

Oskari Väänänen

TASASUUNTAAJAMUUNTAJIEN HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN

TASASUUNTAAJAMUUNTAJIEN HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN

Oskari Väänänen
Opinnäytetyö
Syksy 2023
Energia- ja ympäristötekniikka
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energia- ja ympäristötekniikka

Tekijä: Oskari Väänänen

Opinnäytetyön nimi: Tasasuuntaajamuuntajien hukkalämmön hyödyntäminen

Työn ohjaaja(t): Jukka Ylikunnari, Aki Haasala

Työn valmistuslukukausi ja -vuosi: Syksy 2023

Sivumäärä: 34 sivua

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin Boliden Kokkolan elektrolyysin tasasuuntaajamuuntajilta saatavan hukkalämmön lämpötilan nostamisen kannattavuutta lämpöpumppujen avulla. Työssä tarkasteltiin, millaiset lämpöpumput olisivat tarpeen hukkalämmön hyödyntämisen tehostamiseksi kahdessa eri tilanteessa. Lisäksi suoritettiin kannattavuuslaskelmat lämpöpumpuille, mukaan lukien niiden takaisinmaksuaika.

Työ aloitettiin selvittämällä hankittavat lämpöpumput ja näiden perusteella selvitettiin kaukolämmityksen ostotarpeen väheneminen. Sähkön- ja kaukolämmöhintojen kautta laskettiin saatu kuu-kausittainen säästö, josta arvioitiin takaisinmaksuaika lämpöpumppujen hankinnalle ottamalla myös huomioon muut projektiin menevät arvioidut kulut.

Työssä käytettiin apuna verkkolähteitä, ilmatieteen laitoksen säädataa, sähköpostikeskusteluja sekä Oilonin lämpöpumpun valinta ohjelmaa.

Asiasanat: Hukkalämpö, lämpöpumppu, kannattavuus

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Energytechnology

Author: Oskari Väänänen

Title of thesis: Utilization of Waste Heat from Rectifier Transformers

Supervisors: Jukka Ylikunnari, Aki Haasala

Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2023

Number of pages: 34 pages

This thesis investigated the feasibility of raising the temperature of waste heat from Boliden Kokkola's electrolysis rectifier transformers using heat pumps. The study examined the types of heat pumps needed to enhance the utilization of waste heat in two different scenarios. Additionally, profitability calculations were performed for the heat pumps, including their payback periods.

The work began by identifying the heat pumps to be acquired, and based on these, the reduction in the need for district heating purchases was determined. Through the prices of electricity and district heating, the monthly savings were calculated, from which the payback period for the acquisition of heat pumps was estimated, taking into account other estimated costs associated with the project.

Various online sources, weather data from the Finnish Meteorological Institute, email discussions, and Oilon's heat pump selection program were utilized in the study.

Keywords: Wasteheat, heatpump, payback time

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

| | |
|--------------------|-----------------------------|
| COP | Lämpökerroin |
| C_p | Ominaislämpökapasiteetti |
| P_{tod} | Todellinen teho |
| P_{kok} | Kokonaishäviöt |
| Q | Lämpömäärä |
| Q_v | Tilavuusvirtaama |
| η_{ls} | Lämmönsiirtimeen hyötysuhde |
| η_{m} | Muuntajan hyötysuhde |
| ρ | Tiheys |
| ΔT | Lämpötilaero |

SISÄLLYS

| | |
|--|----|
| KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY | 5 |
| 1 JOHDANTO | 8 |
| 2 TILAAJAN ESITTELY | 9 |
| 2.1 Boliden AB..... | 9 |
| 2.2 Boliden Kokkola..... | 9 |
| 3 TYÖN LÄHTÖKOHDAT | 10 |
| 3.1 Kaukolämpö | 11 |
| 3.2 Kokkolan Energia | 12 |
| 4 LÄMPÖPUMPUT | 13 |
| 4.1 Lämpökerroin | 13 |
| 4.2 Kylmäaineet..... | 14 |
| 4.2.1 R1233zd..... | 14 |
| 4.2.2 R1234ze..... | 15 |
| 5 LÄMPÖPUMPUN VALINTA..... | 17 |
| 5.1 Oilon Selection Tool | 17 |
| 5.2 Sopivan kylmäaineen valinta lämpöpumppuun | 18 |
| 5.3 Lämpöpumppuratkaisu | 19 |
| 6 HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN KAUKOLÄMMÖSSÄ..... | 21 |
| 6.1 Lähtötilanne lämmöntalteenotossa..... | 21 |
| 6.2 Hukkalämmön tuonti lämmitysverkostoon | 22 |
| 6.3 Lämmitysverkoston kytkentä | 22 |
| 6.4 Lämmönsiirtimeltä saatava todellinen teho ja virtaama | 23 |
| 6.5 Kaukolämmön menoveden lämpötila ulkolämpötilan funktiona | 24 |
| 6.6 Lämpöpumpun toiminta | 25 |
| 6.6.1 Lämpöpumpun sähköenergian tarve..... | 26 |
| 6.6.2 Lämpöpumpusta saatu lämpöenergia | 27 |
| 7 KANNATTAVUUSLASKENTA..... | 28 |
| 7.1 Lämpöpumpun sähköenergian ostosta tulevat kustannukset | 28 |
| 7.2 Hankinta- ja asennuskustannukset..... | 29 |
| 7.3 Ostoenergian säästöt | 29 |
| 7.4 Takaisinmaksuaika..... | 30 |

| | | |
|---|------------------|----|
| 8 | YHTEENVETO | 32 |
| | LÄHTEET | 33 |

1 JOHDANTO

Energiatehokkuuden merkitys korostuu entisestään, kun tarkastellaan nykypäivänä yleistä suuntausta kohti kestävämpää teollisuutta. Kuten mainitsit, monet yritykset ovat alkaneet panostaa hukkaenergian talteenottoon ja sen hyödyntämiseen omassa toiminnassaan. Euroopan Unionin ja Suomen valtion antamat suuntaviivat sekä kannustimet vihreään siirtymään ovat sysänneet teollisuutta etsimään innovatiivisia ratkaisuja energiankulutuksen optimoimiseksi.

Tässä kestävä kehityksen ilmapiiressä on tullut selväksi, että energiatehokkuus ei ole vain yrityksille taloudellinen säästökohde, vaan myös keskeinen osa vastuullista liiketoimintaa. Yritysten toimissa korostuvat yhä enemmän paitsi kustannustehokkuus myös yhteiskuntavastuu ja ympäristönäkökohdat. Hukkaenergian talteenotto ei ole ainoastaan tapa parantaa liiketoiminnan kannattavuutta, vaan myös konkreettinen askel kohti kestävä kehityksen tavoitteita.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on syventyä sinkintuotannon elektrolyysiprosessin tasasuuntaajamuuntajilta peräisin olevan hukkalämmön hyödyntämiseen kaukolämmössä. On kuitenkin havaittu, että suoraan tasasuuntaajamuuntajien lämmönsiirtimiltä peräisin oleva hukkalämpö on liian matalassa lämpötilassa tehokkaaseen hyödyntämiseen. Siksi tässä tutkimuksessa keskitytään arvioimaan lämpöpumpun hankinnan kannattavuutta, jonka avulla voidaan nostaa hukkalämmön lämpötilaa ja siten kasvattaa sen hyödyntämismahdollisuuksia.

2 TILAAJAN ESITTELY

2.1 Boliden AB

Boliden on ruotsalainen metallialan yritys, minkä päätoimintaan kuuluu kaivostoiminta ja sulattotoiminta. Boliden tuottaa kuparia, sinkkiä, lyijyä, kultaa, nikkeliä ja hopeaa. Näiden metallien lisäksi Bolidenilla tuotetaan myös rikkihappoa, minkä vuotuinen tuotantokapasiteetti on noin 1,7 miljoonaa tonnia. Sivutuotteina prosesseissa syntyy mm. kuparisulfaattia, sinkkiklinkkeriä ja rautahiekkaa. Boliden konserni toimii tällä hetkellä neljässä eri valtiossa, jotka ovat Ruotsi, Suomi, Norja ja Irlanti. Suomessa Bolidenin toimipisteistä sijaitsevat Kevitsan kaivos ja Harjavallan sekä Kokkolan sulattamot. (1).

2.2 Boliden Kokkola

Boliden Kokkola on Euroopan toiseksi suurin sinkkitehdas, joka valmistaa noin 40 erilaista sinkkiä tuotetta. Sinkintuotantokapasiteetti on 315 000 tonnia ja sinkin lisäksi vuonna 2021 rikkihappoa tuotettiin 320 000 tonnia. Boliden Kokkola työllistää noin 560 henkilöä ja vuonna 2021 liikevaihto oli 254,5 miljoonaa euroa. (2).

3 TYÖN LÄHTÖKOHDAT

Boliden Kokkola Oy elektrolyysi käyttää tasasähköä sinkin tuotantoon. Elektrolyysille tuleva vaihtosähkö on muutettava tasasähköksi ja tämä tapahtuu neljällä tasasuuntaajamuuntajalla, jotka on sijoitettu elektrolyysin tuotantohallin viereen. Kuvassa 1 näkyy yksi neljästä tasasuuntaajamuuntajasta.

Tasasuuntaajamuuntajissa virtaa jäähdytysöljy, josta olisi nimellistehollisesti otettavissa 265 kW verran hukkaenergiaa talteen lämpönä yhtä tasasuuntaajamuuntajaa kohti, eli yhteensä 1,06 MW. Jäähdytysöljystä siirretään hukkalämpö talteen lämmittämällä vettä 47 °C:ksi. Tälle lämpötilalle on haasteellista löytää suoraa käyttökohdetta, jolloin tulee tarpeelliseksi käyttää lämpötilan nostamiseen lämpöpumppua.

Lämpö on tarkoitus ottaa talteen tasasuuntaajamuuntajilta Hitachin suunnitelemalla lämmönsiirtimellä, joka asennetaan jokaiseen tasasuuntaajamuuntajaan. Muuntajilta hyödyksi saatu hukkalämpö siirretään lämpöpumpuille, jossa lämpötila nostetaan hieman korkeammaksi kuin Bolidenin tehtaalle tuleva kaukolämpöveden lämpötila.

Boliden olisi valmis investoimaan aluksi lämmöntalteenoton kahdelta neljästä tasasuuntaajamuuntajasta, jolloin investoinnit ja kannattavuus on mietittävä ensiksi kahden tasasuuntaajamuuntajan lämmöntalteenotolle ja tämän jälkeen kaikille neljälle.

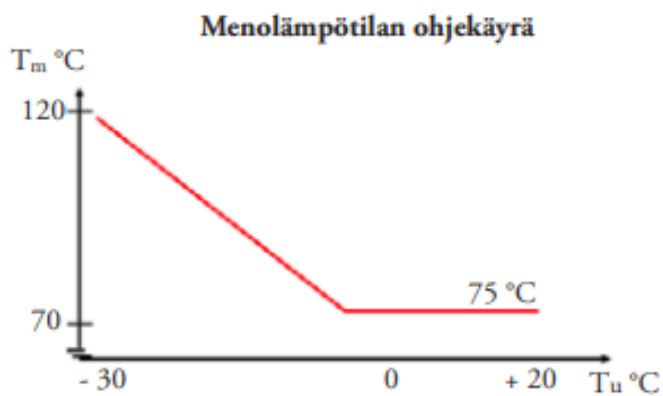


Kuva 1. Yksi neljästä tasasuuntaajamuuntajasta.

3.1 Kaukolämpö

Kaukolämpö on laajalle alueelle keskitetty lämmöntuotanto ja -jakeluverkosto. Kaukolämmitykseen tarvittava lämpöenergia saadaan lämmitysvoimalaitoksilta tai lämpökeskuksista ja jaetaan kaukolämpöverkoston avulla asiakkaille. Kaukolämmössä lämpöenergiaa sitovana aineena käytetään kuumaa vettä, joka on kuumennettu lämpökeskusten kattiloissa tai lämpövoimalaitosten lämmönsiirtimissä. Energiatehokkain tapa tuottaa kaukolämpöä on ensin käyttää sähköntuotantoon lämmityksessä syntyvä höyry ja tästä lopuksi jäävä lämpöenergia käytetään kaukolämmityksen tarpeisiin. Tällaisia laitoksia, jotka tuottavat kumpaakin sähkö- ja lämpöenergiaa kutsutaan CHP-laitoksiksi. Lyhenne tulee englanninkielestä "Combined Heat and Power". (3, s.11).

Kaukolämpöveden menolämpötila määräytyy ulkolämpötilan mukaan. Alla olevassa kuvassa 2 on esitetty ohjearvo tuotantolaitoksille kaukolämmön menoveden lämpötilasta.



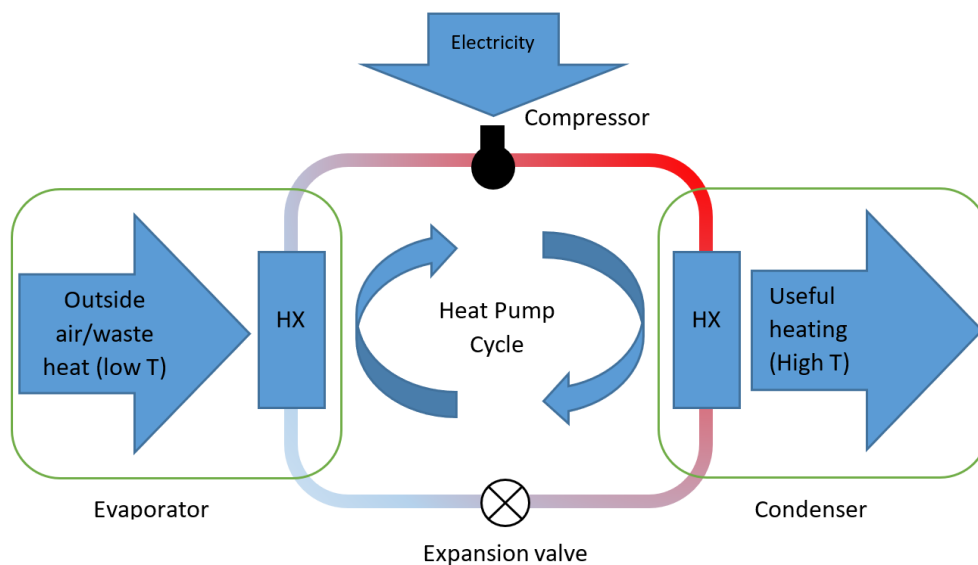
Kuva 2. Menolämpötilan (T_m) ohjekäyrä ulkolämpötilan (T_u) funktiona (3, s.23)

3.2 Kokkolan Energia

Kokkolan Energian kaukolämmöllä on 35 000 asiakasta Kokkolan ja Kälviän alueella. Vuonna 2021 suurinosa (40,5 %) kaukolämpövedestä Kokkolan energialla lämmitettiin hukkalämmöllä. Boliden Kokkola on yksi hukkalämmön viejistä Kokkolan Energialle. (4).

4 LÄMPÖPUMPUT

Lämpöpumpun tehtävä on siirtää lämpöä kylmemmästä tilasta lämpimään toimien käänteisen Carnot-prosessin tavoin. (kuva 3) Lämpöpumppu koostuu neljästä pääkomponentista. Kompressorista, lauhduttimesta, höyrystimestä ja paisuntaventtiilistä. Systemin putkistossa kiertävään kylmäaine johdetaan höyrystimelle, josta kylmäaine saa ulkoisesta lämmönlähteestä lämpöenergiaa höyrystymiseen. Höyrystynyt kylmäaine kulkee seuraavaksi kompressorille, jossa kylmäaineen täytyy olla täysin höyrystynyt. Kompressorilla kylmäaine puristetaan korkeaan paineeseen, jonka seurauksena kylmäaineen kiehumispiste kasvaa ja höyry kuumenee. Seuraavaksi kuuma ja höyrystynyt kylmäaine kulkee lauhduttimelle, missä lämpö luovutetaan haluttuun järjestelmään. Lauhduttimelta palaava nestemäinen kylmäaine kulkee paisuntaventtiilille, josta venttiili syöttää kylmäainetta höyrystimelle pitäen yllä paine-eroa höyrystimen ja lauhduttimen välillä. (5, s.2).



Kuva 3. Lämpöpumpun toimintaperiaate. (6).

4.1 Lämpökerroin

COP-lämpökertoimella tarkoitetaan, kuinka paljon lämpölaitteesta saadaan lämpötehoa suhteessa kompressorin ottamaan sähkötehoon. Esimerkiksi tilanteessa missä lämpöpumpusta saataisiin lämpötehoa 3,5 kW ja kompressorin tarvitsisi 1 kW:n verran tehoa kylmäaineen puristukseen saisimme kaavalla 1 lämpökertoimeksi 3,5 (kaava 1). (7).

$$\frac{Q}{W} = COP$$

4.2 Kylmäaineet

Kylmäaineet ovat luonnon- tai synteettisiä nesteitä, jotka siirtävät lämpöä vastaanottamalla lämpöenergiaa nestemäisessä muodossa ollessaan ja pystyvät höyrystymään alhaisissa lämpötiloissa. Alhaisessa paineessa oleva höyry voidaan puristaa kompressorilla tehdyllä työllä korkeampaan paineeseen, jolloin kylmäaineen lämpötila nousee. (8).

Erilaisia kylmäaineita on useita, joista yleisimmät nykyään ovat perfluorattuja yhdisteitä eli näissä kylmäaineissa hiiliketjun vedyt on korvattu fluorilla. Vesi ja hiilidioksidikin ovat kylmäaineita. Kylmäaineiden ympäristövaikutuksia kuvataan erilaisilla tunnusluvuilla, jotka ovat:

ODP (Ozone Depletion Potential)

Luku, joka ilmoittaa kylmäaineen suhteellisen otsonihaitallisuuden asteikolla 0–1,0.

GWP (Global Warming Potential)

Luku, joka ilmoittaa kylmäaineen kasvihuonehaitallisuuden. Vertailukohtana käytetään hiilidioksidin (CO₂) haitallisuuslukua, jonka arvo on 1,0. Asteikko toimii luvusta 0 ylöspäin.

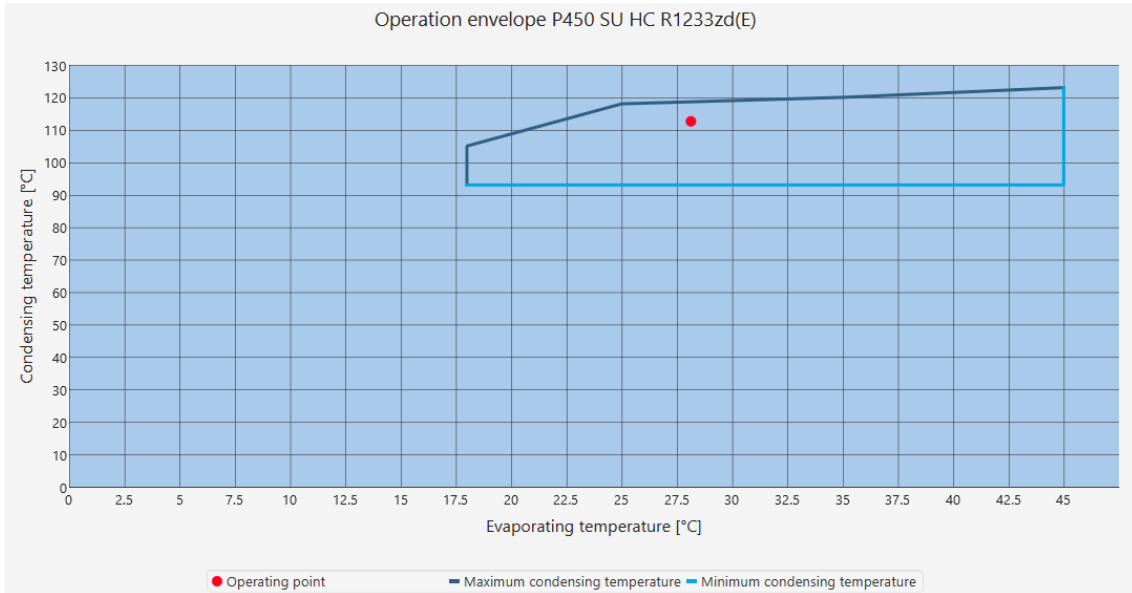
TEWI (Total Equivalent Warming Impact)

Luku, joka ilmoittaa kylmälaitoksen elinajan tuottaman kasvihuonehaitallisuuden kiloina hiilidioksidia. Tässä luvussa huomioidaan suorat kylmäainepäästöt sekä laitteen energiankulutuksesta johtuvat hiilidioksidi päästöt. Asteikko toimii luvusta 0 ylöspäin. Mitä suuremmat nämä luvut ovat, niin sitä haitallisempia ne ovat ilmakehälle ja ympäristölle. (9).

4.2.1 R1233zd

Kylmäaine R1233zd on suunniteltu uusille järjestelmille. Tämän kylmäaineen ominaisuuksia ovat muun muassa alhaiset GWP- (1) ja ODP-luvut (0). (10). R1233zd on suunniteltu matalapaineisiin jäähdyttimiin ja korkeiden lämpötilojen lämpöpumppuihin. Korkeiden lämpötilojen lämpöpumppuiksi

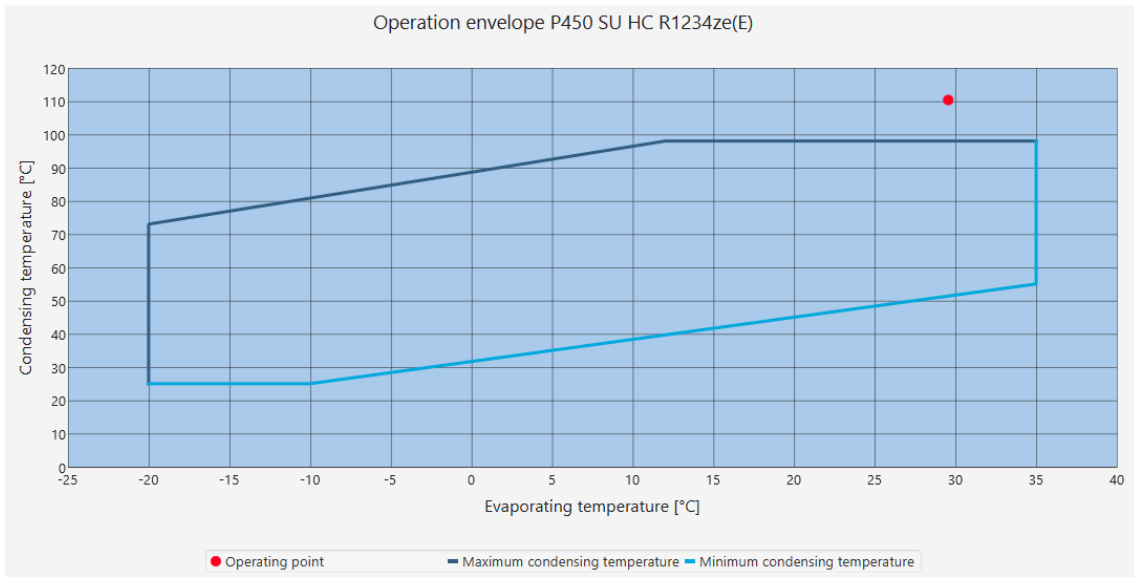
voidaan luokitella lämpöpumput, joiden lämpötilan tuottoalue on 100-160°C. R1233zd kylmäaineen minimituottolämpötila on noin 95 °C ja sillä voidaan tuottaa noin 120 °C. Alla olevassa kuvassa on esitetty tämän kylmäaineen toiminta-alue. Kuva on otettu Oilonin lämpöpumpun valintaohjelmasta.



Kuva 4. R1233zd toiminta-alue Oilonin lämpöpumpun valintaohjelmassa.

4.2.2 R1234ze

R1234ze on suhteellisen uusi kylmäaine, jonka ODP luku kylmäaineen R1233zd:n tavoin on myös nolla. GWP-luku tällä kylmäaineella on myös matala lukuarvolla 7. R1234ze voidaan muun muassa käyttää kylmäaltaissa, lämpöpumpuissa ja muissa keskilämpötilan sovellutuksissa. Tällä kylmäaineella ei voida tehdä niin korkeita lämpötiloja kuin R1233zd:llä ja lämpötilan tuoton yläraja onkin noin 100 °C. Minimituottolämpötila on noin 25 °C. (11). Kuvassa 5 on esitetty kylmäaineen R1234ze toiminta-alue.



Kuva 5. R1234ze toiminta-alue Oilonin lämpöpumpun valintaohjelmassa.

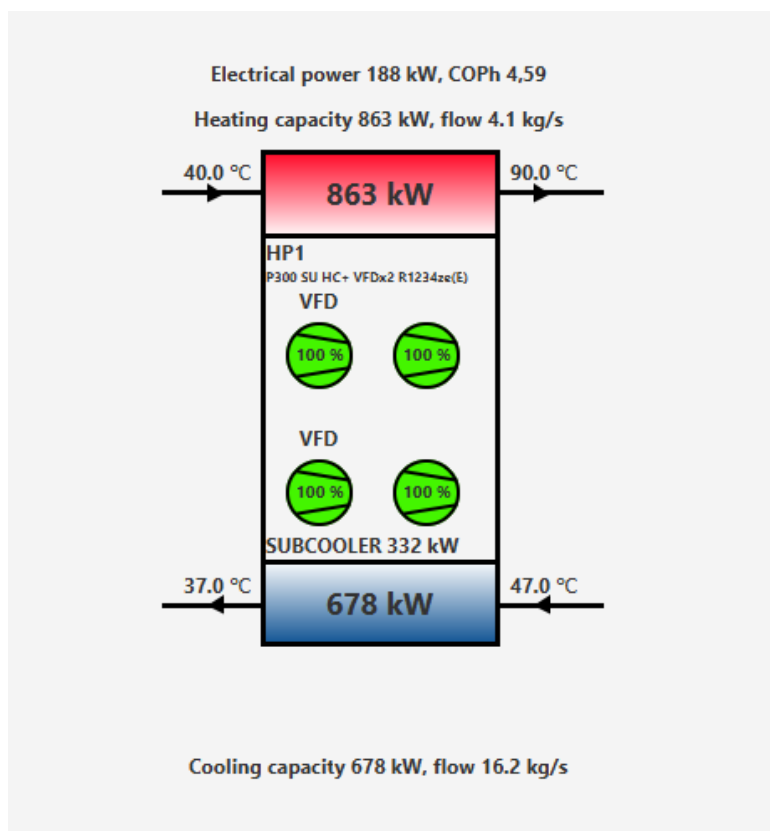
5 LÄMPÖPUMPUN VALINTA

Yleisesti ottaen lämpöpumpun valintaa varten on selvitettävä minkä asteista lämpöä halutaan tuottaa, mikä on höyrystimelle menevän aineen lämpötila sekä mitkä ovat lauhduttimelle ja höyrystimelle menevät virtaamat.

Tässä työssä lämpöpumpun valinnassa auttoi Oilon. Oilon on polttimien ja lämpöpumppujen tuottaja.

5.1 Oilon Selection Tool

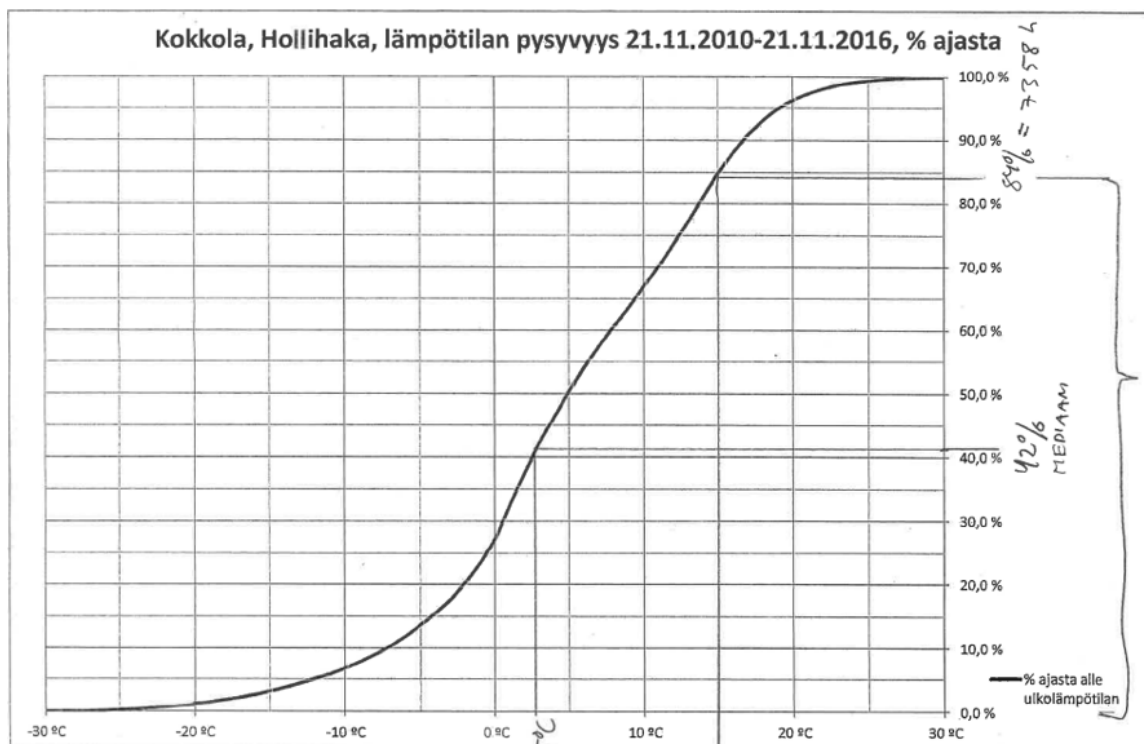
Tässä työssä käytetään apuna Oilonin lämpöpumpun valintaohjelmaa ja valintaohjelmassa käytetään lisenssin takana olevaa teollisuuden kohteisiin tarkoitettujen lämpöpumppujen valintaohjelmistoa. Valintaohjelmaan syötetään ainevirran sisään- ja ulosmenon lämpötilat höyrystimelle ja lauhduttimelle, josta ohjelma laskee valitulle lämpöpumpulle lämmitys- ja jäähdytysenergian, COP-kertoimet, lämpöpumpun tarvitseman sähkötehon sekä virtaamat höyrystimelle ja lauhduttimelle.



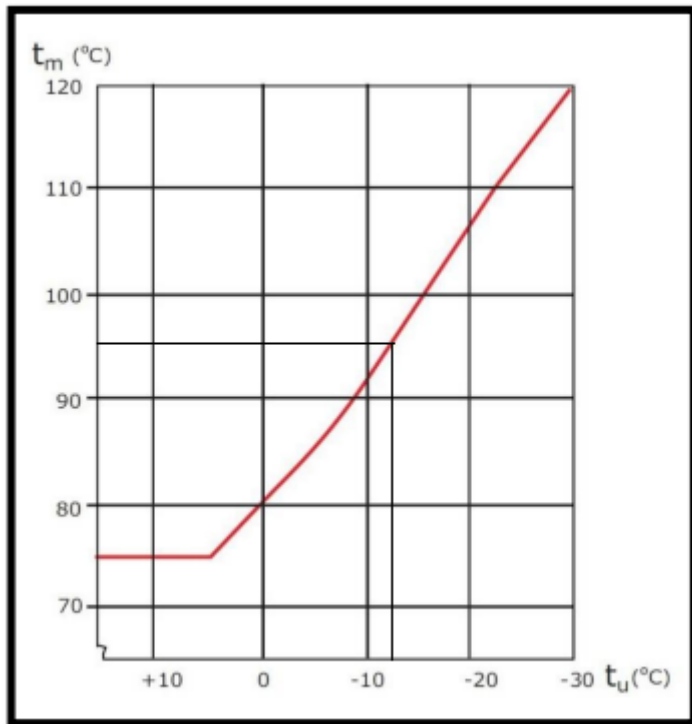
Kuva 6. Näkymä Oilon selection tool:sta.

5.2 Sopivan kylmäaineen valinta lämpöpumppuun

Kylmäaineen valinta perustuu hukkalämmön lämpötilaan ja tuotettavan energian lämpötilaan. Valintaperusteena on käytetty lämpöpumpun lämmöntuotannon aikaa vuodessa. Kuvassa 9 on esitetty Kokkolan Hollihakaan lämpötilan pysyvyyskäyrä, josta piirtämällä voidaan arvioida lämmityskauden pituuden olevan 7358 h, kun lämmityskauden yläraja on 15 °C:tta. Koko lämmityskautta ei ole mahdollista tuottaa lämpöä lämpöpumpulla johtuen kylmäaineiden lämmöntuottoalueista. R1234ze kylmäaineella pystytään parhaimmillaan tuottamaan noin 95 °C:sta vettä. Kuvasta 10 kaukolämmön menolämpötilan ohjekäyrästä voidaan katsoa missä ulkolämpötilassa (t_u) voidaan vielä tuottaa lämpöä kylmäainetta R1234ze käyttämällä. Kuvan 8 kuvaajaan on piirretty ensin viiva x-akselin suuntaisesti piirretystä suorasta R1234ze:n lämmöntuoton ylärajasta (95 °C). Suoran kohdatessa ohjekäyrän leikatessa piirretään suora y-akselin suuntaisesti ja tästä saadaan kylmäaineelle R1234ze minimiarvo (-12 °C), missä voidaan vielä tuottaa lämpöä kaukolämpöön. Nyt kuvasta 9 voidaan katsoa toiminta-aika lämpöpumpulle, joka käyttää kylmäainetta R1234ze piirtämällä lämpötilan pysyvyyskäyrää leikkaavat suorat -12 °C ja 15 °C kohdille ja tästä välistä saadaan arvioitu vuotuinen käyttöaika lämpöpumpulle ulkolämpötilojen perusteella.



Kuva 7 Kokkola, Hollihaka, lämpötilan pysyvyys %-ajasta.



Kuva 8. Kaukolämpöveden menolämpötilan ohjekäyrä ulkolämpötilan mukaan. (12, s336).

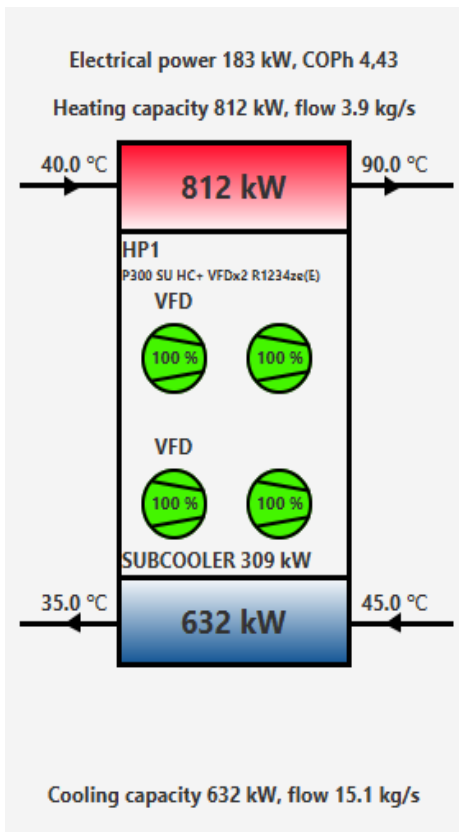
5.3 Lämpöpumppuratkaisu

Boliden olisi ensiksi investoimassa lämpöpumppuun, joka nostaisi kahdelta tasasuuntaajamuuntajalta tulevan hukkalämmön hyödynnettävyyttä, jotta hukkalämpö voitaisiin syöttää kaukolämpöpiiriin. Ensimmäisen investointierän jälkeen olisi tarkoitus hankkia jo hankitun lämpöpumpun rinnalle toinen lämpöpumppu, jotta lopuiltakin tasasuuntaajamuuntajilta saadaan otettua hukkalämpö talteen kaukolämpöpiiriin.

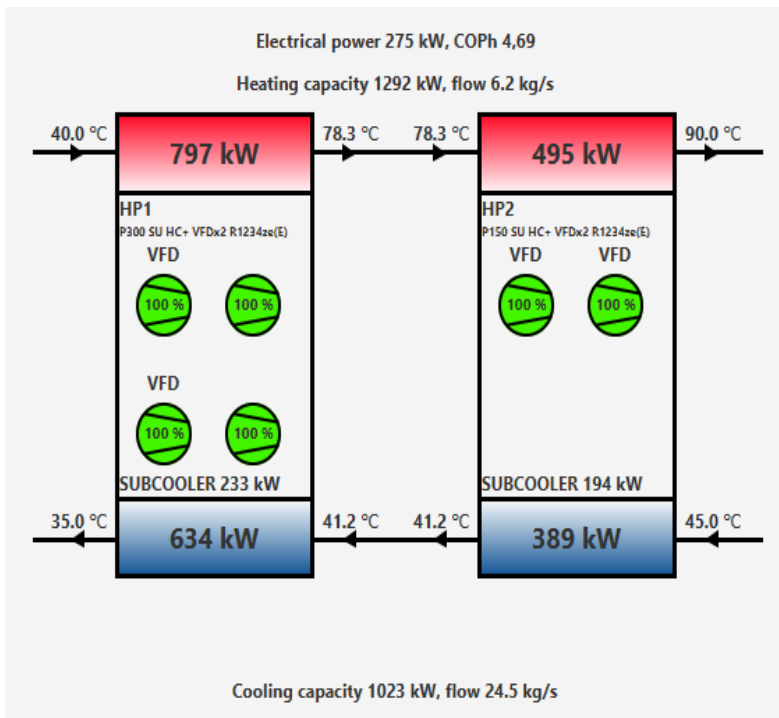
Kokkolan Oilonin toimipisteellä vieraillessa, suositeltiin hankittavaan lämpöpumppuun otettavan kaksi taajuusmuunnettavaa kompressoria, jolloin lämpöpumppu pystyisi toimimaan paremmin esimerkiksi tilanteessa, jossa yhdeltä tasasuuntaajamuuntajalta ei tulisi lämpötilan nostoa varten vesivirtaamaa.

Lämpöpumpuksi ensimmäiseen investointierään valikoitui Oilonin P300 SU HC+ VFDx2 R1234ze. Tässä lämpöpumpussa on kaksi taajuusmuunnettavaa kompressoria ja kylmäaineena toimii R1234ze, joka mahdollistaa lämmöntuoton noin 95-asteeseen saakka.

Toiseen investointierään P300-lämpöpumpun kanssa sarjaan olisi suunniteltu hankittavan P150 SU HC+ VFDx2 R1234ze. Sarjaan kytkettyinä lämpöpumpuilla kykenisi nostamaan kaikilta neljältä tasasuuntaajamuuntajalta tulevan veden lämpötilan hyödynnettävään lämpötilaan kaukolämpöön vientiä varten.



Kuva 9. Lämpöpumpun P300 SU HC+ VFDx2 R1234ze(E) toimintadataa tuottaessa 90-asteista vettä.



Kuva 10. Lämpöpumppujen P300 ja P150 sarjaan kytkennän toimintadataa tuottaessa 90-asteista vettä.

6 HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN KAUKOLÄMMÖSSÄ

Suunnitelmana on viedä tasasuuntaajamuuntajilta saatava hukkalämpö lämpöpumppuun, jolla lämpötila priimataan Bolidenille tulevaan kaukolämpöön. Vaihtoehtoina on syöttää hukkalämpöä meno- ja paluupuolelle. Paluupuolelle syötettäessä hukkalämpöä virtaavan veden lämpötila nousee ja kasvattaa lämpöhäviöitä pienentäen kaukolämpöverkon hyötysuhdetta. Tulopuolella ongelmana taas tulee vastaan lämpöpumpulla nostettava lämpötila-alueen jäykkyys. Tämä johtuu lämpötilan nostamiseen käytettävien korkean lämpötilojen lämpöpumpuissa käytettävistä kylmäaineista. Esimerkiksi kylmäaineen R1233zd minimituottolämpötila on 95 °C, jolloin lämmönvienti kaukolämpöön voi olla haasteellista ajettaessa 70-120°C lämpötila-alueella.

6.1 Lähtötilanne lämmöntalteenotossa

Neljään tasasuuntaajamuuntajaan suunnitellut ja asennettavat Hitachin lämmönsiirtimet ovat tehoaan 250 kW, ja siirtävät tasasuuntaajamuuntajien jäähdytysöljystä lämpöenergiaa siirtimelle tulevaan vesivirtaan, jonka lämpötila on 37°C. Jäähdytysöljy lämmönsiirtimessä lämmittää veden 47°C:en. Veden massavirtaus tunnissa lämmönsiirtimelle on suunnitteluarvojen mukaan 21550 kg/h noin 6 kg/s.

TAULUKKO 1. Hitachin antamia arvoja lämmönsiirtimelle

| | | Hot side | Cold side |
|------------------------|-------------------|----------------|-----------|
| Fluid | | Nynas Nytro 10 | Water |
| Density | kg/m ³ | 859,4 | 990 |
| Specific heat capacity | kJ/(kg*K) | 2,01 | 4,18 |
| Thermal conductivity | W/(m*K) | 0,113 | 0,633 |
| Viscosity inlet | cP | 4,79 | 0,693 |
| Viscosity outlet | cP | 6,52 | 0,575 |
| | | | |
| Mass flow rate | kg/h | 44790 | 21550 |
| Inlet temperature | °C | 50 | 37 |
| Outlet temperature | °C | 40 | 47 |
| Pressure drop | kPa | 97,2 | 15,2 |
| | | | |
| Heat Exchanged | kW | 250 | |
| L.M.T.D. | K | 3 | |

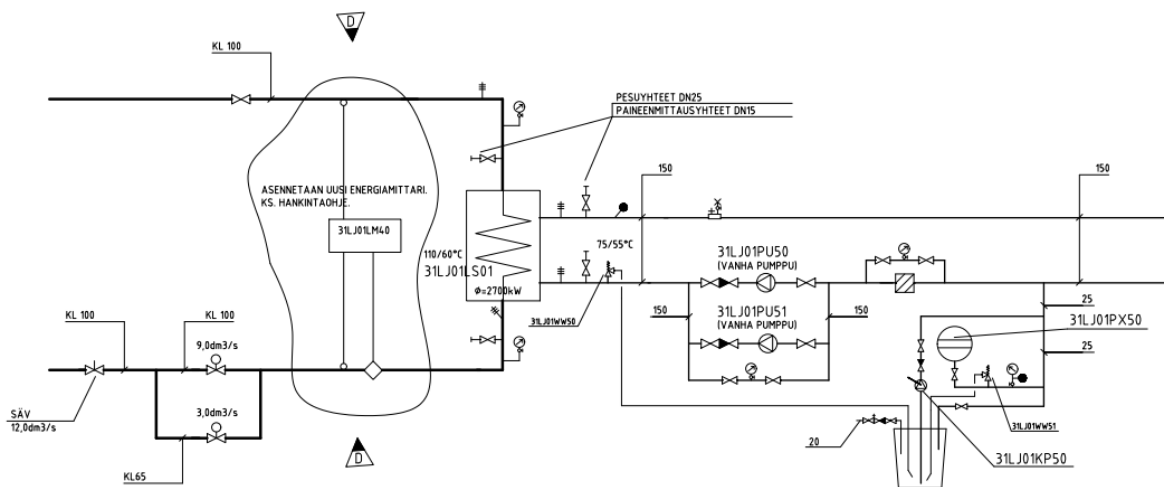
6.2 Hukkalämmön tuonti lämmitysverkostoon

Hukkalämpö tasasuuntaajamuuntajilta on tarkoitus tuoda kaukolämpöpiirin tulopuolelle. Kokkolan Energialta on tullut toive, että kaukolämmön käyttäjien verkkoon tuoma lämpöenergia tuotaisiin tulopuolelle paluupuolen sijasta. Lämmitysverkoston tulopuolelle on tarkoitus tehdä sivuvirtaus, johon paluupuolelta otettu kaukolämpövesi lämmitetään uudestaan lämpöpumpun lauhduttimella valitsemaan kaukolämmön lämpötilaan ja syötetään takaisin kaukolämmön lämmönsiirtimen tulopuolelle nostaen lämmönsiirtimelle menevää energiamäärää.

6.3 Lämmitysverkoston kytkentä

Kaukolämpövesi tulee suoraan päälinjasta KL 100-linjaan, josta kaukolämpövesi menee lämmönsiirrin 31LJ01LS01:lle ja tästä jäähtynyt kaukolämpövesi palaa suoraan paluulinjaan.

Kytkentäkaavio kuvassa 12 uuden energiamittarin asentaminen on vielä toteuttamatta ja se on esitetty ympyröitynä alueena D.

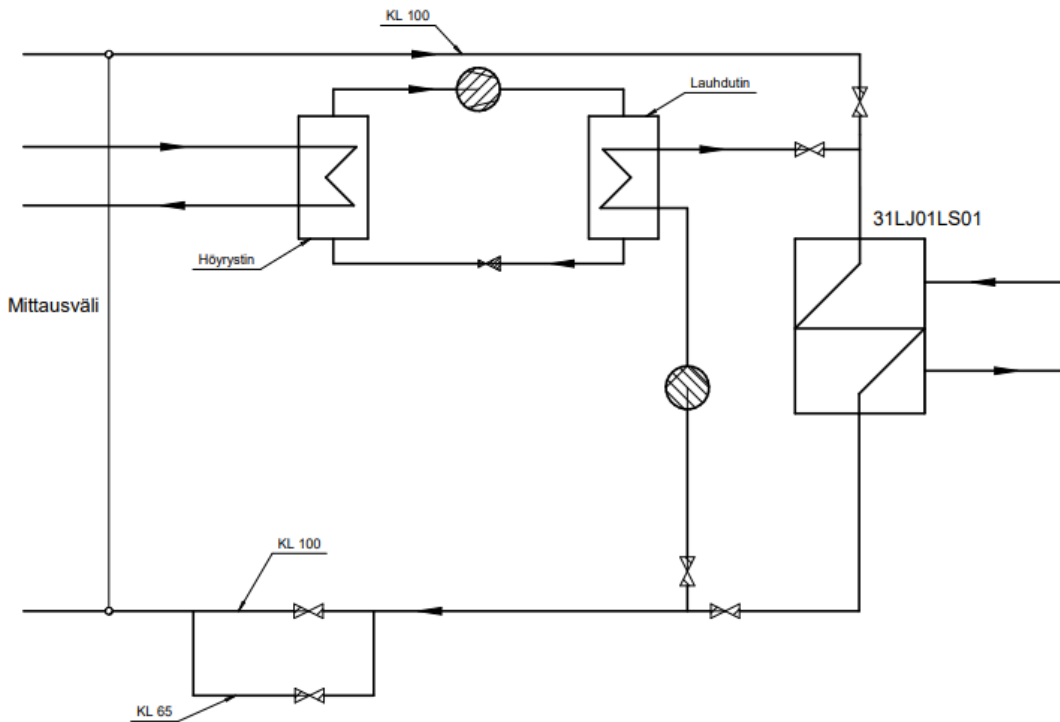


Kuva 11. Lämmitysverkoston kytkentäkaavio.

Alla olevassa kuvassa 13 on esitetty periaattellinen kytkentäkaavio lämpöpumpun kytkemisestä kaukolämpölinjaan KL 100. Osa lämmönsiirtimeltä 31LJ01LS01 palaavasta jäähtyneestä vedestä otetaan uudestaan lämmitettäväksi lämpöpumpun lauhduttimelle, joka sitten syötetään takaisin kaukolämmön tulopuolelle ennen lämmönsiirintä.

Lämpöpumpun höyrystymille tuleva vesi tulee tasasuuntaajamuuntajien hukkalämmöllä lämmittetystä vesivirrasta noin 47 asteisena.

Mittauspisteiden välillä mitataan kaukolämmön energiankulutus. Lämpöpumpun asentaminen vähentää ostettavan kaukolämmön määrää sen verran mitä lämpöpumppu tuottaa lauhduttimelta kaukolämpöön.



Kuva 12. Lämpöpumpun periaatteellinen kytkentä kaukolämpöön

6.4 Lämmönsiirtimeltä saatava todellinen teho ja virtaama

Boliden Kokkolan elektrolyysihallin vierellä on 4 kappaletta tasasuuntaajamuuntajia. Yhdestä tasasuuntaajamuuntajasta on saatavilla 265 kW hukkalämpöä muuntajan jäähdytysöljystä. Kokonaishäviöt näistä kaikista tasasuuntaajamuuntajista ovat siis yhteenlaskettuna 1,06 MW.

$$P = C_p * Q_v * \rho * \Delta T$$

Laskuissa käytetyt veden tiheyden, veden ominaislämpökapasiteetin ja veden entalpiain arvot eri lämpötiloissa on otettu Steam tables excel-lisäosasta.

Todellinen saatava lämpöteho saadaan, kun kerrotaan kokonaishäviöt lämmönsiirtimen ja muuntajan hyötysuhteella:

$$P_{tod} = P_{kok} * \eta_{ls} * \eta_m = 1,06 \text{ MW} * 0,9 * 0,9 = 0,86 \text{ MW}$$

KAAVA 2

Hitachin lämmönsiirtimeltä lähtevä vesivirtaama on johdettu siirtotehon kaavasta:

$$P = c_p * Q_v * \rho * \Delta T$$

KAAVA 3

Siirtotehon kaavasta johdettu tilavuusvirtaaman kaava:

$$Q_v = \frac{P}{c_p * \rho * \Delta T}$$

KAAVA 4

Tästä saadaan lämmönsiirtimeltä lähtevä tilavuusvirtaama:

$$Q_v = \frac{250000 \text{ W}}{4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ } ^\circ\text{C} * 989,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * (47^\circ\text{C} - 37^\circ\text{C})} = 6,05 \text{ l/s}$$

Tämä on linjassa Hitachin ilmoittaman lämmönsiirtimen virtaaman 21550 kg/h kanssa (kuva 6), joka muunnettuna litroina sekunnissa on myös 6,05 l/s.

6.5 Kaukolämmön menoveden lämpötila ulkolämpötilan funktiona

Kaukolämpöveden menolämpötila vaihtelee ulkolämpötilan mukaan. Kaukolämpöjärjestelmissä käytetään usein etukäteen määriteltäviä lämpötilakäyriä, jotka määrittävät menolämpötilan suhteen ulkolämpötilaan. Kokkolan kaukolämpöverkon menoveden lämpötila määräytyy taulukon 1 mukaan. Kaukolämmön menoveden lämpötilat taulukon 1 ulkolämpötilojen väliltä on saatu hyödyntämällä lineaarisen interpoloinnin kaavaa:

$$y = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} (x - x_0) \quad \text{KAAVA 5}$$

Ulkolämpötilat Kokkolasta on saatu ilmatieteen laitoksen säädatasta. Tässä työssä käytetty lämpötiladata on vuosilta 2020-2022 ja on otettu tunnin välein. Työssä säädata on jaettu jokaiselle neljälle vuodenajalle ja excelin JOS-funktioita käyttäen laskettu keskiarvo R1234ze-kylmäainetta käyttävän lämpöpumpun käynnissäolotuntien mukaan. Raja-arvoina ulkolämpötilalle toimii -12°C ja 15°C , sillä -12°C :ssa on kaukolämpöveden menoveden lämpötila 95°C :ssa ja täten kylmäaineen R1234ze maksimituotto lämpötila. 15°C on taas ulkolämpötila, missä tarvetta kaukolämmitykselle ei ole. Taulukoissa 3 ja 4 on esitetty lämpöpumpun käynnissäolotunnit sekä käynnissäolotuntien keskimääräiset ulkolämpötilat vuodenajoin.

TAULUKKO 2. Kl:n menoveden lämpötila ulkolämpötilan funktiona

| T_u (°C) | T_m (°C) |
|------------|------------|
| 50 | 72 |
| 6 | 72 |
| -4 | 84 |
| -8 | 90,93 |
| -29 | 115 |
| -50 | 115 |

TAULUKKO 3. Lämpöpumpun käynnissäolotunnit vuodenajoittain

| Vuosi | Kevät | | Kesä | | Talvi | | Syksy | |
|-------|-------|---|------|---|-------|---|-------|---|
| 2020 | 2169 | h | 967 | h | 1863 | h | 2092 | h |
| 2021 | 2124 | h | 922 | h | 1789 | h | 2103 | h |
| 2022 | 2118 | h | 908 | h | 2080 | h | 2184 | h |
| ka | 2137 | h | 932 | h | 1911 | h | 2126 | h |

TAULUKKO 4. Lämpöpumpun käynnissäolotuntien keskilämpötilat vuodenajoittain

| Vuosi | Kevät | | Kesä | | Talvi | | Syksy | |
|-------|-------|----|------|----|-------|----|-------|----|
| 2020 | 2,5 | °C | 11,8 | °C | -3,1 | °C | 6,5 | °C |
| 2021 | 2,6 | °C | 11,8 | °C | -3,2 | °C | 5,4 | °C |
| 2022 | 2,5 | °C | 11,8 | °C | -3,2 | °C | 4,8 | °C |
| ka | 2,5 | °C | 11,8 | °C | -3,2 | °C | 5,5 | °C |

6.6 Lämpöpumpun toiminta

Ilmatieteen laitoksen säädatasta saadut keskilämpötilat voidaan nyt syöttää taulukon 2 ohjearvoja apuna käyttäen lineaarisen interpoloinnin kaavaan 5, josta saadaan ohjeellinen arvo kaukolämpöveden lämpötilalle ulkolämpötilassa.

$$T_{mtalvi} = 84^{\circ}\text{C} + \frac{90,93^{\circ}\text{C} - 84^{\circ}\text{C}}{-8^{\circ}\text{C} - (-4^{\circ}\text{C})} * (-3,2^{\circ}\text{C} - (-4^{\circ}\text{C})) = 82,6^{\circ}\text{C}$$

TAULUKKO 5. Kaukolämpöveden keskiarvoinen lämpötila vuodenajoittain ulkolämpötilojen funktiona

| | Keskilämpötilat käynnissäolotunneilta vuodenajoittain (T_u) | | Kaukolämpöveden menolämpötila (T_m) | |
|-------|---|----|---|----|
| Talvi | -3,2 | °C | 82,6 | °C |
| Kevät | 2,5 | °C | 76,2 | °C |
| Kesä | 11,8 | °C | 72,0 | °C |
| Syksy | 5,5 | °C | 72,5 | °C |

6.6.1 Lämpöpumpun sähköenergian tarve

Taulukosta 5 voidaan katsoa kaukolämpöveden menolämpötila, johon lämpöpumpun lauhduttimelle tuleva kaukolämpöpiirin lämmönsiirtimeltä jäähtynyt kaukolämpövesi tulee lämmittää. Mitä korkeammalle lämpötilalle lämmitetään niin sitä enemmän lämpöpumppu käyttää tehoa lämmittämiseen. Oilon selection tool:sta on saatu lämpöpumpun tarvitsema sähköteho. Lauhdutin nostaa kaukolämpöveden lämpötilaa 50°C:lla, saman minkä verran lämpötila putoaa lämmönsiirtimellä. Sähköenergian tarve on laskettu vuodenajoittain kertomalla lämpöpumpun tarvitsema sähköteho käynnissäolotunneilla taulukosta 3. Lämpöpumpun sähkötehon rinnalle on arvioitu kiertovesipumppujen tarvitsema sähköteho 8,5 kW.

$$Q_{etalvi} = \frac{135,5 \text{ kW} * 1911 \text{ h}}{1000} = 259 \text{ MWh}$$

P300 kuluttaisi sähköä vuotta kohden kiertovesipumppujen kanssa arviolta noin 873 MWh ja P300 sekä P150 kiertovesipumppujen kanssa noin 1524 MWh.

TAULUKKO 6. Lämpöpumpun P300 tarvitsema sähköenergia vuodenajoittain

| Lämpöpumppuratkaisu P300 | | |
|--------------------------|------------|-------------------------|
| | P_e (kW) | Q_e /vuodenaika (MWh) |
| Talvi | 135,5 | 259 |
| Kevät | 124,5 | 266 |
| Kesä | 112,5 | 105 |
| Syksy | 114,5 | 243 |

TAULUKKO 7. Lämpöpumppujen P300 ja P150 tarvitsema sähköenergia vuodenaikittain

| Lämpöpumppuratkaisu P300+P150 | | |
|-------------------------------|------------|-------------------------|
| | P_e (kW) | Q_e /vuodenaika (MWh) |
| Talvi | 248,5 | 475 |
| Kevät | 213,5 | 456 |
| Kesä | 190,5 | 178 |
| Syksy | 195,5 | 416 |

6.6.2 Lämpöpumpusta saatu lämpöenergia

Kaukolämpökierron menopuolelle lämpöpumpulta saatava energiamäärän kasvu on lämpöpumpun lauhduttimelta saatava energiamäärä. Samaa periaatetta noudattamalla kuin lämpöpumpun sähköenergian kulutuksella saadaan arvioitua vuodessa saatu lämpöenergian säästö. Lauhduttimelta saatava lämpöteho on katsottu Oilon selection tool:sta. P300 lämpöpumpulla tekisi lämpöä kaukolämpöpiiriin vuotta kohden noin 4714 MWh ja lämpöpumppuratkaisulla jossa P300 rinnalla olisi myös P150 saisi lämpöenergiaa vuodessa noin 9032 MWh.

TAULUKKO 8. P300 lämpöpumpusta saatava energiamäärä vuodenaikittain

| Lämpöpumppuratkaisu P300 | | |
|--------------------------|------------|----------------|
| | P_l (kW) | Q_{lp} (MWh) |
| Talvi | 662 | 1265 |
| Kevät | 648 | 1385 |
| Kesä | 636 | 593 |
| Syksy | 692 | 1471 |

TAULUKKO 9 P300, sekä P150 lämpöpumpuista saatava energiamäärä vuodenaikittain

| Lämpöpumppuratkaisu P300+P150 | | |
|-------------------------------|------------|----------------|
| | P_l (kW) | Q_{lp} (MWh) |
| Talvi | 1304 | 2492 |
| Kevät | 1268 | 2710 |
| Kesä | 1247 | 1163 |
| Syksy | 1255 | 2669 |

7 KANNATTAVUUSLASKENTA

Boliden antoi kannattavuuslaskentaa varten sähkön hinnaksi 60,80 €/MWh. Hinta perustuu siihen, että Boliden Kokkola ostaa osan sähkötarpeestaan valmiiksi sovittuun kiinteään hintaan ja lopun sähkötarpeesta vallitsevaan sähkön spot-hintaan.

Kaukolämmön hintana kannattavuuslaskennassa käytetään 18,40 €/MWh.

Oilon on antanut hankittavaksi suunnitelluille lämpöpumpuille ja niiden käynnistysavulle sekä suppealle ja laajalle vuosihuollolle hinta-arvion, nämä on esitetty taulukossa 11.

Kannattavuuslaskuissa esiintyvät asennuskustannukset ja suunnittelukustannukset perustuvat karkeisiin arvioihin.

Korkokuluista tulevat kustannukset on laskettu 3,8 % korolla.

Hitachin suunnitteleman lämmönsiirtimen hankinta ja asennuskustannukset tulevat olemaan noin 120 000 €.

7.1 Lämpöpumpun sähköenergian ostosta tulevat kustannukset

Nostaakseen aineen lämpötilaa lämpöpumppu tarvitsee toimiakseen sähköenergiaa, mikä on ostettava. Tästä tulevat ostosähkön kustannukset vähentävät kokonaiskannattavuutta. Taulukoissa 6 ja 7 on laskettu arvio ostettavan sähköenergian tarpeelle. Kertomalla vuoden sähköenergian tarve sähkön hinnalla saadaan ostosähköstä tulevat kustannukset vuotta kohden. Sähkön hinta on arvioitu olevan noin 60,80 €/MWh

TAULUKKO 10. Ostosähkön kustannukset

| Lämpöpumppuratkaisu | Sähköenergian tarve (MWh) | Ostosähkön kustannukset (€/a) |
|---------------------|---------------------------|-------------------------------|
| P300 | 873 | 53 078 |
| P300 + P150 | 1524 | 92 659 |

7.2 Hankinta- ja asennuskustannukset

Lämpöpumput, niiden käynnistysapu ja vuosihuoltojen hinnat on saatu Oilonilta. Asennuskustannukset ja suunnittelukustannukset ovat suuntaa antavia arvioita. Kiertovesipumppuja ei ole tässä työssä tarkkaan mitoitettu, joten näiden hinta on myös arvioitu. Korkoprosentti vihreän siirtymän investoinnille on arvioitu olevan 3,8 %.

TAULUKKO 11. Lämpöpumppuhankkeen kustannuksia.

| Kustannukset | Hankintahinta ilman varaosia € | Käynnistysapu € | 1. vuosihuolto (laaja) € | 2. vuosihuolto (suppea) € | Asennuskustannukset € | Hitachin lämmönsiirrin e | Suunnittelukustannukset € | Korkokulut € (3,8 %) |
|------------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------|
| P300 | 145 600 | 2 000 | 3 000 | 1 500 | 10 000 | 120 000 | 5 000 | 60 000 |
| P150 | 100 700 | 1 000 | 2 000 | 1 000 | | | | 90 000 |
| Kiertovesipumput | 9 000 | | | | | | | |

7.3 Ostoenergian säästöt

Kaukolämpöenergian hankinnan tarve Kokkolan Energialta vähenee, kun osa lämmitysenergiasta tuotetaan lämpöpumpulla. Tästä seuraa lämmitysenergian ostokustannusten väheneminen. Kaukolämmön hintana käytetään 18,40 €/MWh. Ostettavan lämpöenergian määrä vähenee lämpöpumpun lauhduttimelta saatavan energian verran. Taulukoihin 8 ja 9 on laskettu arviot lämpöenergian määrästä, mikä tuotettaisiin lämpöpumpuilla ja vähentäisi ostettavan kaukolämmön määrää.

TAULUKKO 12. Lämpöpumppuratkaisuilla tehtävä vuotuinen säästö.

| Lämpöpumppuratkaisu | Oman lämmöntuotannon määrä (MWh) | Lämmönoston tarpeen vähemisestä tuleva säästö (€/a) |
|---------------------|----------------------------------|---|
| P300 | 4714 | 86 738 |
| P300 + P150 | 9032 | 166 196 |

7.4 Takaisinmaksuaika

Takaisinmaksua arvioidessa lämpökustannuksista tulevista säästöistä vähennetään ostosähkön ja vuotuiset huoltokustannukset vuotta kohden. Tällä erotuksella sitten jaetaan lämpöpumpuista ja muista kustannuksista tuleva summa ja saadaan arvio takaisinmaksuajalle. Alla olevissa taulukoissa on eritelty kummalekin lämpöpumppuratkaisuille erilliset takaisinmaksuajat, sillä toiseen investointierän aikataulusta ei ole tietoa, joten on yksinkertaisempi laskea kummatkin ratkaisut ker-tainvestointeina antaen suuntaa takaisinmaksuajoille.

Taulukosta 10 saadaan ostosähkön kustannukset ja taulukosta 12 saadaan lämpökustannuksista tuleva säästö. Näiden erotus on hankintakustannuksista joka vuosi vähennettävä määrä.

P300: **32 141 €/a**

P300 + P150: **71 015 €/a**

Kokonaiskustannukset lämpöpumpun P300 hankinnalle sekä muille kuluille taulukosta 11 ovat: 353 100 €.

Kokonaiskustannukset lämpöpumppujen P300 ja P150 hankinnalle sekä muille kuluille taulukosta 11 ovat: 485 800 €

Kokonaiskustannukset energian säästön ja kustannusten erotuksella jakamalla saadaan takaisinmaksuajaksi P300-lämpöpumpun ja muiden kustannusten summalla noin 11 vuotta. Jos P300-lämpöpumpun rinnalle hankittaisiin samalla myös P150 ja asennettaisiin hyödyntämään hukkalämpö kaikilta tasasuuntaajamuuntajilta saataisiin takaisin maksuajaksi noin 7 vuotta. Tämä on kuitenkin kuvitteellinen tilanne, sillä kaikilta neljältä muuntajalta hukkalämmön hyödyntäminen tapahtuisi vasta myöhemmin eikä sen ajankohdalle ole vielä tietoa.

TAULUKKO 13. Lämpöpumppuratkaisun P300 takaisinmaksuaika

| | | |
|---|-------|-----|
| Sähkön oston kustannukset sekä vuosihuollot | 54597 | €/a |
| Kl:n oston tarpeen vähenemisestä tuleva säästö | 86738 | €/a |
| Energian säästön ja kustannusten erotus vuodessa | 32141 | €/a |
| Arvioitu takaisinmaksuaika Lämpöpumppuratkaisulla P300 | 10,99 | a |

TAULUKKO 14. Lämpöpumppuratkaisun P300 + P150 takaisinmaksuaika

| | | |
|---|--------|-----|
| Sähkön oston kustannukset sekä vuosihuollot | 95181 | €/a |
| Kl:n oston tarpeen vähenemisestä tuleva säästö | 166196 | €/a |
| Energian säästön ja kustannusten erotus vuodessa | 71015 | €/a |
| Arvioitu takaisinmaksuaika Lämpöpumppuratkaisulla P300 + P 150 | 6,84 | a |

8 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli selvittää lämpöpumppujen asentamisen kannattavuutta tasasuuntaajamuuntajilta saatavan hukkalämmön hyödynnettävyyden kasvattamiseksi. Työssä selvitettiin, minkälaiset lämpöpumppuratkaisut olisivat hyvät, kuinka suuren osan vuodesta ne voisivat tehdä lämpöä kaukolämpöön, minkälaisia säästöjä lämmityskustannuksiin saataisiin ja takaisinmaksuaika lämpöpumppujärjestelmille. Sopivien lämpöpumppujen valitsemisen apuna käytettiin Oilonin lämpöpumppujen valintaohjelmaa, sekä Oilonin työntekijöiden kanssa käytyjä sähköpostikeskusteluja.

Sopivien lämpöpumppujen löydyttyä selvitettiin, miten lämpöpumput kannattaisi kytkeä lämmitysverkostoon ja työssä on esitetty periaattellinen kytkentäkaavio lämpöpumppujen kytkennästä.

Kokkolan ulkolämpötilojen perusteella arvioitiin laskennallisesti lämpöpumppujen lämmöntuoton tarve kaukolämpöön, josta voitiin arvioida lämmityskustannuksista tulevat säästöt sekä myös lämpöpumpuista ja kiertovesipumpuista nousevat sähkön ostokustannukset.

Hukkalämmöntalteenotto olisi tarkoitus ottaa tasasuuntaajamuuntajilta kahdessa investointierässä, jolloin alussa tarve olisi vain yhdelle lämpöpumpulle. Tämä hankinta maksaisi itsensä takaisin noin 11 vuodessa, mutta määrittelemättömän ajan jälkeen tehtävä toinen investointierä, jossa hukkalämpö otettaisiin talteen kaikilta muuntajilta lyhentäisi takaisinmaksuaikaa huomattavasti lämmityskustannusten pienentyessä.

Takaisinmaksuajat toimivat suuntaa antavina, sillä energianhinnat nykypäivänä vaihtelevat suuresti ja työssä käytetyt sähkön- ja kaukolämmön hinnat ovat arvioita, jotka on laskettu kannattavuusarvioita varten.

Kaukolämmön mitoituslämpötilaa tullaan tulevaisuudessa laskemaan ja voi olla mahdollista, että tällöin hukkalämmön hyödynnettävyyden nostoon löytyisi sopivampia lämpöpumppuratkaisuja lämpötila-alueen kutistuessa. Voi siis olla tarpeen tehdä tarkempaa tarkastelua lämpöpumppuja hankittaessa, jos takaisinmaksuajat venyvät liian pitkiksi ja siirtymä matalalämpöisempään kaukolämpöön on jo alkanut.

LÄHTEET

1. Boliden. Metals for modern life. Hakupäivä 8.2.2023. <https://www.boliden.com/operations>.
2. Boliden . Maailmanluokan sinkkitehdas. Hakupäivä 8.2.2023. <https://www.boliden.com/fi/operations/smelters/boliden-kokkola>.
3. Mäkelä, Tuunanen. 2015. Suomalainen kaukolämmitys. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Hakupäivä 28.2.2023. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/97138/URNISBN9789515885074.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
4. Kokkolan energia. Päästöttömällä hukkalämmöllä tuodaan lämpöä tuhansiin kaukolämpökoteihin. Hakupäivä 1.3.2023. <https://www.kokkolanenergia.fi/fi/kaukolampo/ajankoh-taista/paastotonta-hukkalampoa-kaukolampokoteihin/>
5. Paattakainen, Markus. Uima-altaan lämmitys lämpöpumpulla 1.6.2022. Hakupäivä 2.3.2023. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/752049/Paattakainen_Markus.pdf?sequence=2&isAllowed=y.
6. Automatic Heating. What is a Heat Pump? Hakupäivä 6.3.2023 <https://www.automaticheating.com.au/complete-guide-to-heat-pumps/heat-pumps-explained/>
7. Kontio, Joonas. 2020. Ilmalämpöpumpun lämpökerrointutkimus. Hakupäivä 6.3.2023. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/333020/Kontio_Joonas.pdf;jsessionid=90D43A50E36FA63346B2B4A07B21EE0D?sequence=2
8. Vaillant. Mikä on kylmäaine. Hakupäivä 7.3.2023. <https://www.vaillant.fi/asiakkaat/neuvoja-ja-tietoa/lammitussyanasto/refrigerant-1925130.html>
9. Kapanen, Mika. 2017. Kylmäainetilanne 2017. Suomen kylmäyhdistys ry. Hakupäivä 7.3.2023. <https://iisoy.fi/wp-content/uploads/2021/07/Kylma%CC%88ainetilanne-2017-final.pdf>

10. Linde. R1233zd. Hakupäivä 7.3.2023. https://www.linde-gas.fi/fi/products_ren/refrigerants/hfo_gases/r1233zd/index.html
11. Darment. R1234ze ilmastoystävällinen vaihtoehto moniin kylmäsovelluksiin. Hakupäivä 9.3.2023. <https://darment.fi/kylmaaine/r1234ze/>
12. Koskelainen, Saarela, Sipilä. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Energiateollisuus ry.