

Opinnäytetyö (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

2021

Hannes Lundstedt

LÄMMÖNTALTEENOTTO- JA JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄN KEHITTÄMINEN

– ENTER-hanke

Hannes Lundstedt

LÄMMÖNTALTEENOTTO- JA JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄN KEHITTÄMINEN

- ENTER-hanke

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon paineilmajärjestelmän lämmönvaihtimien vaihtoehtoja ja suunnitella lämmöntalteenottoverkoston toimintavarmuuden parantamista sekä varajäähdytyksen toteuttamista.

Opinnäytetyö tehtiin osana ENTER-hanketta, jonka tarkoituksena on kehittää Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon energiatehokkuutta ja varautumista selvittämällä uuden tekniikan käyttömahdollisuuksia paineilmajärjestelmän energiatehokkuuden optimoimiseksi sekä jäähdytysjärjestelmän parantamiseksi.

Tavoitteena oli löytää paineilman jäähdytykseen uudet prosessi-ilmakompressorien lämmönvaihtimet, joiden painehäviöt ovat nykyisiä lämmönvaihtimia pienemmät ja lämmöntalteenottokyky on parempi. Lisäksi kokonaisuuteen olisi tarkoitus lisätä varajäähdytysjärjestelmä, joka lisäisi sen toimintavarmuutta.

Ensimmäisenä työvaiheena oli tehdä markkinakartoitus ja tutkia vaihtoehtoja uusille lämmönvaihtimille. Markkinakartoitus aloitettiin tekemällä tarjouspyyntö, johon oli koottu lämmöntalteenotto- ja jäähdytysjärjestelmän perustietoja ja vaatimuksia.

Osana opinnäytetyötä vertailtiin tarjouksia, ja vertailusta valikoitui kaksi parhaiten soveltuvaa lämmönvaihtintoimittajaa. Valinta toimittajaehdokkaiden välillä voidaan mahdollisesti tehdä järjestelmään suunniteltujen tarkempien energia- ja paine-eromittauksien jälkeen, jolloin saadaan tarkempaa vertailutietoa nykyisten lämmönvaihtimien energiatehokkuudesta ja paine-erosta.

Lämmöntalteenotto- ja jäähdytysjärjestelmässä on paljon potentiaalia, sillä sen avulla voitaisiin kasvattaa Kakolanmäen puhdistamon energiaomavaraisuutta ja kehittää käyttövarmuutta.

ASIASANAT:

lämmöntalteenotto, energiatehokkuus, lämmönvaihtimet, jätevedenpuhdistamot

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Energy and Environmental Engineering

2021 | 45 pages

Hannes Lundstedt

DEVELOPMENT OF A HEAT RECOVERY AND COOLING SYSTEM

- The ENTER project

The aim of the thesis was to investigate alternatives for heat exchangers in the compressed air system of the Kakolanmäki wastewater plant and to plan the improvement of the operational reliability of the heat recovery and the implementation of backup cooling.

The thesis was part of the ENTER project, which aims to develop the energy efficiency and preparedness of the Kakolanmäki wastewater treatment plant by investigating the possibilities of using new technologies to optimise the energy efficiency of the compressed air system and improve the cooling system.

The aim was to find new heat exchangers for the compressed air cooling of process air compressors with lower pressure losses and better heat recovery than with existing heat exchangers. In addition, a back-up cooling system was to be added to the system to increase its reliability.

The first stage of the work included carrying out market research and investigate alternatives for new heat exchangers. The market research started with a call for tenders, in which basic information and requirements for the heat recovery and cooling system were compiled.

As part of the thesis, various comparisons were made between the tenders, which resulted in the selection of the two most suitable heat exchanger suppliers. The selection between the two best candidates can possibly be made after more detailed energy and pressure difference measurements that are planned for the system to provide more accurate comparative information on the energy efficiency and pressure difference of existing heat exchangers.

The heat recovery and cooling system has great potential to increase the energy self-sufficiency of the Kakolanmäki wastewater treatment plant and to improve its reliability.

KEYWORDS:

heat recovery, energy efficiency, heat exchangers, sewage treatment plants

SISÄLTÖ

SANASTO JA LYHENTEET	6
1 JOHDANTO	7
2 TOIMEKSIANNON ESITTELY	8
2.1 Turun seudun puhdistamo Oy ja Kakolanmäen jätevedenpuhdistamo	8
2.2 Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon puhdistusprosessi	8
2.3 ENTER-hanke	9
2.4 Opinnäytetyön tavoitteet	10
2.5 Opinnäytetyön toimenpiteet	10
3 LÄMMÖNTALTEENOTTO- JA JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄN YLEISKUVAUS	11
4 LÄMMÖNSIIRTO, LÄMMÖNSIIRTIMET JA JÄÄHDYTYS	15
4.1 Lämmönsiirto	15
4.2 Lämmönsiirtimet	16
4.2.1 Putkilämmönsiirtimet	17
4.2.2 Kaksoisputkilämmönsiirtimet	18
4.2.3 Levylämmönsiirtimet	18
4.2.4 Spiraalilämmönsiirtimet	20
4.2.5 Ilmajäähdytteiset lämmönsiirtimet	20
4.3 Lämmönsiirtimien energiatehokkuus	21
4.4 Jäähdytys	24
4.4.1 Jäähdytysvesi ja lämmönsiirtonesteet	24
4.4.2 Läpivirtausjäähdytys	25
4.4.3 Suljettu kiertojäähdytys	25
4.4.4 Avoin kiertojäähdytys	26
5 KAKOLANMÄEN JÄTEVEDENPUHDISTAMON LÄMMÖNTALTEENOTTO- JA JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄ	27
5.1 Nykyinen lämmöntalteenotto- ja jäähdytysjärjestelmä	27
5.2 Lämmöntalteenotto- ja jäähdytysjärjestelmän kehittäminen	30
5.3 Markkinakartoitus ja tarjouspyyntö	35
6 POHDINTAA	39

7 YHTEENVETO	43
---------------------	-----------

LÄHTEET	44
----------------	-----------

KUVAT

Kuva 1. Instrumentti-ilmakompressorit ja prosessi-ilmakompressorit (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).	11
Kuva 2. Instrumentti-ilmakompressori (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).	13
Kuva 3. Kompressoritila ja ilmastusilmakompressorit (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).	14
Kuva 4. Prosessi-ilmakompressoreiden vuoden 2020 prosessi-ilmamäärät (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).	28
Kuva 5. Ilmastusilma 2017 (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).	30
Kuva 6. Nykyinen LTO-piiri (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).	32
Kuva 7. Laajennettu LTO-piiri (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).	33
Kuva 8. Ilmastusilman lämpötila (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).	34
Kuva 9. Ilmastusilmakompressorien lämmönvaihtimien mittoja taulukon 4 mukaisesti (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).	37
Kuva 10. Tuloilmakonehuone (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).	38
Kuva 11. Ilmastusilmakompressorien ilmamääriä (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).	41

TAULUKOT

Taulukko 1. Turun seudun puhdistamon energiatase 2017 (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).	12
Taulukko 2. Lämmöntalteenottoverkoston perustietoja (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).	27
Taulukko 3. Dowcal100E (30%) tiedot (Dow 2021 tekniset tiedot).	28
Taulukko 4. Instrumentti-ilmakompressorien lähtötiedot (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).	35
Taulukko 5. Ilmastusilmakompressorien lämmönvaihtimien lähtötietoja (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).	35
Taulukko 6. Ilmastusilmakompressorien lämmönvaihtimien asennusrajoitteet (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).	36
Taulukko 7. Varajäähdytyksen lämmönvaihtimen lähtötietoja (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).	37

SANASTO JA LYHENTEET

ENTER-hanke	Hankkeessa kehitetään Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon energiatehokkuutta ja varautumista.
LTO	Lämmöntalteenotto
PVLP	Prosessivesilämpöpumppu
Tekninen vesi	Puhdistettua jätevettä
ϕ	Lämpöteho
m	Massavirta
Cp	Ominaislämpökapasiteetti
ΔT	Tulo- ja menolämpötilojen erotus
U	Kokonaislämmönsiirtokerroin
ΔT_{In}	Logaritminen lämpötilaero

1 JOHDANTO

Euroopan energia- ja ilmastopoliitikka painottaa kestäväen kehityksen ja energiankäytön tehokkuutta, ja keskeisiä tavoitteiden toteuttamiseksi ovatkin kestävästi sekä tehokkaasti toimivat tuotantolaitokset. Eri teollisuuden aloilla, kuten jätevedenpuhdistamon toiminnassa, muodostuu runsaasti hukkalämpöä, josta osa on mahdollista hyödyntää lämmöntalteenoton avulla. Käyttökelpoista ylijäämälämpöä häviää Suomen teollisuuden energiankäytöstä noin 37 prosenttia, joten hukkaenergian hyödyntäminen edistäisi energiatehokkuutta ja vähentäisi kustannuksia. (Motiva 2013; Euroopan parlamentti 2020.)

Opinnäytetyön toimeksiantajana on Turun seudun puhdistamo Oy, joka operoi Kakolanmäen jätevedenpuhdistamoa ja huolehtii Turun seudun jätevedenpuhdistuksesta. Jätevedenpuhdistamoiden toiminta Suomessa perustuu ympäristölupaan, joka asettaa toimintaedellytyksiä jätevesien käsittelylaitosten mekanismeihin, kuten puhdistustehokkuuteen. Ympäristölupa asettaa laitoskohtaisia vaatimuksia puhdistusprosessin toimivuu-delle, ja raja-arvoja asetetaan muun muassa poistotehoon sekä lähtevän veden pitoisuuksiin. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021; Valtioneuvoston asetus yhdyskuntajätevesistä 888/2006.)

Turun seudun puhdistamo Oy on osa Turku-konsernia, mikä velvoittaa Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon toiminnan osaksi Turun kestäväen kehityksen tavoitteita. Kakolanmäen jätevedenpuhdistamo kuuluu Turun alueen välttämättömiin toimintoihin, ja puhdistamon käyttäytymisellä on merkittävä vaikutus alueellisesti hiilineutraaliuden toteutumiseen. Turun kaupunki on tarkastellut VLR-raportissa (Voluntary Local Review) YK:n kestäväen kehityksen tavoitteita, ja tämän tarkastelun perusteella kaupunki korostaa erityisesti kohtaa 6: Puhdas vesi ja sanitaatio. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021; Turun kaupunki 2020.)

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää paineilman lämmönvaihtimien vaihtoehtoja ja suunnitella lämmöntalteenottoverkoston toimintavarmuuden parantamista sekä varajäähdytyksen toteuttamista. Lämmöntalteenotto- ja jäähdytysjärjestelmää on kehitetty jatkuvasti, mutta järjestelmää on vielä mahdollista parantaa. Yksityiskohtaisempaan LTO-piirin toimintaa ja kriittisyyttä käsitellään tarkemmin luvuissa 5 ja 6 samalla, kun käsitellään nykyisen järjestelmän ominaisuuksia ja ongelmakohtia.

2 TOIMEKSIANNON ESITTELY

2.1 Turun seudun puhdistamo Oy ja Kakolanmäen jätevedenpuhdistamo

Turun seudun puhdistamo Oy on 14 kunnan omistama yhtiö, jonka toimialana on jätevedenpuhdistuspalvelut. Turun seudun puhdistamo Oy:n huolehtii Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon toiminnasta. Turun seudun puhdistamo Oy:n suurimmat omistajakunnat ovat Turku, Kaarina ja Raisio. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

Kakolanmäen jätevedenpuhdistamo huolehtii Turun ja sen lähikuntien asukkaiden sekä teollisuuden jätevesistä. Kakolanmäen jätevedenpuhdistamo keskittää Turun alueen asukkaiden ja teollisuuden jätevedenkäsittelyn Kakolanmäkeen. Jätevedenpuhdistusprosessin läpi kulkee päivässä keskimäärin noin 90 000 kuutiota jätevettä. Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon puhdistusprosessin perustana ovat mekaaninen, biologinen ja kemiallinen käsittely. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

2.2 Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon puhdistusprosessi

Puhdistusprosessi alkaa tulopumppauksella, josta se johdetaan välppäykseen ja hiekanerotuksen. Kiintoainetta erotellaan jätevedestä karkea- ja hienovälppäyksellä. Ennen hiekanerotusta jäteveteen syötetään ferrosulfaattia. Ferrosulfaatin tehtävänä on laskeuttaa kiintoainesta esiselkeytyksessä ja saostaa jäteveden liukoista fosforia. Karkeavälppäyksen jälkeen jäteveden hiekka ja rasva poistetaan hiekanerotusaltaissa. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

Esikäsittelyn viimeisessä vaiheessa on hienovälppäys, joka viimeistelee kiintoaineksen poistoa. Esikäsittelyn jälkeen esiselkeytyksessä kiintoainesta laskeutetaan painovoimaa hyödyntäen lietetaskuihin. Prosessin liete kuivataan lingoilla ja varastoidaan lietesiloihin. Kuivattua lietettä jatkojalostetaan muun muassa biokaasuksi Gasum Oy:n biokaasulaitoksella. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon puhdistusprosessin keskiössä on aktiivilieteprosessi, joka muodostaa biologisen vaiheen. Ilmastus on jaettu hapelliseen ja hapettomiin lohkoihin. Hapellisiin osiin syötetään ilmaa, joka on peräisin ilmastusilmakompresso-

reista. Hapettomissa lohkoissa sekoittimet hoitavat jäteveden sekoittumisen. Ilmastuksen tarkoituksena on poistaa typpeä ja orgaanista ainetta sekä loput fosforista mikrobien avulla. Biologisen vaiheen alkuun annostellaan kalsiumkarbonaattia alkaliteetin ja pH:n kasvattamiseksi. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

Ilmastuksen jälkeen jätevesi johdetaan jälkiselkeytykseen, jossa biomassa laskeutetaan altaan pohjalle. Ferrosulfaattia ja polymeeria annostellaan jälkiselkeytyksen. Polymeerin käyttäminen tehostaa kiintoaineen laskeutumista altaan pohjalle. Biomassaa kierrätetään takaisin ilmastukseen pumppaamalla ja jätevesi ohjataan hiekkasuodatukseseen. Hiekkasuodatuksessa vesi kulkeutuu hiekkapatjan läpi (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon puhdistusprosessin tukena on ohitusvesien käsittely-yksikkö, johon turvaudutaan esimerkiksi voimakkaiden hulevesi virtaamien takia. Tulvatilanteissa aktiivilieteprosessin kapasiteetti voi olla riittämätön ja osa jätevesistä johdetaan ohitusvesienkäsittelyyn. Ohitusvesien käsittely-yksikössä käytetään jäteveden saostukseen ferrisulfaattia, polymeeriä ja mikrohiekkää. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

2.3 ENTER-hanke

Opinnäytetyö on osa Ympäristöministeriön rahoittamaa ENTER-hanketta, jonka tarkoituksena on kehittää Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon energiatehokkuutta ja varautumista. Turun seudun puhdistamo Oy jätti hakemuksen ympäristöministeriölle loppuvuodesta 2020, ja ENTER-projekti on tällä hetkellä selvitys- ja tutkimusvaiheessa. ENTER-hankkeessa selvitetään uuden teknologian käyttömahdollisuuksia paineilmajärjestelmän energiatehokkuuden optimoimiseksi sekä jäähdytysjärjestelmän parantamiseksi.

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää paineilmajärjestelmän lämmönvaihtimien vaihtoehtoja ja suunnitella lämmöntalteenottoverkoston toimintavarmuuden parantamista sekä varajäähdytyksen toteuttamista. ENTER-hankkeeseen kuuluu myös diplomityö, jonka tarkoituksena on edistää Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon energiatehokkuutta ja varautumista selvittämällä nykyisten ilmastusilmaa tuottavien ruuvikompressorien rinnalle uuden tekniikan mukaisia paineilman tuotantomenetelmiä. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

2.4 Opinnäytetyön tavoitteet

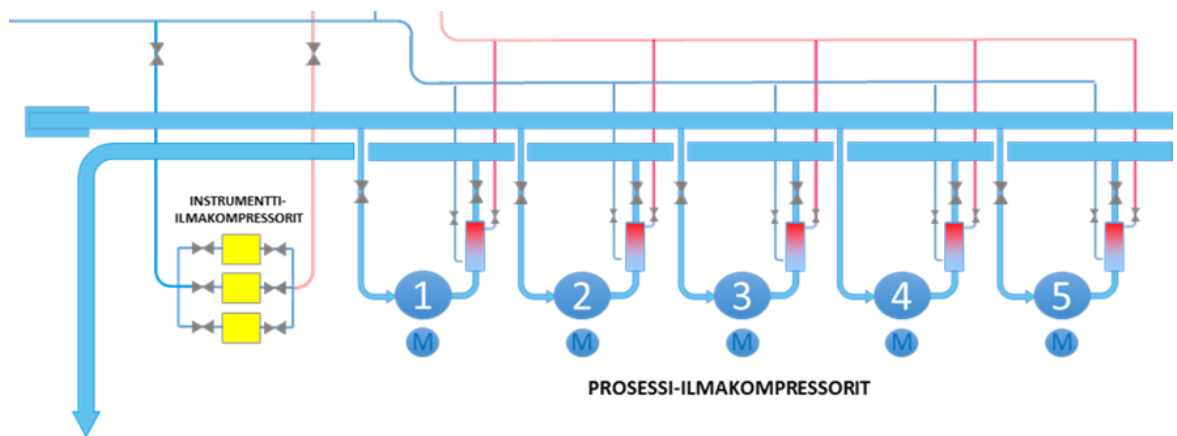
Opinnäytetyön tavoitteena on kehittää energiatehokkuutta ja varautumista selvittämällä uuden tekniikan käyttömahdollisuuksia Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon paineilmajärjestelmän energiatehokkuuden optimoimiseksi sekä jäähdytysjärjestelmän parantamiseksi. Tarkoituksena on löytää uudet lämmönvaihtimet prosessi-ilmakompressorien paineilman jäähdytykseen, joiden painehäviöt ovat nykyisiä lämmönvaihtimia pienemmät ja energiatehokkuus on parempi. Nykyiset lämmönvaihtimet on sijoitettu prosessi-ilmakompressorien painepuolen putkistoon ja jokaisella prosessi-ilmakompressorilla on oma lämmönsiirrin. Prosessi-ilmakompressorit ja instrumentti-ilmakompressorit ovat samassa jäähdytyspiirissä, jossa jäähdytysnesteenä on etyleeniglykolia. Lisäksi LTO-piiriin olisi tarkoitus lisätä varajäähdytysjärjestelmä. Varajäähdytyksellä jäähdytettäisiin instrumentti-ilmakompressoreita ja ilmastusilmakompressoreiden painepuolen jäähdyttimiä eli niiden tuottamaa paineilmaa. Varajäähdytysjärjestelmän lisääminen lämmöntalteenottoverkostoon nostaa prosessin käyttövarmuutta, koska nykyinen lämmöntalteenotto- ja jäähdytyspiiri on herkkä häiriöille, jos LTO-piirissä tapahtuu esimerkiksi vuoto. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

2.5 Opinnäytetyön toimenpiteet

Ensimmäisenä työvaiheena on tehdä markkinakartoitus ja tutkia vaihtoehtoja uusille lämmönvaihtimille. Markkinakartoitus aloitetaan tekemällä tarjouspyyntö, johon kootaan lämmöntalteenotto- ja jäähdytysjärjestelmän perustietoja ja vaatimuksia. Lämmönvaihdintoimittajien tarjouksien pohjalta on tarkoitus tehdä vertailuja keskenään. Kartoituksen avulla voitaisiin saada selville uuden tekniikan käyttömahdollisuuksia, minkä kautta energiatehokkuutta pystyttäisiin parantamaan esimerkiksi hankkimalla uudet lämmönvaihtimet. Opinnäytetyön osuus loppuu tähän, minkä jälkeen ENTER-hanketta jatketaan neuvotteluilla lämmönvaihdintoimittajien kanssa, missä mahdollisesti tehdään päätöksiä uusien lämmönvaihtimien hankinnasta. Mahdollisesti hankkeeseen kuuluu myöhemmässä vaiheessa myös uusien lämmönvaihtimien koeajot. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

3 LÄMMÖNTALTEENOTTO- JA JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄN YLEISKUVAUS

Opinnäytetyössä käsitellään Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon paineilmajärjestelmän lämmöntalteenottoverkostoa. Lämmöntalteenotto- ja jäähdytysjärjestelmä rakentuu kolmesta instrumentti-ilmakompressorista sekä viidestä prosessi-ilmakompressorista. Kaikki kompressorit kuuluvat samaan jäähdytyspiiriin, joka on esitetty kuvassa 1. Prosessi-ilmakompressorit ja instrumentti-ilmakompressorit muodostavat yhteisen jäähdytyspiirin, jossa jäähdytysnesteinä on etyleeniglyykolia. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)



Kuva 1. Instrumentti-ilmakompressorit ja prosessi-ilmakompressorit (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).

Prosessi-ilman kokonaismäärä on noin 100 milj. m³/a, ja instrumentti-ilman kokonaismäärä on noin 4 milj. m³/a. Prosessi-ilmakompressorit käyttävät sähköenergiaa noin 5000 MWh/a. Poistoilmakoneiden LTO-kennoilla ja kompressoreiden lämmönvaihtimilla lämpöä saadaan talteen noin 2500 MWh/a ja suurin osa tästä energiasta saadaan talteen kompressoreiden lämmönvaihtimilla. Taulukossa 1 on esitetty Turun seudun puhdistamo Oy:n vuoden 2017 energiataseen arvoja, mikä antaa suuntaa-antavan kuvan energiamäärästä ja esimerkiksi lämmöntalteenoton määrästä. Huomioitavaa on, että energiataseeseen on tullut muutoksia vuoden 2017 jälkeen, mutta tarkoituksena on antaa suuntaviivat Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon energiantuotosta ja kulutuksesta. Olennaisia kohtia taulukossa 1 ovat erityisesti Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon, ilmastuksen ja lämmöntalteenoton suuruudet. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

Taulukko 1. Turun seudun puhdistamon energiatase 2017 (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).

Ostoenergia	17 200 MWh
Sähkö	15 900 MWh
Sähkö: Kakolanmäen jätevedenpuhdistamo	13 500 MWh
Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon prosessien energioita	
Ilmastus	6 000 MWh
Kierrätyspumppaus	2 500 MWh
Tulopumppaus	1 800 MWh
Ilmanvaihto	1 700 MWh
Esikäsitteily	900 MWh
Valaistus	350 MWh
LTO	2500 MWh

Kompressorilaitteistotilan lämpötila on vuoden ajasta riippumatta 15–25 °C, ja instrumentti-ilmakompressorin imuilman lämpötilan tulee olla 3-45 °C. Imuilman maksimaalinen suhteellinen kosteus 31 °C:ssa on 100 prosenttia, kun taas imuilman maksimaalinen suhteellinen kosteus 45 °C:ssa on 50 prosenttia. Yhdestä instrumentti-ilmakompressorissa maksimissaan käytettävä lämpöteho on noin 50 kW. Ilman käyttöpaine on normaalisti 7 bar ja maksimikäyttöpaine on 8,5 bar. Instrumentti-ilmakompressoreissa on valmiudet ulkoiselle lämmöntalteenotolle. Instrumentti-ilmakompressorin moottorin nimellisteho 55 kW. Tyypillinen puristuksen loppulämpötila käynnin aikana on 75-100 °C. Kuvassa 2 on esitettyä yksi kolmesta instrumentti-ilmakompressorista. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)



Kuva 2. Instrumentti-ilmakompressori (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).

Ilmastusilman lämpötila ennen lämmönvaihdinta on keskimäärin 160 °C. Ilmastusilman lämpötila lämmönvaihtimen jälkeen on 43-80 °C. Yhden ilmastusilmakompressorin virtaus normaalissa tilanteessa on 5700 m³/h, jolloin kompressori käy 100 prosentilla teholla. Ilmastusilman paine normaalisti runkoputkesta mitattuna on 1,64 bar. Ilmamäärällä 5700 m³/h ja lämpötilaerolla 165 °C ja 43 °C saadaan ilmapuolen tarvittavaksi lauhdutustehoksi noin 230 kW per lämmönvaihdin. Kuten luvussa 2 todettiin ilmastusilmakompressorit syöttävät ilmaa ilmastusaltaiden hapellisiin osiin. Ilmastusilmakompressoreiden tuotot vaihtelevat riippuen tarvittavasta ilman määrästä. Tavallinen tilanne voisi olla, että

toinen ilmastusilmakompressoreista käy 100 prosentilla ja toinen kompressori toimii sää-
tävä yksikkönä esimerkiksi 50 prosentin teholla. Kuvassa 3 on esitetty kompressoritilaa
ja ilmastusilmakompressoreita. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)



Kuva 3. Kompressoritila ja ilmastusilmakompressorit (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).

Jäähdytysnesteen virtaus normaalisti on 28,6 l/s, joka jakautuu kaikkien kompressorei-
den lämmönvaihtimien kesken. Jäähdytysnesteen paine on keskimäärin 2 bar. Jäähdy-
tysnesteen lämpötila normaalisti lämmönvaihtimelle on noin 7 °C, kun taas nesteen läm-
pötila lämmönvaihtimen jälkeen on noin 18 °C. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

4 LÄMMÖNSIIRTO, LÄMMÖNSIIRTIMET JA JÄÄHDYTYS

Tässä luvussa käsitellään lämmönsiirron eri muotoja eli johtumista, konvektiota ja säteilyä, mikä jälkeen käsitellään tyypillisimpien lämmönsiirtimien luokittelua ja toimintaa. Lämmönsiirrinostion jälkeen siirrytään tarkastelemaan lämmönvaihtimien energiatehokkuutta ja mitoittamista. Seuraavassa osassa tarkastellaan jäähdytystä, joka kattaa sekä jäähdytysveden että opinnäytetyön kannalta olennaisimmat lämmönsiirtonesteet.

4.1 Lämmönsiirto

Lämpötilaero ja molekyylien liike aiheuttavat lämmön siirtymisen systeemistä toiseen. Lämmönsiirron eri muodot ovat johtuminen, konvektio ja säteily. Lämmönsiirron eri muodot noudattavat vaihtelevia fysikaalisia säännönmukaisuuksia, mutta lämmönsiirto tapahtuu tavallisesti samanaikaisesti johtumalla, kuljettumalla sekä säteilemällä. (Wagner 1994, 13–15.)

Johtumisen väliaineena voi olla kiinteä aine ja levossa oleva neste tai kaasu. Lämmön johtumisen normaalitilanne on stationäärinen. Muutokset ajassa ja systeemin lämpötilakentässä aiheuttavat, että johtuminen on epästationääristä, joka voi tapahtua kertaluonteisesti tai jaksollisesti. (Wagner 1994, 13–15; Hokajärvi 1986, 8–15.)

Virtaavassa nesteessä tai kaasussa voi tapahtua lämmön siirtyminen konvektiivisesti. Konvektio eli kuljettuminen voidaan jakaa pakotettuun konvektioon ja luonnolliseen eli vapaaseen konvektioon. Pakkokonvektion virtaus on lähtöisin ulkoisesta laitteesta esimerkiksi pumpusta, ja vapaan konvektion virtaus perustuu lämpötilaeroihin johtuen fluidien tiheyksien eroavaisuuksista. Haasteena kuljettumisessa on virtaavan nesteen tai kaasun ja seinän välisen lämmön siirtymisen tehokkuuden ratkaiseminen. Virtaus voidaan jakaa laminaariseen virtaukseen ja turbulenttiseen virtaukseen, mikä perustuu virtausnopeuteen ja virtaavan aineen laatuun. Laminaarissa virtauksessa johtumisen osuus on suurempi kuin turbulenttisessa virtauksessa, sillä aineet liikkuvat virtauksen suuntaisesti laminaarisessa virtauksessa. Turbulenttisessa virtauksessa sekoittuminen on tehokasta ja lämpöenergia kulkee nesteen osien mukana poikittaissuuntaisena virtauksena (Wagner 1994, 51; Hokajärvi 1986, 22). Esimerkiksi veden nopea virtaus on merkittävää lämmönvaihtimissa, koska veden turbulenssi auttaa konvektioprosessia lämmön jakamisessa koko vesimäärään. (Flynn 2018.)

Johtumalla ja kuljettumalla lämpö siirtyy väliaineessa, kun taas lämpösäteily ei tarvitse väliainetta kuljettaakseen lämpöä. Sähkömagneettisten aaltojen avulla lämpöenergia etenee absorboivaan kappaleeseen. Kappaleeseen osuvasta säteilystä osa imeytyy siihen, osa heijastuu ja osa lävistää sen riippuen kappaleen ominaisuuksista. Lämpösäteily poikkeaa muista sähkömagneettisen säteilyn lajeista ainoastaan aallonpituudeltaan (Wagner 1994, 117; Hokajärvi 1986, 48–49). Esimerkiksi jäähdytysjärjestelmän paluuputket menettävät lämpöä ympäröivään tilaan säteilemällä. (Flynn 2018.)

4.2 Lämmönsiirtimet

Lämmönsiirrin osuuden tarkoituksena on tutustua työn kannalta olennaisimpiin lämmönsiirrintyyppeihin ja niiden toimintaperiaatteisiin. Laajemman kuvan muodostamiseksi osuudessa käsitellään myös muutamia erikoisempia lämmönsiirrinmalleja.

Lämmönsiirtimiä on useita erilaisia vaihtoehtoja, mutta suurin osa lämmönvaihtimista siirtää lämpöä fluidista toiseen fluidiin kiinteän rajapinnan läpi kuten putkiseinän. Lämmönvaihtimet ovat siis laitteita, joita käytetään lämmön siirtämiseen kuumasta fluidista kylmään. Lämmönsiirtimet voidaan ryhmitellä monella eri tavalla toimintaperiaatteen mukaisesti esimerkiksi rekuperaattoreihin ja regeneraattoreihin (Fagerholm 1986, 289; Theodore 2011, 257–261). Lämmönvaihtimet voivat viedä paljon tilaa, ja tämän takia siirtimet valmistetaan yleensä tiiviiksi putki- tai levypaketeiksi, jotta voidaan säästää tilaa. Lämmönsiirtoa voidaan parantaa putkien ja levyjen rivoituksella. Kaasun lämmönsiirto-kerroin on usein huonompi kuin nesteellä, ja tämän takia rivoitus on yleisempää vaihtimissa, joissa ainakin toinen virtauksista on kaasun olomuodossa. (Fagerholm 1986, 290.)

Rekuperattorit ja regenerattorit ovat pintalämmönsiirtimiä, joissa virtaukset eivät sekoitu keskenään. Pintalämmönsiirtimet ovat yleisempiä kuin lämmönvaihtimet, joissa ainevirtaukset sekoittuvat. Rekuperaattoreissa kiertää kaksi ainevirtausta, ja lämmön siirtyminen tapahtuu kiinteän pinnan läpi kuumasta virtauksesta kylmään virtaukseen. Rekuperatiivisiin lämmönvaihtimiin kuuluu yleensä esimerkiksi jäädyttimet ja lauhduttimet. Regeneratiivisissa lämmönsiirtimissä lämmön siirtyminen tapahtuu ainevirtauksesta kiinteään varastoivaan rakennelmaan, josta lämpö siirtyy toiseen virtaukseen. Virtauksia voidaan suunnata rakennelmaan vuorotellen, tai lämpöä varastoiva rakennelma voi pyöriä ja ainevirtaukset virtaavat erillisten reittien kautta. (Fagerholm 1986, 289–290; Sandberg ym. 2014, 393.)

Rekuperattorit voidaan jakaa ainevirtausten perusteella myötä-, vasta- ja ristivirtalämmönvaihtimiin. Edellä mainitut lämmönsiirtimet voivat olla myös erilaisia muunnelmia näistä siirtimistä. Virtaussuunta vaikuttaa lämmönsiirtimen teoreettiseen tarkasteluun. Kun ainevirtojen virtaus on vastakkainen, on kyseessä vastavirtalämmönsiirrin. Myötävirtalämmönsiirtimessä vastaavasti ainevirtaukset ovat samansuuntaiset. Ainevirrat voidaan ohjata myös ristiin, jolloin teoreettinen tarkastelu on työläämpää kuin myötävirta- ja vastavirtatyypeillä. Vastakkaissuuntainen virtaus mahdollistaa kylmänvirtauksen lämpötilan nousun yli kuumanvirtauksen poistolämpötilan. Vastavirtalämmönsiirtimien ainevirtojen lämpötilaero on lähes vakio ja lämmönsiirto on tehokkaampaa kuin samanveroinen myötävirtatyypinen lämmönvaihdin. Myötävirtalämmönsiirtimien etuna on alun suuri lämpötilaero, mutta lämpötilat liikkuvat toisiaan kohti asympotoottisesti. Jos kohteessa on vaarana esimerkiksi kiehumisvaara, myötävirtatyyppi voi soveltua paremmin tällaisiin kohteisiin. (Fagerholm 1986, 290; Wagner 1994, 153–154.)

4.2.1 Putkilämmönsiirtimet

Yleisin lämmönvaihtintyyppi on putkilämmönsiirrin, jossa yksi väliaine virtaa putkipaketin läpi, kun taas toinen väliaine kulkee putkipaketin ympärillä vaipassa. Putkilämmönsiirtimen olennaisimmat osat ovat vaippaosa ja putkipaketti. Laitteistokokonaisuudesta riippumatta lämmönvaihtimen lämmönsiirtopinta-ala tulee hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti. Tämä voidaan saavuttaa ajamalla yhtä väliainetta edestakaisin kahdella tai useammalla kierroksella putken puolella, kun taas muut virtaukset virtaavat putkien ulkopuolella kuoren puoleisten ohjauslevyjen ympäri (Flynn 2018). Tyypillinen lämmönsiirrintyyppi siirrettäessä kaasuja on putkilämmönsiirrin. (Motiva 2016, 14). Putkien lukumäärä voi vaihdella riippuen lämmönvaihtintyyppistä, ja putkien jakoväli voidaan asentaa monella eri tavalla kuten neliömäiseen ja kolmiomaiseen muotoon. (Stewart ym. 2012, 104–105.)

TEMA (Tubular Exchangers Manufacturing Association) lämmönvaihdinvalmistajien järjestö määrittelee erityyppiset lämmönsiirtimet kolmikirjaimisen koodin avulla: ensimmäinen kirjain tarkoittaa siirtimen etupäätä, toinen kirjain merkitsee vaipan tyyppiä ja kolmas kirjain tarkoittaa vaihtimen loppupäätä. TEMA-nimikkeistöä käyttämällä lämmönvaihtimille voidaan määrittää oma tunnus rakenteen perusteella. (Stewart ym. 2012, 93–106.)

Jäähdytysvesi voi olla lämmönvaihtimen vaipan tai putkipaketin puolella. Putkipaketin puoleinen vesi on toimivampi vaihtoehto puhdistuksen kannalta. Veden asianmukainen

virtausnopeus huolehtii, että putkien seinämät pysyvät puhtaana kiintoaineen kerrostumista. Heikko virtausnopeus edistää kiintoaineen laskeutumista putkiin. Toisinaan prosessipuolen korkealla paineella voidaan käsitellä taloudellisemmin lämmönvaihtimen kuoren puoleisella jäähdytysvedellä. Yleinen ongelma tällaisissa vaihtimissa on alhainen virtausnopeus, jota usein esiintyy esimerkiksi ohjauslevyjen ja putkitukien ympärillä, vaikka keskimääräinen virtausnopeus vaipan läpi vaikuttaisi hyväksyttävältä. Nämä riittämättömän virtausnopeuden alueet voivat lisätä kerrostumia ja metallien nopeaa kulumista. (Flynn 2018.)

4.2.2 Kaksoisputkilämmönsiirtimet

Yksinkertainen kaksoisputkilämmönsiirrin koostuu kahdesta samankeskeisestä putkesta, joita asennetaan yleensä sarjaan riittävän pinta-alan aikaansaamiseksi lämmönsiirtoa varten. Kuitenkin Shell-and-Tube-lämmönsiirtimet tarjoavat yleensä muun muassa suuremman pinta-alan lämmönsiirtoa varten pienemmällä rakenteella ja helpommalla puhdistuksella, mutta kaksoisputkilämmönsiirtimiä on edelleen käytössä. (Theodore 2011, 281–282; Serth & Lestina 2014, 67–68.)

Kaksoisputkilämmönsiirrin koostuu siis kahdesta samankeskeisestä putkesta. Lämmöntehokkuuden kannalta on yleensä taloudellisempaa, että kuuma ainevirtaus kulkee sisäputkessa ja kylmä virtaus kulkee toisella puolella. Virtaukset kulkevat useimmiten vastakkaisiin suuntiin, joissakin erityiskäyttöisissä sovelluksissa virtaukset voivat kulkea myös samaan suuntaan. Ulkoputki voidaan eristää lämmön siirtymisen minimoimiseksi ympäristöön. Kuten todettu kaksoisputkilämmönvaihtimet rakentuvat tavallisesti useista putkivaiheista, jotka on lähes aina järjestetty pystysuoraan pinoon. Pidemmät putket jatketaan liittämällä ne takaisin taivutuksin. Putken pituus pidetään kohtuullisena, koska putkiston paino voi aiheuttaa putken taipumisen. Saatavilla on siis myös moniputkisia lämmönvaihtimia, joissa sisempi putki on korvattu U-putkien nipuilla. (Theodore 2011, 281–282; Serth & Lestina 2014, 67–68.)

4.2.3 Levylämmönsiirtimet

Levylämmönsiirtimet koostuvat sarjasta ohuita uritettuja levyjä, jotka on yhdistetty tiiviiksi paketiiksi (Stewart ym. 2012, 156). Levylämmönsiirtimiä käytetään useimmiten kahden nesteen prosesseihin. (Motiva 2016, 14.)

Levylämmönsiirintyyppit voidaan jakaa tiivisteellisiin, hitsattuihin sekä juotettuihin. Esimerkiksi tiivisteelliset levylämmönsiirtimet (Gasketed Plate-and-Frame Heat Exchangers) koostuvat levypaketeista, jotka on puristettu kahden painolevyn väliin. Tiivisteet tiivistävät levyjen reunat estääkseen kylmän ja kuuman virtauksen sekoittumisen estäen samalla ylimääräisiä vuotoja ympäristöön. Tiivisteellisessä levylämmönsiirtimessä levypaketti ja painolevyt voidaan asentaa runkoon, tämän tyyppinen asennus mahdollistaa laitteen purkamisen ja puhdistuksen. Levyt valmistetaan muokattavista korroosionkestävistä materiaaleista kuten ruostumattomasta teräksestä ja titaanista. Turbulenttisen virtauksen aikaansaamiseksi levyjä uritetaan ja muotoillaan usealla eri tavalla riippuen laitevalmistajasta. (Serth & Lestina 2014, 74.)

Levyjen kokonaismäärä ja valmistajien ilmoittama pinta-ala levyä kohden ovat osaltaan määrääviä tekijöitä lämmönsiirtimen kokonaislämmönsiirtopinta-alaa määrittäessä. Plate-and-Frame-lämmönsiirtimet ovat useimmiten paljon pienikokoisempia kuin saman pinta-alan putkilämmönsiirtimet. Likaantumisongelmat voivat kuitenkin olla merkittäviä, koska levytasojen välissä on heikkoja veden virtauskanavia. Tämä voi johtaa esimerkiksi kerrostumiin ja korroosioon. (Flynn ym. 2018.)

Levylämmönsiirtimet ovat useimmiten vastavirtatyyppisiä. Niiden lämmönsiirtokertoimet ovat yleensä suurempia kuin putkilämmönsiirtimissä. Tämän seurauksena tiivisteelliset levylämmönsiirtimet ovat yleensä pienikokoisempia. Tiivisteellisten levylämmönsiirtimien käyttö rajoittuu suunnilleen alle 25 baariin ja korkeintaan 250 °C lämpötiloihin. (Serth & Lestina 2014, 74.)

Suunnittelu edellyttää tavallisesti omia lämmönsiirto- ja painehäviökorrelaatioita, jotka riippuvat levyjen yksityiskohdista, Reynoldsin numeron lisäksi. Reynoldsin numero on dimensioton luku, joka osoittaa, onko virtaus laminaarinen vai turbulenttinen. Esimerkiksi veden virtaus lämmönvaihtimen putkessa ei ole tasaista. Putken keskiosassa kulkee enemmän vettä suuremmalla nopeudella kuin putken seinämän läheisyydessä. (Flynn 2018.)

Plate-and-Shell-levylämmönsiirtimet koostuvat hitsatuista ympyrälevyistä, jotka hitsataan sylinterimäisen kuoren sisään. Rakentamisessa ei ole käytetty tiivisteitä, sillä kaikki liitännät on hitsattu. Plate-and-Shell-lämmönsiirtimet ovat kooltaan kompakteja kuten tiivisteelliset levylämmönsiirtimet. Näiden vaihtimien rakenne kestää jopa 150 baarin suunnittelupaineet ja 900 °C lämpötilat, jotka ovat huomattavasti paremmat kuin tiivisteellisessä kokoonpanossa. (Serth & Lestina 2014, 74–75.)

4.2.4 Spiraalilämmönsiirtimet

Spiraalilämmönvaihtimet on muodostettu spiraaliksi valssatuista levyistä. Spiraalilämmönvaihtimia voidaan pitää levylämmönvaihtimina. Levyistä koostuva vaihdin sijoitetaan tavallisesti vaipan sisään ja fluidit kulkevat levyjen väliin muodostettujen kanavien läpi. Tiivisteillä varustetut päätylevyt estävät nesteiden sekoittumisen keskenään. Kanavat siis suljetaan tiivistetyillä päätylevyillä, jotka pultataan ulompaan koteloon. Tulo- ja poistokanavat kiinnitetään vaippaan ja liitetään sitä kautta kanavistoon. Tämän tyyppiset lämmönvaihtimet eivät ole kovin yleisiä, mutta niitä voidaan käyttää esimerkiksi erittäin likaisissa prosesseissa, koska kanavien turbulenssi on suuri ja ne ovat helposti puhdistettavissa. (Flynn 2018; Sinnott ym. 2005, 765.)

4.2.5 Ilmajäähdytteiset lämmönsiirtimet

Ilmajäähdytystä voidaan käyttää esimerkiksi, kun käytettävissä oleva jäähdytysvesi vaatii laajaa puhdistusta likaantumisen vähentämiseksi tai vedestä on pulaa. Ilmajäähdytteisen lämmönvaihtimen pääomakustannukset ovat yleensä korkeat, mutta käyttökustannukset ovat useimmiten pienemmät kuin vesijäähdytteisen lämmönvaihtimen. Näin ollen korkeat energiakustannukset suhteessa pääomakustannuksiin suosivat ilmajäähdytystä. Ilmajäähdytys vähentää jäähdytysveteen liittyviä ongelmia likaantumisen ja korroosion kanssa. Ilmajäähdytteisen ylläpitokustannukset ovat yleensä edullisemmat. Ilmajäähdytteiset lämmönvaihtimet vaativat suuren tilan ympärilleen, puhaltimet aiheuttavat melua ja lauhde saattaa jäätymä matalissa lämpötiloissa. (Kakaç & Liu, 364; Serth & Lestina 2014, 509.)

4.3 Lämmönsiirtimien energiatehokkuus

Kaikissa lämmönsiirtimissä on tekijöitä, jotka vaikuttavat lämmönsiirtoon ja energiatehokkuuteen. Lämmönsiirtimien keskeisiä suunnitteluparametrejä ovat vaihtimen tyyppi ja materiaali, mitoitus, ainevirtauksien ominaisuudet sekä kustannukset. Lämmönvaihtimen materiaali, joka on yleensä metalli, vaikuttaa sen lämmönsiirto-ominaisuuksiin ja tätä kautta lämmönjohtavuuteen, joka johtuu materiaalin paksuudesta ja lämmönsiirtopinta-alasta. Ainevirtauksien ominaisuuksiin kuuluu muun muassa molempien aineiden lämpötilat, paineet, painehäviöt, virtaukset ja virtausnopeudet. Kustannuksissa vertaillaan koko lämmönvaihtimen elinkaarikustannuksia, johon kuuluu esimerkiksi kunnossapito-, asennus- ja käyttökustannukset. (Flynn 2018; Motiva 2016, 6.)

Lämpöteho on laskettavissa kaavalla:

$$\phi = mC_p\Delta T = U\Delta T_{\ln}$$

jossa

- ϕ = lämpöteho [kW]
- m = jommankumman virtaavan aineen massavirta [kg/s]
- C_p = saman aineen ominaislämpökapasiteetti [J/(kgK)]
- ΔT = saman ainevirran tulo- ja menolämpötilojen erotus [K]
- U = lämmönvaihtimen kokonaislämmönsiirtokerroin [W/K]
- ΔT_{\ln} = logaritminen lämpötilaero [K]

Logaritminen lämpötilaero perustuu ainevirtauksien lämpötilaeroihin ja tehokkuuden kannalta lämpötilaeron tulisi olla mahdollisimman korkea. Lähtökohtaisesti logaritmissen lämpötilaeron ollessa korkea niin lämmönsiirtokerroimen oltava myös riittävä. Lämmönsiirtokerroin eli U -arvo on yksi lämmönvaihtimen suorituskyvyn ja hyötysuhteen indikaattoreista. U -arvo ei ole yhtä herkkä virtauksien ja lämpötilojen muutoksille kuin monet yleisesti käytetyt indikaattorit. Prosessivirtauksissa tai lämpötiloissa tapahtuvia äärimmäisiä muutoksia lukuun ottamatta U -arvon lasku tai nousu heijastaa yleensä todellisia eroja lämmönvaihtimen puhtaudessa. U -arvoon vaikuttaa siis eniten lämmönsiirtopintojen puhtaus, mutta on kuitenkin oletettava, että virtausnopeudet ovat vakiot. (Flynn 2018; Motiva 2016, 4.)

Lämmönsiirtopintojen likaantuminen on yleinen ongelma, mikä voi vähentää lämmönsiirtoprosessin tehokkuutta. Likakerrosta voidaan käsitellä samalla tavalla kuin lämpövastusta. Lämpötehon muuttuminen on tapauskohtaista, mutta vähäinenkin määrä likavastusta heikentää energiatehokkuutta ja lämpötehoa. Likaantuminen edistää usein eroosiota ja korroosiota, jotka ovat tyypillisiä likaantumisen mekanismeja. Jos korroosiota ja kerrostumista ei pidetä hallinnassa, lämmönvaihtimet voivat muuttuvat tehottomiksi. Tehokkuuden menetys ja laitteiden viat aiheuttavat vähentyntä lämmönsiirtoa, lisääntyntä huoltoa ja puhdistusta ja ennakoimattomia keskeytyksiä tuotannossa. Muita tyypillisiä likaantumistapoja ovat hiukkaslikaantuminen, saostuminen, kemiallinen likaantuminen ja biologinen likaantuminen. Saostuminen voi johtua korroosiotuotteista, kalkkia muodostavista mineraaleista, suspendoituneista kiinteistä aineista ja vedessä olevista bakteereista. Kaikkia likaantumismekanismeja yhdistää se, että ylimääräinen aines kertyy pinnoille ja komponenttien vuorovaikutuksesta aiheutuvat ongelmat voivat vähentää energiatehokkuutta. Ainevirtausten ominaisuudet, aika ja lämmönvaihtimentyypit vaikuttavat lämmönjohtavuuteen sekä likakerroksen paksuuteen. (Flynn 2018; Motiva 2016, 7–16.)

Lämmönsiirtotehokkuuden heikentyminen, johtuen likakerroksesta, voi aiheuttaa esimerkiksi tilanteen, jossa jäähdytysvesi ei välttämättä poista prosessista riittävästi lämpöä. Prosessia voidaan joutua hidastamaan tai jäähdytysveden virtausta on lisättävä, jotta lämpö saadaan poistettua. Virtausnopeuden kasvattamista ei voi kuitenkaan lisätä loputtomasti, koska esimerkiksi painehäviöt kasvavat voimakkaasti ja laitteistot eivät mekaanisesti kestä. Monesti lämmönsiirtimiä on samassa järjestelmässä monia ja pitää huomioida, että esimerkiksi virtausnopeuden kasvattaminen vaikuttaa kaikkiin järjestelmän lämmönsiirtimiin. Painehäviön kasvu kohottaa tarvetta pumppaukseen tai puhallukseen, mikä aiheuttaa lisäkustannuksia sähkötehoon, jota käytetään pumppuihin ja puhaltimiin. Pumppujen ja puhaltimien tehokkuus on siis riippuvainen painehäviöstä, kun pumppauksen tai puhalluksen hyötysuhde ja tiheys ovat suunnilleen vakiot. (Flynn 2018; Motiva 2016, 8–11.)

Jäähdytysveden lämpötila vaihtelee putken poikkileikkauksen läpi, ja kuumin vesi on lähinnä putken seinämää. Putken seinämän lämpötila on tärkeä muuttuja, joka säätelee syöpymistä ja laskeutumista putken pinnalle. Putken pinnan lämpötila määritetään veden nopeuden, lämpövirran, veden lämpötilan, prosessin lämpötilan ja seinän lämmönjohtavuuden perusteella. Putken pinnan korkean lämpötilan alueet ovat todennäköisiä paik-

koja, joihin voi muodostua korroosiota. Monet vedessä esiintyvät yhdisteet ovat vähemmän liukoisia korotetussa lämpötilassa, ja korroosioreaktiot etenevät nopeammin lämpötilan noustessa. (Flynn 2018.)

Lämmönvaihtimien suositeltu huolto edellyttää säännöllistä tarkastusta alkuperäisten suunnittelukriteerien mukaisen suorituskyvyn varmistamiseksi. Lyhyempi yleistarkastuksia tulisi suorittaa säännöllisesti, kun yksikkö on toiminnassa. Tärinähäiriöt, vuotavat tiivistetyt liitokset, liiallinen painehäviö ja heikentynyt hyötysuhde ovat kaikki merkkejä siitä, että perusteellinen tarkastus ja huolto ovat tarpeen. Oletuksena on, että lämmönvaihdin on sijoitettu asianmukaisesti, jotta se voidaan puhdistaa, vaihtaa tiivisteet ja kaikki muut korroosiolle tai eroosiolle, tärinälle tai ikääntymiselle alttiit osat. Putkien sisäosat ja ulkopuolet tulisi tarkastaa myös silmämääräisesti vaurioiden varalta. Metallien osien kunto on tutkittava laitteen ennakoitun käyttöiän tai mahdollisten korjaavien toimenpiteiden määrittämiseksi. Metalliosien mahdollisia heikkenemisen syitä ovat muun muassa yleinen korrosio, raerajakorrosio ja galvaaninen korrosio. (Theodore 2011, 446; Kakaç & Liu 1998, 66.)

Lämmönvaihtimen suorituskyvyn seuranta on välttämätöntä järjestelmän toiminnan ymmärtämiseksi ja parhaiden tulosten saamiseksi. Useita suunnitteluparametreja tulisi vertailla alkuperäisiin mitoituksiin ja tarkastella mahdollisia muutoksia. Mittaukset tulee määrittää tietyllä ajanjaksolla ja arvioitava trendianalyysointiluvuilla. Lämmönvaihtimesta mitataan yleensä lämpötiloja, virtauksia ja painehäviöitä. Erilaiset mittaukset ja seurannat ilmaisevat, milloin järjestelmä tarvitsee huoltotoimenpiteitä, ja kuinka paljon esimerkiksi energiaa prosessista saadaan talteen. (Flynn 2018; Motiva 2016, 12.)

Lämmönvaihtimen suunnittelussa ja optimoinnissa on otettava huomioon monia toisistaan riippuvia tekijöitä. Vain osa suunnitteluprosessista koostuu kvantitatiivisesta arvioinnista. Suuren määrän kvalitatiivisten arvioiden ja kompromissien takia lämmönvaihtimen suunnittelu on haastava kokonaisuus. Parhaimpaan lopputulokseen päädytään yleensä, kun lämmönvaihdin täyttää suorituskykyvaatimukset pienimmällä kustannuksella, joka sisältää pääomakustannukset sekä käyttö- ja ylläpitokustannukset. Pääomakustannuksiin kuuluvat muun muassa toimitukset, asennukset ja testaukset. Käyttö- ja ylläpitokustannuksia ovat esimerkiksi korjaukset ja puhdistukset. (Kakaç & Liu 1998, 66–67.)

4.4 Jäähdytys

Tässä luvussa käsitellään prosessien jäähdytysjärjestelmiä ja erityisesti jäähdytysveden ominaisuuksia jäähdytyksessä. Ensimmäiseksi käsitellään lyhyesti veden perustietoja ja lämmönsiirtonesteitä, minkä jälkeen tarkastellaan erilaisia jäähdytyspiirejä. Jäähdytysjärjestelmät on jaettu kolmeen eri osaan, läpivirtausjäähdytykseen, suljettuun kiertojäähdytykseen ja avoimeen kiertojäähdytykseen. Työn kannalta olennaisin jäähdytysjärjestelmä on suljettu kiertojäähdytysjärjestelmä.

4.4.1 Jäähdytysvesi ja lämmönsiirtonesteet

Vettä käytetään jäähdytysjärjestelmissä, koska sitä on laajasti saatavilla useimmilla alueilla. Vettä on helppo käsitellä, sillä on myös kapasiteettia kuljettaa lämpöä pois prosessista. Vesi on useimmiten liuotin, koska sillä on kyky liuottaa käytännössä kaikkia aineita jossain määrin. Tämä veden erityiskyky on mahdollista sen rakenteen ansiosta. Veden rakentuu kahdesta vetyatomista ja yhdestä happiatomista. Vesimolekyylin napaisuuden avulla vesi voi liuottaa kaikkia ionisia ja polaarisia aineita, mutta ei-polaariset yhdisteet esimerkiksi hiilivedyt eivät liukene veteen. Vedellä on siis heikko positiivinen varaus lähellä vetyatomeja ja heikko negatiivinen varaus lähellä happiatomia. (Flynn 2018; Seneviratne 2007, 25–26.)

Veden liukoisuuteen vaikuttavia muuttujia ovat lämpötila, paine, pH, redox-potentiaali ja muiden aineiden suhteelliset pitoisuudet liuoksessa. Vesimolekyylit voivat ionisoitua H^+ ja OH^- . PH-arvon normaalina pitoisuutena pidetään seitsemää, kun taas pH välillä 0-7 on hapan ja pH välillä 7-14 on emäksinen. Liuenneet aineet, lämpötila ja mikrobiaktiivisuus voivat kuitenkin aiheuttaa muutoksia tasapainoon. PH:lla on voimakas vaikutus esimerkiksi lämmönvaihtimien putkistoon. Yleensä alle kuuden pH-arvo on syövyttävä metalliputkille ja yli kahdeksan pH-arvo voi aiheuttaa lohkeilua, johtuen kalsiumin ja muiden metalli-ionien saostumisesta anioneilla, kuten karbonaatit, fosfaatit ja sulfaatit. Nämä vaikutukset voivat voimistua liuenneiden kaasujen ja ionien vaikutuksesta. Tästä syystä monia teollisuusjätevesiä ohjataan yleensä pH-arvon välillä 6 ja 11. Teollisuusjätevesien säädöksissä on ohjeita myös muun muassa vesimäärille ja lämpötiloille. (Seneviratne 2007, 26–27; Vesilaitosyhdistys 2016, 3.)

Vesi voi siis liuottaa monia aineita kuten edellisessä kappaleessa on todettu. Tämän seurauksena vesi voi aiheuttaa jäähdytysjärjestelmään korroosiota, vedessä olevat liuenneet ionit ylittävät joidenkin mineraalien liukoisuuden ja muodostavat karstaa, veden jotkin ominaisuudet voivat myös lisätä bakteerien kasvua, mikä voi aiheuttaa ongelmia prosessiin. Vedessä suspendoituneet aineet voivat myös kerääntyä heikkojen virtausten alueille ja aiheuttaa likaantumista. (Flynn 2018.)

Yleensä jäähdytysveden sekaan laitetaan lämmönsiirtonestettä, jotta voidaan estää esimerkiksi veden jäätyminen. Lämmönsiirtonesteet voivat parantaa lämpökapasiteettia, lämmönjohtavuutta sekä tarjota korroosiosuojaa järjestelmälle. Vedellä laimennettavilla lämmönsiirtonesteillä voidaan kerätä prosessista energiaa talteen ja käyttää lämpöä hyödyksi muissa kohteissa. Lämmönsiirtonesteen pitoisuuksia pidetään yleensä hyvin alhaisina, jotta veden lämmönsiirto-ominaisuudet eivät putoa. Lämmönsiirtonesteinä voidaan käyttää esimerkiksi etyleeniglykolia, jonka pitoisuudet ovat useimmiten 25-30 prosenttia. Veden ja lämmönsiirtonesteen seoksen tulee olla hyvin sekoittunut ja homogeeninen, jotta lämmön siirtyminen olisi optimaalista. Veden kanssa käytettäviä lämmönsiirtonesteitä ovat esimerkiksi etyleeniglykoli, propyleeniglykoli, kaliumformiaatti ja betaaniini. (Mäkinen ym. 2014, 185–186; Dow 2021.)

4.4.2 Läpivirtausjäähdytys

Läpivirtausjäähdytysjärjestelmät vaativat toimiakseen runsaasti vettä, koska vesi kiertää vain kerran järjestelmän läpi. Läpivirtausjäähdytystä käytetään rannikkoalueilla teollisuuslaitoksissa esimerkiksi lämpövoimaloissa, joilla on pääsy merivesiin jäähdytystä varten. Lämpöä ei poisteta prosessista haihduttamalla vaan palauttamalla se takaisin esimerkiksi mereen. Läpivirtausjäähdytyksen käyttö on vähentynyt johtuen ympäristövaikutuksista ja kyvyttömyydestä käsitellä järjestelmiä taloudellisesti korroosiota ja kerrostumista vastaan. Läpivirtausjäähdytyksen veteen liittyvät ongelmat ovat yleensä hyvin järjestelmäkohtaisia, koska vesimäärät voivat olla todella suuria ja vesillä on laadullisia eroja riippuen sen alkuperästä. (Flynn 2018; Seneviratne 2007, 84.)

4.4.3 Suljettu kiertojäähdytys

Suljetut kiertojäähdytysjärjestelmät ovat tyypillisiä teollisissa prosesseissa kuten kompressorien jäähdytyksessä. Suljetussa kiertojäähdytyksessä vesi kierrätetään suljetussa

piirissä, jossa haihtuminen on vähäistä. Suljetuissa kiertojäähdytysjärjestelmissä lämpö siirtyy jäähdytysveteen kuumasta prosessista ja lämpö siirtyy jäähdytysvedestä yleensä toiseen lämmönsiirtolaitteeseen, jonka kautta lämpöä hyödynnetään. Suljetun jäähdytyspiirin haasteet ovat samat kuin kaikilla muillakin vesijärjestelmillä eli korroosio, kerrostumat ja mikrobiologian ongelmat. Suorituskykyyn liittyvät ongelmat suljetuissa järjestelmissä johtuvat useimmiten vesivuodoista tai mikrobiongelmista. (Flynn 2018; Seneviratne 2007, 84.)

4.4.4 Avoin kiertojäähdytys

Avoimet kiertojäähdytysjärjestelmät poistavat ylimääräisen lämmön esimerkiksi jäähdytystornissa, lauhduttimissa tai haihdutusaltaissa. Avoin kiertojäähdytys hyödyntää esimerkiksi vettä järjestelmien jäähdytykseen, mikä ohjataan jäähdytystä vaativaan prosessiin ja prosessilaitteisiin. Veteen on sitoutunut lämpöä, joka haihdutetaan esimerkiksi jäähdytystornissa, joka on tyypillinen avoin kiertojäähdytysjärjestelmä. Haihdutuksessa jäljellä oleva vesi voidaan kierrättää myös takaisin jäähdytykseen. Kaikkein tyypillisin avoin kiertojäähdytysjärjestelmä on jäähdytystorni. (Flynn 2018.)

5 KAKOLANMÄEN JÄTEVEDENPUHDISTAMON LÄMMÖNTALTEENOTTO- JA JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄ

Tämän luvun tarkoituksena on perehtyä Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon lämmöntalteenotto- ja jäähdytysjärjestelmään. Tässä opinnäytetyössä keskitytään erityisesti paineilmajärjestelmän lämmöntalteenottoverkostoon ja sen yksityiskohtiin. Ensimmäiseksi käsitellään LTO-piirin toimintaa, ja millaisia toimenpiteitä järjestelmän kehittymiseksi on jo tehty ennen ENTER-projektin käynnistymistä. Nykyisen järjestelmän kuvaamisen jälkeen siirrytään käsittelemään laajemmin hankkeen kehityskohteita. Luvun lopussa esitetään tehdyt toimenpiteet ja tulevaisuuden suunnitelmat.

5.1 Nykyinen lämmöntalteenotto- ja jäähdytysjärjestelmä

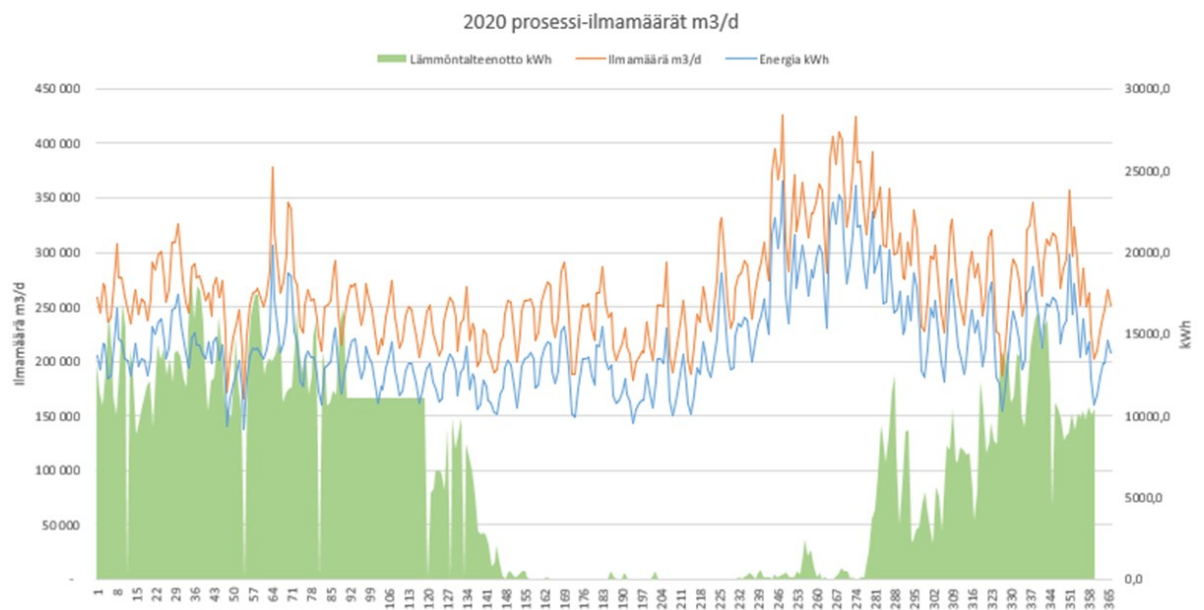
Lämmöntalteenottoverkoston perustietoja on koottu seuraavaan taulukkoon 2:

Taulukko 2. Lämmöntalteenottoverkoston perustietoja (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).

Putkiston kokonaispituus	850 m, Ø 200 mm
Nykyiset lämmönvaihtimet	8 kpl
Instrumentti-ilmakompressorit	3 kpl
Prosessi-ilmakompressorit	5 kpl
Prosessi-ilman kokonaismäärä	Noin 100 milj. m ³ /a
Instrumentti-ilman kokonaismäärä	Noin 4 milj. m ³ /a
Kokonaisenergia	5 300 MWh
LTO:n osuus kokonaisenergiasta	2 400 MWh

Lämmöntalteenottoverkostoon on tehty monia parannuksia energiatehokkuuden sekä toimintavarmuuden parantamiseksi. Kuten taulukosta 2 huomataan, prosessi-ilman kokonaismäärä on noin 100 milj. m³/a, joten muutokset prosessi-ilmajärjestelmään ovat selkeästi vaikutuksiltaan merkittävämmät verrattuna instrumentti-ilmajärjestelmään. Prosessi-ilmakompressorien energiatehokkaita ajotapoja on tutkittu ja otettu käyttöön. Myös

yhden prosessi-ilmakompressorin oikosulkumoottori on vaihdettu kestmagneettimoottoriksi. Ajotapamuutosten ja moottorivaihdosten avulla kehitystä on saatu aikaiseksi, mutta parantaminen ei todennäköisesti ole mahdollista ilman laitteiston muutoksia. Kuvassa 4 on esitetty vuoden 2020 prosessi-ilmakompressoreiden ilmamääriä, lämmöntalteenottoa sekä energioita. Kuvassa 4 huomataan, miten kesäkuukausina lämmöntalteenottoa ei saada hyödynnettyä juurin lainkaan, koska lämpöenergialle ei ole tarvetta. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)



Kuva 4. Prosessi-ilmakompressoreiden vuoden 2020 prosessi-ilmamäärät (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).

Prosessi-ilmakompressorit ja instrumentti-ilmakompressorit kuuluvat samaan jäähdytyspiiriin, jossa jäähdytysnesteinä on etyleeniglykolia (30 %). Jäähdytysnestetä kulkee suljetussa kiertopiirissä noin 25 m³ ja nesteen tuotenimi on Dowcal 100E, jota on aiemmin kutsuttu nimillä Dowcal 10 tai Dowcal 100. Taulukon 3 tiedot kertovat Dowcal 100E:n (30 %) perustietoja. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021; Dow 2021 tekniset tiedot.)

Taulukko 3. Dowcal100E (30%) tiedot (Dow 2021 tekniset tiedot).

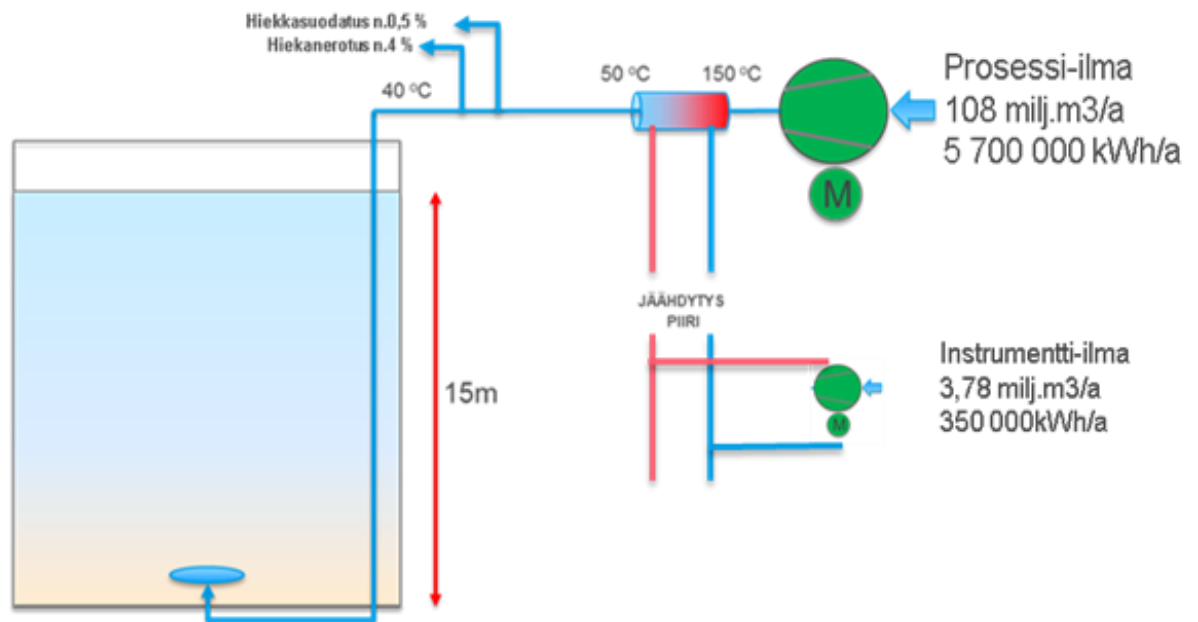
Tiheys g/cm ³ , 20°C	1.043
Jäätymispiste °C	-16.4
Kiehumispiste °C, 1 bar(a)	103.8

Dynaaminen viskositeetti mPa.s, 20°C	2.38
Kinemaattinen viskositeetti mm ² /s, 20°C	2.28

Lämmöntalteenottoverkostossa ei ole sulkuja, joten vuototilanteissa putkiston tyhjentyminen ja täyttäminen vaikuttaa koko verkostoon. Vikatapaukset ja huoltotyöt ovat haastavia ja prosessin toimintaan voi tulla pitkiä katkoja. Lämmöntalteenottoverkostoon on kuitenkin tehty parannuksia esimerkiksi kahdentamalla LTO-piirin kiertopumppu. Talteen otettua lämpöä hyödynnetään Kakolanmäen luolaston lämmitykseen ja prosessiveden lämmittämiseen. Lämpimään kesäaikaan lämpöenergiaa ei saada hyödynnettyä täysin ja energiaa joudutaan hukkaamaan poistoilman kautta. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

Prosessi-ilmakompressorit käyttävät sähköenergiaa noin 5000 MWh/a. Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon ilmanvaihtokoneet käyttävät nykyisin noin 800 MWh/a sähköä ja lisäksi ne kuluttavat ostettua kaukolämpöä 170-250 MWh/a. Omalla lämmöntalteenotolla saadaan noin 2500 MWh/a, josta osa tulee poistoilmakoneiden LTO-kennoista ja suurin osa kompressoreiden lämmönvaihtimista. Taulukossa 2 on kuvattu esimerkki vuoden 2020 kokonaisenergioista. Ilmanvaihtopiiriin kuuluu myös lämmönsiirrin, jonka lämpöteho on 1700 kW. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

Instrumentti-paineilmaa käytetään puhdistamolla muun muassa sulkuluukkuihin, venttiileihin ja paineilmalla toimiviin työkaluihin. Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolla on useita suuren koko luokan venttiilejä, jotka on kyettävä ajamaan oikeaan asentoon häiriötilanteen sattuessa. Prosessi-ilmasta suurin osa käytetään ilmastukseen, joka kuuluu Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon ydintoimintoihin jätevedenpuhdistuksessa. Ilmastuksen aktiivilietemenetelmä käyttää biologisessa prosessissaan happea, joka on liuenut veteen. Ilmastusilmaa syötetään altaiden pohjasta ilmastuslautasten kalvojen lävitse. Kuvassa 5 havainnollistetaan paineilmojen kulkeutumista ja ilman lämpötiloja. Kuvassa 5 esitetyt arvot ovat suuntaa antavia ja niitä käsitellään yksityiskohtaisemmin seuraavassa luvussa. Ilmastuslautaset kestävät maksimissaan 80°C asteen lämpötiloja, minkä takia prosessi-ilmalla pitää jäähdyttää lämmönvaihtimilla. Jätevedenpuhdistusprosesseista hiekanerotukseen ja hiekkasuodatukseen käytetään myös prosessi-ilmalla, mutta huomattavasti vähemmän kuin ilmastukseen. Prosessi-ilmalla kokonaismäärä taulukon 2 mukaan vuonna 2020 oli noin 100 miljoonaa m³/a ja tästä ilmastusilman kertymä oli noin 90 miljoonaa m³/a. Prosessi-ilmakompressoreista käytetään myös tämän takia nimeä ilmastusilmakompressorit. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021; Sulzer 2017.)



Kuva 5. Ilmastusilma 2017 (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).

Häiriötilanteessa instrumentti-ilmakompressorit sammuvat 15 minuuttia ja prosessi-ilmakompressorit noin tunti jäähdytyksen loputtua. Instrumentti-ilmakompressorit voidaan korvata kokonaan erillisellä ja siirrettävällä varajärjestelmällä, mutta prosessi-ilmakompressoreilla ei ole tällä hetkellä toimivaa varajäähdytysjärjestelmää. LTO-piirissä on olemassa varajäähdytinjärjestelmä mutta sitä ei ole toistaiseksi tarvittu. Nykyinen varajäähdytys on ongelmallinen esimerkiksi LTO-putkiston vuodon sattuessa, koska se on sijoitettu samaan putkistoon tavallisen jäähdytyksen kanssa. Häiriötilanteita varten varajäähdytysjärjestelmä olisi sijoitettava tarkoituksenmukaisempaan paikkaan lähelle kompressoreja ja sen tehoa on tarpeen lisätä, jotta kompressorien käyttö myös häiriötilanteissa on mahdollista. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

5.2 Lämmöntalteenotto- ja jäähdytysjärjestelmän kehittäminen

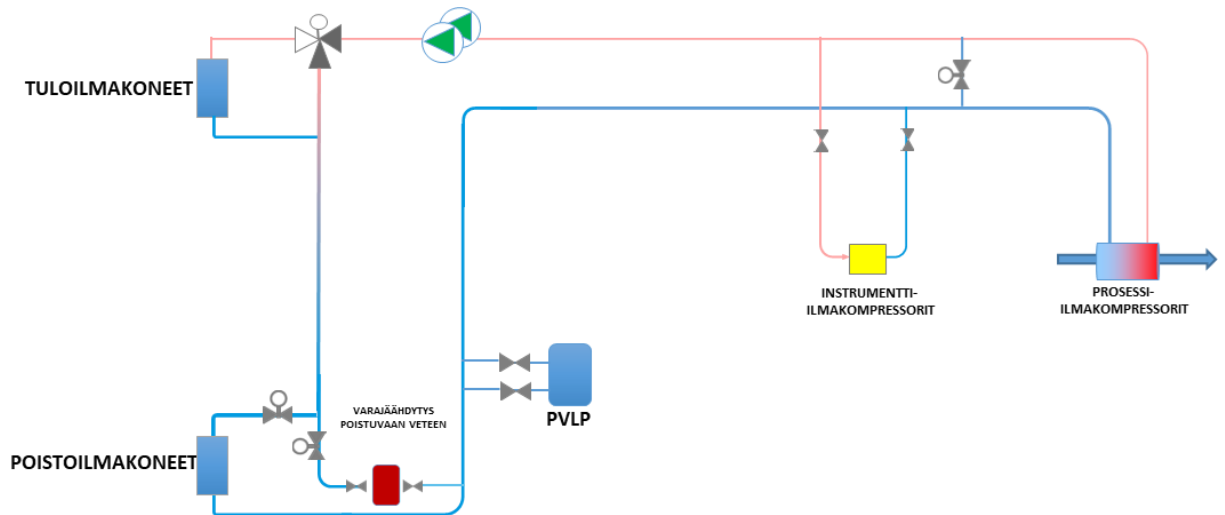
Tässä luvussa käsitellään lämmöntalteenotto- ja jäähdytysjärjestelmän kehittämistä, ja tavoitteena on selvittää paineilmajärjestelmän lämmönvaihtimien vaihtoehtoja ja suunnitella lämmöntalteenottoverkoston toimintavarmuuden parantamista sekä varajäähdytyksen toteuttamista. Lämmöntalteenottojärjestelmässä on paljon potentiaalia, jonka kautta

Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon energiaomavaraisuutta voitaisiin kasvattaa sekä käyttövarmuutta kehittää.

Tavoitteena oli löytää uudet lämmönvaihtimet prosessi-ilmakompressorien paineilman jäähdytykseen, joiden painehäviöt ovat nykyisiä lämmönvaihtimia pienemmät ja lämmön talteenotto kyky on parempi. Nykyiset lämmönvaihtimet on sijoitettu prosessi-ilmakompressorien painepuolen putkistoon ja jokaisella prosessi-ilmakompressorilla on oma lämmönsiirrin. Prosessi-ilmakompressorit ja instrumentti-ilmakompressorit ovat samassa jäähdytyspiirissä, jossa jäähdytysnesteinä on etyleeniglykolia (30%). Lisäksi LTO-piiriin olisi tarkoitus lisätä varajäähdytysjärjestelmä. Varajäähdytyksellä jäähdytettäisiin instrumentti-ilmakompressoreita ja ilmastusilmakompressoreiden painepuolen jäähdyttimiä eli niiden tuottamaa paineilmaa. Varajäähdytysjärjestelmän lisääminen lämmöntalteenottoverkostoon nostaa prosessin käyttövarmuutta, koska nykyinen lämmöntalteenotto- ja jäähdytyspiiri on herkkä häiriöille, jos LTO-piirissä tapahtuu esimerkiksi vuoto. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

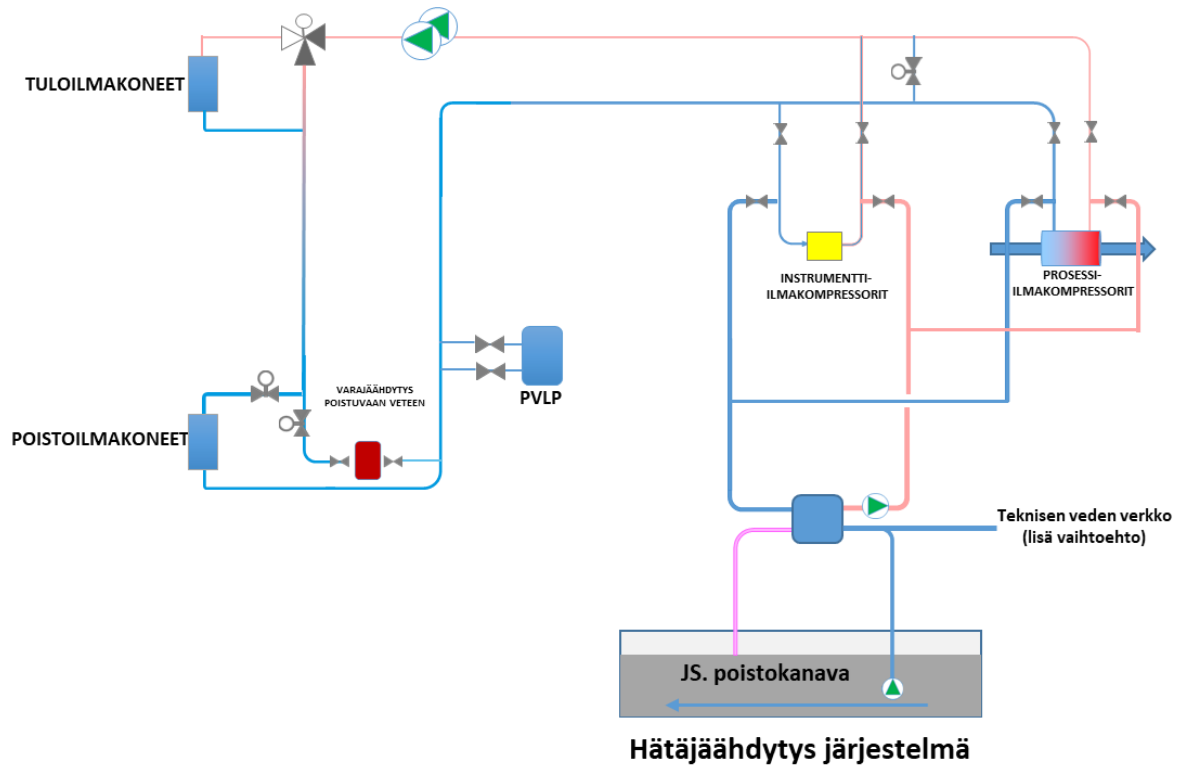
Suunnitelmissa on, että uusi varajäähdytysjärjestelmä käyttäisi jäähdytykseen jälkiselkeytettyä vettä tai vaihtoehtoisesti teknistä vettä, kuitenkin niin, että jälkiselkeytetty vesi on ensisijainen vaihtoehto. Tekninen vesi on useimmiten puhtaampaa kuin jälkiselkeytetty vesi. Vesien erona on, että tekninen vesi on hiekkasuodatettua ja sisältää vähemmän kiintoainetta. Jälkiselkeytettyssä vedessä ja teknisessä vedessä on jonkin verran epäpuhtauksia, minkä takia varajäähdytysjärjestelmään on suunniteltu myös suodatinta. Kokemusten perusteella teknisen veden epäpuhtaudet muodostavat likaantumista putkistoihin, mikä voi aiheuttaa ongelmia varajäähdytysjärjestelmän lämmönvaihtimen tehokkuuteen. Varajäähdyttimen tyyppi tulee vaikuttamaan siihen, millainen suodatin järjestelmään hankitaan. Järjestelmä tulee tarvitsemaan myös uppopumpun, jolla pumpataan jälkiselkeytettyä vettä sen lähtevästä kanavasta. Uudella varajäähdyttimellä tulisi olemaan erillinen oma putkistonsa. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

Kuvassa 6 on esitetty yksinkertaistettu kuva LTO-piiristä, josta huomataan kompressorit, putkistoa ja tuloilmakoneet sekä poistoilmakoneet. Kuvassa 6 lyhenne PVLP tarkoittaa prosessivedenlämpöpumppua. Kuvassa olevat pumput ovat jäähdytysnesteen kierto-pumppuja. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)



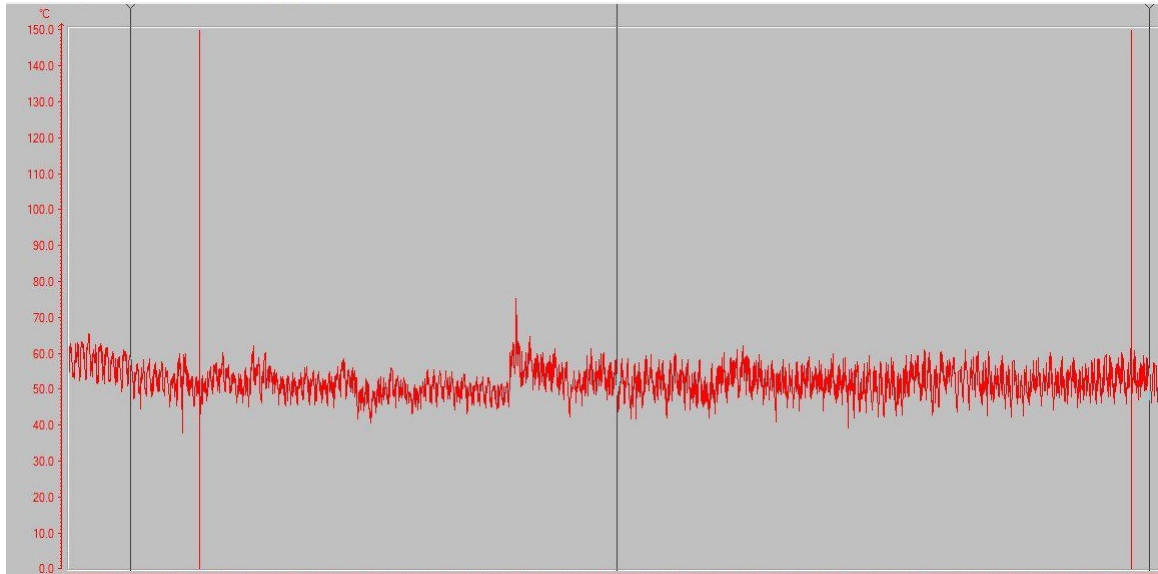
Kuva 6. Nykyinen LTO-piiri (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).

Kuvassa 7 on esitetty yksinkertaistettu kuva vaihtoehtoisesta laajennetusta LTO-piiristä, johon on lisätty varajähdytysjärjestelmä. Keskeisessä osassa lämmöntalteenotto- ja jäähdytysjärjestelmää ovat jäähdytysnesteen kiertopumput, joita automaatio ajaa vuorotellen ja vuorottelu-aika on 24 tuntia. Rakennusautomaation vuorotteluohjelmaan on asennettavissa pumppujen minimi ja maksimi nopeudet, joita noudatetaan jäähdytysveden lämpötilan mukaisesti. Toisen jäähdytysnesteen kiertopumpun mennessä vikatilaan tai turvakytkimen mennessä nolla-asentoon, toinen kiertopumpuista käynnistyy automaattisesti. Kuvassa 7 tuloilmakoneiden vieressä on kolmitieventtiili, joka ohjailee sitä, miten paljon lämpöä tarvitaan. Kun lämpöenergiaa tarvitaan, venttiili on asennossa 100 prosenttia eli täysin auki. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)



Kuva 7. Laajennettu LTO-piiri (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).

Oleellinen lämpötilamittauspiste LTO-piirissä sijaitsee ilmastusilman runkoputkessa, ja lämpötila ei saa nousta yli 80 °C-asteen, koska vaarana on ilmastuslautasten vaurioituminen. Muita olennaisia mittauksia ovat jäähdytysnesteen lämpötila lämmönvaihtimille sekä jäähdytysnesteen lämpötila lämmönvaihtimen jälkeen. Kuvassa 8 on ilmastusilman runkoputkessa olevan lämpötilamittauksen tietoja muutaman kuukauden ajalta havainnollistamaan lämpötilan vaihteluita. Kuvassa 8 keskiarvo lämpötila on ollut 52 °C, mutta kuten kuvaajasta huomataan, ilmastusilma on käynyt hyvin lähellä 80 °C asteen lämpötilaa. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)



Kuva 8. Ilmastusilman lämpötila (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).

5.3 Markkinakartoitus ja tarjouspyyntö

Ensimmäisenä työvaiheena oli tehdä markkinakartoitus ja tutkia vaihtoehtoja uusille lämmönvaihtimille. Markkinakartoitus aloitettiin tekemällä tarjouspyyntö, johon on koottu lämmöntalteenotto- ja jäähdytysjärjestelmän perustietoja ja vaatimuksia muun muassa kompressoreista, jäähdytysnesteestä sekä lämmönvaihtimien asennusrajoitteita. Tarjouspyyntö lähetettiin usealle eri lämmönvaihtintoimittajalle. Instrumentti-ilmakompressorien tietoja on esitetty taulukossa 4 ja ilmastusilmakompressorien lämmönvaihtimien lähtötietoja on esitetty taulukossa 5. Ilmastusilmakompressorien lämmönvaihtimien asennusrajoitteista on annettu suuntaa-antava esimerkki kuvassa 9 ja taulukossa 6, joissa on nykyisten lämmönsiirtimien mitat. Taulukkoon 7 on merkitty varajäähdytyksen lämmönvaihtimen lähtötietoja. Ilmastusilman lämpötila lämmönvaihtimen jälkeen on nykyisin 43-80 °C, tavoitteena on mahdollisimman alhainen lämpötila. Päämääränä on parantaa jäähdytystä ja nostaa jäähdytysnesteen lämpötila mahdollisimman korkeaksi huomioiden jäähdyttimen tilarajoitteet. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

Taulukko 4. Instrumentti-ilmakompressorien lähtötiedot (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).

Asia	Tekniset tiedot
Kompressorin moottorin nimellisteho	55 kW
Ilma maksimikäyttöpaine (8,5 bar)	10 m ³ /min
Ilma käyttöpaine	7 bar
Tyypillinen puristuksen loppulämpötila käynnin aikana	75 – 100 °C
Käytettävissä oleva lämpöteho maksimi (per kompressori)	49,4 kW

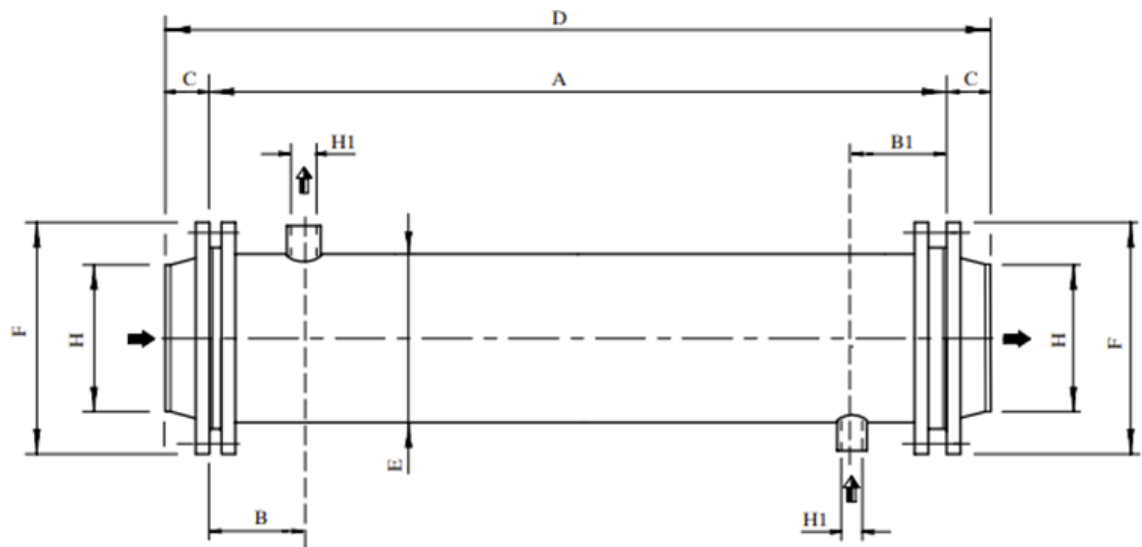
Taulukko 5. Ilmastusilmakompressorien lämmönvaihtimien lähtötietoja (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).



Asia	Tekniset tiedot
Laitteistotilan lämpötila	15-25 °C

Ilmastusilman lämpötila ennen lämmönvaihdinta	150-165 °C
Ilmastusilman lämpötila lämmönvaihtimen jälkeen	43-80 °C
Ilmastusilma virtaus normaali (per kompressori)	5700 m ³ /h (100%)
Ilmastusilma paine normaali (runkoputki)	1, 64 bar
Ilmastusilma paine min (runkoputki)	1 bar
Ilmastusilma paine max (runkoputki)	2 bar
Jäähdytysnesteen lämpötila lämmönvaihtimelle LTO-piirissä	
Jäähdytysnesteen lämpötila normaali	11,84 °C
Jäähdytysnesteen lämpötila min	6,92 °C
Jäähdytysnesteen lämpötila max	17,89 °C
Jäähdytysnesteen lämpötila lämmönvaihtimen jälkeen LTO-piirissä	
Jäähdytysnesteen lämpötila normaali	17,81 °C
Jäähdytysnesteen lämpötila min	11,16 °C
Jäähdytysnesteen lämpötila max	25,60 °C
Jäähdytysnesteen virtaus normaali	28,6 l/s
Jäähdytysnesteen paine normaali	2 bar
Jäähdytysnesteen paine max	10 bar
Ilman liitântäkoko	DN 250, PN 10, laippa
Jäähdytysnesteen liitântäkoko	DN 100, PN 10, laippa

Taulukko 6. Ilmastusilmakompressorien lämmönvaihtimien asennusrajoitteet (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).

A (mm)	B (mm)	B1 (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	F (mm)
1299	116	133	71	1441	273	395



 = compressed air flow
 = cooling water flow

Kuva 9. Ilmastusilmakompressorien lämmönvaihtimien mittoja taulukon 4 mukaisesti (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).

Taulukko 7. Varajäähdytyksen lämmönvaihtimen lähtötietoja (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).

Laitteistotilan lämpötila	15-25 °C
Jäähdyttävän nesteen lämpötila normaali	14 °C
Jäähdyttävän nesteen lämpötila min	8 °C
Jäähdyttävän nesteen lämpötila max	20 °C
Jäähdytettävä teho max	2 MW
Jäähdytettävä teho min	600 kW

Taulukossa 7 jäähdyttävän nesteen lämpötilat ovat jälkiselkeytetyn veden tietoja. Lämmönvaihdintoimittajaa on pyydetty määrittämään jäähdyttävän ja jäähdytettävän nesteen

virtaukset, paineet sekä lämpötilat. Toimittajia on tarjousvaiheessa pyydetty toimittamaan mittapiirroksia, tekniset laskelmat sekä huolto-ohjeet. Toimitusvaiheessa tarjoajan tulee toimittaa edellä mainittujen laskelmien ja piirrosten lopulliset versiot sekä noudattaa painelaitedirektiiviä. Toimitusehtona on DDP Incoterms 2020. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

Varajäähdytyksen lämmönvaihdin on tarkoitus sijoittaa tuloilmakonehuoneeseen, ja putkistolla on näin lyhyt matka kompressoritilaan sekä jälkiselkeytetyn veden lähtevään kanavaan. Tuloilmakonehuoneesta ja mahdollisesta varajäähdyttimen paikasta on hahmotettu kuvaan 10. Kuvan 10 seinän takana on kompressoritila ja oikealla puolella jälkiselkeytetyn veden kanava. Tuloilmakonehuoneesta löytyy myös muun muassa jäähdytysnesteen kiertopumput sekä koko LTO-piirin energiamittari. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)



Kuva 10. Tuloilmakonehuone (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).

6 POHDINTAA

Kaikilta lämmönvaihdintoimittajilta saatiin tarjoukset, joita vertailtiin keskenään. Tärkeimpiä vertailukriteerejä olivat muun muassa hinta, tehokkuus ja painehäviöt. Yhtenä ratkaiseva tekijänä on, että toimittajien kanssa yhteistyö on pitänyt olla sujuvaa ja tarjoukset on myös pitänyt tehdä laadukkaasti. Joidenkin toimittajien kanssa yhteistyö on ollut työlästä, ja jotkut lämmönvaihdintoimittajat eivät pystyneet tarjoamaan sekä ilmastusilmakompressorien lämmönvaihtimia sekä varajäähdytintä, joten tarjoukset eivät olleet täysin vertailukelpoisia, kun verrataan molemmista lämmönvaihtimista koostuvaa kokonaiskustannusta. Lähtötiedot mitoituksissa ovat hyvin samanlaisia keskenään kuten pitikin. Tarjouksista löytyi monia erilaisia lämmönvaihdintyyppisiä esimerkiksi muutamia erilaisia levy-, poimutettuja putki- sekä lamellilämmönsiirtimiä. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

Kaikista tarjouksista valikoitu kaksi parhaiten soveltuvaa ehdokasta, joiden kesken tehtiin vielä yksityiskohtaisempaa tarkastelua. Näiden tarjouksien pohjalta ei ole vielä tehty jatkotoimenpiteitä, koska halutaan selvittää vielä tarkemmin nykyisten lämmönvaihtimien tehokkuus ja paine-ero. Mittausten perusteella pystyttäisiin tutkimaan, miten paljon tehokkaammat tarjousten lämmönvaihtimet ovat nykyisiin verrattuna. Ilmastusilmakompressorien lauhdutustarpeeksi on arvioitu noin 230 kW, mutta mittauksilla saataisiin varmistusta tähän tietoon. Jäähdytyspiirissä on siis energiamittaus, joka mittaa koko järjestelmän energioita, mutta vertailun kannalta olisi hyvä saada yksittäisten lämmönvaihtimien tiedot selville. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

Nykyisistä prosessi-ilman jäähdyttimistä ei ole saatavissa kovin tarkkoja teknisiä tietoja, minkä takia lämmönvaihtimiin on tarkoitus asentaa energia- ja paine-eromittauksia, mitä kautta saataisiin vieläkin luotettavaa vertailutietoa. Suunnitelmassa olisi siis saada selville nykyisten lämmönvaihtimien paine-ero, jotta pystytään vertailemaan tarjottavien lämmönvaihtimien mitoituksia. Aikomuksena on, että paine-eromittaus asennettaisiin ilmastusilmakompressorin lämmönvaihtimen molemmin puolin. Paine-eromittauksen lisäksi LTO-piiriin on suunniteltu jäähdytysnesteen puolelle energiamittarointia. Liuospuolelle energiamittaus on hyödyllinen lisäys, koska silloin nähdään yksittäisen kompressorin kautta kerätyn energian määrä. Energiamittarin valinnassa tulee huomioida nesteiden ominaislämpökapasiteetit, koska mittarien pitää soveltua mittausteknisesti tietyille nesteille. Jäähdytysnesteenä käytettävä etyleeniglykoli alentaa ominaislämpökapasiteettia.

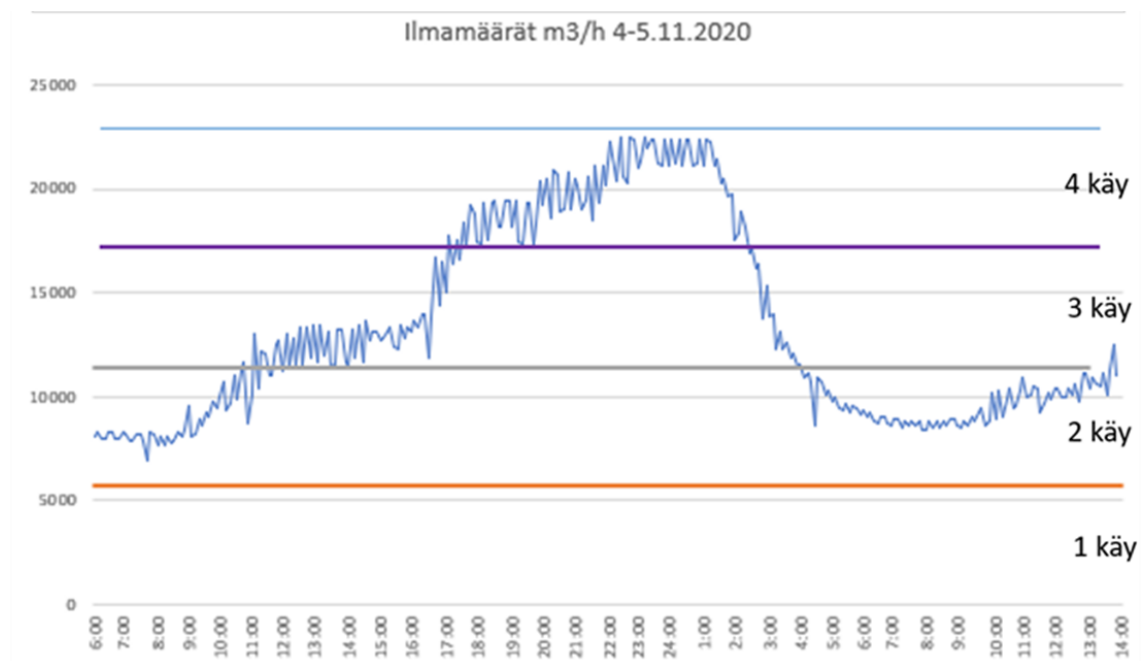
Ilmapuolen paine-eromittausta ja nestepuolen energiamittausta varten tarvitaan verkoston nimellispaine, joka on molemmilla PN 10. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021; Kamstrup 2021.)

Uudella varajäähdytysjärjestelmällä tultaisiin jäähdyttämään instrumentti-ilmakompressoreiden ja ilmastusilmakompressoreiden paineilmaa. Uusi varajäähdytysjärjestelmä käyttäisi siis jäähdytykseen ensisijaisesti jälkiselkeytettyä vettä tai vaihtoehtoisesti teknistä vettä toiminnan turvaamiseksi kaikissa tilanteissa. Uutta varajäähdytintä valittaessa tulee kiinnittää huomiota veden riittävyteen sekä puhtauteen. Pitää myös huomioida, että kyseessä on varajäähdytysjärjestelmä, jota käytettäisiin toissijaisesti. Jälkiselkeytettyä vettä otettaisiin jälkiselkeytetyn veden lähtevästä kanavasta uppopumpulla. Teknisen veden sekä jälkiselkeytetyn veden ominaisuuksista ja laadusta löytyy molemmista tarkempaa tietoa. Vesien laatu ja ominaisuudet vaikuttavat järjestelmään asennettavan suodattimen valintaan. Varajäähdyttimen tyyppi ja malli vaikuttavat myös suodattimen valintaan. Tämänhetkisten tietojen mukaan varajäähdyttimeksi valikoituu levylämmönsiirrin, joka voi olla hyvinkin herkkä likaantumaa, kuten levylämmönsiirrin kappaleessa-kin todettiin. Suodattimen lisäksi järjestelmään voisi olla hyvä asentaa vastavirtahuuhtelulaitteisto, jossa olisi liittimet vesijohtoveteen. (Flynn ym. 2018; Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

Teknisen veden pumppuja on kolme kappaletta, joita automaatio valitsee käyttöön tarpeen mukaan. Teknisen veden pumppuja on yhteensä kolme kappaletta, joiden tuotot ovat kahdella pumpulla 132 m³/h ja yhdellä 56 m³/h. Kaksi suuremman tuoton omaava teknisen veden pumppua ovat pääasiassa varalla ja pienimmän tuoton pumppu pystyy hoitamaan normaalissa tilanteessa koko teknisen veden järjestelmää. Teknistä vettä käytetään prosesseihin ja altaiden pesuihin. Varajäähdyttimen jäteveden virtaukselle on tarjouksissa mitoitettu suunnilleen 100–140 m³/h. Teknisen veden paine normaalissa tilanteessa on 3,5 bar, mikä on riittävästi voittamaan tarjouksien varajäähdyttimien virtaushäviöt. Näiden tietojen pohjalta teknisen veden riittävydessä ja paineenkorotuksessa ei pitäisi olla ongelmia tämänhetkisten tietojen perusteella. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

Lämmöntalteenotto- ja jäähdytysjärjestelmässä ei ole sulkuja tällä hetkellä. Ilmastusilmakompressorien lämmönvaihtimia voitaisiin alkaa vaihtamaan vasta, kun varajäähdytysjärjestelmä olisi toiminnassa. Venttiilien lisäys parantaisi jäähdytyspiirin toimintavarmuutta ja korjattavuutta. Laitekohtaiset sulut ilmastuskompressoreissa eivät aiheuta ongelmia paineilmantuotantoon. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

Yhtenä vaihtoehtona on mietitty myös, tarvitseeko kaikkia ilmastusilmakompressoreita liittää varajäähdytyksen piiriin. Toimintavarmuuden kannalta paras ratkaisu olisi liittää kaikki ilmastusilmakompressorit osaksi varajäähdytystä, vaikka tavallisessa tilanteessa kahdella tai kolmella kompressorilla prosessi toimii normaalisti. Lämmönvaihdintarjousten pohjalta tehdään päätöksiä, mikä olisi ihanteellinen vaihtoehto. Ilmastusilmakompressorien ilmamäärät ovat normaalisti yli 10 000 m³/h ja yhden ilmastusilmakompressorin tuottaa ilmaa noin 5 700 m³/h. Kuvassa 11 on esitetty esimerkki ilmastusilmakompressorien ilmamääristä riippuen siitä, kuinka monta kompressoria on käynnissä. Kuvassa 11 oikeaan laitaan on merkitty, kuinka monta kompressoria käy ja vasempaan laitaan kuvaa on merkitty ilmamäärät. Esimerkiksi oranssi viiva kuvassa 11 kuvastaa yhden ilmastusilmakompressorin tuottoa. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)



Kuva 11. Ilmastusilmakompressorien ilmamääriä (Turun seudun puhdistamo Oy 2021).

LTO-piiriä ohjataan pääasiassa tällä hetkellä rakennusautomaatiosta, mutta sillä on liittymäpinta tuotantoautomaatioon. Varajäähdytysjärjestelmän ohjaus ja seuranta olisi tarkoitus liittää kokonaan tuotantoautomaatioon. LTO-piirin ongelmana on, että se kuuluu kahteen eri automaatiojärjestelmään: rakennusautomaatioon sekä tuotantoautomaatioon. LTO-piirin ohjaus sekä seuranta aiotaan liittää kokonaan tuotantoautomaatioon, jolloin järjestelmä olisi yhtenäinen. Lähtökohtaisesti teknisen veden haaraan lisätään siis moottoriventtiili rajatietoineen. Varajäähdytysjärjestelmän muille kriittisille käsiventtiileille lisätään auki ja kiinni -rajatiedot. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

Varsinaiseen verkostoon liittyvät mitoitukset eivät kuulu tähän opinnäytetyöhön. Verkkoon liittyvä suunnittelu on ohjattu suunnittelijoiden vastuulle. Esille on noussut kuitenkin muutamia asioita. Verkosto saattaa tarvita säätöventtiilejä vakauttamaan virtaamia. Verkkoston säätöventtiilien lisäksi putkistoon voi olla tarpeellista lisätä varolaitteistoja esimerkiksi paisuntaventtiilejä. (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

ENTER-hankkeen osana on myös diplomityö, jonka tarkoituksena on selvittää nykyisten ilmastusilmaa tuottavien ruuvikompressoreiden rinnalle uuden tekniikan mukaisia paineilman tuotantolaitteistoja sekä -menetelmiä. Yhtenä vaihtoehtona on mietitty muun muassa turbokompressoreita. Uuden kompressorin tärkeimpiä ominaisuuksia pitäisi olla muun muassa laaja tuottokäyrä ja nopea säädettävyys. Uuden kompressorin hankinnassa tulee huomioida vaikutukset jäähdytysnesteen riittävyteen sekä lauhdutusvirtaamaan. Jäähdytysnesteen virtaamat voivat muuttua, kun lauhdutusvirtaama jakautuukin useammalle lämmönvaihtimille. Onko jäähdytysnesteen kiertopumpun tuotto enää riittävä, jos LTO-piiriin lisätään lisää kompressoreita ja tätä kautta lämmönvaihtimia? (Turun seudun puhdistamo Oy 2021.)

Soveltuvien lämmönvaihdintoimittajien kanssa on tarkoitus olla tarkemmin yhteyksissä ja neuvotella tarkemmin yksityiskohdista liittyen lähtötietojen kelpoisuuteen. Tarkoituksena on hankkia aluksi yksi vaihdin ilmastusilmakompressoreihin, millä suoritetaan koeajo. Tämän jälkeen päätetään, hankitaanko vastaavia lämmönvaihtimia muihin ilmastusilmakompressoreihin. Varajäähdytysjärjestelmän lisääminen kokonaisuuteen parantaisi myös merkittävästi LTO-piirin toimintavarmuutta. Tarkoituksena olisi, että varajäähdytyksen lisääminen olisi ensimmäisiä työvaiheita, joita lähdetäisiin toteuttamaan.

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon paineilma-järjestelmän lämmönvaihtimien vaihtoehtoja ja suunnitella lämmöntalteenottoverkoston toimintavarmuuden parantamista sekä varajäähdytyksen toteuttamista. Tavoitteena oli tutkia uuden tekniikan käyttömahdollisuuksia paineilmajärjestelmän energiatehokkuuden optimoimiseksi sekä jäähdytysjärjestelmän parantamiseksi.

Ensimmäisenä työvaiheena oli tehdä markkinakartoitus ja tutkia vaihtoehtoja uusille lämmönvaihtimille. Markkinakartoitus aloitettiin tekemällä tarjouspyyntö, johon oli koottu lämmöntalteenotto- ja jäähdytysjärjestelmän perustietoja ja vaatimuksia.

Ennen opinnäytetyötä oli jo tiedossa, että lämmöntalteenotto- ja jäähdytysjärjestelmässä on paljon mahdollisuuksia ja potentiaalia. Hankkeessa esille tulleita asioita olivat, että lisäämällä energia- ja paine-eromittaukset järjestelmään, voidaan varmistua nykyisten lämmönvaihtimien toiminnan tehokkuudesta sekä niiden aiheuttamasta paine-erosta. Etenkin toimintavarmuutta voitaisiin kehittää lisäämällä varajäähdytin LTO-piiriin. Markkinakartoituksen avulla saatiin selville myös uuden tekniikan käyttömahdollisuuksia, minkä kautta energiatehokkuutta pystyttäisiin parantamaan esimerkiksi hankkimalla uudet lämmönvaihtimet.

ENTER-hanketta jatketaan neuvotteluilla lämmönvaihdintoimittajien kanssa, missä mahdollisesti tehdään päätöksiä lämmönvaihtimien hankinnan suhteen. Samaan aikaan lämmöntalteenotto- ja jäähdytysjärjestelmään suunnitellaan energia- ja paine-eromittauksien lisäämistä. Myöhemmin mahdollisten uusien laitteistojen asennuksien ja hankintojen jälkeen tehdään päivityksiä muun muassa automaatioon.

LÄHTEET

Euroopan parlamentti 2020. Faktatietoja Euroopan unionista. Energiapolitiikka: yleiset periaatteet. Viitattu 24.05.2021. <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/fi/sheet/68/energiapolitiikka-yleiset-periaatteet>.

Fagerholm, N. E. 1986. Termodynamiikka. Otakustantamo. Jyväskylä.

Flynn, D. 2018. The Nalco Water Handbook, Fourth Edition. McGraw-Hill Education. Yhdysvallat.

Hokajärvi, E. 1986. Lämmön siirtyminen. Valtion painatuskeskus. Helsinki.

Kakaç, S. & Liu, H. 1998. Heat exchangers: selection, rating, and thermal design. CRC Press.

Kamstrup. 2021. Lämpöenergiaratkaisut. Lämpöenergiamittarit. MULTICAL® 603. <https://www.kamstrup.com/fi-fi/lampoenergiaratkaisut/lampoenergiamittarit/multical-603#/>.

Motiva Oy 2013. Tuotannon hukkalämpö hyödyksi. Viitattu 20.05.2021. https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/teollisuus/tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.10766.shtml.

Motiva Oy 2016. Energiatehokas lämmönsiirto. Viitattu 01.04.2021. https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/teollisuus/energiatehokas_lammonsiirto.10766.shtml.

Mäkinen, P. 2014. & ym. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Perustietoa ilmastointitekniikasta rakentamisen ja rakennusten käytön asiantuntijoille. Ilmastointitekniikka osa 1. Talotekniikka-Julkaisut Oy. Tammerprint 2014.

Sandberg, E. & ym. 2014. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Perustietoa ilmastointitekniikasta rakentamisen ja rakennusten käytön asiantuntijoille. Ilmastointitekniikka osa 1. Talotekniikka-Julkaisut Oy.

Seneviratne, M. 2007. A Practical Approach to Water Conservation for Commercial and Industrial Facilities. Elsevier Science & Technology.

Serth, R. W. & Lestina, T. 2014. Process Heat Transfer: Principles, Applications and Rules of Thumb. Elsevier Science & Technology.

Sinnott, R. & Coulson, J. M. & Richardson, J. F. 2005. Chemical Engineering Design: Chemical Engineering Volume 6. Elsevier Science & Technology.

Stewart, M. & Lewis, O. T. 2012. Heat Exchanger Equipment Field Manual: Common Operating Problems and Practical Solutions. Elsevier Science & Technology.

Sulzer. 2017. Disc diffuser system type ABS KKI 215. Tekniset tiedot.

The Dow Chemical Company (Dow). 2021. Lämmönsiirtonesteet. DOWCAL™-nesteet. Korroosionestoaineilla varustetut glykolipohjaiset lämmönsiirtonesteet. Opas tuotteisiin, järjestelmän rakenteeseen, asennukseen ja käyttöön.

The Dow Chemical Company (Dow). 2021. Tekniset tiedot. DOWCAL™ 100E Heat Transfer Fluid.

Theodore, L. 2011. Heat Transfer Applications for the Practicing Engineer. John Wiley & Sons, Incorporated.

Turun kaupunki. 2020. Näin Turku tekee hyvää, kestävä ja parempaa kaupunkia. YK:n kestävä kehityksen tavoitteiden toteutuminen Turussa 2020. Viitattu 01.04.2021. https://www.turku.fi/sites/default/files/atoms/files//turku_voluntary_local_report_sdg_web_fi.pdf.

Turun seudun puhdistamo Oy 2021. Kakolanmäen jätevedenpuhdistamo. Viitattu 01.04.2021. <https://www.turunseudunpuhdistamo.fi/>.

Valtioneuvoston asetus yhdyskuntajätevesistä 888/2006. Finlex. Viitattu 01.04.2021. <https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2006/20060888>.

Vesilaitosyhdistys. 2016. Teollisuusjätevesiopas. Asumajätevesistä poikkeavien jätevesien johtaminen viemäriin. Vesilaitosyhdistyksen julkaisusarja nro 50. Helsinki.

Wagner, W. 1994. Lämmönsiirto. Painatuskeskus Oy. Opetushallitus. Helsinki.