



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

HUKKALÄMMÖN TALTEEN- OTTO LÄMPÖPUMPULLA II- SALMEN VOIMALAITOK- SELLA

TEKIJÄ/T: Esa Niemi

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala | |
| Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma | |
| Työn tekijä(t) Esa Niemi | |
| Työn nimi Hukkalämmön talteenotto lämpöpumpulla Iisalmen voimalaitoksella | |
| Päiväys 30.05.2019 | Sivumäärä/Liitteet 33 |
| Ohjaaja(t) Jukka Huttunen | |
| Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savon Voima Oyj, | |
| <p>Tiivistelmä</p> <p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tehdä selvitys Savon voimalle, olisiko Iisalmen voimalaitoksella syntyvää hukkalämpöä mahdollista hyödyntää, lämpöpumpun avulla. Hukkalämpö on hyödynnettävissä voimalaitoksella sijaitsevassa jäähdytyspiirissä.</p> <p>Tässä opinnäytetyössä käydään läpi mahdollisia kohteita, joissa jäähdytyspiiriin hukkalämpöä voitaisiin hyödyntää lämpöpumpun avulla. Käsittelen myös lämpöpumpun toimintaa ja COP-lukua. Lisäksi esittelen Savon Voima Oyj:tä ja Iisalmen voimalaitosta. Iisalmen voimalaitoksella sijaitsevasta savukaasupesurista tuli olennainen osa kannattavuuslaskentaa, joten käyn myös savukaasupesurin toimintaa läpi.</p> <p>Tein myös tämän kirjallisen esityksen lisäksi Excel-taulukon Savon Voima Oyj:lle, jossa käyn läpi takaisinmaksuaikaa, ja jäähdytyspiiristä saatavaa energiaa.</p> <p>Jäähdytyspiiristä saatavaksi energiaksi saatiin n. 770kW. Jäähdytyspiiri on myös aina käytössä voimalaitoksen ollessa toiminnassa. Vuosittaiseksi energiamääräksi saatiin siis noin 4475 MWh 8 kuukauden ajalta. Hukkalämmön hyödyntämiskohteeksi valikoitui palaavan kaukolämpöveden lämmitys. Haasteeksi tuli voimalaitoksella sijaitseva savukaasupesuri. Jotta hukkalämpö voitaisiin hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti, pitäisi hyödynnettävän kohteen lämpötila olla mahdollisimman matala. Hukkalämmön hyödyntäminen ennen pesuria olisi hyödytöntä, sillä paluuveden lämmitys ennen savukaasupesuria heikentää pesurin hyötysuhdetta. Ratkaisuksi ehdotettiin savukaasupesurin yli menevää linjaa, jossa hukkalämpö hyödynnettäisiin. Haasteeksi osoittautui pesurin käyttäytyminen, joka saattaa häiriintyä oleellisesti, mikäli suunniteltu linja rakennetaan. Tässä opinnäytetyössä käydään läpi myös vaihtoehto, jossa hukkalämpö hyödynnettäisiin savukaasupesurin jälkeen. Tämä vaihtoehto on huonompi, koska siihen vaaditaan suurempi alkuinvestointi, sekä lämpöpumpun COP-luku pienenee.</p> <p>Lämpöpumpun tuotoksi saatiin n. 39 000 €/vuosi riippumatta lopullisesta kytkennästä. Laskettu säästö perustuu osittain olettamuksiin ja lopullisen säästön laskenta vaatii tarkempaa selvitystä. Todellisuudessa pumpun kannattavuus olisi hiukan parempi, jos lämpö voitaisiin sijoittaa pesurin yli vietävään linjaan.</p> | |
| <p>Avainsanat</p> <p>Lämpöpumppu, Voimalaitos, Hukkalämpö, COP-luku, Jäähdytyspiiri</p> | |
| | |

| | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------------|----|
| Field of Study Technology, Communication and Transport | | | |
| Degree Programme Degree Programme in Energy Engineering | | | |
| Author(s) Esa Niemi | | | |
| Title of Thesis Utilization of Waste Heat Using a Heat Pump in Iisalmi Power Plant | | | |
| Date | 30-May-2019 | Pages/Appendices | 33 |
| Supervisor(s) Jukka Huttunen | | | |
| Client Organisation /Partners Savon Voima Oyj | | | |
| <p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to make a report to Savon Voima Group and find out whether it would be possible to benefit from waste heat that is produced in Iisalmi power plant. This waste heat is produced in a cooling circuit in the power plant and it would be utilized with a heat pump.</p> <p>In this thesis possible places where the waste heat could be utilized with a heat pump were studied, also heat pumps and their COP-numbers are discussed as well as Iisalmi power plant and Savon Voima group as a company. A flue gas scrubber located in Iisalmi power plant became an essential part of profitability calculations, so also flue gas scrubbers were covered in the thesis.</p> <p>In addition of this thesis also an Excel table containing profitability calculations and the energy available from the cooling circuit in the Iisalmi power plant was made. This Excel table was made just for Savon Voima Group.</p> <p>The possible amount of waste heat that could be utilized from the cooling circuit was calculated to be roughly 770kW. This cooling circuit is always used when the power plant is running. The yearly quantity of energy that could be extracted from the cooling circuit was around 4475 MWh. It was chosen to utilize the waste heat directly to heating of the returning district heating water. The flue gas scrubber was proven to be challenging regarding the utilization of the waste heat. Since the flue gas scrubber has the better efficiency the cooler water it is being fed, it would have been useless to utilize the waste heat before the flue gas scrubber. Suggested solution to this challenge was to build a separate line and steal roughly 10% of the water flow going to the flue gas scrubber, and to utilize the heat gained from the heat pump to this flow. The challenge in this was that how would this effect the flue gas scrubber. Because the needed information about this effect was not received also undergo the possibility of utilizing the waste heat after the flue gas scrubber was studied. If the waste heat was to be utilized after the flue gas scrubber the pump would have a smaller COP-number, this solution would also have higher investment costs.</p> <p>The profits gained from the heat pump were calculated to be around 39 000€/year regardless of the way the waste heat is being utilized in the district heating. These calculations are rough estimates and to make more accurate calculations a more detailed report is needed. In reality the heat pump would be more effective if the waste heat could be utilized in its own line over the flue gas scrubber.</p> | | | |
| <p>Keywords</p> <p>Heat pump, Power plant, Flue gas scrubber, COP-number, Cooling circuit, Waste heat</p> | | | |
| | | | |

ESIPUHE

Tämä opinnäytetyö on tehty yhteistyössä Savon Voiman ja Calefa Oy:n kanssa. Suuri kiitos Savon Voiman ohjaajilleni Valtteri Partaselle ja Kari Anttoselle, sekä Calefa Oy:n Antti Porkalle. Haluaisin myös kiittää ohjaavaa opettajaani Jukka Huttusta erittäin hyvästä ohjaamisesta ja kaikesta avusta tässä opinnäytetyössä.

Tässä opinnäytetyössä on tarkoitus tehdä selvitys Savon Voimalle, voidaanko voimalaitoksen jäähdytyspiiristä talteenottaa ja hyödyntää hukkalämpöä. Selvitykseen kuuluu saatavan hukkalämmön määrän laskeminen, hyödyntämiskohteen selvittäminen, takaisinmaksuajan laskeminen sekä PI-kaavio piirtäminen tarvittaville laitteille.

Hukkalämpö on tarkoitus hyödyntää lämpöpumpun avulla. Alussa kerron hyödyllisiä käsitteitä, liittyen lämpöön ja lämpöpumppuihin.

SISÄLTÖ

| | | |
|--------|-----------------------------------------|----|
| 1 | JOHDANTO | 7 |
| 1.1 | Tausta | 7 |
| 1.1.1 | Savon Voima | 7 |
| 1.1.2 | Iisalmen voimalaitos..... | 7 |
| 1.2 | Ongelma | 8 |
| 1.3 | Tavoitteet | 8 |
| 1.4 | Rajaukset..... | 8 |
| 2 | TEORIA | 9 |
| 2.1 | Leijupetikattila | 9 |
| 2.2 | Lämpö ja lämpötila..... | 9 |
| 2.3 | Entalpia | 9 |
| 2.4 | Entropia | 10 |
| 2.5 | Carnot-kone | 10 |
| 2.6 | Ideaalikaasu | 11 |
| 2.7 | Tilamuutokset..... | 12 |
| 2.8 | Tilapiirrokset..... | 13 |
| 2.8.1 | T, s -piirros | 13 |
| 2.8.2 | p, h -piirros..... | 14 |
| 2.9 | Tilapiirosten prosesseja..... | 16 |
| 2.9.1 | Höyrystyminen | 16 |
| 2.9.2 | Lauhtuminen | 16 |
| 2.9.3 | Puristus | 16 |
| 2.9.4 | Kuristus | 17 |
| 2.10 | Kylmäaineet | 17 |
| 2.10.1 | Vaadittavia ominaisuuksia | 17 |
| 2.10.2 | Termodynaamiset ominaisuudet | 18 |
| 2.11 | Lämpöpumput | 18 |
| 3 | HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN..... | 19 |
| 3.1 | Voimalaitoksen jäähdytyspiiri..... | 19 |
| 3.2 | Jäähdytyspiiristä saatava energia | 19 |
| 3.3 | Lämpöpumppu..... | 21 |

| | | |
|-------|----------------------------------------------------------------------|----|
| 4 | HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN | 21 |
| 4.1 | Hukkalämmön mahdolliset kohteet | 21 |
| 4.1.1 | Palamisilman esilämmitys..... | 22 |
| 4.1.2 | Omakäyttövesi ja patteriverkosto | 22 |
| 4.1.3 | Voimalaitoksen piha-alueen sulana pito | 23 |
| 4.1.4 | Polttoaineen kuivaus | 23 |
| 4.1.5 | Hyödyntäminen kaukolämmön tuotannossa | 23 |
| 5 | SAVUKAASUPESURIN TUOMAT HAASTEET LÄMPÖPUMPPUKYTKENNÄLLE | 24 |
| 5.1 | Savukaasupesuri | 24 |
| 5.2 | Savukaasupesurin lämmönvaihtimen ylityksen haasteet | 25 |
| 6 | TULOKSET | 26 |
| 6.1 | Lämpöpumppu..... | 26 |
| 6.1.1 | Ruuvikompressori | 26 |
| 6.1.2 | Kylmäaine R134a | 26 |
| 6.2 | Pesurin ylittäminen..... | 27 |
| 6.2.1 | PI-Kaavio | 27 |
| 6.2.2 | Kaukolämpöveden lämpötila ennen pesuria..... | 27 |
| 6.2.3 | Tarvittava vesimäärä | 28 |
| 6.3 | Kaukolämpöverkkoon siirtäminen pesurin jälkeen..... | 29 |
| 6.3.1 | PI-Kaavio | 29 |
| 6.3.2 | Kaukolämpöveden lämpötila savukaasupesurin jälkeen..... | 30 |
| 6.4 | Takaisinmaksuaika | 30 |
| 6.4.1 | Takaisinmaksuajan laskeminen..... | 31 |
| 6.4.2 | Savukaasupesurin ylittäminen | 31 |
| 6.4.3 | Lämmön luovuttaminen kaukolämpölinjaan savukaasupesurin jälkeen..... | 31 |
| 6.5 | Yhteenvedo..... | 31 |
| | LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT | 33 |

1 JOHDANTO

1.1 Tausta

Savon Voimalla huomattiin, että Iisalmen voimalaitoksella sijaitsevassa jäähdytyspiirissä muodostuu hukkalämpöä. Tätä hukkalämpöä oli tutkittu jo aikaisemmin, mutta selvitys hukkalämmön käytöstä oli jäänyt tekemättä. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tehdä kattava selvitys jäähdytyspiirissä syntyvästä hukkalämmöstä, sekä voitaisiinko tätä hyödyntää taloudellisesti kaukolämmön tuotannossa.

1.1.1 Savon Voima

Savon Voima on Savossa toimiva paikallinen energiayhtiö. Savon Voima aloitti toimintansa vuonna 1947 ystävänpäivänä 14.02.1947. Tällöin Savossa oli tarvetta valolle ja voimalle, sodan jälkeisen jälleenrakennuksen aloittamiselle. Savon Voiman omistaa 100% Savon alueen 20 kuntaa, Savon Voima on siis täysin paikallinen konserni.

Nykyään Savon Voima tuottaa ja jakelee sähköä ja lämpöä Savon alueella. Sähköverkkoa Savon Voimalla on n.27t km ja n.2300 GWh siirtovolyymi sähkölle, ja asiakkaita sähköverkossa on n. 120 tuhatta. Savon Voima investoi n.50 miljoonaa euroa säävarmaan sähköverkkoon vuosittain. Savon Voiman kaukolämpöverkoissa oli vuonna 2018 asiakkaita n. 3000 kpl. Lämpöenergiaa myytiin noin 600 GWh vuonna 2018. Savon Voimalla on sähköä ja lämpöä tuottavia laitoksia Iisalmella ja Pieksämäellä. Pelkästään kaukolämpöä Savon Voima tuottaa seuraavilla paikkakunnilla ja alueilla; Siilinjärvi, Suonenjoki, Leppävirta, Kiuruvesi, Vuorela-Toivala, Lapinlahti, Pielavesi, Juankoski, Nilsia, Joroinen, Keitele, Rautalampi, Karttula, Maaninka, Tahkovuori, Nenonpelto ja Nipanen.

1.1.2 Iisalmen voimalaitos

Tämän työn selvityksen alla oleva Iisalmen Voimalaitos on niin sanottu vastapainevoimala, eli voimala tuottaa sekä sähköä ja lämpöä. Sähköteho voimalaitoksella on 15MW ja kaukolämpöteho on 30MW. Voimalaitoksen tehon tuottaa leijupetikattila, jonka on toimittanut Foster Wheeler.



KUVA 1. Iisalmen voimalaitos

1.2 Ongelma

Ongelmana voimalaitoksella oli jäähdytyspiirissä syntyvä hukkalämpö, ja kohde missä tätä hukkalämpöä voitaisiin hyödyntää.

1.3 Tavoitteet

Tavoitteena opinnäytetyössä oli, tehdä selvitys voitaisiinko hukkalämpöä hyödyntää, ja löytää hukkalämmölle hyödyntämiskohde.

1.4 Rajaukset

Voimalaitoksella syntyvä hukkalämpö olisi tarkoitus hyödyntää lämpöpumpulla, joten tässä opinnäytetyössä käsitellään lämpöä ja lämpöpumppuja. Käsittelen myös savukaasupesuria, sillä voimalaitoksella sijaitsevasta savukaasupesurista tuli olennainen osa selvitystä.

2 TEORIA

2.1 Leijupetikattila

Leijupetikattilassa on hiekkapetikerros, johon puhalletaan alapuolelta tarvittava palamisilma. Leijupetikattilassa puhallus saa hiekkapetikerroksen ainoastaan leijumaan. Hiekkapeti kuumennetaan aluksi öljypolttimilla kuumaksi, jonka jälkeen kattilaan voidaan syöttää kliinteää polttoainetta kuten esimerkiksi puuhaketta. Polttoaineen osuessa kuumaan hiekka kerrokseen syttyy se palamaan, ja näin ollen myös ylläpitää hiekan lämpöä. (Energiatekniikka, Jarmo Perttula v2000 s.177)

2.2 Lämpö ja lämpötila

Kykenemme jossain määrin aistimaan lämpötilan eri tasoja. Tästä syystä lämpötilalla on hyvin konkreettinen merkitys. Termodynamiikassa lämpötiläkäsitteen merkitys ja sisältö on laajempi. Lämpötila liittyy olennaisesti termisen tasapainon käsitteeseen. Kun kaksi kappaletta saatetaan yhteyteen, ne asettuvat tasapainoon toistensa kanssa, tähän tasapainoon kuuluu myös lämpötila. Tasapainoa edeltävä tila on muutostila, jossa kappaleesta toiseen siirtyy lämpöä. Puhutaan siis lämpövirrasta, vaikka lämpöä eikä lämpövirtausta ole olemassa. Lämpötila koostuu kappaleen sisäenergiasta, eli molekyylien liikkeestä/energiasta. Käsitteet lämpövirta ja lämpötila kuitenkin havainnollistavat asiaa. Lämpötila on siis molekyylikineettistä eli molekyylien liike-energiaa ja lämmön siirtyminen tämän energian siirtymistä molekyyalitasolla törmäilyjen ja molekyylien välisten voimien välityksellä. Mikäli kappale/systeemi on lämpöeristetty, eli ei ole lämmönsiirtoyhteydessä ympäristön kanssa, kutsutaan sitä adiabaattiseksi. (Aalto, Alijoki, Hakala, Hirvelä, Kaapola, Mentula, Seinelä 2012, 1.)

2.3 Entalpia

Termodynamiikan ensimmäinen pääsääntö on energian säilymisen laki:

$$\Delta U_{12} = U_2 - U_1 = Q_{12} + W_{12} \quad (1)$$

Systeemin sisäenergia U lisääntyy määrän ΔU_{12} viedyn lämmön Q_{12} ja työn W_{12} määrillä. alaindeksi 12 tarkoittaa tilamuutosta välillä 1-2.

Tietystä adiabaattisesta systeemistä saatava työ on kaavan;

$$\Delta U_{12} = U_2 - U_1 = Q_{12} + W_{12} \quad (2)$$

perusteella $W = \Delta U_{12}$. Systeemi on tällöin suljettu, sillä se suorittaa kertaprosessin. Koneissa, joissa systeemi on avoin, virtaa ainetta sisään ja ulos, yleensä vielä samalla massavirralla, tällöin voidaan puhua jatkuvuustilasta eli stationääritilasta. (Aalto ym. 2012, 2-3.)

Yksinkertaiseen adiabaattiseen systeemiin viedään vain teho P , tämä lisää sisäenergiaa nopeudella $\dot{m}(u_2 - u_1)$, u on sisäenergia massayksikköä kohti eli ominaissisäenergia [J/g tai kJ/kg] ja \dot{m} massa-virta. Systeemiin vietäessä massa Δm , systeemin painetta p vastaan tehdään työtä. Systeemi vastaan vastaa tekee työtä poistaessaan paineella p saman massan. Kumpikin tilavuuden muutostyö on $p\Delta v$, jossa v on ominaistilavuus (m³/kg) (tiheyden ρ käänteisarvo)

Näin saadaan

$$\dot{m}(u_2 - u_1) = P + \dot{m}(p_1 v_1 - p_2 v_2) \quad (3)$$

Eli

$$\dot{m}(u_2 + p_2 v_2 - u_1 + p_1 v_1) = P \quad (4)$$

Tästä voidaan määritellä suure entalpia, kaavalla

$$h = u + pv \quad (5)$$

h on ominaisentalpia eli entalpia massayksikköä kohti [J/g tai kJ/kg]. (Aalto ym. 2012, 2-3.)

2.4 Entropia

Toinen pääsääntö on eräällä tavalla vastakohta eli muuttumisen laki. Molekyyliteoreettisesti toinen pääsääntö sanoo, että systeemi pyrkii itsestään todennäköisimpään tilaan, joka on sen tasapainotila. Tästä todennäköisyydestä käytetään käsitettä *entropia* S [kJ/K tai J/K], joka saavuttaa systeemin tasapainossa maksiminsa. Ominaisentropiaa s [J/gK tai kJ/kgK] eli massayksikköä kohti laskettua entropiaa käytetään aineelle. (Aalto ym. 2012, 4.)

2.5 Carnot-kone

Suurin lämpövoimakoneesta saatavissa oleva työ, tai lämpöpumpussa tarvittava pienin työ, määritellään toisen pääsäännön avulla. Carnot-prosessi, eli palautuvien prosessien perusprosessi, jossa molemmat teoreettiset rajapinnat toteutuvat. (Aalto ym. 2012, 5.)

Lämpövoimakoneen hyvyttä mitataan hyötysuhteella η .

$\eta = \text{saatu työ} / \text{käytetty lämpö}$.

Carnot hyötysuhde eli lämpövoimakoneen suurin mahdollinen hyötysuhde

$$\eta_c = 1 - T_0/T \quad (6)$$

Lämpöpumpun hyvyttä mitatessa täytyy huomioida, käytetäänkö pumppua lämmitykseen (lämpöpumppu) vai kylmennykseen (kylmäkone). Kylmäkoneelle käytetään käsitettä kylmäkerroin ε

$$\varepsilon = Q_0/W \quad (7)$$

Lämpöpumpulle käsitettä lämpökerroin ϕ

$$\phi = Q/W \quad (8)$$

Häviöttömässä tapauksessa

$$\phi = \varepsilon + 1 \quad (9)$$

Suurin ε ja ϕ saavutetaan palautuvalla koneella (esim. Carnot-prosessi)

$$\varepsilon = T_0/T - T_0 \quad (10)$$

$$\phi = T/T - T_0 \quad (11)$$

Nämä kaavat antavat teoreettisen ylärajan, mutta todelliset koneet jäävät näistä arvoista suhteellisen paljon. Englanninkielisessä kirjallisuudessa käytetään molemmille kertoimille nimitystä COP (Coefficient Of Performance). (Aalto ym. 2012, 5.)

2.6 Ideaalikaasu

Gay-Lussacin, Boyle-Mariotten ja Avokadron lait yhdistämällä saadaan ideaalikaasun käyttäytymisen määräävä kaava eli tilayhtälö

$$pV = NRT \quad (12)$$

p on paine [$\text{Pa}=\text{N}/\text{m}^2$], V tilavuus [m^3], N moolimäärä m/M [mol], T lämpötila [K] ja R yleinen kaasuvakio = $8,3143 \text{ J}/(\text{molK})$, kaava voidaan kirjoittaa myös muotoon

$$pV_m = RT \quad (13)$$

$$pV = R * T\rho \quad (14)$$

V_m on moolitilavuus V/N [m^3/kmol], v ominaistilavuus V/m [m^3/kg], R^* ominaiskaasuvakio = R/M [J/gK tai kJ/kgK]. (Aalto ym. 2012, 6.)

Mitä harvempia kaasut ovat sitä paremmin ne noudattavat ideaalikaasuyhtälöä, pienemmässä paineessa kaasut ovat harvempia. Esimerkiksi ilma normaalipaineessa on melko lähellä ideaalikaasua. Kylmäaineet sen sijaan lämpöpumpuissa ja jäähdytyskoneissa ovat yleensä kaukana ideaalikaasukäyttäytymisestä. Ideaalikaasun sisäenergia riippuu vain lämpötilasta, jolloin muutos välillä 1-2 on

$$u_1 - u_2 = \bar{c}_v(T_2 - T_1) \quad (15)$$

\bar{c}_v on keskimääräinen ominaislämpö välillä 1-2, kaavan seurauksena myös entalpia on vain lämpötilan funktio:

$$h_1 - h_2 = \bar{c}_p(T_2 - T_1) \quad (16)$$

Ideaalikaasujen keskimääräisten ominaislämpöjen välillä on yhteys

$$\bar{c}_p - \bar{c}_v = R^* \quad (17)$$

(Aalto ym. 2012, 6.)

2.7 Tilamuutokset

Prosessi eli tilamuutos, missä lämpötila on vakio, on isoterminen. Tilayhtälöstä seuraa (Boylen-Mariotten laki):

$$pV = \text{vakio} \quad (18)$$

Isobaarisessa tilamuutoksessa paine on vakio:

$$V/T = \text{vakio} \quad (19)$$

Isokoorisessa tilamuutoksessa tilavuus on vakio

$$p/T = \text{vakio} \quad (20)$$

(Gay-Lussacin laki)

Isentrooppinen tilamuutos on prosessi, joka tapahtuu häviöttömänä, ja jonka aikana ympäristön ja kaasun välillä ei tapahdu lämmönsiirtoa. Käyttämällä entropian määritelmää ($ds = dq/T$), ensimmäistä pääsääntöä ja ideaalikaasun tilayhtälöä voidaan johtaa isentrooppisen prosessin paineen, lämpötilan ja tilavuuden muutoksien suhteille seuraavat kaavat

$$T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{(\gamma-1)/\gamma} \quad (21)$$

$$= (V_2/V_1)^{\gamma-1} \quad (22)$$

γ on isentrooppivakio: $\gamma = c_p/c_v$

Polytrooppivakio k saa eri prosesseille seuraavat arvot:

isotermi $k=1$

isobaari $k=0$

isokoori $k=\infty$

isentroppi $k=\gamma$

Avoimessa systeemissä esim. kompressorin tekee tilavuuden muutostyötä, eli puristaa kaasua. Tämä työ on polytrooppiselle prosessille:

$$w_t = h_2 - h_1 = \frac{k-1}{k} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right] \quad (23)$$

Tässä w_t on ns. teknillinen työ/massa. (Aalto ym. 2012, 6-7.)

2.8 Tilapiirrokset

Aineen tilasuureiden välisiä yhteyksiä esitetään tilapiirroksilla. Piirrokset joissa akseleina ovat lämpötila T ja entropia s (T, s -piirros), sekä entalpia h ja entropia s (h, s -piirros), pidetään tärkeimpinä.

Paineen p , ja entalpian, h (p, h -piirros) on myös kylmäteknikassa tärkeä, paineen ja entalpian olennaisuuden takia. (Aalto ym. 2012, 15.)

2.8.1 T, s -piirros

T, s -piirrosta kutsutaan myös joskus lämpödiagrammiksi, sillä tietyissä prosesseissa lämpömäärä on prosessia kuvaavan käyrän ja T -akselin väliin jäävä pinta-ala. T, s -piirrosta voidaan pitää useissa suhteissa termodynaamisesti havainnollisena. (kuva 1.1) Kylläisen nesteen rajakäyrä a ja kylläisen höyryn rajakäyrä b jakavat piirroksen kolmeen osaan: neste (alijäänyt neste), tulistunut höyry sekä kylläisen nesteen ja höyryn seosalue eli kostea höyry. Kiinteä alue on selvyiden vuoksi yleensä jätetty pois tilapiirroksista. Sillä on harvoin merkitystä.

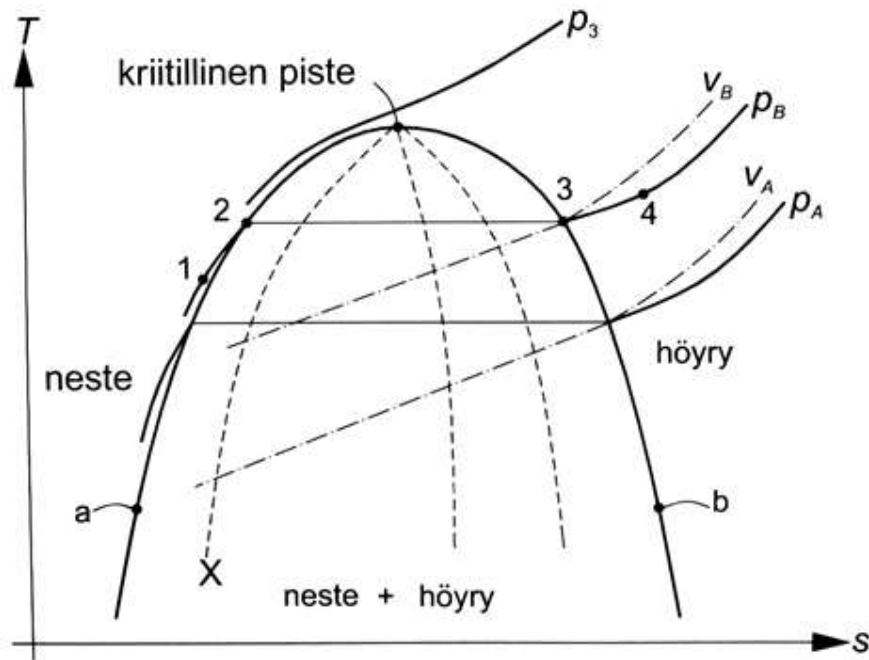
Isobaarisen eli vakioaineessa tapahtuvan lämmityksen 1-2-3-4 osat ovat:

1-2 nesteen lämmitys kyllästys tilaan

2-3 nesteen höyrystyminen vakioaineessa ja vakioämpötilassa

3-4 höyryn tulistus

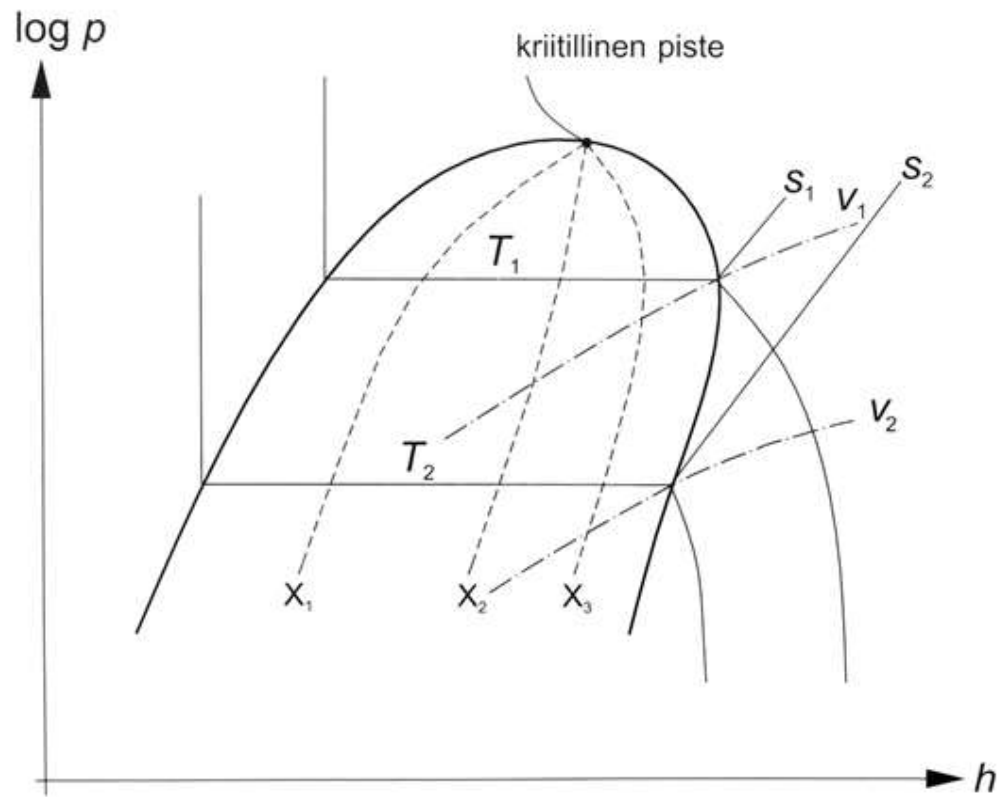
Isentrooppinen tulistus on piirroksessa pystysuora. (Aalto ym. 2012, 15.)



KUVA 2. T, s-piirros (Aalto, Alijoki, Hakala, Hirvelä, Kaapola, Mentula, Seinelä 2012, 15.)

2.8.2 p, h -piirros

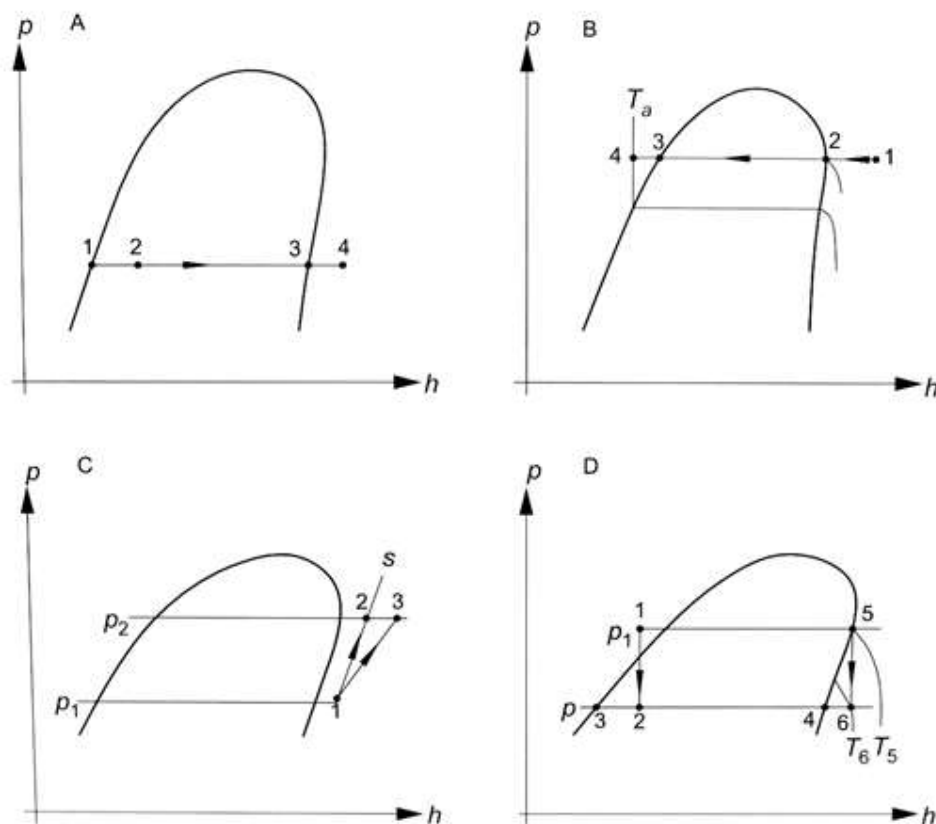
Toisena akselina entalpia h antaa mahdollisuuden lukea mm. lämpömäärät ja puristustyö janoina. Toisena akselina paine on prosesseja käsiteltäessä käytännöllinen paineenmuutosten takia. Tarkkuuden säilyttämiseksi piirroksen koko alueella piirretään paineasteikko logaritmisena. Tästä syystä puhutaan usein $\log p$, h -piirroksesta. Kuten T, s-piirroksessa. Kriittinen piste jakaa rajakäyrän kahteen osaan: kylläisen nesteen ja kylläisen höyryn tasapainokäyriin. Jäähdytys/lämmitysprosessin esittämiseen vaaditaan vähintään höyryalueen isentroopit (entropi $s = \text{vakio}$). Usein esitetään myös höyryalueen isotermit (lämpötila $T = \text{vakio}$), isokoorit (tilavuus $v = \text{vakio}$), sekä vakiohöyrypitoisuuden x -käyrät. (Aalto ym. 2012, 15.)



KUVA 3. p , h -piirroksen periaate. (Aalto, Alijoki, Hakala, Hirvelä, Kaapola, Mentula, Seinelä 2012, 16.)

Isotermit puhtaalle aineelle ovat vaakasuoria kostean höyryn alueella, koska lämpötila ei muutu höyrystymisen aikana vakioaineessa. Isotermit kääntyvät tulistuneen höyryn alueella vähitellen alas pystysuoriksi. Isotermejä nestealueella ei yleensä esitetä, sillä ne ovat lähes pystysuoria. Nestealueen ja kaksifaasi-alueen isentroopit jätetään selkeyden vuoksi yleensä piirtämättä. (Aalto ym. 2012, 15-16.)

2.9 Tilapiirosten prosesseja



KUVA 4. Prosesseja p, h-piirroksessa. A höyrystyminen, B lauhtuminen, C puristus, D kuristus. (Aalto, Alijoki, Hakala, Hirvelä, Kaapola, Mentula, Seinelä 2012, 17.)

2.9.1 Höyrystyminen

Täydellisen höyrystymisen tapahtuessa tilapiste siirtyy kylläisen nesteen käyrältä kylläisen höyryn käyrälle, pisteestä 1 pisteeseen 3. Höyrystymiseen vaadittava lämpö on höyrystyslämpö $l_h = h'' - h'$. Mikäli höyrystyminen alkaa kostean höyryn alueelta (piste 2), on kulunut lämpö $h_3 - h_2$. Höyryn lämmittämistä jatkamalla höyry tulistuu (piste 4) Tulistuslämpö on $h_4 - h_3$. (Aalto ym. 2012, 16-17.)

2.9.2 Lauhtuminen

Tulistuneen höyryn saaminen kylläiseksi edellyttää lämmön poistamista $h_1 - h_2$ (piste 1, kuva 1.9B). Höyrystyslämpö $l_h = h_2 - h_3$ vapautuu lauhtumisessa (pisteet 2 – 3). Kylläistä nestettä jäädyttäessä neste ali jäätyy prosessissa 3 – 4. (Aalto ym. 2012, 16-17.)

2.9.3 Puristus

Ideaalisessa lämpöeristetyssä (adiabaattisessa) puristuksessa, prosessi tapahtuu pitkin isentrooppia 1-2 (kuva1.9C), koska entropia pysyy vakiona. Entalpiain muutos $h_2 - h_1$ on vastaava tarvittava työ/massa puristukselle. Todellisessa puristuksessa 1 – 3 entropia kasvaa, koska syntyy häviöitä.

Entalpian muutos on adiabaattisessa puristuksessa puristuksen työ. Mikäli puristuksen aikana lämpöä poistuu ympäristöön, voidaan prosessi likimääräistää polyntrooppiseksi, tällöin puristustyö ei ole enää vastaava entalpian muutos, vaan pienempi. Ero on kuitenkin käytännössä pieni kompressorissa. (Aalto ym. 2012, 16-17.)

2.9.4 Kuristus

Kuristuksessa aineen painetta pienennetään venttiilissä tai putkessa. Prosessia voidaan pitää adiabaattisena eli lämpöeristettynä, sillä paisuessaan aine ei tee työtä. Entalpia pysyy tällöin vakiona ensimmäisen pääsäännön mukaan, kuristus on siis p, h-piirroksessa pystysuora prosessi. Kuristaessa nestettä osa siitä voi höyrystyä. Höyrystynyt osuus on $x = (h_2 - h_3)/(h_4 - h_3)$. Kun tilasta 5 kylläistä höyryä kuristetaan, tulistuu se lämpötilaan T_6 . (Aalto ym. 2012, 16-17.)

2.10 Kylmäaineet

Lämpöpumpuissa ja kylmäkoneissa käytettyjen höyryprosessien kiertoaineiden nimitys on kylmäaine. Ensimmäinen tunnettu kylmäaine oli eetteri 1800-luvulla Jakob Perkinssin rakentamassa kylmäkoneistossa. Eetteristä oli kuitenkin luovuttava nopeasti, sen vaarallisuuden takia. Sittemmin kehitettiin erilaisia hiilivetyjä, kuten etaania (C_2H_6) matalissa lämpötiloissa sekä etykloridia (C_2H_5Cl) ja metyylkloridia (CH_3Cl). Varhain käyttöön otetut hiilidioksidi (CO_2), ammoniakki (NH_3) ja rikkidioksidi (SO_2) olivat pitkään tärkeitä kylmäaineita. Hiilidioksidista luovuttiin laajalti 1950-luvun aikana, huonon hyötysuhteen ja korkean höyrypaineen takia. Hiilidioksidi on kuitenkin tulossa uudelleen käyttöön ympäristöystävällisyytensä ansiosta, myös nykyiset parannellut prosessit ja koneiden komponentit parantavat sen käyttöä. Ammoniakki muutamista haitoista huolimatta on jäänyt laajalti käyttöön, etenkin suurissa koneistoissa useiden suotuisien ominaisuuksien ansiosta. Ensimmäiset metaanista syntetisoidut aineet löydettiin 1930-luvulla ns. halogeenihiilivedyt R12 ja R22, joiden ominaisuudet osoittautuivat hyviksi ja ne otettiin laajasti käyttöön. 1990-luvulla niistä luovuttiin, koska epäillyt klooria sisältävien yhdisteiden ympäristöongelmista saivat varmistuksen. Halogeenivetyjen uutena ongelmana on kasvihuonevaikutuksen lisääminen eli ilmakehän lämpeneminen. (Aalto ym. 2012, 102.)

2.10.1 Vaadittavia ominaisuuksia

Kylmäaineet jaotellaan useaan turvallisuusluokkaan palavuutensa ja myrkyllisyytensä mukaan eurooppalaisessa (EN 378-1) normissa. (Aalto 2012, 103.)

Palavuusluokkia ovat:

1. Ilmassa palamattomat
2. Alempi syttymisraja ilmassa on vähintään 3,5 til. %
3. Alempi syttymisraja ilmassa on alle 3,5 til. %

Myrkyllisyysluokat ovat:

- A. Aineet, joiden sallittu työpaikkapitoisuus on yli 400 ppm
- B. Aineet, joille sallitaan työpaikkapitoisuus enintään 400 ppm

2.10.2 Termodynaamiset ominaisuudet

Moolimassa, höyrystymislämpö, ominaislämmöt ja höyrynpaine, eli termodynaamiset ominaisuudet määräävät kylmäaineen käyttäytymisen kiertoprosessissa. Tiheys, viskositeetti, pintajännitys ja lämmönjohtavuus eli ns. kuljetusominaisuudet, vaikuttavat painehäviöön ja lämmönsiirtymiseen. Toivottavia ominaisuuksia ovat:

- Suuri höyrystymislämpö, massavirta, kompressorin ja putkisto saadaan pienemmäksi.
- Pieni painesuhde, puristustyö on pieni ja tulistuminen puristuksessa vähäistä.
- Pieni viskositeetti, kompressorin venttileiden ja putkistojen painehäviöt pienenevät.
- Hyvä lämmönjohtavuus pienen viskositeetin kanssa antaa tehokkaan lämmönsiirron.
- Suuri tilavuustuotto, mahdollistaa pienemmän kompressorin.
- Sopiva höyrynpainealue. Pienessä paineessa tilavuustuotto on huono, joka johtaa suurempaan kompressorin. Suuressa paineessa materiaalien vaatimukset kasvavat.

Lauhtumis- ja höyrystymislämpötilaerojen suurentuessa tulistuminen puristuksessa kasvaa. Mikäli höyrystymislämpötila on matala ja lauhtumislämpötila korkea tarvitaan mahdollisimman vähän tulistuva kylmäaine. (Aalto ym. 2012, 103.)

2.11 Lämpöpumput

Lämpöpumpun tarkoitus on ottaa lämpöenergiaa kylmästä lämmön lähteestä, ja nostaa lämpöenergian lämpötilatasoa, jolloin sitä voidaan hyödyntää lämmittämiseen korkeammassa lämpötilassa. Tätä prosessia voidaan käyttää sekä lämmön talteenotossa, sekä lämmön tuotannossa. Lämmön lähde on tyypillisesti niin alhaisessa lämpötilassa, että sitä ei voida suoraan hyödyntää. Lämmönsiirto perustuu kylmäaineen faasimuutoksiin (neste/höyry).

Tyypillisessä lämpöpumpussa on:

- kompressorin
- kaksi lämmönvaihdinta: höyrystin ja lauhdutin
- kylmäaine, joka kiertää kahden lämmönvaihtimen ja kompressorin läpi suljetussa kierrossa.

Lämpöpumpun hyötysuhdetta kuvataan lämpökertoimella (COP), joka on lämpimään aineeseen luovutetun lämpömäärän ja siirtoon tarvittavan energiamäärän välinen suhde. (Rajagopalan 1995, 155).

3 HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN

3.1 Voimalaitoksen jäähdytyspiiri

Opinnäytetyössäni tarkoituksena oli selvittää olisiko jäähdytyspiirin hukkalämpöä mahdollista hyödyntää lämpöpumpun avulla. Jäähdytyspiiri sijaitsee Iisalmen voimalaitoksella, voimalaitos on niin sanottu vastapainevoimala, eli voimalaitos tuottaa sekä sähköä ja lämpöä, lämpötehon ollessa 30MW ja sähkötehon 15MW.

Voimalaitoksella sijaitsevan jäähdytyspiirin tehtävänä on jäähdyttää seuraavia voimalaitoksen osia; näytekokeskus, syöttövesipumput, tyhjiöpumput, generaattorin ilman jäähdytys, sekä saatto-öljyn jäähdytys. Jäähdytyspiirissä kiertää vesiglykoli seos 50/50 seoksella, virtauksen ollessa noin 83 m³/h. Jäähdytyspiirissä kiertävästä seoksesta voitaisiin hyödyntää noin 770kW seuraavan kaavan avulla

$$P = q_m * c_p * T \quad (24)$$

jossa;

P =teho

q_m =massavirta kg/s

c_p =Vesi-glykoli-seoksen ominaislämpökapasiteetti; 3,21 -10C asteen lämpötilassa.

T = lämpötilan muutos.

Tehtäviini kuului löytää kohde hukkalämmölle, sekä tehdä yksinkertainen PI-kaavio mahdollisen pumpun kytkennälle.

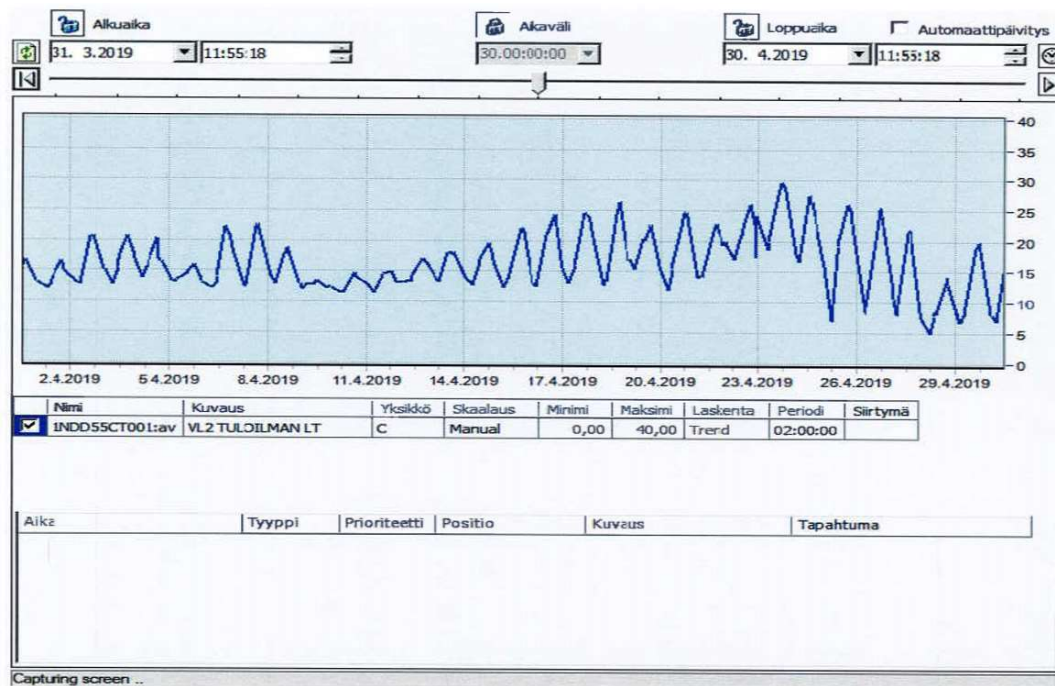
Mikäli lämpöpumpulla hyödynnetään jäähdytyspiirissä syntyvää hukkalämpöä ennen tuloilman patteriostoa, ei saisi jäähdytyspiirin lämpötilaa laskea alle 0°C, sillä tuloilmapatteristo saattaa jäätyä umpeen. Tätä varten pumppuun tulisi asentaa automaatio, joka alentaisi pumpun tehoa tai sammuttaisi pumpun, mikäli jäähdytyspiirin vesi-glykoli-seoksen lämpötila laskisi liian alhaiseksi. Jäähdytyspiirissä kiertävän seoksen lämpötila-arvot sain trendi tiedostoina Iisalmen voimalaitokselta.

3.2 Jäähdytyspiiristä saatava energia

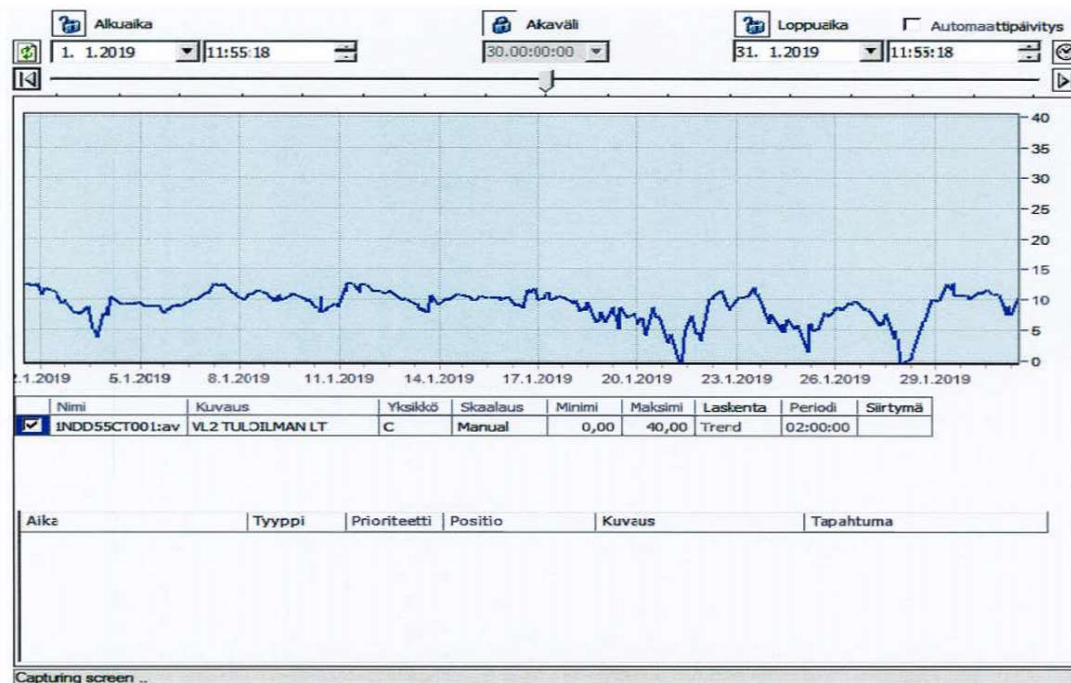
Tärkeimpiä selvitettäviä asioita oli: kuinka paljon energiaa olisi saatavilla jäähdytyspiiristä ja mihin tämän energian voisi käyttää järkevästi. Ensimmäiseksi laskettiin, että jäähdytyspiiristä olisi mahdollista saada n.10C° verran tehoa, eli lämpöpumppu viilentäisi piirissä kiertävää vesi-glykoliseosta 10°C astetta. 83m³/h virtauksella tämä tarkoitti n. 770kW tehoa, kaavalla;

$$P = q_m * c_p * T \quad (25)$$

Jäähdytyspiiriin kuuluvan kattilasalin ilmanlämmittimen rajoitti määrää kuinka paljon jäähdytyspiiriä saisi viilentää. Jäähdytyspiirin täytyy pysyä yli 0°C asteen lämpöisenä, jos hukkalämpö hyödynnettäisiin ennen tuloilmapatteristoa. Tuloilmanlämmitykseen haluttiin myös käyttää mahdollisimman paljon energiaa. Näistä syistä lämpöpumpun otto päätettiin sijoittaa tuloilmanlämmityspatteriston jälkeen. Tämä tarkoittaa, että piirissä kiertävän seoksen lämpötilaan vaikuttaa suuresti ulkolämpötila. Iisalmen voimalaitokselta saaduista kuvaajista, näimme tuloilman lämpötilan. Voidaan olettaa tuloilman lämpötilan olevan lähes sama, kuin vesiglykoli seoksen lämpötila tuloilman lämmittimen jälkeen.



KUVA 5. Tuloilman lämpötila patteriston jälkeen, Huhtikuulta.



KUVA 6. Tuloilman lämpötila patteriston jälkeen, Tammikuulta.

Kuvaajista näimme, että ulkolämpötila vaikuttaa erittäin paljon jäähdytyspiirin lämpötilaan. Jäähdytyspiirin lämpötilan laskiessa lähelle 0°C saattaa ilmetä jäähdytyspiirin jäähdytettävissä kohteissa ongelmia. Lämpöpumpun pienenevä COP-luku jäähdytyspiirin viiletessä saattaisi aiheuttaa myös taloudellisia häviöitä. Tämän takia lämpöpumppuun on hyvä saada automaatio, joka pysäyttäisi pumpun, mikäli jäähdytyspiirin vesiglykoli seoksen lämpötila laskisi tietyn pisteen alle.

3.3 Lämpöpumppu

Opinnäytetyön alkuvaiheessa oltiin yhteydessä useampiin lämpöpumpputoimittajiin, saadaksemme mahdollisimman monta eri näkökulmaa selvitykseen. Yhteistyöhön päädyttiin lopulta selvityksen osalta Calefa Oy:n kanssa.

4 HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN

4.1 Hukkalämmön mahdolliset kohteet

Ensimmäisenä tehtävänä oli löytää hukkalämmölle sopiva kohde. Kohteen suurin kriteeri oli, että lämpöpumpusta saataisiin tuottoisa ja kannattava. Suurimpia ongelmia oli löytää tuottoisa kohde, jossa pumpun COP-luku olisi maltillinen. COP-luvulla tarkoitetaan pumpun lämmön tuoton suhdetta sen kuluttamaan sähkömäärään.

Yksi tärkeimmistä selvityksen aiheista olikin selvittää mihin jäähdytyspiirin hukkalämpö voitaisiin hyödyntää. Kohteen tulisi olla tarpeeksi matalassa lämpötilassa, jotta lämpöpumpun COP luku pysyi korkeana, jolloin pumpun kannattavuus kasvaisi. Projektin alussa mietittiin seuraavia kohteita:

- Kaukolämmön paluuveden lämmitys
- Tuloilman lämmitys
- Omakäyttöveden lämmitys
- Patteriverkosto
- Savukaasupesurin viilentäminen
- Pihan sulatus
- Polttoaineen kuivaus

Lopulta päädyimme yhdessä käyttöpäällikön ja Calefa Oy yhteyshenkilön kanssa tulokseen, että hukkalämpö olisi järkevintä hyödyntää kaukolämmöntuotannossa kaukolämpöverkon paluuveden esilämmitykseen.

4.1.1 Palamisilman esilämmitys

Palamisilman esilämmitys oli yksi ensimmäisistä kohteista, joita aloimme selvittämään. Kävi kuitenkin ilmi, että palamisilma otetaan kattilahallista, joka jo nyt lämmitetään jäähdytyspiirillä. Kattilahallissa oli jopa kovilla pakkasilla muutenkin kuuma, ja sen lämmittäminen olisi aiheuttanut ongelmia hallissa sijaitseviin elektronisiin laitteisiin. Palamisilman lämmitys olisi lisännyt kattilan tehoa ja näin ollen lisännyt kaukolämmön ja sähkön tuotantoa, myös pumpun COP olisi pysynyt maltillisena, sillä ilmaa ei olisi tarvinnut lämmittää paljoa. Tuloilman lämmityksestä olisi kuitenkin syntynyt liikaa haittoja, joten tästä ideasta luovuttiin pian.



KUVA 7. Tuloilman lämmityspatteristo

4.1.2 Omakäyttövesi ja patteriverkosto

Seuraavana kohteena mietimme hukkalämmön hyödyntämistä omakäyttöveden lämmityksessä ja patteriverkostossa. Näihin kohteisiin olisi riittänyt pienempi loppulämpötila, jolloin pumpun COP-luku pysyisi maltillisena. Haasteeksi muodostui kuitenkin omakäyttöveden ja patteriverkoston epämääräinen ja vähäinen käyttö, jolloin 770kW tehoa ei olisi voitu hyödyntää tehokkaasti.

4.1.3 Voimalaitoksen piha-alueen sulana pito

Yksi selvityksen alainen kohde oli voimalaitoksen piha-alueen sulana pito, tähän olisi riittänyt erittäin pienet lämpötilat, mutta olisi vaatinut mittavia investointeja, sekä hyödyt olisivat olleet lähinnä mukavuuspainotteisia. Tästä kohteesta luovuttiin sen huonon kannattavuuden takia.

4.1.4 Polttoaineen kuivaus

Yksi mahdollisista hukkalämmön hyödyntämiskohteista olisi ollut myös polttoaineen kuivaus. Tällä olisi saavutettu parempi hyöty polttoaineesta sitä polttaessa, joka taas olisi johtanut kattilan parempaan hyötysuhteeseen. Tämän kohteen ongelmana oli siihen tarvittavat suuret investoinnit. Polttoaineelle olisi pitänyt rakentaa suurehko patteristo tai erillinen kuljetin, jossa polttoaine kuivattaisiin. Savukaasupesurin lämmöntalteenoton teho olisi myös pienentynyt kuivemman polttoaineen seurauksena.

4.1.5 Hyödyntäminen kaukolämmön tuotannossa

Hukkalämmön kannattavin käyttökohde oli sen hyödyntäminen kaukolämmöntuotannossa. Hyödyntäminen olisi mahdollista kaukolämpöveden paluu puolella, ennen tai jälkeen savukaasupesurin lämmönvaihdinta. Haasteeksi tässä syntyi kaukolämpöveden korkea lämpötila, jolloin pumpun COP-luku laskee, koska pumpun täytyisi tehdä noin 65 °C asteista lämpöä. Kaukolämpövesi on n. 50 °C astetta ennen pesuria, jolloin pumpun pitäisi nostaa jäähdytyspiiristä syntynyt hukkalämpö n. 60 °C asteeseen. Hukkalämmön hyödyntäminen ennen savukaasupesuria heikentäisi savukaasupesurin lämmöntalteenoton hyötysuhdetta. Kaukolämpöverkossa pitäisi siis hukkalämpö hyödyntää savukaasupesurin lämmönvaihtimen jälkeen, jolloin kaukolämpöveden lämpötila on noin 60 °C astetta. Hukkalämmön kohteen lämpötilan ollessa 60 °C astetta täytyisi pumpulla tehdä vähintään 65 °C asteista lämpöä, että lämpö saataisiin siirrettyä verkkoon maltillisella lämmönvaihtimella ja putkituksella. Suurimmaksi haasteeksi tässä ratkaisussa tuli pumpun COP-luku, joka väistämättä huononee lämpötilaerojen ollessa suuria.

Toinen mahdollisuus hyödyntää hukkalämpö kaukolämpöverkossa olisi tehdä, ohituskanava pesurin vaihtimen yli kylmemmälle kaukolämpövedelle. Tässä ratkaisussa lämpö saataisiin hyödynnettyä COP-luvun jäädessä maltillisemmaksi. Tällä ratkaisulla säästyttyisiin suuremmilta putkisto töiltä. Ongelmaksi, syntyi kuitenkin savukaasupesurin käyttäytyminen, sillä mikäli pesurin lämmönvaihtimelle menevän veden määrä pienenee, voi savukaasupesurin hyötysuhde heikentyä ja pahimmillaan pesurin toiminta häiriintyä.

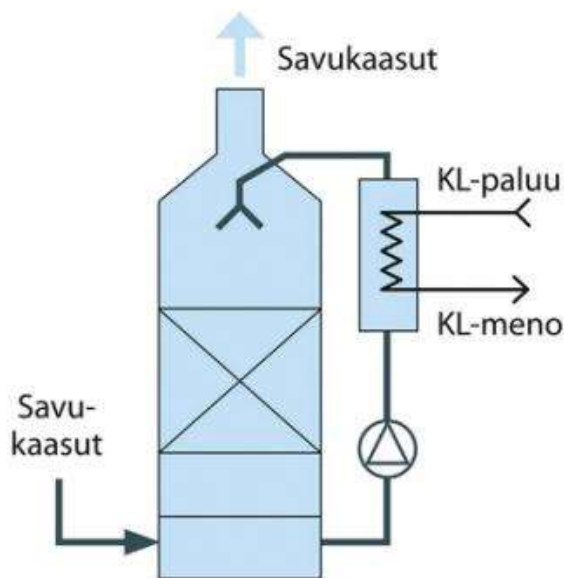
5 SAVUKAASUPESURIN TUOMAT HAASTEET LÄMPÖPUMPPUKYTKENNÄLLE

5.1 Savukaasupesuri

Savukaasupesuri on laite, jonka tarkoituksena oli alun perin savukaasujen hiukkaspäästöjen vähentäminen. Nykyään pesurin hyödyntämisen painopiste on siirtynyt enemmän savukaasuissa olevan hukkalämmön talteenottoon. Iisalmen voimalaitoksen savukaasupesurikin on investoitu lämmön talteenottoa varten ja toissijaisena tavoitteena on ollut päästöjen vähentäminen.

Savukaasupesurin hiukkaspäästöjen suodatus ja savukaasuissa olevan lämmön hyödyntäminen perustuu kahteen peräkkäiseen prosessointivaiheeseen, savukaasujen pesuvaiheeseen ja lauhduttamiseen. Savukaasujen pesuvaiheessa savukaasusta poistetaan pääosa savukaasujen pienhiukkasista, ja samalla savukaasut lauhtuvat niin sanottuun märkätilaan, joka on noin 60-70°C astetta. Pesuvaiheesta savukaasut johdetaan lauhduttimeen, jolloin savukaasut luovuttavat lämpöenergiaansa, vastavirtaan suihkutettavaan kiertoveteen. Lauhtuminen tapahtuu täytekappalekerroksissa, joita on yksi tai useampia. Nämä kerroksen toimivat prosessin lämmönsiirtopintoina. Pesurissa kiertävä kiertovesi johdetaan lämmön vaihtimelle, jolla itse lämpö siirretään haluttuun kohteeseen. (Järvenreuna, J. 2014)

Savukaasupesurin lämmön talteenoton kannalta on olennaista saavuttaa kastepistettä alempi lämpötila. Kastepiste on lämpötila, jossa savukaasujen suhteellinen kosteus on 100%. Mikäli savukaasut jäähtyvät alle kastepisteen, alkaa savukaasuissa oleva vesihöyry tiivistyä vedeksi. Veden eri faasimuutosten yhteydessä entalpiamuutokset ovat huomattavasti suurempia kuin yhden faasin sisällä. Veden höyrystyessä ja tiivistyessä lämpöenergian siirtymät ovat suurempia. Savukaasuissa olevan vesihöyryn tiivistyessä, vapautuva lämpöenergia siirtyy tehokkaammin kiertoveteen ja sitä kautta lämmönvaihtimeen. Mikäli pesurissa savukaasut eivät lauhdu alle kastepisteen, romahtaa pesurin lämmöntalteenottokyky ja pesuri alkaa toimia pahimmillaan haihduttimena.



KUVA 8. Savukaasupesurin yksinkertainen PI-kaavio. (Järvenreuna, J. 2014)

5.2 Savukaasupesurin lämmönvaihtimen ylityksen haasteet

Savukaasupesurin lämmönvaihtimen yli tehtävä kanava lämpöpumpulle tarkoittaisi pienempää virtausmäärää savukaasupesurin lämmönvaihtimella. Kun virtausmäärä pienenee lämmönvaihtimella, pienenee myös lämmönvaihtimen lämmönsiirtokyky. Tämä tarkoittaa, että savukaasupesuri ei välttämättä pysty luovuttamaan kaikkea lämpöä kaukolämpöverkkoon, jolloin pesurissa kiertävän kiertoveden lämpötila kasvaisi. Kiertoveden lämpötilan kasvaessa yli savukaasujen kastepisteen, romahtaa savukaasupesurin lämmöntalteenottokyky. Savukaasujen loppulämpötilan kasvaessa heikkenee savukaasupesurin hyötysuhde, tämä on todennäköisempi tapahtuma virtauksen heikkenemisen takia.

Tästä haasteesta tuli tämän selvityksen kannalta olennainen. Mikäli lämpöpumpusta saatu lämpö johdetaan omalle kanavalle savukaasupesurin lämmönvaihtimen yli, saattaa pesurin toiminta häiriintyä oleellisesti. Pumpulla tuotettu lämpö voitaisiin toisaalta myös hyödyntää pesurin lämmönvaihtimen jälkeen, tämä taas tarkoittaisi pumpun huonompaa COP-lukua, sekä suurempaa putkitustyötä, joka johtaisi suurempiin investointikustannuksiin.

6 TULOKSET

Selvitykseen tarvittavien tietojen puutteessa en pystynyt selvittämään, häiriintyykö savukaasupesuri oleellisesti, mikäli lämpöpumpulla tuotettu lämpö ohjattaisiin omaan kanavaan pesurin yli. Epävarmuuden takia, käsittelen tässä opinnäytetyössä kummatkin mahdolliset ratkaisut, eli savukaasupesurin ylittämisen ja savukaasupesurin jälkeisen kaukolämpöveden lämmityksen.

6.1 Lämpöpumppu

Calefa Oy:ltä sain kustannusarvion lämpöpumpulle, jonka teho on 777 kW, pumpun toimintalämpötilat ovat 10/20 talteenottopuolella ja 65/60 luovutuspuolella. Lämpöpumppu toimisi ruuvikompressorilla ja käyttäisi kylmäaineena R134A:ta.

Lämpöpumppu jolle kustannusarvio laskettiin, ottaisi jäähdytyspiiristä n. 500 kW verran lämpöä, eli n. 8 °C verran. Kokonaisuudessaan kaukolämpöverkkoon hyödynnettäisiin kuitenkin n. 770 kW verran energiaa.

6.1.1 Ruuvikompressor

Calefa Oy:n ehdottamassa lämpöpumpussa olisi yksiruuvinen ruuvikompressor. Ruuvikompressorin etuja on sen venttiilittömyys ja yksinkertaisuus. Yksiruuvisessa kompressorissa sähkömoottori pyörittää ruuvia ja puristustila erotetaan ruuvin molemmiin puolin sijaitsevilla sakaramaisilla sulkupyörillä. Sulkupyöriin kohdistuvat voimat ovat pieniä ja ne voidaan valmistaa esim. muovikomposiiteista. Ruuvikompressorit ovat yleensä ns. öljyruiskutteisia, eli sylinteriin ruiskutetaan runsaasti öljyä, tällä saavutetaan monia etuja. Öljykalvo toimii kompressorissa tiivisteinä, jonka ansiosta voidaan kierrosnopeutta alentaa, tämä taas ehkäisee vielä lisää kompressorin kulumista. Öljyruiskutteen kompressorin vaatii kuitenkin tehokkaan öljynsuodattimen, jotta öljy saadaan eroteltua kylmäaineesta. (Aalto 2012, 148.)

6.1.2 Kylmäaine R134a

Kylmäaine R134a on etaanijohdannainen ja ainoa käytössä oleva ei seos. Sillä on tavallisesti korvattu käytöstä poistettua R12:ta. Kylmäaineena R134a on palamatonta, myrkytöntä eikä se sisällä klooria. Aineella on kuitenkin selviä kasviuonhaittoja johtuen sen kohtalaisen suuresta infrapunasäteilyn absorptiosta. Muihin kylmäaineisiin verrattuna R134a:n tilavuustuotto on selvästi pienempi, joten se tarvitsee suuremman kompressorin. (Aalto 2012, 111.)

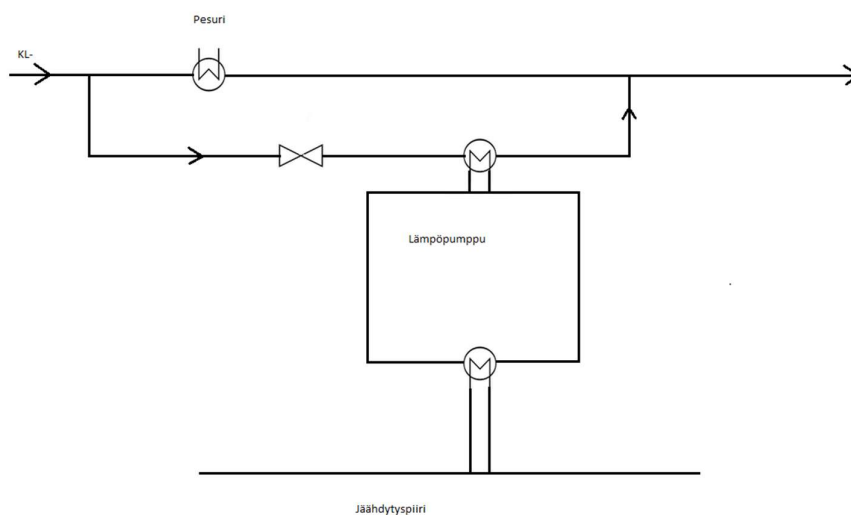
Kloorittomana ja voimakkaasti polaarisenä R134a ei liukene mineraaliöljyihin, koska ne eivät ole riittävän polaarisia. R134a:n riittävä sekoittuvuus saavutetaan vain kahdella öljytyypillä: polyalkyleeniglykooleilla ja estereillä. (Aalto 2012, 111.)

6.2 Pesurin ylittäminen

Ratkaisussa, jossa lämpöpumpun tuottama lämpö luovutettaisiin savukaasupesurin lämmönvaihtimen yli, olisi kaukoveden lämpötila keskimäärin n. 50 °C.

6.2.1 PI-Kaavio

Savukaasupesurin yli vedettävä linja tarvitsisi seuraavanlaisen kytkennän.

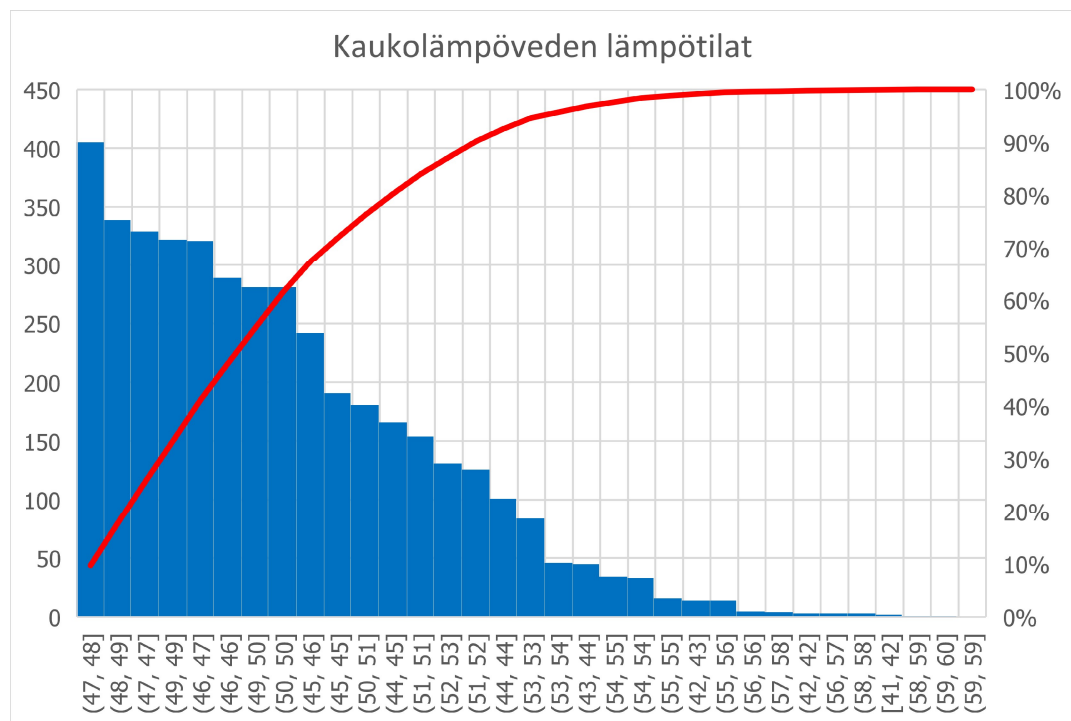


KUVA 9. Savukaasupesurin yli tehty linja johon lämpöpumppu kytkettäisiin.

Kyseisessä kytkennässä olisi yksinkertainen venttiili, jolla säädeltäisiin pumpulle menevän veden määrää.

6.2.2 Kaukolämpöveden lämpötila ennen pesuria

Käytettävissä oli Excel-tiedosto Iisalmen voimalaitoksen kaukolämpöveden lämpötilamittauksista talvelta 2016-2017. Mittaukset ovat tunnin välein suoritettuja. Näistä tiedoista pystyttiin laskemaan kaukolämpöveden keskimääräiseksi lämpötilaksi 48 °C. Näistä mittauksista tehtiin myös Parento-diagrammin, mistä näemme prosentuaalisesti yleisimmät lämpötilat kaukolämpövedelle.



KUVA 10. Parento-diagrammi kaukolämpöveden lämpötiloista.

Diagrammissa siniset pylväät edustavat eri lämpötiloja, jotka näkyvät pylväiden alapuolella, pylvään koko kertoo, kuinka usein tämä lämpötila on toistunut mittausjaksolla. esim. yleisin lämpötila 47-48 °C on toistunut n. 400 kertaa. Punainen viiva näyttää kumulatiivisen prosenttiosuuden tapahtumien kokonaismäärästä, prosentit näkyvät oikealla.

Diagrammista näemme, että n. 60% ajasta kaukolämpöveden lämpötila on ollut 46 °C – 50 °C. Näemme myös, että lämpötilat yli 50 °C ovat suhteellisen harvassa, ja 90% ajasta lämpötila on alle 53 °C.

Nämä lämpötilatiedot ovat tärkeitä, sillä niillä voidaan laskea tarvittava ohitusvesimäärä savukaasupesurin lämmönvaihtimen yli.

6.2.3 Tarvittava vesimäärä

Iisalmen voimalaitoksella palaavan kaukolämpöveden massavirta on keskimäärin 150 kg/s. Kaukolämpöveden massavirta on lähinnä olennainen, mikäli savukaasupesurin yli päätetään ottaa oma kanava, johon lämpöpumpulla jäähdytyspiiristä siirretty energia luovutetaan.

Mikäli lämpö päätetään luovuttaa kaukolämpöverkkoon, niin että savukaasupesurin lämmönvaihtimen yli tehdään oma linja, jossa virtaava vesi on n. 50 °C ja lämpöpumppu tuottaisi 60 °C lämpöä. Tarvittaisiin ohituskanavaan virtauksen massavirraksi 18,5 kg/s, jotta pumpulla tuotettu 770 kW energia saataisiin siirrettyä virtaavaan kaukolämpöveeseen. Tämä olisi noin 12% keskimääräisestä kokonaisvirtauksesta. Tarvittava virtaus energian siirtämiseksi voidaan laskea kääntämällä kaava

$$P = q_m * c_p * \Delta T \quad (26)$$

muotoon:

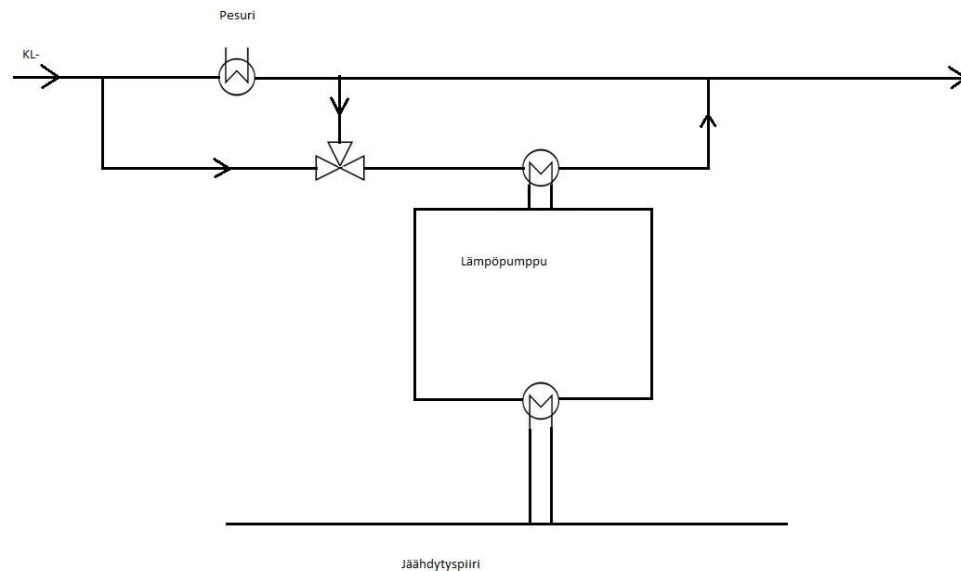
$$q_m = \frac{P}{c_p * (T_J - T_e)} \quad (27)$$

6.3 Kaukolämpöverkkoon siirtäminen pesurin jälkeen

Kaukolämpövesi savukaasupesurin jälkeen on huomattavasti lämpimämpää kuin ennen savukaasupesuriapesuria, mikäli savukaasupesurin toiminta häiriintyisi oleellisesti ottamalla osa veden massavirtauksesta, täytyisi hukkalämpö hyödyntää savukaasupesurin jälkeen. Tämä ratkaisu olisi vähemmän kannattava, sillä se vaatii suuremmat investoinnit, sekä pumpun COP-luku olisi pienempi.

6.3.1 PI-Kaavio

Savukaasupesurin jälkeen hyödynnettävä hukkalämpö vaatisi seuraavanlaisen kytkennän.

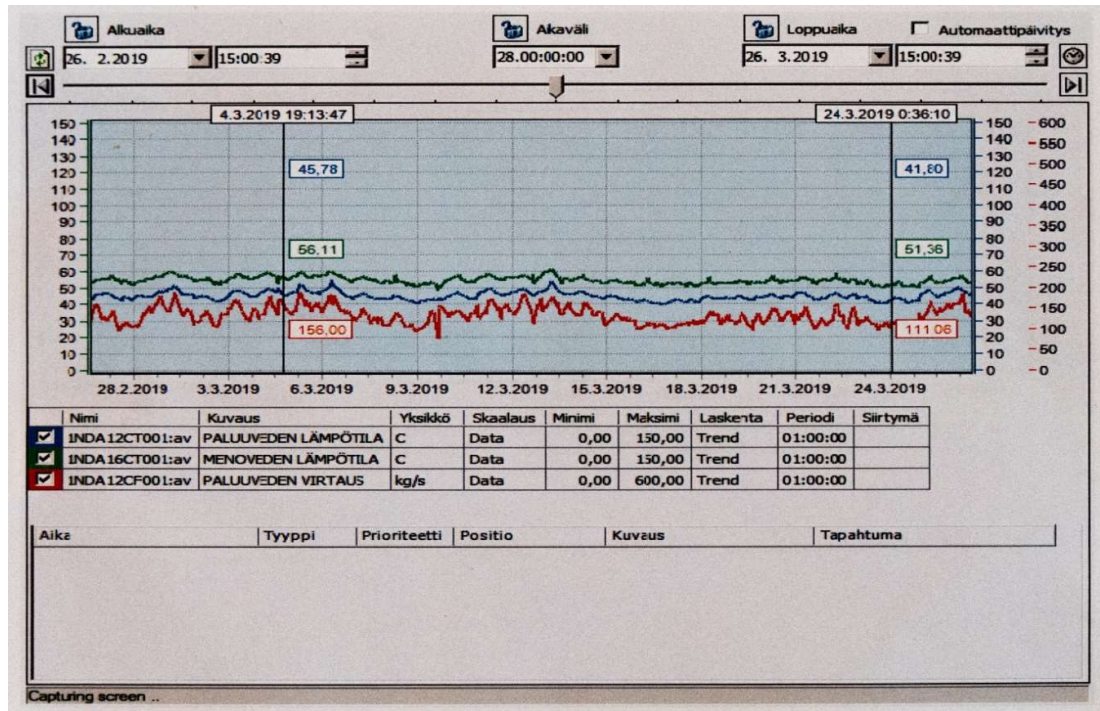


KUVA 11. PI-kaavio savukaasupesurin jälkeiselle kytkennälle

Mikäli hukkalämpö olisi tarkoitus käyttää kaukolämpöverkossa savukaasupesurin jälkeen olisi, myös viisasta rakentaa erillinen linja pesurin ylitse, millä voidaan säädellä pumpulle menevän veden lämpötilaa.

6.3.2 Kaukolämpöveden lämpötila savukaasupesurin jälkeen

Kaukolämpöveden lämpötilan, sain Iisalmen voimalaitokselta trendi tiedostoina, nämä tiedostot eivät ole yhtä kattavia tai tarkkoja verrattuna Excel tiedostoon, jossa lämpötilat on mitattu tunnin välein. Näen kuitenkin näistä tiedoista tarvittavat arvot, jotta voin tehdä tarvittavat laskut.



KUVA 12. Voimalaitokselta saatu trendi tiedosto, jossa näkyy paluuveden lämpötilat ennen/jälkeen savukaasupesurin, sekä veden massavirta.

Kyseisessä kuvaajassa punainen käyrä on veden massavirta, vihreä käyrä on kaukolämpöveden lämpötila savukaasupesurin jälkeen, ja sininen käyrä on paluuveden lämpötila ennen pesuria.

Kyseisestä kuvaajasta näen, että kaukolämpövesi savukaasupesurin jälkeen on korkeimmillaan n. 60 °C. Lämpöpumpulle vietävä vesimäärä olisi mitoitettava niin, että lämpöpumppu pystyisi aina luovuttamaan jäähdytyspiiristä saadun energiamäärän kaukolämpövedeen. Tarvittava virtaus lämpöpumpulle olisi mitoitettava 60 °C mukaan. Tämä tarkoittaisi, että lämpöpumpun täytyisi nostaa lämpötila 15 °C asteesta 65 °C asteeseen. Tämä tarkoittaa pienempää COP-lukua sekä suurempaa putkitustyötä lämpötilaerojen ollessa pieniä kaukolämpöveden ja pumpun luovutuslämpötilan välillä. Kaukolämpöveden ollessa 60 °C ja pumpun nostaessa lämmön 65 °C olisi tarvittava massavirta lämmönvaihtimella n. 37 kg/s.

6.4 Takaisinmaksuaika

Näistä kahdesta ratkaisusta huomattavasti taloudellisempi olisi savukaasupesurin ylitys, mihin hukkalämpö siirrettäisiin lämpöpumpun avulla. Mikäli savukaasupesuri häiriintyisi oleellisesti tästä ratkaisusta, olisi ainoa vaihtoehto hyödyntää saatu lämpö savukaasupesurin jälkeen. Kustannukset putki-

työlle olisivat n. 25000€-30000€ enemmän, mikäli hukkalämpö hyödynnettäisiin pesurin jälkeen, verrattuna savukaasupesurin ylitykseen tehtäviin putkituksiin. Hukkalämmön hyödyntäminen savukaasupesurin yli rakennettuun linjaan mahdollistaisi myös lämpöpumpun pienemmän COP-luvun.

Nämä erot yhdessä vaikuttavat oleellisesti takaisinmaksuaikaan ja kannattavuuslaskennan sisäiseen korkoon.

6.4.1 Takaisinmaksuajan laskeminen

Voimalaitoksen jäähdytyspiiri on aina käytössä, voimalaitoksen ollessa toiminnassa. Vuosittaiset käyttötunnit voidaan laskea lämpöpumpulle olevan 8 kk eli 5760 h. Koska jäähdytyspiiri toimii jatkuvasti, on energiaa saatavilla aina voimalaitoksen ollessa käytössä. Näistä syistä saadaan lämpöpumpulle suhteellisen korkea kohtaavuuskerroin, tässä työssä kohtaavuuskerroin määriteltiin 80%. Käytännössä pumppu on pois päältä ainoastaan huoltojen aikana ja kaikista kylmimpinä aikoina, mikäli vesi-glykoli-seos jäähtyy liikaa.

Takaisinmaksuajan laskemisessa otin myös huomioon 1,2% vuosittaisen inflaation, 1,5% vuosittaisen sähkön hinnan muutoksen, 1,5% vuosittaisen polttoaineen hinnan muutoksen

Takaisinmaksuaikaa tärkeämpi tieto on sijoituksen sisäinen korko. Sisäisen koron laskentaan tarvitsin vuosittaiset tuotot nykyarvoilla, sekä alku investointikustannuksen.

6.4.2 Savukaasupesurin ylittäminen

Tässä ratkaisussa voimme olettaa lämpöpumpun COP-luvun hiukan nousevan, sillä pumpun täytyy nostaa lämpötila 60 °C asteeseen 65°C asteen sijaan. Tätä mahdollista COP-luvun nousua ei kuitenkaan ole tässä laskussa huomioitu, sillä jäähdytyspiirin lämpötila vaikuttaa myös suuresti pumpun COP-lukuun.

6.4.3 Lämmön luovuttaminen kaukolämpölinjaan savukaasupesurin jälkeen.

Mikäli lämpö aiottaisiin luovuttaa kaukolämpölinjaan, olisi investointikustannukset suuremmat joh-tuen suuremmista putkitöistä. Pumpun luovuttaman lämmön ja kaukolämpölinjan lämpötilaero tar-koittaisi käytännössä suurempaa lämmönvaihdinta ja tarvittava virtaus kasvaisi.

6.5 Yhteenveto

Tuloksista huomataan, että lämpöpumppu olisi huomattavasti kannattavampi investointi, mikäli pumpulla tuotettu lämpö voitaisiin luovuttaa savukaasupesurin yli tehdylle erilliselle linjalle. Tässä ratkaisussa pumpun COP-luku nousisi hiukan ja alkuinvestointi olisi maltillisempi.

Tässä opinnäytetyössä tehdyt laskelmat ovat suuntaa antavia ja tarkempien tulosten saaminen vaatii tarkempaa selvitystä ja mittaustietoa.

Lämpöpumpulla on mahdollista hyödyntää voimalaitoksilla syntyvää hukkalämpöä kaukolämmöntuotannossa. Ongelmaksi syntyy yleensä suuret lämpötilaerot hukkalämmön ja kaukolämpöverkon paluulämpötiloissa. Tulevaisuudessa polttoaineen hinnat saattavat kuitenkin nousta, yleisen kustannustason ja nousevan biopolttoaineiden kysynnän vuoksi. Takaisinmaksuaikaan ja sisäiseen korkoon vaikuttaakin oleellisesti vallitseva sähkön ja polttoaineen hinta.

Lämpöpumpun kytkeminen suoraan kaukolämmön paluuveteen pesurin jälkeen olisi nykytilanteessa huomattavasti kannattamattomampi, mutta jos käytettäville polttoaineille lisätään veroja, tai polttoaineiden hinnat nousevat suhteessa enemmän sähkön hintaan nähden, tulee tulevaisuudessa lämpöpumppu olemaan kannattava investointi kaukolämmöntuotannossa.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

AALTO Esa, ALIJOKI Tapio, HAKALA Pertti, HIRVELÄ Aulis, KAAPOLA Esko, MENTULA Jukka, SEINELÄ Antti. 2012. Kylmätekniikka 4. painos. Helsinki: Suomen kylmäyhdistys.

PERTTULA Jarmo. 2000. Energiatekniikka. Porvoo: WSOY.

RAJAGOPALAN Venkatachari. 1995. Sähkölämpötekniikat Periaatteet ja sovellukset. Espoo: Otatieto.

JÄRVENREUNA, J. 2014. Savukaasupesuri parantaa lämpöyhtiön kannattavuutta. [Viitattu: 09.05.2019] Saatavissa: <http://www.promaintlehti.fi/Tuotantotehokkuuden-kehittaminen/Savukaasupesuriparantaa-lampoyhtion-kannattavuutta>