Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Albina Pelenen

Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon ylijäämälämmön hyödyntäminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Talotekniikka
Insinöörityö
14.3.2019

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Albina Pelenen Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon ylijäämälämmön hyödyntäminen 24 sivua + 6 liitettä (salaiset) 14.3.2019
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Ammatillinen pääaine	LVI-suunnittelu
Ohjaajat	ryhmänvetäjä Ida Erämaa ryhmänvetäjä Anne Pietiläinen lehtori Hanna Sulamäki

Insinöörityö tavoitteena oli tutkia, mistä kaikkialta Turun seudun puhdistamolta on saatavilla ylijäämälämpöä ja minkälainen määrä. Sen perusteella tutkittiin, mihin hukkalämpöä voidaan hyödyntää ja mikä olisi optimaalinen ratkaisu.

Ennen työn aloitamista käytiin tutustumassa kohteseen ja kerättiin mittaustiedot toteutuneista energiankulutuksista. Ilmeni, että hyödynnettävää energiaa on saatavissa ilmastuskompressoreiden jäähdytysvedestä ja puhdistamon tilojen poistoilmasta. Sen jälkeen lähdettiin vertamaan laskelmien avulla kohteen lämpöenergiakulutuksia ja ylijäämälämmön kapasiteettia. Kun oli selvitetty hukkalämmön lämpötilat ja virtaamat, päädyttiin ottamaan lämpö talteen lämpöpumppujärjestelmien avulla.

Tämän jälkeen pyydettiin laitevalmistajilta apua lämpöpumppujen mitoitukseen ja hinnoitteluun. Saatujen tietojen perusteella verrattiin erilaisia kytkentävaihtoehtoja ja suoritettiin kannattavuustarkastelu.

Todettiin, että ilmastuskompressoreilta saatava lämpöenergia on kaikista hyödyllisempa siirtää toimistorakennuksen kaikkiin lämmitysjärjestelmiin. Tarkasteltaessa poistoilmasta saatavaa lämpöenergiaa nähtiin, että paras ratkaisu olisi siirtää lämpö pelkästään käyttöveden lämmitystä varten. Molemmissa tapauksissa valittiin lämpöpumppuratkaisut kaukolämmön rinnalle, koska jonkun järjestelmistä on katettava kokonaan lämmitystehontarve.

Jos Turun seudun puhdistamo päättää rakentaa lämmöntalteenottojärjestelmän, selvitystä pystytään hyödyntämään selvitystä järjestelmän valinnassa. Työtä tehdessä saatuja tietoja pystytään muutenkin hyödyntämään suunniteltaessa tulevia lämmitysjärjestelmiä.

Avainsanat	LTO, ylijäämälämpö, lämmöntalteenotto, lämpöpumput,

Author Title Number of Pages Date	Albina Pelenen Waste Heat Recovery From Kakolamäki Wastewater Treatment Plant 24 pages + 6 appendices (suppressed) 14 March 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Professional Major	HVAC Design
Instructors	Ida Erämaa, Team Manager Anne Pietiläinen, Team Manager Hanna Sulamäki, Senior Lecturer

The purpose of this Bachelor's thesis was to investigate the availability and quantity of surplus heat in a wastewater treatment plant in Turku. The final year project, also examined where waste heat can be used and what would be the best solution.

For achieving the aim, the project studied the energy consumption, heating systems and surplus energy locations at a water treatment plant in Turku. It turned out that reusable heat is available from the cooling water of the air compressors and from the exhaust air of the plant. A heat pump was selected for the heat recovery system and the necessary calculations were made with the help of manufacturing companies.

The thesis established that the thermal energy from air compressors is the best solution for transferring heat to all heating systems of the office building. The heat from the exhaust air is only suitable for heating hot water. In both cases, heat pumps were used in combination with district heating.

The information from the thesis can be used in the design of new heating systems and can help to choose the heat recovery system for the Turku wastewater treatment plant.

Keywords	waste heat, heat recovery, heat pumps

Sisällys

Lyhenteet

1 Johdanto 1

1.1 Pöyry Finland Oy 1
1.2 Turun seudun puhdistamo Oy 1
1.3 Työn tausta 2
1.4 Työn tavoite 2

2 Ylijäämälämmön talteenottomenetelmiä 2

2.1 Ylijäämälämmön käyttö sellaisenaan 3
2.2 Lämpöpumppuratkaisut 3
2.2.1 Lämpökertoimet 4
2.2.2 Mekaaniset lämpöpumput 5
2.2.3 Absorptiolämpöpumput 6
2.2.4 Höyryn mekaaninen komprimointi 7
2.2.5 Termokompressori 7
2.3 Lämmönsiirtimet 8
2.3.1 Rekuperaattori 8
2.3.2 Regeneraattori 9
2.4 Nestekiertoinen lämmöntalteenottojärjestelmä 9
2.5 ORC-tekniikka 10

3 Nykytilanne Turun seudun puhdistamolla 11

3.1 Veden puhdistusprosessi 11
3.2 Nykyinen lämmöntalteenottojärjestelmä jätevedenpuhdistamolla 12
3.3 Jätevedenpuhdistamon ylijäämälämmön saatavuus 12
3.3.1 Ilmastuskompressorit 12
3.3.2 Poistoilmakanava 13

4 Selvitys ylijäämälämmön saatavuudesta 13

4.1 Jätevedenpuhdistamon lämmitysenergian tarve 13
4.2 Jätevedenpuhdistamon ylijäämälämmön kapasiteetti 14
4.2.1 Ilmastuskompressoreilta saatava lämpö 14
4.2.2 Poistoilmakanavasta saatava lämpö 14
4.3 Ylijäämälämmön hyödyntäminen kohteessa 15
4.3.1 Ilmastuskompressoreilta tuleva lämpöenergia 15

4.3.2 Poistoilmasta tuleva lämpöenergia 17

5 Tulokset 21

5.1 Ilmastuskompessoreilta saatava lämpöenergia 21

5.2 Poistoilmasta saatava lämpöenergia 22

6 Päätelmät 22

Lähteet 24

Liitteet

Lyhenteet

COP	Coefficient of Performance. Ilmalämpöpumpun hyötysuhde, tehokkuus tietyllä hetkellä.
LTO	lämmöntalteenotto
LVI	lämpö, vesi, ilma. Taloteknisia järjestelmiä, jotka liittyvät lämmitykseen, käyttöveteen tai ilmanvaihtoon.
SCOP	Seasonal Coefficient of Performance. Vuosilämpökerroin eli koko lämmityskauden hyötysuhde.

1 Johdanto

1.1 Pöyry Finland Oy

Yhtenä osapuolena opinnäytetyössä on Pöyry Finland Oy, kansainvälinen konsultti- ja suunnitteluyritys. Pöyryn historia alkoi vuonna 1958 sulfaattisellutehtaan suunnittelusta Äänenkoskelle. Vuonna 1962 laajennettiin toimintaa ja perustettiin ensimmäinen ulkomaan toimipaikka Tukholmaan, ja siitä jatkui kansainvälistyminen muualle Eurooppaan. 1970-luvulla yritys jatkoi kasvua, ja Pöyrystä tuli yksi maailman suurimmista metsäalan konsultti- ja suunnitteluyrityksistä. 1993 tehtiin strateginen muutos ja laajennettiin toiminta uusille toimialoille energia-, infrastruktuuri ja ympäristöalalle. Nykyisin Pöyry on maailmanlaajuinen asiantuntijayritys, jossa työskentelee 5 500 asiantuntijaa 40 maassa, ja se toimii seuraavilla aloilla:

- Energia: lämpö-, ydin-, vesivoima, sähkön siirto ja jakelu, uusiutuva energia.
- Teollisuus: sellu- ja paperiteollisuus, kaivos- ja metalliteollisuus, kemianteollisuus ja biojalostus.
- Infrastruktuuri: väyläinfrastruktuuri, vesi- ja jätehuolto, rakennukset ja rakenteet, maankäyttö.

Tärkeänä rakennuksien elinajan pidentäjänä, niiden toimivuuden ja turvallisuuden seikkana on hyvin suunniteltu ja oikein toimiva talotekniikka. Samoin moneen prosessiin toimivuuteen voidaan vaikuttaa talotekniikalla. Esimerkiksi paperinvalmistamiseen tarvitaan tosi suuri määrä ilmaa, joka tuodaan ilmanvaihtojärjestelmien avulla. Pöyryllä on vahva ja monipuolinen osasto, joka toteuttaa LVI-ratkaisuja todella erilaisiin ja vaativiin kohteisiin. Tämän opinnäytetyön opastajana on toiminnut Pöyryn LVI-ryhmä. Pöyryn talotekniikkaosastolla on noin kolmekymmentä henkilöä Vantaan konttorissa, mutta LVI-suunnittelua Pöyryllä tehdään läpi Suomen eri konttoreilla. (1)

1.2 Turun seudun puhdistamo Oy

Toisena opinnäytetyön osapuolena on Turun seudun puhdistamo Oy, joka on perustettu vuonna 2002 ja tuottaa jätevedenpuhdistuspalvelua. Yhtiö on osana Turku-konsernia. Vuonna 2008 rakennettiin uusi jätevedenpuhdistamo, joka kokoaa Turun ja

sen lähikuntien jätevedet puhdistukseen Kakolanmäkeen. Palvelualueella on noin 500 pumppaamoa, ja viemäriverkoston kokonaispituus on enemmän kuin 2 000 km. Puhdistamossa on neljä linjaa puhdistusprosesseja, jotka perustuvat mekaaniseen, kemialliseen ja biologiseen käsittelyyn. (2)

1.3 Työn tausta

Työn taustana on Turun seudun puhdistamolta saatava melko iso määrä ylijäämälämpöä, jota voi hyötykäyttää. Veden puhdistusprosessissa käytetään ilmastuskompressoreita. Ilmastusilman jäähdyttämiseen käytetään vettä, ja palaavan veden lämpötila on tarpeeksi korkea, jotta siitä voidaan ottaa lämpöä talteen. Laitoksella on olemassa oleva LTO-järjestelmä, mutta on tullut esille, että ilmastuskompressoreiden jäähdytysveden hukkaenergiaa olisi vieläkin saatavissa. Toinen kohta, josta löytyy hukkalämpöä, jota voi mahdollisesti hyödyntää, on puhdistamotilojen poistoilma. Poistoilman lämpötila on vaihtuva, mutta sen määrä on suuri.

1.4 Työn tavoite

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia, mistä kaikkialta Turun seudun puhdistamolla on saatavilla ylijäämälämpöä ja minkälainen määrä. Sen jälkeen saatujen tietojen perusteella pitää selvittää, mihin hukkaenergiaa voitaisiin hyödyntää ja mikä olisi optimaalisin ratkaisu siirtää saatava energia hyötykäyttöön. Opinnäytetyössä on myös tavoitteena selvittää, kuinka paljon korvaavan energian avulla voitaisiin vähentää kaukolämmön käyttöä, sekä selvittää, aiheutuisiko muutoksista minkäänlaisia riskejä.

2 Ylijäämälämmön talteenottomenetelmiä

Teollisuudessa syntyy paljon lämpöä, jota on mahdollista ottaa talteen ja hyödyntää. Hyödynnettävää ylijäämälämpöä on saatavilla monesta eri paikasta kuten poistohöyryistä, jäte- ja jäähdytysvesistä sekä erilaisissa prosesseissa vapautuvista kaasuista. Tämän lämmön varastointiin löytyy monia erilaisia lämmmöntalteenottomenetelmiä riippuen vapautuvan lämmön olomuodosta ja sen lämpötilasta. Kykyä käyttää ylijäämälämpöä rajoittaa sen liian matala lämpötila, kuinka puhdasta virtaava aine on tai sen määrä. Usemmiten hukkalämpöä viedään ympäristöön ilmana tai vetenä. Esimerkiksi

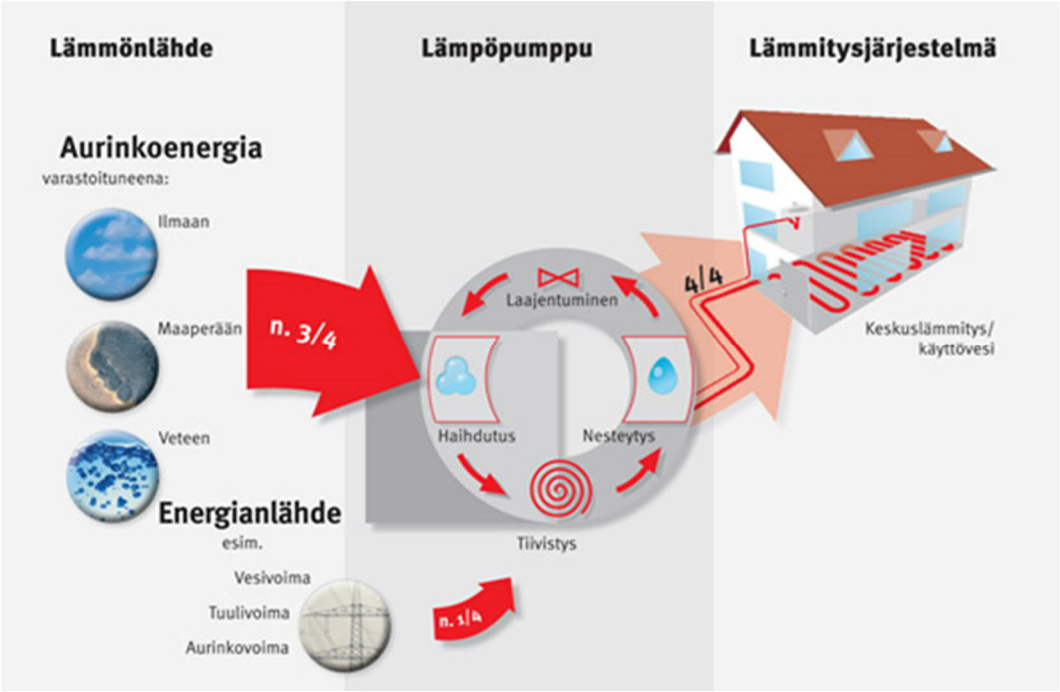
ongelmaksi lämmöntalteenotossa voi muodostua virtaavan nesteen likaisuus, koska suodatusprosessista voi muodostua liian kallis ja monimutkainen.

2.1 Ylijäämälämmön käyttö sellaisenaan

Joskus ylijäämälämmön lämpötila on sopiva johonkin toiseen prosessiin tai lämmitysjärjestelmään suoraan sellaisenaan, ilman että lämpötilaa tarvitsisi nostaa. Riippuen nesteen tai kaasun lämpötilasta sitä voi käyttää esimerkiksi lämmitysjärjestelmän esilämmittämistä varten suoraan sellaisenaan.

2.2 Lämpöpumppuratkaisut

Lämpöpumppujen avulla pystytään ottamaan talteen lämpöenergiaa ilmasta, nesteestä, kalliosta tai maaperästä (kuva 1). Lämpöpumppujen toimintaperiaate on hyvin yksinkertainen: ne toimivat kuin jääkaapit, mutta toisinpäin. Jääkaapin kompressorikoneisto ylläpitää sisällön kylmänä johtamalla lämpöä kaapista huonetilaan. Lämpöpumppu taas päinvastoin kerää lämpöä kylmästä ulkotilasta ja siirtää sitä rakennukseen sisään. Lämpöpumpuilla voidaan kasvattaa ylijäämälämmön matala lämpötila niin korkeaksi, että sitä pystyy hyödyntämään rakennuksen lämmitysverkostossa tai muualla teollisuusprosessissa. Näin voidaan käyttää hyväksi energiaa ja parantaa ilmastoa, joka muuten poistuu atmosfääriin ja lisää kasvihuonepäästöjä. (3, s. 29.)



Kuva 1. Esimerkkikuva lämpöpumpun ”ilmaisen energian” hyödyntämisestä (4).

2.2.1 Lämpökertoimet

Lämpöpumppujen tehon mittayksikkönä on lämpökerroin COP (yhtälö 1), joka kertoo lämpöpumpun tuottaman lämmitystehon ja kuluttamaan sähkön suhdetta. COP kertoo hyötysuhteen yhdessä pisteessä, +7 °C :n lämpötilassa. (5)

$$COP = \frac{Q_{out}}{W_{in}} \tag{1}$$

COP on lämpökerroin
Q_{out} on lämpöpumpusta saatava lämmitysteho
W_{in} on tehty työ (kulutettu sähkö)

Euroopan unionissa on asetettu uudet ilmasto- ja energiatavoitteet 20–20-20, jolla halutaan vuoteen 2020 mennessä vähentää primäärienergian käyttöä 20 %, tuottaa 20 % vähemmän CO_2-päästöjä ja saada 20 % kulutettavasta energiasta uusiutuvaksi. Siitä johtuen lämpökerroin COP on jäämässä pois, ja sen sijaan tulee voimaan lämpökerroin SCOP (yhtälö 2), joka on koko lämmityskauden lämpökerroin. EU:ssa ilmoitetaan energiamerkintä kolmelle ilmastoalueelle: lämpimälle, keskimääräiselle ja kylmälle. (5; 6.)

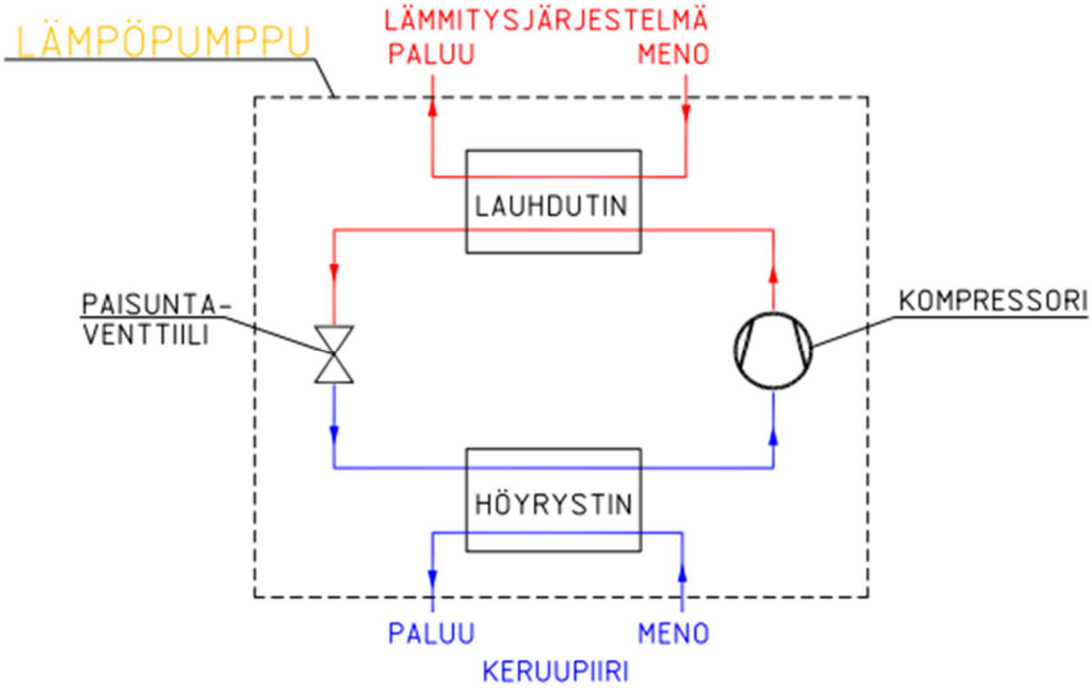
$$SCOP = \frac{Q_H}{Q_{HE}} \quad (2)$$

SCOP on lämmityskauden lämpökerroin
Q_H on vuotuinen lämmitysenergiatarve
Q_{HE} on vuotuinen lämpöpumpun sähköenergiatarve

2.2.2 Mekaaniset lämpöpumput

Mekaaniset lämpöpumput ovat kompressorilämpöpumppuja. Lämpöpumppujen toiminta pohjautuu kylmäainekiertoon. Höyrystimeen vapautunut ja hyvin paljon jäähtynyt kylmäaine ottaa ulkopuolella olevasta ympäristöstä lämpöä, ja kaasuuntuu sen avulla. Sen jälkeen kompressorissa kylmäaine puristetaan korkeaan paineeseen ja se kuumenee. Kuuma kylmäaine johdetaan lauhduttimeen, jossa vapautuu ulkoa kerättyä lämpöä ja tapahtuu kiertoaineen jäähtyminen, minkä jälkeen se tiivistyy takaisin nesteeksi (kuva 2). Seuraavaksi nestemäinen kylmäaine palautuu paisuntaventtiilin kautta taas höyrystimeen, ja kierto alkaa uudestaan. Tyypillisiä mekaanisia lämpöpumppuja ovat seuraavat pumpputyypit:

- Ilmalämpöpumput (ILP), jotka keräävät lämpöä ulkoilmasta ja luovuttavat sitä rakennuksen sisäilmaan. Tämä on yksinkertaisin pumppu ja helppo asennettava.
- Maalämpöpumppu (MLP) kerää lämpöä maasta tai vedestä putkistossa kiertävän nesteen avulla ja siirtää sen kiinteistön vesikiertoon.
- Ilma-vesilämpöpumppu (UVLP) ottaa lämpöä ulkoilmasta ja johtaa sitä vesivaraajaan, josta voi johtaa lämpimän veden patteriverkostoon tai lämmittää käyttövettä.
- Poistoilmalämpöpumppu (PILP) ottaa lämpöenergiaa talteen rakennuksen poistoilmasta ja johtaa sitä tuloilmaan tai veteen.

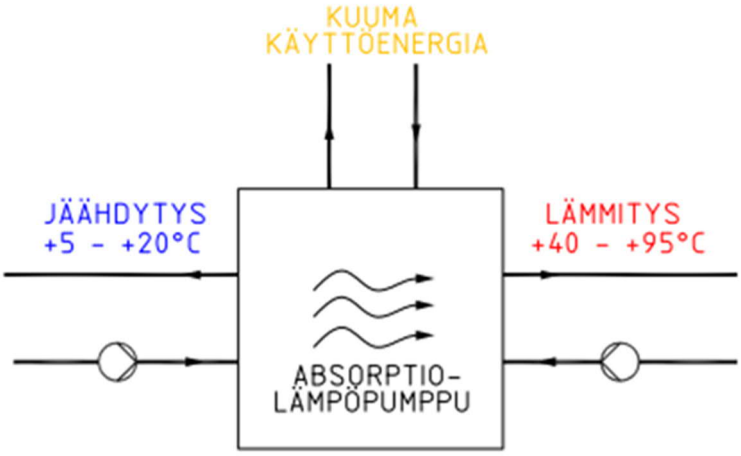


Kuva 2. Lämpöpumpun toimintakaavio

Mekaanisten lämpöpumppujen käyttö on viime vuosina yleistynyt, ja niiden käyttöä solvelletaan paitsi pienissä asuinrakennuksissa, myös isoissa kiinteistöissä ja teollisuudessa. Tekniikka on koko ajan kasvun myötä kehittynyt ja lämpöpumppujen elinkaari pidentynyt. (3, s. 28–32.)

2.2.3 Absorptiolämpöpumput

Absorptiolaitteita käytetään kohteissa, joissa on kuumaa käyttöenergiaa, kuten 1–9 bar höyryä, +250...+700 °C:n lämpötilan moottoreiden pakokaasuja tai kuumaa vettä +65...+150 °C. Absorptiolämpöpumpussa verrattuna perinteiseen lämpöpumppuun ei ole kompressoria vaan kiehutin ja imeytin, joilla ulkopuolelta tuodulla lämmöllä kiertävästä liuoksesta saadaan erottumaan kylmäaine, joka höyrystetään ja palautetaan takaisin liuokseen eli absorboidaan. Näin siirtämällä matalalämpöinen ylijäämälämpö ja kuumakäyttöenergia absorptiopumppuun saadaan valmistettua lämmintä nestettä. Yleisin kiertoaine, jota käytetään absorptiopumpuissa, on litiumbromidivesiliuos, jonka ominaisuutena on voimakas absorptio. Absorptiolaitteet kuluttavat vähän sähköä verrattuna tuotettuun jäähdytystehoon, ja ne ovat turvallisia. COP absorptiolämpöpumpuilla on yleensä 1,7–2,0. Kuva 3 on absorptiolämpöpumpun periaatekuva. (7)



Kuva 3. Absorptiolämpöpumpun periaatekuva

2.2.4 Höyryn mekaaninen komprimointi

Höyryn mekaaninen komprimointi on avoin lämpöpumppukierto, jossa prosessista tulevan höyryn lämpötilaa ja painetta nostetaan mekaanisella kaasu-, sähkö- tai höyrymoottorikäytösellä kompressorilla. Sellaisia pumppuja käytetään tavanomaisesti kemianprosesseissa. On olemassa yksivaiheisia kompromointilämpöpumppuja ja usempivaiheisia. Väliaine määritetään siten, että höyryn paine ja ominaistilavuus olisivat mahdollisimman pieniä. (8)

2.2.5 Termokompressori

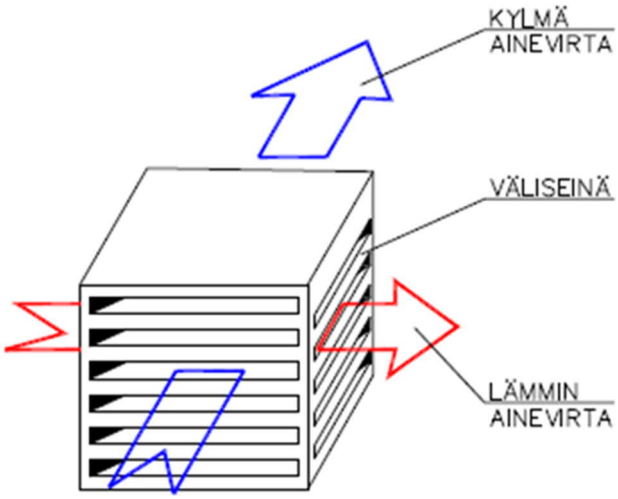
Termokompressori on höyryejektori, jolla nostetaan matalapainesen höyryn paine prosessia varten sopivampaan painetasoon. Ejektoria käytetään sellaisissa käyttökohteissa, joissa lämpöpumppusovelluksen käyttöikä on lyhyt. Termokompressorit ovat suosittuja metsäteollisuudessa, mutta niitä hyödynnetään myös muissa kohteissa kuten ruoanjalostuksessa tai kemianteollisuudessa. Sellaisen kompressorin hyötysuhde on noin kolmannesosa mekaanisen kompressorin hyötysuhteesta, mutta hankintakustannukset ovat pieniä. (8)

2.3 Lämmönsiirtimet

Lämmönsiirrin tai lämmönvaihdin on laite, jolla siirretään lämpöä eri lämpötilaltaan olevien aineiden keskellä sekoittamatta niitä. Energiaa voi siirtyä kolmella eri tavalla: lämpösäteilyn, johtumisen tai konvektion avulla. Kun lämpö kulkee lämpimästä kylmempään väliaineen sisällä, se tapahtuu johtumisella. Konvektiossa energiaa siirtyy kuljetuksella kaasun tai nesteen mukana. Säteily on myös lämmön kuljetustapa, mutta se ei vaadi väliainetta. Lämmönsiirtimiä voi luokitella eri ominaisuuksien perusteella esimerkiksi lämmönsiirtotavan, rakennetyypin tai virtausjärjestelyn mukaan. Lämmönvaihtimet voi jakaa kahteen ryhmään toimintaperiaatteeltaan: rekuperaattoreihin ja regeneraattoreihin. (9; 10.)

2.3.1 Rekuperaattori

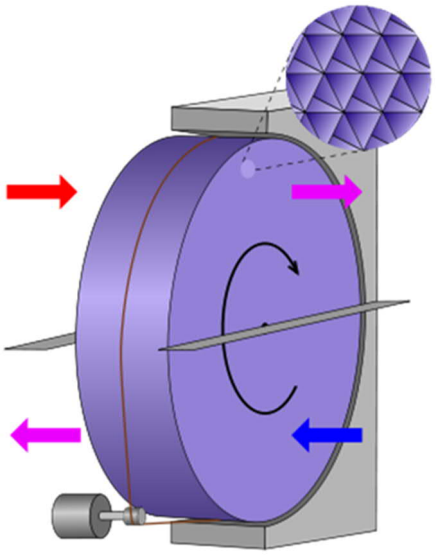
Rekuperaattorit ovat tyypiltään levy- tai putkilämmönsiirtimiä, joissa liikkuu seinämällä erotettuna kaksi jatkuvaa ainevirtaa siirtäen lämpöä lämpimästä ainevirrasta kylmempään. Rekuperatiiviset lämmönsiirtimet voidaan jakaa risti-, vasta- ja myötävirtasiirtimiin sekä näiden yhdistelmiin. Kuvassa 4 on näytetty, miten kylmä ja lämmin ainevirta liikkuvat rekuperaattorissa (11, s. 223–227).



Kuva 4. Rekuperaattorin periaatekuva

2.3.2 Regeneraattori

Regeneraattorissa lämpöä varastoivan kiinteän rakenteen läpi kulkevat ainevirrat vuorotellen vastakkaisiin suuntiin. Regeneraattorit ovat yleensä pienempiä kuin rekuperaattorit, ja niihin saa paremmin lämmönsiirtopintaa, mutta hankaluutena on virtojen välisten vuotojen ehkäisy. Yleisimpiä regeneraattoreita ovat pyörivät lämmönsiirtimet, joita tyypillisesti käytettään ilmanvaihtokoneissa siirrettäessä lämpöä poistoilmasta tuloilmaan. Kuva 5 on periaatekuva, jossa punaisella nuolella on näytetty lämmin poistoilma, sinisella ulkoilma ja alempana oleva vaalenpunainen nuoli kuvaa lämmitettyä tuloilma sekä ylempi vaaleanpunainen nuoli jäähtynyttä jäteilma. (11, s. 223–227.)

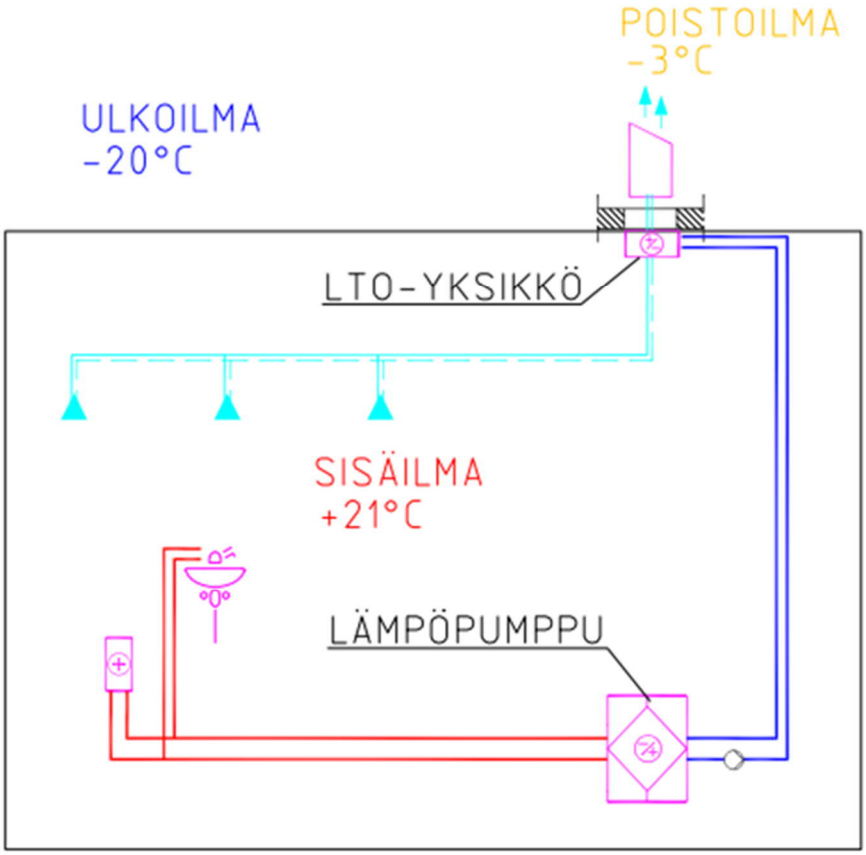


Kuva 5. Pyörivän lämmönsiirtimen periaatekuva (12).

2.4 Nestekiertoinen lämmöntalteenottojärjestelmä

Välillä lämmönsiirtotekniikassa ei pystytä lämmön luovutusta varten saamaan kahta virtaamaa suoraan kohtaamaan toisiaan pelkästään väliseinämällä erottamalla. Sellainen tilanne on yleinen ilmanvaihdossa, kun tuloilma tuodaan rakennukseen eri kohdasta kuin se poistetaan, mutta lämpöä halutaan ottaa talteen. Tässä tapauksessa, koska virtaukset ovat kaukana toisistaan, poistoilman lämpöenergia siirretään kiertonesteen avulla tuloilmaan. Tämän järjestelmän toimintaa varten tarvitaan lisäksi kaksi lämmönsiirrintä. (11, s. 223–225.)

Nestekiertoista lämmön talteenottojärjestelmää hyödynnetään myös silloin, kun talteenotettu lämpö poistoilmasta halutaan siirtää lämpöpumpulla rakennuksen lämmitysjärjestelmiin. Poistoilmapuolelle asennetaan huippuimuriin lämmönsiirrin tai poistokanavaan LTO-patteri ja nesteen avulla tuodaan lämpöenergia lämpöpumpulle. Kuvassa 6 on havainnollistettu tällaistä järjestelmää. (10)

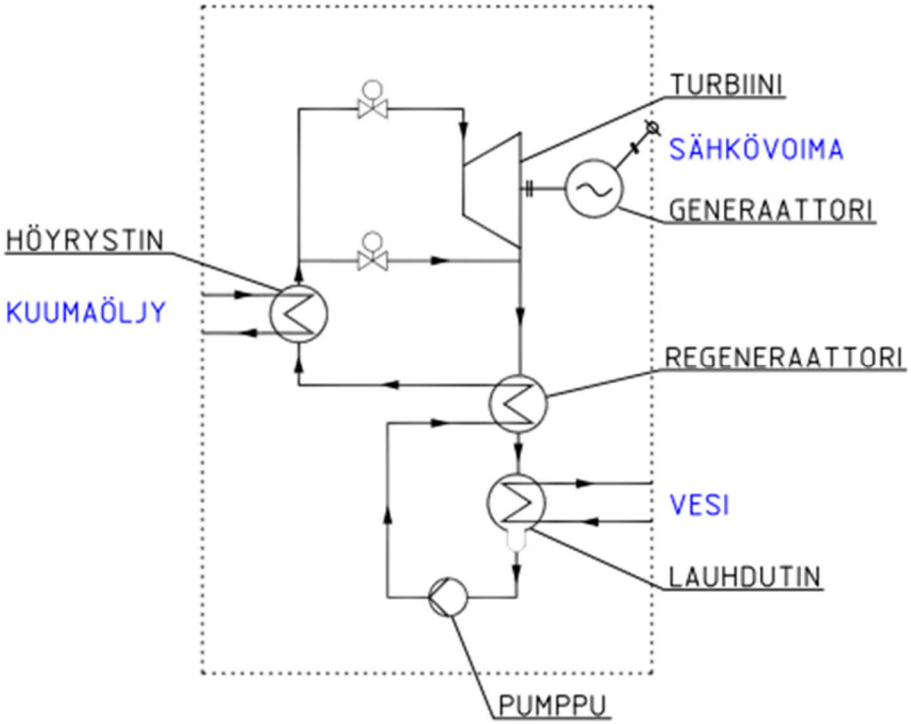


Kuva 6. Esimerkki nestekiertoisen lämmön talteenoton järjestelmän hyödyntämisestä

2.5 ORC-tekniikka

ORC-tekniikan (Organic Rankine Cycle) avulla pystytään ylijäämälämpöä muuttamaan sähköksi. Tekniikassa veden sijasta käytetään orgaanista kiertoainetta, mikä tekee mahdolliseksi hyödyntää kylmäaineen höyrystymisominaisuuksia matalissa lämpötiloissa. ORC-tekniikkaa voi soveltaa eri teollisuusprosesseissa, joissa hukkalämpöä on saatavilla. Kohteita, joissa Rankinen-kiertoprosessia käytetään hyväksi, ovat voimalaitokset, CHP-laitokset, erilaiset uunit ja moottorit sekä muut kohteet, joissa muodostuu

suhteellisen kuumaa sekundäärilämpöä. Tuotettaessa sähköä ORC-tekniikan avulla ei tarvita lisää polttoainetta, mikä parantaa hyötysuhdetta ja tätä myötä energiatehokuutta. Koska ORC-prosessista ei synny lisää hiilidioksidipäästöjä, voidaan sanoa, että saadaan vihreää sähköä. Kuvassa 7 on esitetty ORC-prosessin tyyppikaavio. (13; 8.)



Kuva 7. ORC-prosessin tyyppikaavio (13)

3 Nykytilanne Turun seudun puhdistamolla

3.1 Veden puhdistusprosessi

Jäteveden puhdistukselle on asetettu tiukat vaatimukset, sillä mereen voi laskeutua vain puhdasta vettä. Jätevesi tulee puhdistamon tulopumppaamoon kahdesta suunnasta. Sieltä pumpataan vesi puhdistusprosessiin alkuun välppäykseen, jossa karkea kiinteä aines poistetaan jätevedestä. Erotettu kiitoaines viedään biolaitokselle jatkokäsittelyyn, jossa siitä valmistetaan maanparannusainetta ja kaukolämpöä. Seuraavaksi vesi johdetaan hiekkaerotukseen, jossa erotetaan hiekka ja rasva. Jäteveden matka jatkuu esiselkeytysaltaalle, joissa poistetaan osa kiintoaineesta laskeuttamalla painovoimalla

pohjalle. Sitten jätevesi menee ilmastusaltaisiin, joissa vesi käsitellään biologisesti aktiivilieteprosessissa. Tämän jälkeen jätevesi virtaa jälkiselkeytykseen. Veden puhdistuskapasiteetin täyttyessä osa vedestä johdetaan ohitusveteen, joissa vesi käsitellään kemiallisesti. Puhdistusprosessin viimeinen vaihe on jälkikäsittely, joissa vesi suodatetaan hiekkapatjan läpi. Puhdas vesi johdetaan mereen ja puhdistuksessa syntyvä liete pyritään käyttämään mahdollisimman tehokkaasti. Puhdistamolla liete varastoidaan siiloihin ja kuivataan, minkä jälkeen se viedään biokaasulaitokselle, jossa liete käsitellän varsinaisesti mädättämällä. (2)

3.2 Nykyinen lämmöntalteenottojärjestelmä jätevedenpuhdistamolla

Turun seudun jäteveden puhdistamo muodostuu puhdistamosta, joka sijaitsee luolastossa sekä maan päällä olevasta toimistorakennuksesta. Luolastossa hukkalämpöä hyödynnetään monella eri tavalla:

- Puhdistetusta jätevedestä otetaan lämpöä talteen lämpöpumppujen avulla ja siirrettään kaupungin kaukolämpöverkkoon.
- Ilmastuskompressoreilta tuleva ylijäämälämpö hyödynnetään luolaston tuloilman lämmittämisessä.
- Luolaston ilmanvaihdossa on myös LTO-järjestelmä.

Toimistorakennuksessa lämmön talteenotto on toteutettu ilmanvaihtokoneissa, joissa lämpöä otetaan poistoilmasta ja siirretään tuloilmaan. (14)

3.3 Jätevedenpuhdistamon ylijäämälämmön saatavuus

Tutkiessa kohdetta on tullut esille, että olemassa olevien lämmöntalteenottojärjestelmien lisäksi löytyy vielä ainakin kaksi paikkaa, joista on mahdollista ottaa lämpöä talteen. Näitä ovat ilmastuskompressoreilta tuleva jäähdytysvesi ja luolaston poistoilma.

3.3.1 Ilmastuskompressorit

Veden puhdistusprosessissa yhdessä puhdistusvaiheessa käytetään aktiivilietemenetelmää, joka toimiakseen vaatii veteen liuennutta happea. Ilma tuodaan puhdistetta-

vaan veteen ilmastuskompressoreiden avulla. Tarvittavan ilman määrä on suuri, 6 000–25 000 m³/h, ja prosessissa syntyvä vastapaine aiheuttaa ilman lämpenemisen noin 150 °C:seen. Tämä ilma jäähdytetään ilmastusta varten noin 50 °C:n lämpötilaan kompressoreiden avulla. Prosessissa syntyvä ylijäämälämpöä on mahdollista ottaa talteen ja hyötykäyttää. Osa kompressoreilta muodostuvasta ylijäämälämmöstä hyödynnetään jo ilmanvaihtojärjestelmässä.

Ilmastuskompressoreilta tulee enemmän lämpöä, kuin käytetään nykyisessä LTO-järjestelmässä hyväksi. Kompressoreilta tulevan jäähdytysveden virtaama on suuri, mutta lämpötila alhainen. Tästä voimme päätellä, että olisi kannattavaa ottaa lämpöä talteen lämpöpumppujen avulla.

3.3.2 Poistoilmakanava

Veden puhdistusprosessi tapahtuu isossa luolastossa, joka koostuu pitkistä tunneleista, joista ilma poistetaan erillisenä koneellisena poistona. Suuri määrä ilmaa, 40–60 m³/s, johdetaan tunneleita pitkin poistopiipulle, jossa kolmella poistopuhaltimella ilma puhalletaan ulos. Luolaston sisäilman lämpötila on keskimäärin 15 °C. Näin syntyy kohtalaisen suuri lämpöhukka, koska melko lämmintä ilmaa menee suoraan ulos. Jatkuvasta isosta ja suhteellisen lämpimästä poistoilmavirrasta on mahdollista ottaa talteen energiaa poistoilmalämpöpumppujärjestelmällä.

4 Selvitys ylijäämälämmön saatavuudesta

Tässä luvussa selvitetään, minkälaisia lämmitysjärjestelmiä laitoksella on olemassa ja onko mahdollista ja hyödyllistä siirtää ylijäämälämpöä olemassa oleviin systeemeihin. Samalla arvioidaan riskit, jotka voivat syntyä uusien järjestelmien lisäämisestä olemassa oleviin prosesseihin.

4.1 Jätevedenpuhdistamon lämmitysenergian tarve

Turun seudun puhdistamolla on kaksi eri lämmitysjärjestelmien palvelukohdetta, yksi on maan alla sijaitseva puhdistamon luola ja toinen maan päällä oleva toimistorakennus. Luolaston LVI-järjestelmistä ainoastaan ilmastoinnin patterit vaativat lämpöä, ja

niille tuodaan kaukolämpöä. Luolaston tunnelia palvelevan lämmönvaihtimen teho on 1 700 kW, mutta koska ilmanvaihtoa on säädetty tarpeiden mukaiseksi, tarvittava maksimiteho nykyään on 1 265 kW. Toimistossa taas on monia järjestelmiä, kuten ilmanvaihto, patteriverkosto ja käyttövesi, jotka tarvitsevat lämmitysenergiaa. Näin ollen hallintorakennuksessa on kolme lämmönvaihdinta teholtaan 204 kW, 40 kW ja 262 kW, jotka käyttävät, samoin kuin luolastossa, kaukolämpöä energian lähteenä. Kuitenkin puolet toimistorakennuksessa valmistettavasta lämpimästä käyttövedestä käytetään luolastossa vedenpuhdistusprosessissa. Koska lämmitysjärjestelmät ovat olemassa olevia, lämmitysenergian tarve selvisi edellisten vuosien perustella suoraan laitokselta. Luolaston keskimääräinen lämmitysenergiankulutus on ollut 560 MWh/a ja hallintorakennuksella 750 MWh/a.

4.2 Jätevedenpuhdistamon ylijäämälämmön kapasiteetti

4.2.1 Ilmastuskompressoreilta saatava lämpö

Ilmastuskompressoreilta tulee tasavirralla 28,6 l/s jäähdytysvettä, mutta veden lämpötila on vaihtuva, pakkasilla voi laskea lähelle 0 °C:ta ja kesällä nousta yli +30 °C:n. Lisäksi kompressoreiden systeemiin palaavan veden lämpötila ei saa olla alle +5 °C, mikä tarkoittaa, että vettä joudutaan pakkasilla jopa lämmittämään, mikä toteutetaan olemassa olevan LTO-järjestelmän avulla. Veden lämpötilatiedot on saatu puhdistamon automaatiojärjestelmästä. Mittausjärjestelmästä näkee myös, miten kompressoreilta tulevan veden lämpötila on riippuvainen ulkolämpötilasta. Mittauksista saatujen lukemien avulla voidaan laskea, että maksimissaan tehoa olisi saatavilla 2 763 kW ja ulkolämpötilan ollessa alle –2 °C ylijäämälämpöä ei olisi käytettävissä ollenkaan. Koska ylijäämälämpöä on saatavissa paljon kesällä ja suurin lämmön tarve on talvella, LTO-järjestelmän mitoitus täydelle teholle ei ole järkevää, sillä koko tehoa on vaikea hyödyntää kesällä.

4.2.2 Poistoilmakanavasta saatava lämpö

Poistoilmakanavassa virtaa ilmaa noin 45 m³/s ja poistoilman lämpötila on +10... +20 °C. Poistoilman ollessa +10 °C tehoa olisi saatavissa 432 kW, ja kun ilma on +20 °C, tehoa saisi 972 kW. Kokoaikaista mittausta poistolämpötilalle laitoksella ei ole, mutta poistoilmaa on välillä tarkkailtu mittaamalla lämpötila kanavasta. Ylijäämäläm-

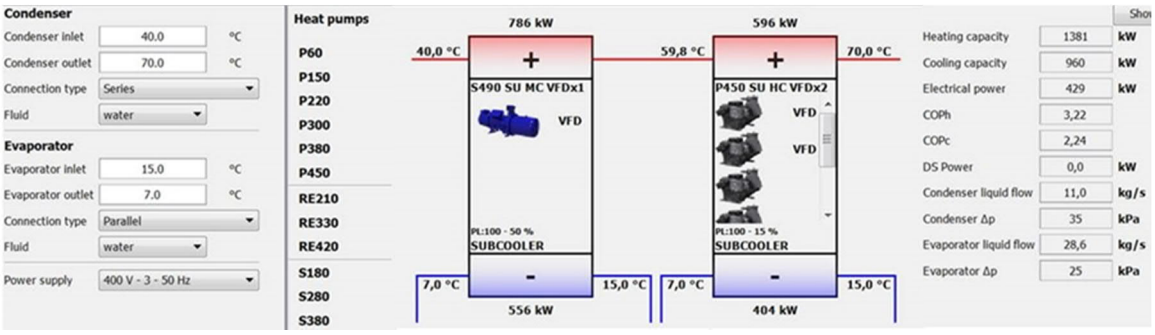
mön määrä on arvioitu sillä perustella, että poistuvan ilman lämpötila ei myöskään saa jäähtyä liikaa, eli tässä tapauksessa jäähtyneen ilman lämpötilaksi on ajateltu minimissään +2 °C.

4.3 Ylijäämälämmön hyödyntäminen kohteessa

Tutkittavan ylijäämälämmön määrä on verrattain pieni, jotta sen myyminen ulkopuoliselle taholle olisi kannattavaa, mutta tarpeeksi iso käytettäväksi hyväksi puhdistamon rakennusten lämmitysjärjestelmissä. Tutkittaessa kahta ylijäämälämmön lähdettä ja saatavan energian määrää on tehty laskelmia siitä, mihin ja kuinka paljon on optimaalista hyödyntää saatava lämpö. Työssä tehdyt laskelmat ovat yritysten sisäiseen käyttöön, eikä laskelmia julkaista tässä työssä. Tämän jälkeen arvioitiin tilannetta, jossa ilmastuskompressoreita tuleva energia siirrettäisiin hallintorakennukseen lämmitysjärjestelmiin tai sitä hyödynnettäisiin luolaston ilmanvaihdossa. Samoin verrattiin vaihtoehtoja, joissa poistoilmasta saatava energiaa käytettäisiin toimiston tai tunnelin lämmityksessä.

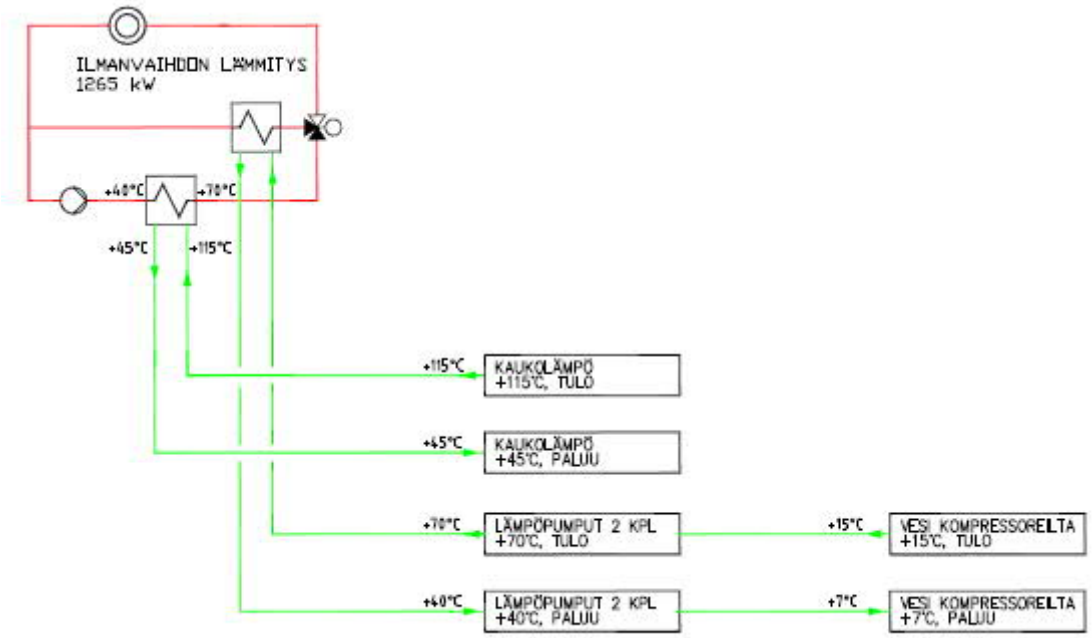
4.3.1 Ilmastuskompressoreilta tuleva lämpöenergia

Päädyttiin, että ilmastuskompressoreilta tuleva lämpö olisi parhaiten mahdollista ottaa talteen lämpöpumpuilla. Tutkittiin erilaisia valmistajia ja tässä tapauksessa valittiin Oilon Group Oy:n pumput, koska oli ainoa yritys, joka valmistaa teollisuuslämpöpumppuja Suomessa. Näin ollen valmistajan ohjauksella tehtiin mitoitus tarvittavilla parametreilla Oilon-laitemitoitusohjelmalla (kuva 8). Lämpöpumppujen avulla saatava teho mitoitettiin ilmastuskompressoreilta tulevan veden keskimääräisen lämpötilan mukaan, joka on 15 °C. Näin jäähdytyspuolelle saadaan lämpöpumpuilla tehoa 961 kW ja lämmityspuolelle 1 381 kW. (15)

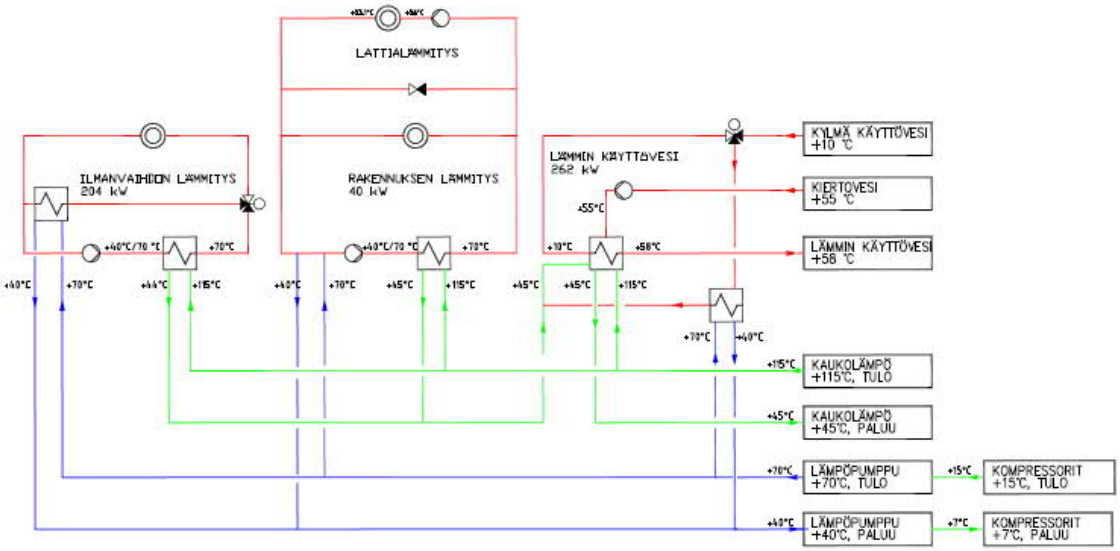


Kuva 8. Oilon-mitoitusohjelmalla tehty lämpöpumppumitoitus

Koska luolastossa ja hallintorakennuksessa lämmitysjärjestelmien toisiopuolen lämpötilat ovat samoja 70 °C/40 °C, yhtä laitemitoitusta pystytään hyödyntämään tarkastaessa niin luolaston kuin hallintorakennuksen mahollista LTO-järjestelmä. Alla on esitetty molemmasta vaihtoehtosta periaatekytkentakaaviot. (Kuvat 9 ja 10.)



Kuva 9. Luolaston ilmanvaihdon lämmitysjärjestelmän periaatekytkentäkaavio

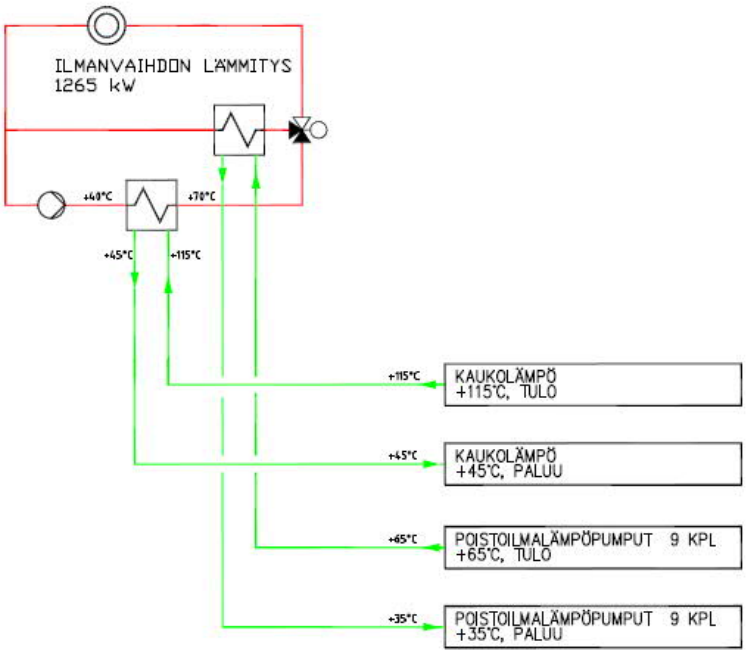


Kuva 10. Hallintorakennuksen lämmitysjärjestelmän periaatekytkentäkaavio

4.3.2 Poistoilmasta tuleva lämpöenergia

Hyvän ja kannattavan ratkaisun löytämiseksi on pyydetty eri poistoilmalämpöpumppujen valmistajilta mitoituksia laitteista. Sopivimmaksi mitoitukseksi valittiin Nibe Energy Systems Oy:n laskelmat, ja tältä yritykseltä saatujen tietojen perusteella on tehty poistoilmahyödyntämiseen liittyvät laskelmat. Nibe valittiin, koska yritykseltä oli saatavilla parhaiten tietoa toteutuneista isoista kohteista. (16)

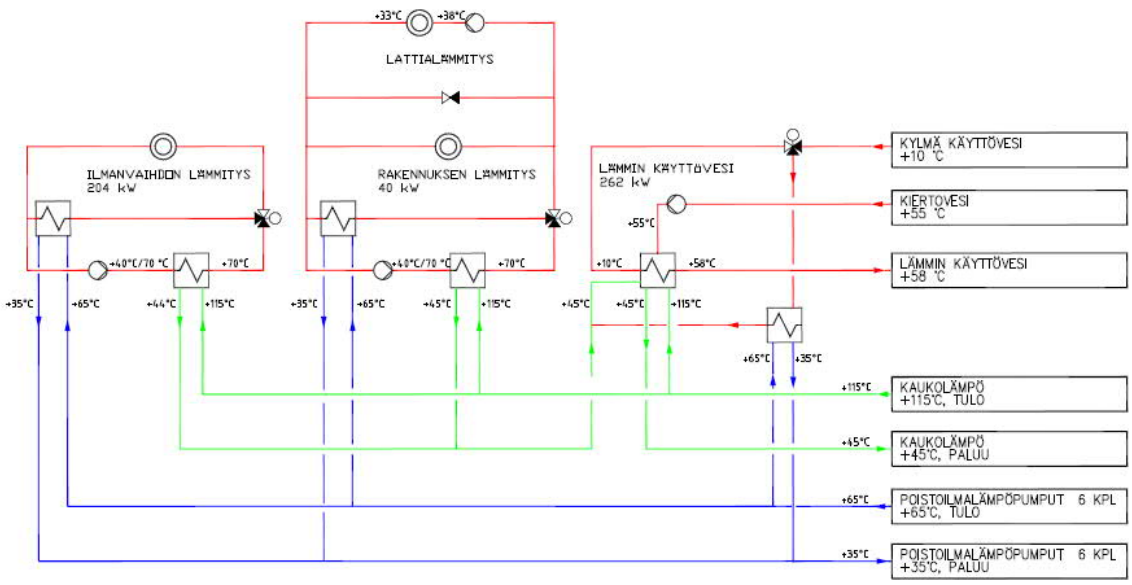
Ensimmäinen tutkittava vaihtoehto oli siirtää poistoilmasta saatu lämpö luolaston IV-järjestelmään. Poistoilmalämpöpumpun avulla saadaan 65 °C:n lämpöistä vettä ja lämpötila on alhaisempi kuin olemassa olevan järjestelmän mitoituslämpötila toisiopuolella. Tässä tapauksessa kannattavaksi valittiin siirtää ylijäämälämpöä yhdeksällä kappaleella lämpöpumppuja kytkettynä sarjaan kaukolämmön rinnalle. Lämpöpumpuilla saataisiin 648 kW tehoa hyötykäyttöön. Kuvassa 11 on näytetty periaatekytkentä tilanteesta.



Kuva 11. Luolaston ilmanvaihdon lämmitysjärjestelmän periaatekytkentäkaavio

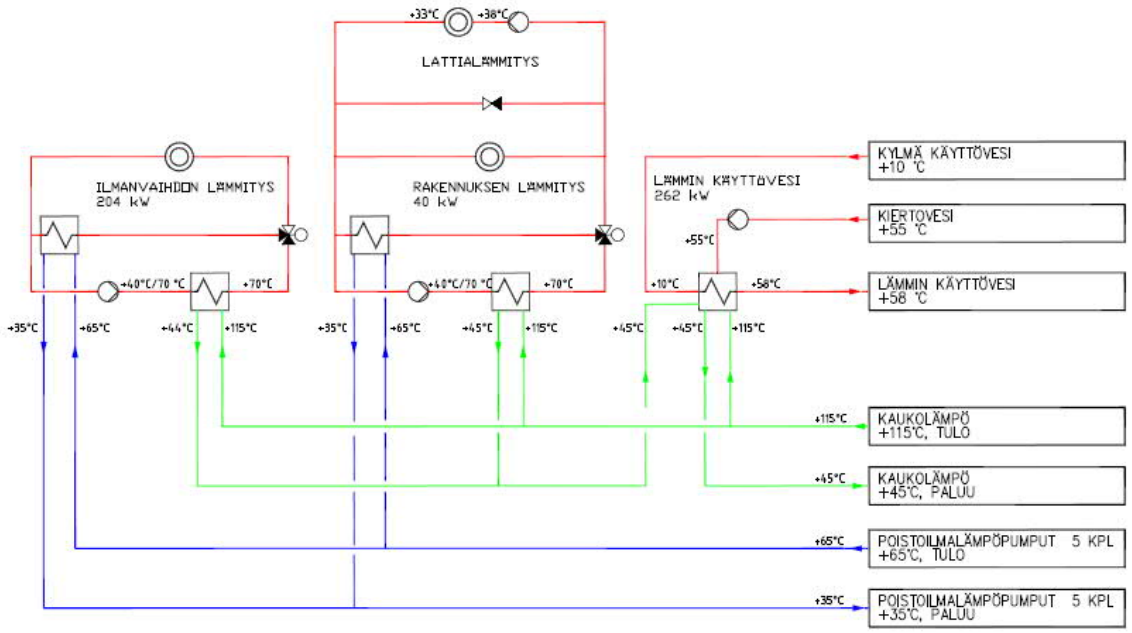
Toinen mahdollisuus on ohjata poistoilmasta saatu lämpöenergia hallintorakennuksen lämmitysjärjestelmiin. Mitoituksista tuli ilmi, vaikka tehoa lämpöpumpuilla saataisiin sen verran, että pystytään hoitamaan kaikki veden, rakennus ja ilmanvaihdolämmitys kokonaan, näin sitä ei ole kannattava toteuttaa. Näin on, koska lämpöpumppujen sähköenergian kulutus verrattuna niiden tuottamaan lämmitysenergiaan olisi liian iso, eli hyötysuhde olisi minimissä.

Tästä syystä verrattiin kolmea vaihtoehtoa hyödyntää poistoilman ylijäämälämpö lämpöpumppujärjestelmällä hallintorakennuksessa. Yksi ratkaisu olisi siirtää energiaa rakennuslämmitykseen ja hoitaa samalla noin 20 % käyttöveden lämmityksestä (kuva 12). Mitoituksista nähtiin, että kannattavinta on toteuttaa sellainen järjestelmä kuudella 60 kW:n pumpulla, koska viidellä kaukolämmityksen kulutus suhteessa on isompi ja seitsemällä taas sähkön kulutus on liian suuri.



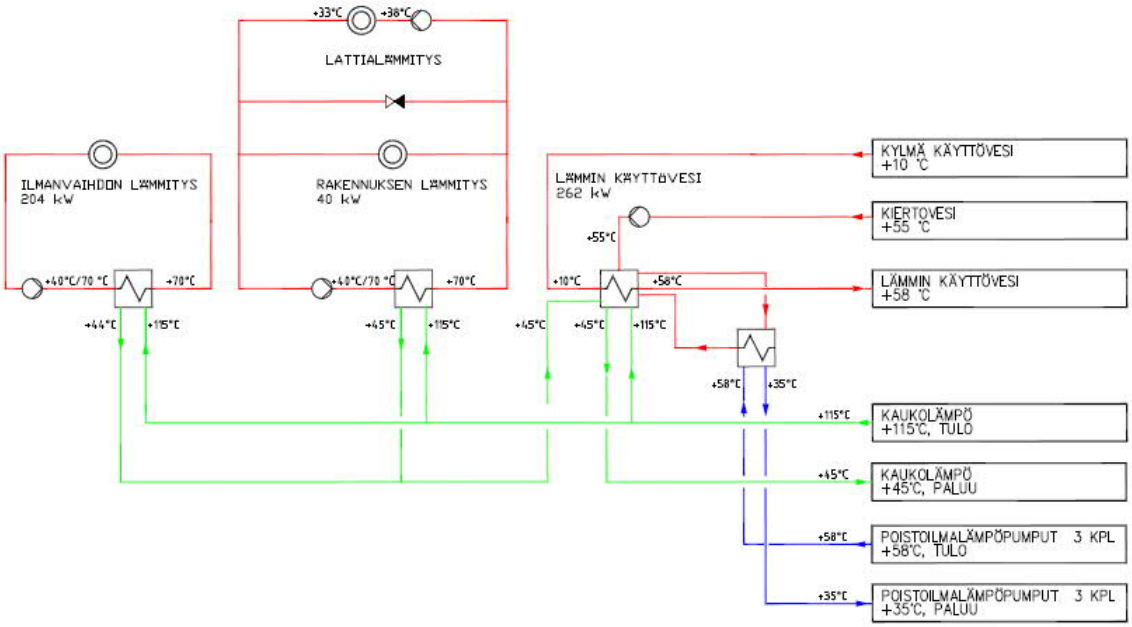
Kuva 12. Hallintorakennuksen lämmitysjärjestelmän periaatekytkentäkaavio

Seuraava tapaus on, että ylijäämälämpöä hyödynnetään vain patteriverkostossa ja IV-lämmityksessä ja että käyttövesi hoidetaan pelkällä kaukolämmöllä (kuva 13). Selvitettiin, että tällaisessa versiossa kannattavinta olisi käyttää viittä 60 kW:n lämpöpumppua.



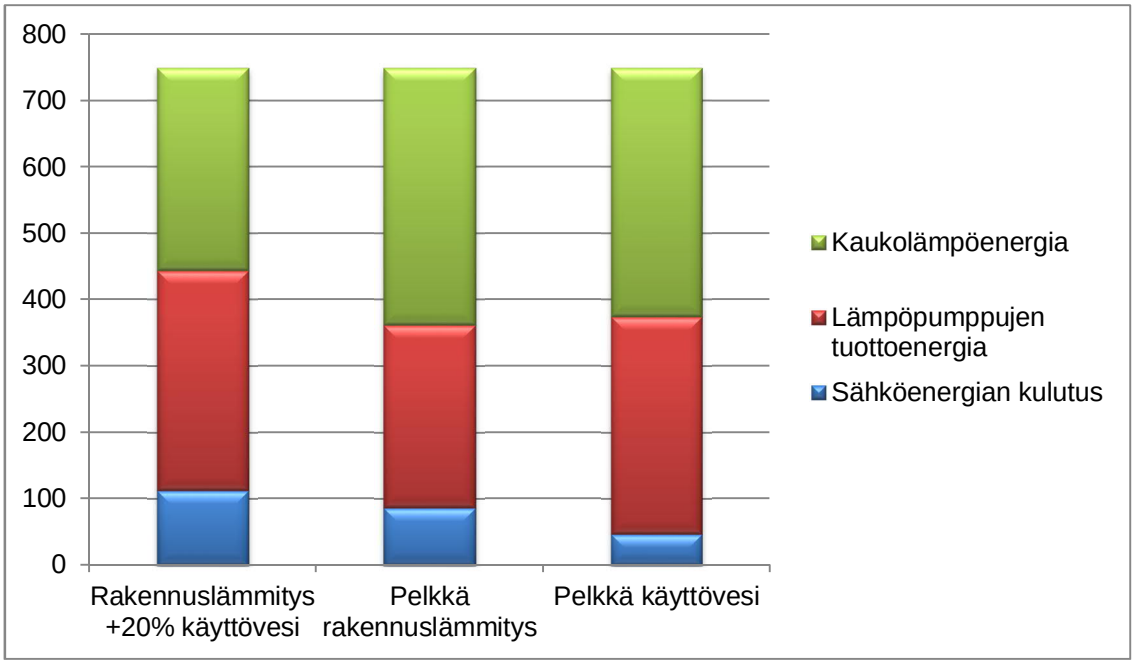
Kuva 13. Hallintorakennuksen lämmitysjärjestelmän periaatekytkentäkaavio

Kolmas vaihtoehto olisi käyttää lämpöpumppuja ainoastaan käyttöveden lämmityksessä (kuva 14). Tällaisessa tapauksessa sähköenergian kulutuksen kannalta olisi järkevintä käyttää kolmea 60 kW:n poistoilmalämpöpumppua.



Kuva 14. Hallintorakennuksen lämmitysjärjestelmän periaatekytkentäkaavio

Kaikissa kolmessa ratkaisussa ensisijaisesti lämmitysenergian tarve katetaan lämpöpumpuilla. Vasta sen jälkeen, kun lämmitysverkostoon menevän veden lämpötila ei ole enää riittävän korkea, lisäteho otetaan kaukolämmöstä. Kuvaajassa 15 näytetään energia-osuudet lämpöpumppujen asennuksen jälkeen. Kaaviossa punaisella värillä oleva osuus esittää saatavan ilmaisen energian määrän.



Kuva 15. Energiajakauma lämpöpumppujen asennuksen jälkeen

5 Tulokset

Eri järjestelmien kannattavuustarkastelut tehtiin laskemalla uusien järjestelmien suoria takaisinmaksuaikoja. Laitevalmistajilta saatiin avustusta ja ohjausta lämpöpumppujen valintaan ja mitoituksiin, minkä perusteella arvioitiin tarvittavat laitteiden määrät ja hinnat. Turun seudun puhdistamolta saatiin tietoa lämmitysjärjestelmien reaalisesta energiakulutuksesta. Kaikki kustannuslaskelmat perustuivat todellisiin investointi- ja käyttökustannuksiin.

5.1 Ilmastuskompessoreilta saatava lämpöenergia

Ensimmäiseksi tarkastettiin vaihtoehtoa, joissa ilmastuskompressoreilta saatava ylijäämäenergia siirretään lämpöpumppujen avulla pelkästään laitoksen käyttöveden lämmitämistä varten. Tulokseksi saatiin, että tämä vaihtoehto ei ole kannattava, koska takaisinmaksuajaksi tulisi noin 20 vuotta, mikä on pitkä aika ottaen huomioon lämpöpumppujen keskimääräinen elinkaari-ikä, joka on 25–30 vuotta. Sitten analysoitiin tapausta, jossa kytketään lämpöpumppujärjestelmä kaukolämmön rinnalle hyödyntäen ylijäämälämpöä kaikissa toimistorakennuksen lämmitysjärjestelmissä. Tästä saatiin parempi vaihtoehto, koska takaisinmaksuaika olisi noin 10 vuotta. Seuraavaksi tutkittiin

järjestelmä, jossa ilmastuskompressoreilta tuleva lämpöenergiaa käytetään luolaston ilmanvaihtojärjestelmän jälkilämmityksessä, ja saatiin takaisinmaksuajaksi 12–13 vuotta, joka on suhteellisen pitkä aika.

5.2 Poistoilmasta saatava lämpöenergia

Tarkasteltaessa poistoilmasta mahdollisesti talteen otettavan lämmön siirtoa luolaston IV-järjestelmään nähdään, että huippupakkasilla tehoa ei riitä kattamaan koko järjestelmä ja talvella tarvitaan ainakin 20 % kaukolämpöä lisälämmöksi. Kannattavuuslaskelman mukaan tämä lämpöpumppujärjestelmä maksaisi itsenä takaisin noin kymmenessä vuodessa.

Tutkittaessa erilaisia vaihtoehtoja, joissa poistoilmasta saatava lämpöenergia käytettäisiin hyväksi hallintorakennuksen lämmitysjärjestelmissä, saatiin tulokseksi kaikissa kolmessa mahdollisessa vaihtoehdossa takaisinmaksuajaksi noin saman verran eli 7–9 vuotta. Teoriassa kaikista paras vaihtoehto olisi hyödyntää poistoilmasta talteen saatu lämpö pelkästään käyttöveden lämmitystä varten.

6 Päätelmät

Niin ilmastuskompressoreilta kuin poistoilmasta tulevan ylijäämälämmön siirtoa varten on valittu lämpöpumppujärjestelmät, jotka kytketään kaukolämmön rinnalle. Koska koko lämmityskautena ei ole saatavissa 100 %:n tehoa ylijäämälämmöstä, jonkun muun järjestelmän pitää kattaa 100 % lämmitystehon tarpeesta. Tässä tapauksessa kaukolämpöjärjestelmä pitää olla mitoitettu täydelle teholle, jotta varmistetaan riittävä toimintavarmuus. Tällaisia järjestelmiä kutsutaan hybridijärjestelmiksi. Hybridijärjestelmien etuna on kyky yhdistää erilaisia lämmitysmuotoja ja sen kautta hyödyntää järkevintä lämmitysmuotoa riippuen olosuhteista. Sellaisissa järjestelmissä on myös huonoja puolia, kuten investointi- ja huoltokustannukset, jotka ovat suuret.

Tämäntyyppisia lämpöpumppujärjestelmien ratkaisuja isoissa kohteissa ei ole toteutettu vielä paljon. Tämän vuoksi oikean järjestelmän mitoitus on vaikea, ja järjestelmän hyötysuhde todellisuudessa saattaa poiketa laskelmista paljonkin. Mitoituksissa käytetään aina oletusta, että kaikki järjestelmän komponentit toimivat parhaalla mahdollisella

hyötysuhteella, missään ei ole vuotoja ja kaikki osat on valittu oikein. Todellisuudessa niin itse kompressori, kuin muut apulaitteet ja osat kuluvat, mikä laskee hyötysuhdetta ja sitä kautta takaisinmaksuaika kasvaa.

Turun seudun puhdistamolla lämpöpumppujärjestelmän rakentamisessa huonona puolena on ylijäämälämmön lähteiden sijainti, joka on kaukana lämmitysjärjestelmistä. Pitkästä välimatkasta muodostuu paljon lämpöhäviöitä putkistoissa, ja vuotoriski on suuri. Myös kiertopumpun tehon tarve tulee olemaan iso, mikä lisää sähkön kulutusta.

Tämän opinnäytetyön tekeminen oli itselleni tosi mielenkiintoista. Työssä käsitelty aihe on hyvin nykyaikainen, koska energiatehokkuus rakentamisessa on tosi tärkeä ja siihen panostetaan yhä enemmän ja enemmän. Tehdessä opinnäytetyötä tästä aiheesta pääsi syventymään mahdollisiin energian talteenottomenetelmiin ja sitä kautta näkemään, että aiheessa on vielä paljon kehittämistä ja tutkimista. Työssä erityisesti syvennyttiin lämpöpumppuihin, jotka ovat kehittynyt viimeisen kymmenen vuoden aikana huomattavasti, mutta kuitenkin soveltamista vielä riittää.

Erityisesti tuli esille, että kokemusta isojen poistoilmamäärien talteenotosta, niin lämpöpumppujärjestelmien valmistajilla kuin suunnittelijoilla on tosi vähän. Siitä johtuen tehokkaan järjestelmän mitoituksesta ja komponenttien valinnasta tietojen saanti oli todella haastavaa.

Lähteet

1 Tietoa meistä. 2018. Verkkoaineisto. Pöyry <http://www.poyry.fi/> Luettu 15.10.2018.

2 Tutustu toimintaan. 2016. Verkkoaineisto. Turun seudun puhdistamo. <https://www.turunseudunpuhdistamo.fi/> Luettu 15.10.2018.

3 Perälä, Osmo ja Perälä, Rae. 2013. Lämpöpumput. Kolmas uudistettu painos. Helsinki: Alfamer / Karisto Oy.

4 Ilmalämpö. 2013. Verkkoaineisto. Oy Callidus Ab. Kuva <http://callidus-oy-ab.fi/fi/lammitys/ratkaisut/ilmalampo>

5 Maaskola, Iikka ja Kataikko, Matti. 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen. ORC-sovellukset. Verkkoaineisto. Motiva.<https://www.motiva.fi/files/13513/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Lampopumppu-_ja_ORC-sovellukset.pdf>. Luettu 01.11.2018.

6 Energian säästö ja lämpökertoimet. 2008. Verkkoaineisto. Regroup Oy <http://www.ilmalampopumput.fi/fi/mika-ihmeen-lampopumppu/energian-saasto> Luettu 25.10.2018.

7 Absorptiolaitteet. 2018. Verkkoaineisto. Calefa Oy <http://www.calefa.fi/fi/palvelut/teknologiat/absorptiolaitteet/> Luettu 28.10.2018.

8 Innanen, Seppo. 2018. Lehtori, Metropolia. Organic Rankine Cycle. Luentomateriaali.

9 Lämmönvaihtimen perusteet. 2016. Verkkoaineisto. Johanna_Ekocoil. <https://ekocoil.wordpress.com/2016/02/28/lammonvaihtimien-perusteet/> Luettu 22.10.2018.

10 Lampinen, Markku J. (toim.) 1997. Lämmönsiirtimien mitoitus. Otaniemi: Teknillinen korkeakoulu.

11 Seppänen, Olli. 2001. Rakennusten lämmitys. 2. päivitetty painos. Helsinki: Suomen LVI-liitto ry.

12 Pyörivä lämmönsiirrin. 2007. Kuva. Verkkoaineisto. Wikipedia. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Py%C3%B6riv%C3%A4_l%C3%A4mm%C3%B6nsiirrin> Luettu 15.01.2019

13 ORC-tekniikka. 2018. Verkkoaineisto. Calefa Oy <http://www.calefa.fi/fi/palvelut/teknologiat/orc/> Luettu 22.10.2018.

14 Arfman, Jarn; Malmikare, Esa; Laanti, Jarkko. Turun seudun puhdistamo. Turku. Lähtötietopalaveri 14.2.2018.

15 Kukkula, Martti. Oilon Oy. Vantaa. Lämpöpumppujen mitoitusohjelman esittely. 8.5.2018.

16 Olander, Markus. NIBE Energy Systems Oy. Vantaa. Suunnittelijaseminaari. 24.4.2018.

Liitte

Luottamuksellinen. Vain tilanneen yrityksen sisäiseen käyttöön.