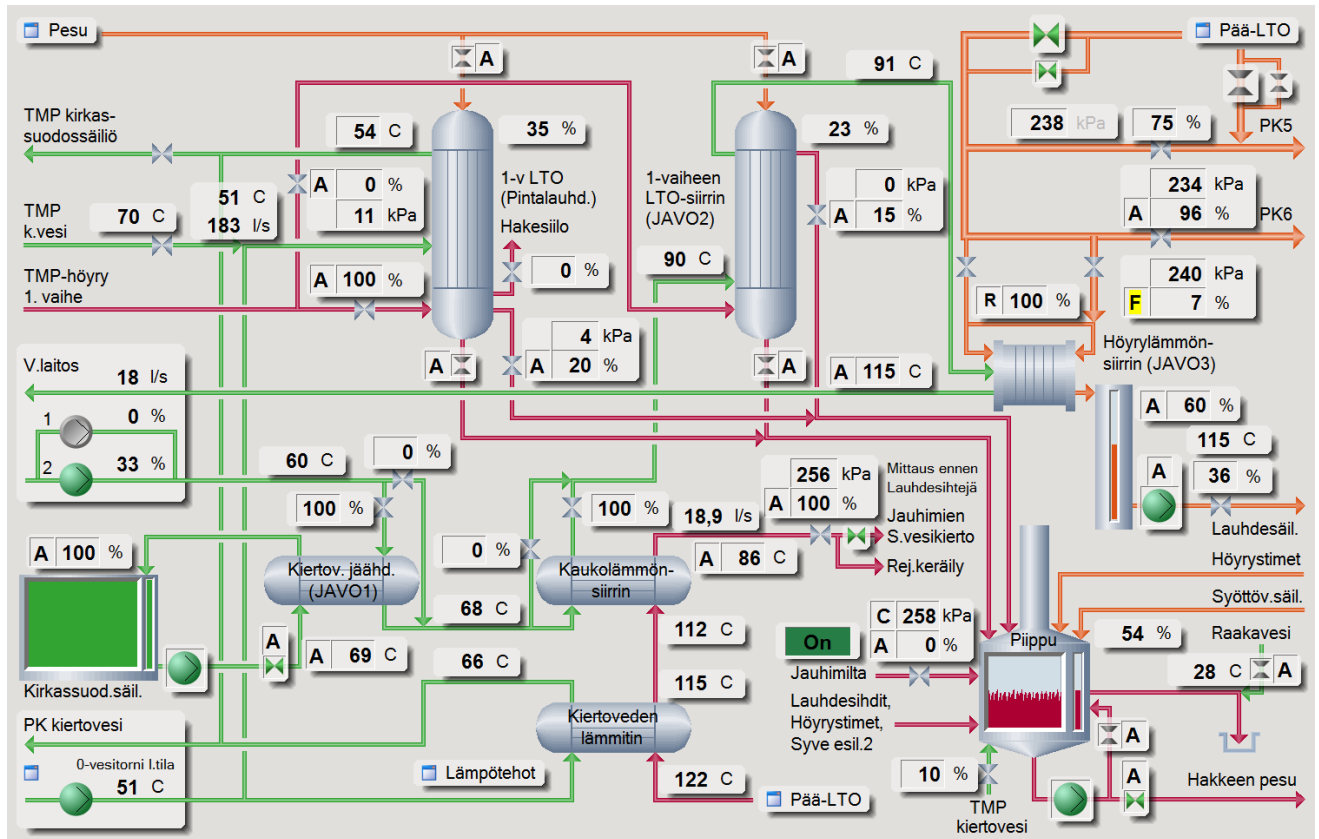
Liite 5 Kuorimolle tuleva höyryvirtaus. Vuoden aikajakso. (Wedge -tiedonkeruujärjestelmä.)



Liite 6 Hiirtämön kierto-vesiprosessin valvomonäyttö (MetsoDNA -automaatiojärjestelmän kuvakaappaus.)



Liite 7 PK5:n kierto-vesitornilta lähtevä jätevesivirtaus. (MetsoDNA -automaatiojärjestelmän kuvakaappaus.)



Liite 8 Kaukolämpöveden kiertopiiri. (MetsodDNA -automaatiojärjestelmän kuvakaappaus.)