

Opinnäytetyö (AMK)

Konetekniikka

2019

Mikko Kärkäs

# KIRKNIEMEN PAPERITEHTAAN PROSESSIJÄTEVESIEN JÄÄHDYTYS

Mikko Kärkäs

## KIRKNIEMEN PAPERITEHTAAN PROSESSIJÄTEVESIEN JÄÄHDYTYS

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan Sappi Finland Oy:n Kirkniemen paperitehtaan jätevesiaseman jäähdytystornien korvaamista vaihtoehtoisella menetelmällä. Nykyiset jäähdytystornit ovat teknisen käyttökänsä loppupäässä ja tukkeutumisalttiita eikä niiden jäähdytysteho ole riittävä. Tässä työssä käsitellään kolmea vaihtoehtoa, joita ei ole markkinoilla valmiina kaupallisina ratkaisuin. Vaihtoehdot käsitellään teoriatasolla siten, että tarkastelusta saa käsityksen niiden jatkokehityskelpoisuudesta. Lisäksi esitellään kaksi kaupallista vaihtoehtoa, joista toinen on uusien jäähdytystornien hankinta.

Tarkastelun perustana on käytetty tehtaan omia mittaushistoriatietoja lämpötiloista ja tilavuusvirroista. Lisäksi on käytetty Sarlinin paineilmaraportista saatuja tietoja ilmastuksen turbokompressorien osalta, Jacir air treatment:n esitettä alkuperäisistä jäähdytystorneista ja Pöyry Oy:n vuonna 2000 laatimaa prosessi- ja instrumentointikaaviota sekä Kähkösen (2000) diplomityötä jätevesiaseman prosessiin tutustumisen ja aktiivilietelaitoksen toimintaan perehtymisessä.

Tämä opinnäytetyö sisältää kuvauksen jätevesiaseman prosessista pääpiirteittäin ja yleiskuvauksen aktiivilietelaitoksen toiminnasta sekä siihen vaikuttavista prosessiparametreista. Lisäksi tässä työssä kerrotaan paperin- ja massanvalmistusprosessin vaikutuksesta prosessijätevesien lämpötilaan sekä vertaillaan ympärivuotisen lämpötilanmuutoksen vaikutusta raakaveden ja prosessijäteveden lämpötilaan.

Tämän opinnäytetyön tulosten pohjalta luotu vertailutaulukko esittää jokaisen vaihtoehdon keskeiset toiminnot. Vertailuun valittiin vaihtoehdon toimivuus pää- tai apujäähdyttimenä, legionellariski, jäähdytystehon säädettävyys, liitettävyys höyrystävään jäähdytykseen, huollettavuus, likaantumisalttius sekä valmiiden ratkaisujen saatavuus. Vertailu tehtiin rasti ruutuun periaatteella. Laskemalla jokaisen vaihtoehdon pisteet, ilmastukseen virtaavan jäteveden suora jäähdytys lämmönvaihtimella vaikutti kaikkein lupaavimmalta ratkaisulta.

### ASIASANAT:

Jäähdytys, jäähdytystorni, jätevesi, aktiiviliete, paperitehdas

Mikko Kärkäs

## COOLING OF PROCESS WASTEWATER OF THE PAPER MILL IN KIRKNIEMI

The objective of this thesis was to study alternative methods for wastewater cooling towers in Sappi Finland Kirkniemi mill. The current cooling towers are at the end of their technical lifespan, prone to clogging and their cooling power is insufficient during warm weather. This thesis presents three proposals that are not on the market. Alternative cooling methods were reviewed in theory, so that their potential for further development can be demonstrated. In addition, two on-the-market solutions are presented as a potential solution. One of these is investing on new cooling towers.

The mill's own recording history about temperature and volumetric flow rates was used as a basis of this study. In addition, Sarlin's pneumatic report was used in order to gain information on the aeration of turbo compressors. Jacir air treatment's cooling tower data sheet, PI diagram created by Pöyry Oy in 2000 and the thesis by Kähkönen in 2000 regarding Kirkniemi's wastewater plant were used as source material to become familiar with wastewater handling- and activated sludge process.

This thesis contains a description of wastewater handling process and principles of activated sludge process and important process parameters are outlined. In addition, pulp and paper manufacturing process and weather effects on wastewater temperature were studied.

The comparison chart, that was created from the results of this study presents eight key features of the studied proposals. The compared features include adequacy for main and auxiliary cooling, the risk of spreading legionella, adjustable cooling power, option of connecting with evaporative cooling, serviceability, fouling and availability of readymade solutions. The comparison was made by checking the box. By counting the score for each proposal, a direct cooling of wastewater flow to the aeration seemed to be the most promising solution.

### KEYWORDS:

Cooling, cooling tower, wastewater, activated sludge, paper mill

# SISÄLTÖ

<b>KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO</b>	<b>7</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>9</b>
<b>2 KIRKNIEMEN PUHDISTAMOPROSESSI</b>	<b>11</b>
2.1 Välppäys	12
2.2 Esiselkeytys	12
2.3 Tasaus	13
2.4 Ilmastus	13
2.5 Jälkiselkeytys	13
2.6 Flokkaus	14
2.7 Flotaatio	14
2.8 Lietteenkäsittely	15
2.8.1 Primääriliete	15
2.8.2 Bioliete ja kemiallinen liete	15
2.9 Ympäristönäkökohdat	16
2.10 Kapasiteetti	16
<b>3 AKTIIVILIETELAITOKSEN TOIMINTAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT, PÄÄSTÖT JA NIIDEN VAIKUTUKSET</b>	<b>17</b>
3.1 Bakteerit	17
3.2 Happi	17
3.3 Lämpötila	18
3.4 pH	18
3.5 Typpi ja fosfori	18
3.6 Viipymä	19
3.7 Lieteikä	19
3.8 Kuorma	19
<b>4 JÄÄHDYTYKSEN NYKYTILANNE</b>	<b>20</b>
4.1 Jäähdytystornien kuvaus	20
4.2 Tornien haasteet	20
4.3 Tornien hyödyt	21
<b>5 PROSESSIN VAIKUTUS LÄMPÖTILAAN</b>	<b>22</b>

5.1 Tuotantoseisokkien vaikutus lämpötilaan	22
5.2 Jätevesiaseman sisäinen lämpökuormitus	23
<b>6 VUODENAIKOJEN VAIKUTUS LÄMPÖTILAAN</b>	<b>26</b>
<b>7 VAIHTOEHDOT JÄÄHDYTYKSEN TOTEUTTAMISEKSI</b>	<b>29</b>
7.1 Ilmastusilman jäähdyttäminen lämmönvaihtimella	29
7.2 Altaaseen tulevan veden jäähdyttäminen	30
7.3 Altaassa olevan veden jäähdyttäminen	35
7.4 Höyrystävä jäähdytys	36
7.5 Kaupalliset ratkaisut	38
7.5.1 COOLIT jäähdytin	38
7.5.2 Uudet jäähdytystornit	39
<b>8 LOPPUPÄÄTELMÄ</b>	<b>40</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>42</b>

## KAAVAT

Kaava 1. Lämmön siirtyminen kuljetuksessa (Mäkelä ym. 2016, 111).	24
Kaava 2. Ilman tiheys annetussa paineessa ja lämpötilassa (Valtanen 2016, 394).	24
Kaava 3. Massavirta (Mäkelä ym. 2016, 99).	25
Kaava 4. Lämmön siirtyminen kuljetuksessa, josta on ratkaistu lämpötilaero (Mäkelä ym. 2016, 111).	30
Kaava 5. Lämmön siirtyminen ainekerroksen läpi (Mäkelä ym. 2016, 111).	31
Kaava 6. Pinta-ala ratkaistu kaavasta 5.	31
Kaava 7. Ainekerroksen lämmönvastuksen yksikkö (Mäkelä ym. 2016, 111).	31
Kaava 8. Lämmönsiirtymiskerroin.	31
Kaava 9. Lämmönvaihtimen mitoitusyhtälö (Springerin (1998) mukaan (ks. Motiva 2016, 4)).	32
Kaava 10. Logaritminen lämpötilaero ratkaistuna lämmönvaihtimen mitoitusyhtälöstä.	32
Kaava 11. Kylmän ainevirran ulostulolämpötila (Bergman ym. 2011, 732).	33
Kaava 12. Teoreettinen maksimi lämmönsiirtoteho (Bergman ym. 2011, 731).	33
Kaava 13. Todellinen lämmönsiirtoteho (Bergman ym. 2011, 732).	33
Kaava 14. Vastavirtalämmönvaihtimen $\epsilon$ -NTU relaatio (Bergman ym. 2011, 725).	33
Kaava 15. Pinta-ala NTU-luvusta (Bergman ym. 2011, 723).	34
Kaava 16. Höyrystymiseen tarvittava lämpöenergia (Valtanen 2016, 194).	37
Kaava 17. Höyrystymiseen tarvittava teho.	37
Kaava 18. massavirta ratkaistuna höyrystymiseen tarvittavasta tehosta.	38

## KUVAT

Kuva 1. Tehdaskuva (Sappi 2018).	11
Kuva 2. Yksinkertaistettu prosessikaavio (Sappi 2003).	12
Kuva 3. Jätevedenpuhdistamo lähikuvassa (Sappi 2018).	15

## KUVIOT

Kuvio 1. Esiselkeytetyn veden lämpötilanvaihtelu 2019 juhannusseisokin aikana (Sappi 2019).	22
Kuvio 2. Lämpötilanvaihtelu jouluseisokissa 2018 ja sitä seuranneella viikolla (Sappi 2019).	23
Kuvio 3. Esiselkeytetyn veden lämpötilanvaihtelu vuonna 2018 (Sappi 2019).	26
Kuvio 4. Raakaveden lämpötilan vaihtelu vuonna 2018 (Sappi 2019).	27
Kuvio 5. Ilmanlämpötilanvaihtelu Lohjan Porlassa vuonna 2018 (Ilmatieteenlaitos 2019).	27
Kuvio 6. Lämmönsiirtoteho pinta-alan funktiona.	34

## TAULUKOT

Taulukko 1. Jäähdytysratkaisujen vertailu.	40
--	----

# KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO



PK1	Paperikone 1
PK2	Paperikone 2
PK3	Paperikone 3
PI-kaavio	Prosessi- ja instrumentointikaavio
JS1	Jälkiselkeytin 1
JS2	Jälkiselkeytin 2
JS3	Jälkiselkeytin 3
AVR	Ferri-alumiinisulfaatti
K2	Voimalaitoksen kattila 2
K5	Voimalaitoksen kattila 5
ES1	Esiselkeytin 1, nykyinen PK3 varoallas
ES2	Esiselkeytin 2
N	Typpi
P	Fosfori
BOD	Biologinen hapenkulutus
COD	Kemiallinen hapenkulutus
A	Pinta-ala [m <sup>2</sup> ]
k	Lämmönsiirtokerroin [W/mK]
Q	Lämmönvaihtimen teho [W]
T	Lämpötila [K tai °C]
$\Delta T$	Lämpötilaero [K]
$\Delta T_{in}$	Logaritminen lämpötilaero [K]

CFD	Computational fluid dynamics
$\dot{Q}$	Lämpövirta eli lämpöteho
$\dot{V}$	Tilavuusvirta
$d$	Ainekerroksen paksuus.
$\theta$	Pintalämpötilojen erotus
$R$	Ainekerroksen lämmönvastus.
$h$	Lämmönsiirtymiskerroin.
$U$	Kokonaislämmönsiirtokerroin.
$\phi$	Lämmönvaihtimen teho.
$r$	Höyrystymislämpö.



# 1 JOHDANTO

Tämä työn aiheena on prosessijätevesien jäähdytys Kirkniemen paperitehtaalla. Tarkoituksena oli selvittää eri vaihtoehtot jäähdytyksen toteuttamiselle ja vertailla niitä keskenään. Selvitys laadittiin, koska nykyinen jäähdytysjärjestelmä ei ole jäähdytyskapasiteetiltaan riittävä. Vaihtoehtoja arvioitiin selvittämällä suurin mahdollinen jäähdytystehon tarve perustuen viiden vuoden mittaushistoriaan. Seuraavaksi erilaisia ratkaisuja arvioitiin laskennallisesti. Arvioinnin tuloksena saatiin tietoja lämmönvaihtimen lämmönsiirtopinta-alasta ja jäähdyttävän ainevirran lämpötilasta. Näistä tiedoista arvioitiin ratkaisun yleistä toimivuutta. Kaupallisia ratkaisuja arvioitaessa hyödynnettiin valmistajien tarjoamia teknisiä tietoja laitteistosta.

Kirkniemen paperitehtaan kolmen paperikoneen yhteinen tuotantokapasiteetti on 750 000 tonnia vuodessa päällystettyjä papereita heatset offset -menetelmällä tuotettaviin painotöihin. Tehtaan massanvalmistuksen tuotantokapasiteetti on 300 000 tonnia vuodessa mekaanista massaa omaan käyttöön. Viennin osuus tuotannosta on yli 90%. Tehdas työllistää suoraan noin 550 paperialan henkilöä. (Sappi 2019)

Kirkniemen tehdas sijaitsee Lohjanjärven rannalla. Tämän vuoksi tehtaan jätevedenpuhdistamon ravinne- ja lika-ainepäästöille on säädetty tarkat rajat. Ympäristöasioiden suunnittelussa, toteutuksessa ja raportoinnissa tehdas seuraa ISO 14001 standardia sekä EMAS -käytäntöä (Sappi 2019). Tässä työssä käsiteltävä ilmastusvaiheen lämpötila on keskeinen tekijä puhdistamon päästöjen kannalta ja vaikuttaa päästörajojen toteutumiseen. Prosessijätevesien jäähdyttäminen nykyisillä jäähdytystorneilla on ollut ongelmallista mm. niiden tukkeutumisen ja ympäröivän ilman korkean lämpötilan aiheuttaman lämmönsiirtotehon laskun vuoksi.

Työhön liittyy myös turvallisuusnäkökohta. Jätevedenpuhdistamon vesissä on havaittu olevan legionellabakteeria. Legionellabakteeri leviää torneista haihtuvan vesihöyryn mukana ympäristöön. Hengitysaltistumisen välttämiseksi puhdistamolla on käytettävä hengityssuojainta tornien käytön aikana. Legionellabakteeria ei ole voitu poistaa järjestelmästä torjunta-aineita käyttämällä, koska se vaarantaisi aktiivilieteprosessin kannalta tärkeät bakteerit.

Kappaleessa 2 perehdytään Kirkniemen jäteveden puhdistusprosessiin. Prosessi on esitelty vaihe kerrallaan. Kappaleessa 3 käsitellään aktiivilietelaitoksen toimintaan vai-

kuttavat tekijät, laitoksen päästöt ja näiden vaikutukset. Kappaleessa 4 esitellään jäähdytyksen nykytilanne ja jäähdytystornien hyödyt sekä haasteet. Kappaleissa 5 ja 6 perehdytään prosessin ja vuodenaikojen vaikutukseen prosessijätevesien lämpötilaan. Kappaleessa 7 esitellään eri vaihtoehtot jäähdytyksen toteuttamiseksi ja arvioidaan niitä. Kappaleessa 8 esitetään vaihtoehtojen vertailutaulukko sekä muut havainnot, jotka tässä työssä tulivat ilmi.

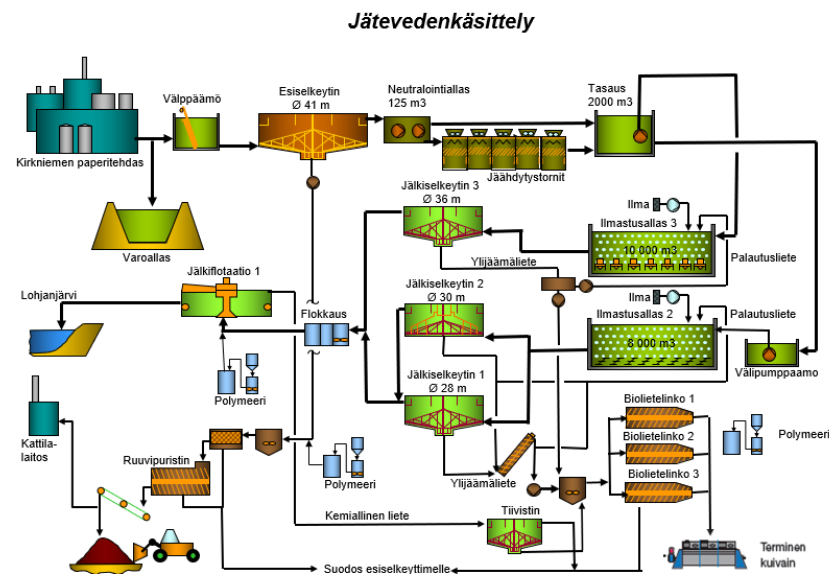
## 2 KIRKNIEMEN PUHDISTAMOPROSESSI

Kirkniemen jätevedenpuhdistamo perustuu aktiivilieteprosessiin. Jätevedenpuhdistamo on kuvassa 1 alhaalla vasemmalla. Jätevedenpuhdistamolla käsitellään kaikki paperin- ja massantuotannon prosessivedet, joita ei voi uudelleen kierrättää prosessissa. Käsiteltävät prosessivedet koostuvat paperin- ja massanvalmistuksen jätevesistä. Jätevedenpuhdistamo koostuu eri rakennusvaiheiden aikaisista, mm. PK3 rakennuksen yhteydessä, prosessin osista. Osa näistä on korvattu tai otettu muuhun käyttöön. Osa on alkuperäisessä käytössä. (Kähkönen 2000, 51-53.)



Kuva 1. Tehdaskuva (Sappi 2018).

Prosessi sisältää mekaanisen, biologisen ja kemiallisen vaiheen. Prosessi etenee PI-kaavion päälinjaa seuraten tehtaalta lohjanjärveen seuraavasti: PK3:lta ja massanvalmistukselta lähtee oma linjansa sekä PK1 & PK2- linjoilta ja niiden massatehtaalta omansa jätevedenpuhdistamolle. Molemmissa linjoissa on purkumahdollisuus varoaltaaseen. Linjat yhdistyvät esiselkeytyksen syöttökaivossa, josta jatkuu linja porrasvälpälle. Porrasvälpältä seuraava vaihe on esiselkeytys. Esiselkeytykseltä lähtee linja vanhan neutralointialtaan (neutralointiallas toimii nykyään pumppausaltaana jäähdytys-tornien käytön aikana) kautta tasausaltaaseen, josta vesi pumpataan ilmastuslinjoihin 2 ja 3. Ilmastus 2:sta vesi pumpataan kahteen jälkiselkeyttimeen, jälkiselkeytin 1:een ja 2:een. Ilmastus 3:sta prosessi etenee jälkiselkeytin 3:een. Ilmastuslinjat 2 ja 3 yhdistyvät ennen flotaatiota kemikalointi- ja flokkausaltaassa. Flotaation jälkeen käsitelty vesi puretaan lohjanjärveen. Kuvassa 2. on esitetty yksinkertaistettu jätevesiaseman prosessikaavio (Pöyry 2000; Mäkipää 2007, 7.)



Kuva 2. Yksinkertaistettu prosessikaavio (Sappi 2003).

Seuraavat esittelyt puhdistusprosessin osista perustuvat Kähkösen (2000) tekemään kuvaukseen, joka puolestaan perustuu Harmaan (1995) tekemään puhdistamon prosessikuvaukseen, tehtaan laatuarkistoon ja käyttöhenkilökunnan selostuksiin. Kähkösen työstä löytyy lisäksi PK3:n (1996) rakennusvaiheen aikana rakennetut prosessin osat. Lisäksi lähteenä on käytetty Pöyry Oy:n laatimaa PI-kaaviota (2000) sekä Mäkipään tutkintotyötä (2007). Puhdistusprosessin osat käsitellään siinä järjestyksessä, mihin ne on sijoitettu prosessissa.

## 2.1 Välppäys

Välppäys on mekaanisen vaiheen ensimmäinen osa. Välppäyksessä jätevedestä erotetaan karkea kiintoainne, kuten puutikut, puunkuoret, ym. Välppäys suoritetaan porraskäpällä, joka sijaitsee PK3:n rakennusvaiheen aikana rakennetussa välppämörakennuksessa. (Kähkönen 2000, 54.)

## 2.2 Esiselkeytys

Esiselkeytys on mekaanisen vaiheen toinen osa. Esiselkeytinlaitteita on kaksi, mutta vanhempi 1966 rakennettu on muutettu PK3:n varoalaksi. Esiselkeytinallas 2 on pyö-

reä, halkaisijaltaan 41 metrin allas. Esiselkeyttimessä on altaan ympäri pyörivä silta, joka kuljettaa laahainta altaan pohjaa pitkin. Jätevesi syötetään altaaseen sen keski- osasta, josta se jakautuu tasaisesti altaaseen. Jäteveden sisältämät kiintoaineet las- keutuvat altaan pohjalle, josta laahain kerää ne mukaansa ja poistaa ne altaan keski- suppilon kautta. Tästä kiintoaineesta käytetään nimitystä primääriliete. Selkeytetty vesi poistuu altaasta sen kehällä olevien ylivuotokourujen kautta. (Kähkönen 2000, 56; Pöy- ry 2000.)

### 2.3 Tasaus

Tasaus on biologisen vaiheen ensimmäinen osa. Tasausallas on entinen ilmastusallas 1. Altaan tilavuus on 2000 m<sup>3</sup>. Allas on pintailmastettu ja toimii esi-ilmastuksena. (Käh- könen 2000, 58; Mäkipää 2007, 7; Pöyry 2000.)

### 2.4 Ilmastus

Biologisen vaiheen toinen osa. Puhdistamolla on kaksi ilmastuslinjaa, joissa molem- missa on oma ilmastusaltaansa. Normaalisissa kuormitustilanteissa vesi virtaa molem- pien ilmastuslinjojen läpi. Ilmastukseen tarvittava paineilma tuotetaan turbokompresso- reilla. Kompressoreja säädetään voimalaitoksen valvomosta käsin altaiden happipitoi- suuden mukaan. Ilmastuksessa jätevettä hapetetaan mikrobitoiminnan ylläpitämiseksi ja varsinainen biologinen puhdistus tapahtuu ilmastuksessa. (Kähkönen 2000, 58-61; Mäkipää 2007, 10.)

### 2.5 Jälkiselkeytytys

Biologisen vaiheen kolmas osa. Ilmastuslinjalla 3 on yksi jälkiselkeytin (JS3). Ilmastus- linjalla 2 on kaksi jälkiselkeytintä (JS1 ja JS2). Jälkiselkeytyksessä ilmastuksessa syn- tynyt jätevesi-lieteseoksesta erotetaan liete. Seos johdetaan altaan keskellä olevaan rauhoitusrenkaaseen. Rauhoitusrenkaasta seos leviää tasaisesti koko altaaseen. Liete laskeutuu altaan pohjalle johtuen veden ja lietteen välisestä tiheyserosta. Tiheyseron saavuttamiseksi on tärkeitä, että aktiivilietteeseen on valikoitunut sellainen bakteeri- kanta, joka omaa hyvät laskeutumisominaisuudet. Esimerkiksi ilmastuksen lämpötilojen nousu aiheuttaa rihmamaisten bakteerien osuuden kasvua bakteeribiomassassa. Tä-

mä tekee lietteestä huonosti laskeutuvan ja johtaa lisääntyneisiin lika-ainepäästöihin ja paisuntalietteen muodostumiseen. Jälkiselkeyttimessä on kehävetoinen pohjalietelaa-hain, joka kerää pohjalle laskeutunutta lietettä. Laahaimen keräämä liete kerätään altaan keskisyvennykseen. Liete pumpataan palautuslietteeksi ilmastusaltaaseen ja osa poistetaan kierrosta lietteenkäsittelyyn. Lietteestä poistetaan bakteeribiomassan kasvua vastaava osa ylijäämälietteenä. Puhdistettu vesi poistuu altaan kehältä ylivuoto-kaukaloon. (Kähkönen 2000, 61-63; Hakala ym 2012, 5-7; Pöyry 2000.)

## 2.6 Flokkaus

Kemiallisen vaiheen ensimmäinen osa. Jälkiselkeytettyyn veteen sekoitetaan pika-sekoitusaltaassa saostusaine (AVR). AVR on granuloitua Ferrialumiinisulfaattia (Kemira 2019). Annosmäärää säädetään voimalaitoksen valvomosta. (Kähkönen 2000, 63-64; Pöyry 2000.)

## 2.7 Flotaatio

Flotaatio on kemiallisen vaiheen toinen osa ja jätevedenpuhdistuksen viimeinen osa ennen palautusta Lohjanjärveen. Flokattu jätevesi sisältää kemiallista lietettä, joka erotetaan flotaatiossa. Flotaatiossa jäteveden sekaan syötetään flotaatiossa jo kerran kiertänyttä puhdistettua vettä. Vesi on kyllästetty ilmalla flotaatioaltaan alla flotaatiohuoneessa. Paineilma ruiskutetaan veden sekaan puolijohtavien kalvojen läpi. Vedessä olevat ilmakuplat nostavat kemiallisen lietteen flotaatioaltaan pinnalle, josta se kauho-taan pois allasta kiertävän kehävetoisen keräimen avulla. Pyörimisnopeutta säädetään silmämääräisesti. Pohjalle laskeutunut liete kerätään pohjakaapimella lietetaskuun. Poistettu kemiallinen liete siirretään lietteenkäsittelyyn. (Kähkönen 2000, 64-65; Pöyry 2000.)

Kuvassa 3. on tehdaskuvasta otettu puhdistamon suurennos. Kuvasta on nähtävissä suurin osa altaista. Esiselkeytin 2 sijaitsee edessä keskellä. Esiselkeyttimen vasem-malla puolella on ilmastusallas 3, jonka takana näkyvät kirkasvetiset altaat ovat jälki-selkeyttimiä. Flotaatioallas jää ilmastusallas 3:n taakse. Jäähdytystornit ovat kuvassa keskellä esiselkeyttimen yläpuolella. Jäähdytystornien takana on ilmastusallas 2 ja ta-sausallas.



Kuva 3. Jätevedenpuhdistamo lähikuvassa (Sappi 2018).

## 2.8 Lietteenkäsittely

Seuraavat havainnot lietteenkäsittelystä perustuvat jätevedenpuhdistamon PI-kaavioon (Pöyry 2000).

### 2.8.1 Primääriliete

Esiselkeyttimen (ES2) primääriliete pumpataan voimalaitoksen lietepuristimille, jossa sen kiintoainepitoisuutta nostetaan mekaanisesti puristamalla. Kuivattu liete poltetaan voimalaitoksen kattila 2:ssa.

### 2.8.2 Bioliete ja kemiallinen liete

Bioliete on jälkiselkeytyksessä erotettua bakteeribiomassaa, johon on sitoutuneena jäteveden lika-ainepartikkeleja. Biolietteestä osa pumpataan palautuslietteenä takaisin ilmastusaltaaseen ja bakteeribiomassan kasvua vastaava osa poistetaan ylijäämali-

teenä linkohuoneessa sijaitseville kuivauslingoille, joilla lietteen kuiva-ainepitoisuutta nostetaan n. 20 %:iin. Lingottu liete on vielä suhteellisen kosteaa, joten se kuivataan termisellä kuivaimella. Termisen kuivaimen sisällä on pyöriviä kiekkoja, joissa virtaa höyryä. Höyryn tuoma lämpö kuivattaa kiekkojen ympärillä olevan lietteen. Lopputulokseksi saadaan hienojakoista pölyä, jonka kuiva-ainepitoisuus on n. 90 %. Kuivattu liete puhalletaan voimalaitokselle ja poltetaan joko kattila 2:ssa tai kattila 5:ssä. Kemiallinen liete käsitellään yhdessä biolietteen kanssa ja poltetaan voimalaitoksella. (Pöyry 2000.)

## 2.9 Ympäristönäkökohdat

Kirkniemen jätevesiaseman läpi kulkeva jätevesivirtaama on vuositasolla noin 5 457 000 m<sup>3</sup>. Jäteveden ominaisvirtaamaa on 8,9 m<sup>3</sup>/t. Yksiköllä m<sup>3</sup>/t tarkoitetaan jätevesikuutiometriä tuotettua paperitonnia kohti. Jätevedenpuhdistamolla puhdistettu jätevesi lasketaan laskuojaa pitkin Lohjanjärveen. Jätevesissä on pieniä päästökomponenttisiä COD:tä (2,17 kg/t), BOD:tä (0,09 kg/t), typpeä (N) (31 g/t), fosforia (P) (3,7 g/t) ja kiintoainepäästöjä (0,72 kg/t). Suluissa olevat luvut ovat ominaispäästöjä. Vuositasolla päästöt ovat seuraavat: COD 1328 t, BOD 57 t, P 2,25 t, N 19,2 t ja kiintoaineita 442 t. Veteen aiheutuvien päästöjen merkittävin ympäristövaikutus on vesistön hapenkulutus (BOD ja COD) sekä rehevöityminen (N ja P). Vaikutusten vähentämiseksi Kirkniemen paperitehtaalte on säädetty päästörajat, joita ei tule ylittää. Muita toimenpiteitä ovat veden käytön ja puhdistuksen tehokkuus sekä Lohjanjärven eteläosan syvänteiden hapettaminen. Jätevesiaseman satunnaispäästöjen minimoimiseksi arvioidaan ympäristöriskejä. Riskejä havaittaessa tehdään korjaavia toimenpiteitä ja keskitytään laitteiston kunnossapitoon, käyttöön sekä tarkkailuun. (Sappi 2018, 7-10.)

## 2.10 Kapasiteetti

Puhdistamo on suunniteltu 20 000 m<sup>3</sup>/d päivittäiselle virtaukselle. Biologinen osa on suunniteltu käsittelemään COD:tä 36 000 kg/d ja fosforiravinnetta 80 kg/d. Biologisen osan typpiravinnekuormitus oli vuonna 2018 210 kg/d, Kiintoainekuorma 3 500 kg/d ja BOD 14 800 kg/d. (Sappi 2018.)



### 3 AKTIIVILIETELAITOKSEN TOIMINTAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT, PÄÄSTÖT JA NIIDEN VAIKUTUKSET

Tässä kappaleessa kerrotaan aktiivilietelaitoksen toimintaan vaikuttavat keskeiset tekijät, päästöt ja niiden vaikutukset. aktiivilieteprosessin parametrit vaikuttavat prosessissa elävään bakteerikantaan, joka on oleellinen laitoksen puhdistuskyvyn kannalta. Väärnlainen bakteerikanta johtaa lisääntyneisiin COD- ja ravinnepäästöihin. Aktiivilieteprosessi on biologinen jäteveden puhdistusmenetelmä, jossa mikrobit sitovat lika-aineet vedestä erotettavaan muotoon. Aktiivilieteprosessi sisältää vähintään ilmastuksen ja selkeytyksen. Varsinainen puhdistus tapahtuu ilmastuksessa, jossa liukoiset ja kolloidit lika-aineet sitoutuvat lietteeseen. Selkeytyksessä liete erotetaan vedestä. Lietteen kasvusta johtuen osa lietteestä poistetaan ylijäämälietteenä. Loput palautetaan takaisin ilmastukseen. (Kähkönen 2000, 9-11; Hakala ym 2012, 5.)

#### 3.1 Bakteerit

Aktiiviliete koostuu flokeista, josta 95...99% on bakteerimassaa. Bakteereista vain 1...10% on jakautumiskykyisiä. Aktiivilieteprosessin toiminnan kannalta bakteeribio-massan kyky muodostaa flokkeja on tärkeä. Grayn (2004) mukaan (ks. Luhtaniemi 2017, 20) Prosessiolosuhteiden muutokset saattavat heikentää flokkien muodostumista ja siten haitata lietteen laskeutumista selkeytyksessä. Flokin laskeutumisominaisuuksien heikkeneminen lisää poistuvan veden kiintoainepitoisuutta (Hakala ym. 2012, 7). Aktiivilietteen bakteerit valikoituvat vallitsevien olosuhteiden mukaan. Mikrobilajistoon vaikuttavia prosessiolosuhteita ovat mm. happipitoisuus, lämpötila ja pH. (Kähkönen 2000, 13.)

#### 3.2 Happi

Chudoban (1989) mukaan (ks. Kähkönen 2000, 13) ilmastuksen tehtävä aktiivilieteprosessissa on kuljettaa happea mikrobeille. Ilmastus toimii myös sekoittimena, jolla liete pidetään suspensiona. Liian alhainen happipitoisuus rajoittaa aerobisten mikrobien kasvua. Halttusen (1999) ja Laukkasen (1990) mukaan (ks. Kähkönen 2000, 13-14)

Hapen tarve on prosessin alkupäässä suurempi kuin loppupäässä. Tästä syystä happipitoisuus on syytä mitata eri kohdissa ilmastusallasta. Mittauksista saadun happiprofiilin avulla voidaan säätää ilmastuksen tehokkuutta. Alhaisilla happipitoisuuksilla useiden rihmamaisten bakteerien kasvunopeus on suurempi kuin flokkeja muodostavilla bakteereilla (Kähkönen 2000, 14).

### 3.3 Lämpötila

Lämpötilan vaikutus aktiivilietelaitoksen toimintaan on keskeinen tekijä tässä opinnäytetyössä. Lämpötila vaikuttaa biokemiallisten reaktioiden nopeuksiin. Tämä tekee lämpötilasta merkittävän tekijän aktiivilieteprosessin bakteeribiomassan muodostumiseen. Jos vääränlaiset bakteerit valikoituvat, flokkien muodostuminen heikkenee ja lika-ainepäästöt kasvavat. Lämpötilan kasvu lisää prosessin hapenkulutusta kiihtyneen reaktionopeuden kautta. Tämä aiheuttaa vaaran ilmastuskapasiteetin riittämättömydestä. Metsäteollisuuden jätevesien lämpötilan tulee olla välillä 35...37 °C. (Kähkönen 2000, 16-17.)

Tehtaalla on käytännössä havaittu, että vesien lämpötilan nousun aiheuttama bakteerikannan muutos johtaa käyttämättömien fosforiravinteiden kulkeutumiseen Lohjanjärveen. Fosforipäästöjen seuranta on päästörajojen takia tärkeätä.

### 3.4 pH

Benefieldin ja Randallin (1980) mukaan (ks. Kähkönen 2000, 18-19) entsyymikatalysoitujen reaktioiden optimi-pH on välillä 6,5...8,5. pH:n äkillinen muutos saattaa aiheuttaa huomattavia prosessihäiriöitä. pH saattaa muuttua ulkoisten tekijöiden lisäksi osana aktiivilietteen toimintaa, kun jäteveden orgaanisia happeja hajoaa vedeksi ja hiilidioksidiksi. (Kähkönen 2000, 18.)

### 3.5 Typpi ja fosfori

Typpi ja fosfori ovat merkittävimmät vesistöjen rehevöitymistä aiheuttavat ravinteet (Pietiläinen ja Räike 1999, 7). Vuorirannan (1989) mukaan (ks. Kähkönen 2000, 20) metsäteollisuuden jätevedet ovat ravinneköyhiä ja ravinteiden lisääminen on tarpeellis-

ta. Typpi ja fosfori toimivat aktiivilieteprosessissa bakteerien makroravinteena (Kähkönen 2000, 20).

### 3.6 Viipymä

Aktiivilietteen hydraulisella viipymällä tarkoitetaan aikaa, jonka vesi viipyy ilmastusaltaassa. Tänä aikana tapahtuu lika-aineiden sitoutuminen bakteeribiomassaan ja lika-aineiden käyttö bakteerien ravintona. Hydraulinen viipymä Kirkniemessä on noin 24 tuntia. (Kähkönen 2000, 40.)

### 3.7 Lietekä

Lietekä kuvaa lietteen uusiutumisaikaa, eli aikaa, jona prosessissa oleva liete on täysin uusiutunut. Lietekä on määritelty prosessissa olevan lietemäärän suhteena siitä poistuvaan lietemäärään. Lietekiän säätely vaikuttaa aktiivisen biomassan määrään ja mikrobikantaan. Kirkniemessä lietekä on noin 15 vuorokautta. (Kähkönen 2000, 30-32.)

### 3.8 Kuorma

Kuorma jakautuu liete-, flokki-, kiintoaine- ja hydrauliseen kuormaan. Lietekuorma kuvaa vuorokauden aikana aktiivilietelaitokselle kulkevan ravinnon suhdetta ilmastuksessa olevaan biomassaan. Flokkikuormalla tarkoitetaan lika-aineen kiinnittymistä palautuslietteeseen. Grayn (1995) mukaan (ks Kähkönen 2000, 37) Kiinnittymisen jälkeen lietteen on regeneroiduttava ennen kuin siihen voi kiinnittyä uusia lika-aineita. Paperiteollisuuden jätevedet sisältävät runsaasti kiintoaineita, jotka voivat vähentää aktiivisen lietteen osuutta ilmastuksessa kiinnittymällä flokkeihin. Hydraulinen kuormitus vaikuttaa selvimmin jälkiselkeytyksessä. Suurella läpivirtauksella liete ei ehdi laskeutua ja kiintoainetta voi kulkea jälkiselkeytyksen ohi. (Kähkönen 2000, 34-46.)

## 4 JÄÄHDYTYKSEN NYKYTILANNE

Jäähdytys toimii tällä hetkellä viidellä Jacir air treatmentin valmistamalla ilmajäähdytteisellä jäähdytystornilla. Jäähdytystornit ovat laajasti käytetty menetelmä jätevesien jäähdytykseen.

### 4.1 Jäähdytystornien kuvaus

Jäähdytystornissa vesi ruiskutetaan matalapaineisen suuttimen läpi verkkomaiselle lämmönvaihdinpinnalle tornin yläosassa. Vettä jäähdytetään konvektiivisesti tuulettimen avulla. Tuuletin on sijoitettu tornin yläosaan ja se luo ilmavirtauksen tornin alaosasta ylöspäin. Jokaisen tornin läpi virtaa vettä 144 m<sup>3</sup>/h. Lämpöä 2511 kW tornia kohti. Tällä saavutetaan valmistajan esitteen mukaan 35 °C Lämpöinen vesi kun jäähdyttimeen tuleva vesi on 50 °C. Esitteestä ei käy ilmi lämpötilaeron aikaansaamiseksi vaadittavaa ilmanlämpötilaa. Valmistajan mukaan vettä häviää prosessista haihtumalla noin 3,6 m<sup>3</sup>/h tornia kohti. Tornien yhteisteho on 12 555 kW, veden läpivirtaama 720 m<sup>3</sup>/h ja haihtuvan veden määrä 18 m<sup>3</sup>/h. (Jacir Air Treatment 2006.)

### 4.2 Tornien haasteet

Jäähdytys perustuu tornia ympäröivän ilman lämpötilaan, joten jäähdytysteho on verrannollinen ilman lämpötilaan. Lämpimällä ilmalla on vaarana lämmönsiirtotehon rittämättömyys ja jäähdytettävän veden lämpeneminen. Jäähdytystornit on tarkoitettu toimimaan suljetulla kierrolla ilman, että jätevesi olisi suoraan tornien kanssa tekemisissä. Kustannussyistä on päädytty avoimen kierron jäähdytystorneihin. Haittana on suuttimien likaantuminen ja tukkeutuminen. Suuttimien likaantuminen haittaa virtausta ja pisanmuodostusta laskien jäähdytystehoa. Suuttimien tukkeutuessa tornit joudutaan puhdistamaan. Puhdistaminen saattaa kestää jopa viikon, jonka aikana torni ei ole käytössä. Avoimesta jäähdytyskierrosta johtuen järjestelmää ei voida bakteerikontaminaation varalta desinfioida, koska se vaarantaisi myös prosessille tärkeät mikrobit.

Koska järjestelmää ei voida desinfioida, se toimii leviämisalustana jätevedessä kasveille legionellabakteereille. Legionellabakteeria kehittyy lämpimässä vedessä ja se leviää ilmassa aerosolina. Tässä tapauksessa aerosolina toimii torneista muodostuva ve-

sihöyry. Legionellabakteerin vuoksi jätevesiasemalla on käytettävä P3 hengityssuojainta tornien ollessa käytössä. (terveyskirjasto 2019.)

Kesällä 2019 tornien havaittiin olevan hajoamassa. Tornien komponentit ovat suurilta osin muovia, ja ovat aikojen saatossa haurastuneet. Muovisten osien korjaaminen on vaikeaa ja vaihtaminen kallista. Jos vauriot ovat suuria, saattaisi olla järkevämpää uusia koko järjestelmä. Tällaiset jäähdytystornit ovat kuitenkin melko kalliita. Valmistajan esitteessä mainittiin hinnaksi vuonna 2006 57600 €, joten kaikkien viiden tornin yhteenlaskettu hinta on 288000 €. Jos tornit uusitaan, tulee nille rakentaa suljettu jäähdytyskierto. Tämä nostaa hintaa entisestään, mutta parantaa toimintavarmuutta. (Jacir Air Treatment 2006.)

#### 4.3 Tornien hyödyt

Jäähdytystornit ovat laajasti käytetty menetelmä ja niitä on paljon tarjolla. Torneilla saadaan teoriassa toteutettua jäähdytys tehokkaasti. Suljetulla kierrolla toteutettu torni on periaatteessa legionellavapaa ja se voidaan dekontaminoida haitallisen bakteerikasvuston tapauksessa. Jäähdytystorni on edullinen käyttää, sillä sen käyttökustannukset koostuvat lähinnä veden pumppauksesta torniin ja puhaltimen käytöstä. Toiminnaltaan ne ovat yksinkertaisia.

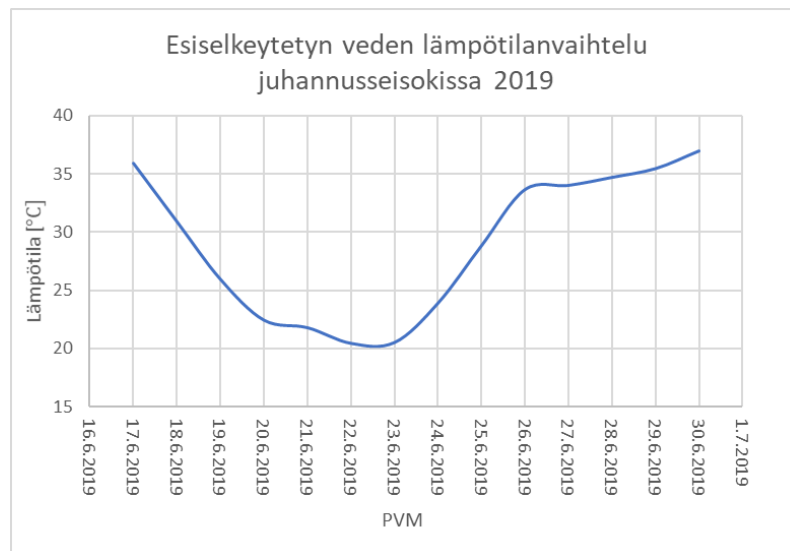
## 5 PROSESSIN VAIKUTUS LÄMPÖTILAAN

Jätevesiasemalle tulevien prosessijätevesien aiheuttama lämpökuorma syntyy paperin- ja massanvalmistusprosessissa. Paperin- ja massanvalmistusprosessin kuormitusasteet vaikuttavat oleellisesti jätevesien lämpötilaan. Prosessin yläjuoksulla on lämmönvaihtimia, joiden tarkoitus on ottaa hukkalämpöä talteen jätevesistä ja vähentää jätevedenpuhdistamon lämpökuormaa. Lämmönvaihtimien kunto, likaantuneisuus sekä ajotapa vaikuttavat jätevedenpuhdistamolle tulevaan lämpökuormaan.

Tässä kappaleessa esitettävät tiedot, joiden perusteella kuviot koskien esiselkeytetyn jäteveden lämpötiloja on piirretty, ovat peräisin tehtaan tietojärjestelmästä, josta ne on otettu 8.10.2019.

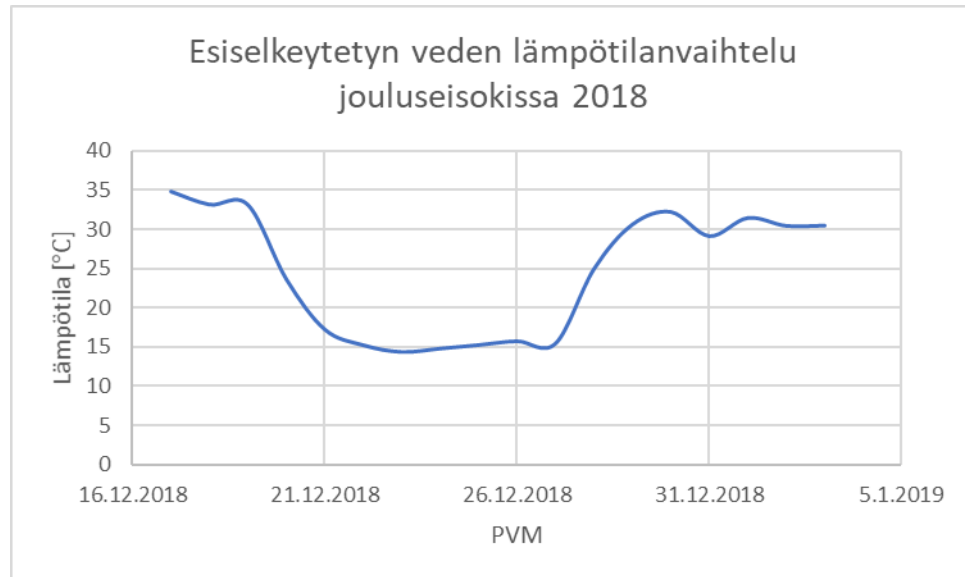
### 5.1 Tuotantoseisokkien vaikutus lämpötilaan

Tuotantoseisokit vaikuttavat oleellisesti jätevesien lämpötilaan. Kuvaajassa 1 on esitettyä juhannusseisakin, 17.6.- 23.6.2019, sekä sitä seuraavan viikon aikainen lämpötilanvaihtelu. Tiedot kuvaajaan on saatu esiselkeytetyn veden lämpötilamittaushistorias- ta ja mittaustulokset on tallennettu joka aamu kello 6.00.



Kuvio 1. Esiselkeytetyn veden lämpötilanvaihtelu 2019 juhannusseisokin aikana.

Verrattuna jouluseisokkiin 2018, lämpötilanvaihtelu tapahtui hieman suuremmalla välillä. Kuvaajassa 2 on esitetty lämpötilanvaihtelu jouluseisokissa 2018 sekä sitä seuranneella viikolla. Kuvaajia tarkastelemalla on havaittavissa, että talvella seisokin vaikutus lämpötilaan on vähäisempi kuin kesällä.



Kuvio 2. Lämpötilanvaihtelu jouluseisokissa 2018 ja sitä seuranneella viikolla.

## 5.2 Jätevesiaseman sisäinen lämpökuormitus

Keskimääräinen virtaus Ilmastusallas 2:een on noin 93 l/s välillä 1.1.2015-8.10.2019. Ilmastusaltaassa on ajoittain huomattavat määrät ylimääräistä lämpöä.

Seuraavissa laskelmissa tarvittavat tiedot perustuvat mittaushistoriaan väliltä 1.1.2015-8.10.2019. Tiedot on tallennettu joka päivä kello kuusi aamulla. Tämä oletettavasti vaikuttaa jonkinverran vesien lämpötilaan, johtuen päivälämpötiloja matalammista yölämpötiloista. Tämän vuoksi historiallinen korkein lämpötila ei välttämättä vastaa todellista korkeinta lämpötilaa. Mittausvälillä ilmastusaltaan lämpötila on ollut enimmillään noin 40,7 °C 9.8.2015. Ilmastusaltaassa lämpötila saisi olla enintään 37 °C (Kähkönen 2000, 16-17). Esiselkeytetyn veden lämpötila on ollut enintään 42,1 °C 20.7.2018. 9.8.2015 esiselkeytetyn veden lämpötila oli 40 °C. 20.7.2018 ilmastusaltaan lämpötila oli 41,9 °C. Suurin lämpötilaero esiselkeytetyn veden ja ilmastusaltaan välillä oli 8,3 °C 29.12.2017. Tuolloin lämpötilat olivat esiselkeytyksen jälkeen 29,3 °C ja ilmastusaltaassa 21 °C.

Arvio suoritetaan suurimmalla esiselkeytetyn veden lämpötilalla. Ensiksi arvioidaan jäteveden vaatimaa jäähdystystehoa. Tässä laskelmassa käytetään taulukosta satavaa veden tiheyttä (Valtanen 2016, 396). Laskelmassa käytetty ilmastusaltaaseen tuleva tilavuusvirta on valittu historiallisen maksimin perusteella, ja vesi pyritään jäähdyttämään 35 °C:een. Lämpökuormat on laskettu siten, että kaikki yli 35 °C on ylimääräistä lämpökuormaa. Näihin on päädytty, jotta altaasta poistettava lämpöteho olisi mahdollisimman suuri arvioinnissa. Ilmastusaltaaseen tulevaa lämpökuormaa voidaan arvioida seuraavalla kaavalla:

$$\dot{Q} = \dot{m} * C_p * \Delta T$$

Kaava 1. Lämmön siirtyminen kuljetuksessa (Mäkelä ym. 2016, 111).

Ylläolevaan kaavaan sijoitetaan seuraavat arvot

- $\dot{m} = 198,4 \text{ kg/s}$
- $C_p = 4,2 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$
- $\Delta T = 7,1 \text{ K}$

Ilmastusaltaan vähennettäväksi lämpökuormaksi saadaan 5915 kW

Jätevedenkäsittely jo itsessään aiheuttaa lämpökuormaa vesiin. Esimerkiksi ilmastuksen aiheuttama lämpökuorma ilmastusallas 2:een (Valtanen 2016, 410). Sarlin oy:n Kirkniemeen toimittaman paineilmaraportin mukaan ilmastuksen ilmanlämpötila on noin 40 °C ja ilmanpaine noin 185 kPa kompressorin jälkeen (Sarlin 2019). Arvioidaan ilman tiheyttä seuraavalla kaavalla:

$$\rho = \rho_0 * \frac{p * T_0}{p_0 * T}$$

Kaava 2. Ilman tiheys annetussa paineessa ja lämpötilassa (Valtanen 2016, 394).

Sijoitetaan kaavaan seuraavat arvot:

- $\rho_0 = 1,293 \text{ kg/m}^3$
- $p = 185000 \text{ Pa}$
- $T_0 = 273,15 \text{ K}$
- $p_0 = 101325 \text{ Pa}$
- $T = 313,15 \text{ K}$



Ilmastusilman tiheydeksi saadaan 1,593 kg/m<sup>3</sup>.

Kun tilavuusvirta on tiedossa, ilmastuksen massavirta lasketaan seuraavasti: tilavuusvirran ollessa 5,125 m<sup>3</sup>/s:

$$\dot{m} = \rho * \dot{V}$$

Kaava 3. Massavirta (Mäkelä ym. 2016, 99).

Sijoitetaan kaavaan seuraavat tiedot:

- $\rho = 1,593 \text{ kg/m}^3$
- $\dot{V} = 5,125 \text{ m}^3/\text{s}$

Ilmastuksen massavirraksi saadaan noin 7,887 kg/s.

Lopuksi lasketaan ilmastuksen lämpökuorma. Sijoitetaan kaavaan 1. seuraavat arvot:

- $\dot{m} = 7,887 \text{ kg/s}$
- $C_p = 1,005 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$
- $\Delta T = 5 \text{ K}$

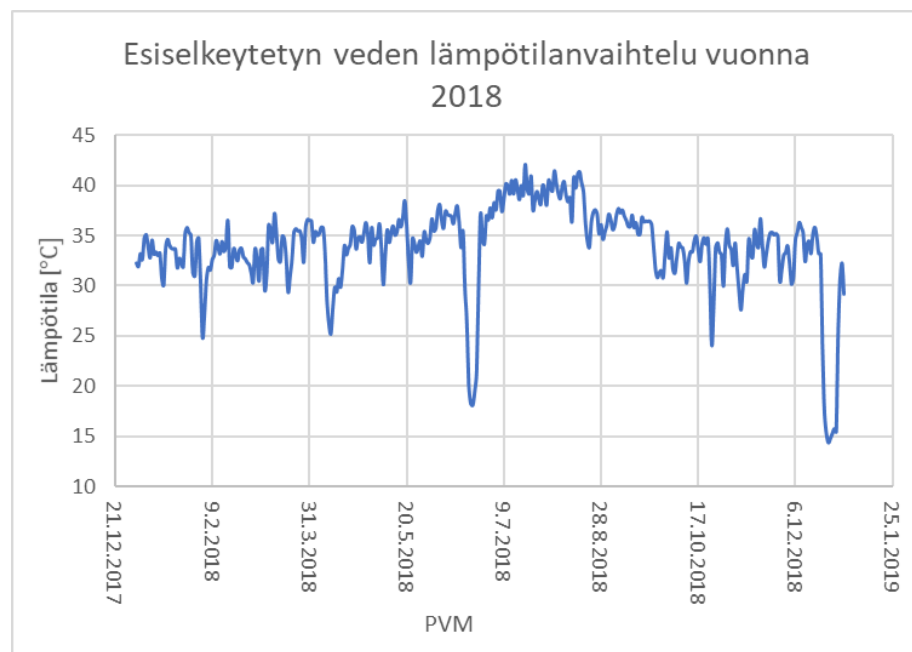
Ilmastuksen aiheuttamaksi lämpökuormaksi tulee noin 39,6 kW.

Ilmastuksen osuus poistettavasta lämmöstä on noin 0,7%. Muita jätevesiaseman sisäisiä kuormituksia ovat esimerkiksi pumppauksesta ja aktiivilietteen mikrobitoiminnasta aiheutuvat lämpökuormat.

## 6 VUODENAIKOJEN VAIKUTUS LÄMPÖTILAAN

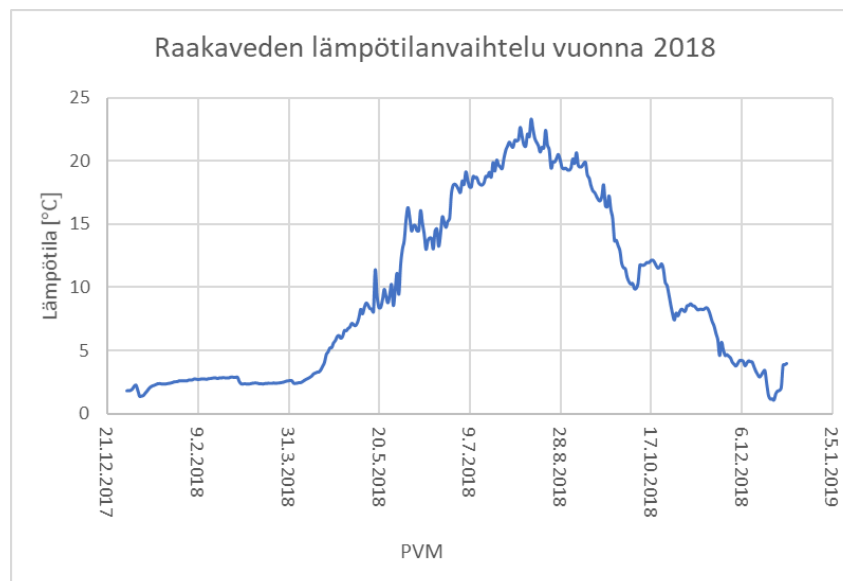
Prosessivesien lämpötilaan vaikuttaa myös Lohjanjärvestä nostetun raakaveden lämpötila. Ilmanlämpötila vaikuttaa raakaveden lämpötilaan ja välillisesti puhdistamolle tulevan prosessiveden lämpötilaan. Kuvaajassa 3 on esitetty vuoden 2018 aikainen esiselkeytetyn veden lämpötilanvaihtelu perustuen mittaushistoriaan.

Tässä kappaleessa käytetyt tiedot raaka- ja jäteveden lämpötiloista ovat peräisin tehtaan tietojärjestelmästä, josta ne on otettu 8.10.2019.



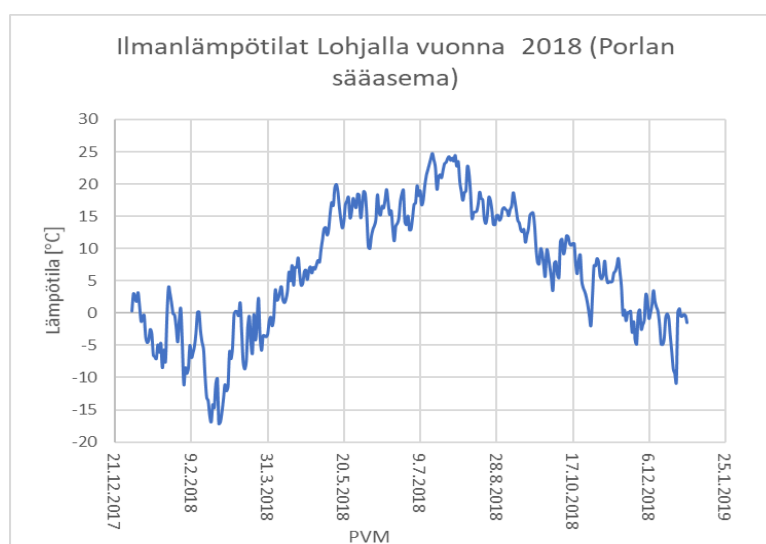
Kuvio 3. Esiselkeytetyn veden lämpötilanvaihtelu vuonna 2018.

Kuvaajassa 4 esitetään mittaushistorian mukainen raakaveden lämpötilan vaihtelu vuonna 2018. Kuvaajia 2 ja 3 vertaamalla havaitaan, että jätevesien lämmön nousu mukaillee raakaveden lämmön nousua, mutta ei seuraa suoraan tätä. Esiselkeytetyn jäteveden ja raakaveden välinen korrelaatiokerroin on noin 0,48 vuoden 2018 tiedoista laskien. Ero lämpötilanvaihteluissa raakaveden ja esiselkeytetyn jäteveden välillä selittyy prosessin tuoman lämmön vaihtelulla ja tuotantoseisakeilla.



Kuvio 4. Raakaveden lämpötilan vaihtelu vuonna 2018.

Raakaveden lisäksi vuodenajat ovat vaikuttaneet jätevesien jäähtymiseen puhdistamolla. Lämmin ilma heikentää lämmön haihtumista altaista sekä jäähdytystornien lämmönsiirtotehoa. Seuraavien vuosikymmenten aikana on odotettavissa vuotuisen keskilämpötilan nousua, hellejaksojen pitkittymistä ja huippulämpötilojen nousua (Ruosteenoja ym. 2016, 24-25; Ilmasto-opas 2019). Tämä heikentää entisestään altaista tapahtuvaa lämmönhaihtumista ja vesi-ilma tyypisten jäähdytysratkaisujen tehoa sekä välillisesti raakaveden jäähdytyskykyä.



Kuvio 5. Ilmanlämpötilanvaihtelu Lohjan Porlassa vuonna 2018 (Ilmatieteenlaitos 2019).

Ilmanlämpötila vaikuttaa vahvasti raakaveden lämpötilaan (korrelaatiokerroin noin 0,85). Ilmanlämpötilan vaikutus esiselkeytetyn veden lämpötilaan ei ole yhtä vahva (0,47), mutta merkittävä. Tämä johtuu todennäköisesti prosessin kuormituksen vaihtelun vaikutuksesta lämpötilaan. Ilmanlämpötilan vaikutus ilmastusallas 2:n lämpötilaan on hieman suurempi, mutta samaa suuruusluokkaa (0,49). Vähäinen ero on todennäköisesti seuraamusta puhdistamon kattamattomista altaista, joissa ilmanlämpötila pääsee vaikuttamaan veden lämpötilaan. Korrelaatiokertoimet on laskettu tehtaan mittaushistoriasta ja ilmatieteenlaitoksen avoimesta datasta. Vertailua vääristää hieman ilmanlämpötilojen tallennusajankohta, kello 0.00, verrattuna tehtaan omaan mittaushistoriaan. Lisäksi ilmanlämpötilahavainnot on mitattu Lohjan Porlassa, joka sijaitsee 8 km päässä Kirkniemestä. Ilmatieteenlaitoksen mittaushistorian voidaan kuitenkin olettaa antavan riittävän tarkan vertailukohteen, koska vesistön lämpötilat eivät ole kovin herkkiä pienille ilmanlämpötilan heilahteluille. Yllä olevassa kuvaajassa on esitetty ilmanlämpötilojen vaihtelu vuoden 2018 aikana. (Ilmatieteenlaitos 2019.)

## 7 VAIHTOEHDOT JÄÄHDYTYKSEN TOTEUTTAMISEKSI

Tässä kappaleessa esitellään tässä työssä esiintyvät vaihtoehdot ilmastuksen jäähdytykseen sekä perehdytään ratkaisuihin. Jäähdytysratkaisut käsitellään teoriatasolla. Tavoitteena on saada karkea käsitys toimivista ratkaisuista, jotta lupaavalta vaikuttavista ratkaisuista voidaan jatkokehittää ja lopuksi valita niistä parhaiten soveltuva.

Vaihtoehtoisia menetelmiä jäähdytyksen toteuttamiseksi ovat:

- Ilmastusilman jäähdytys kompressorin jälkeen asennettavalla lämmönvaihtimella.
- Ilmastettavan jäteveden jäähdytys lämmönvaihtimella
- Jäähdytyskanavat ilmastusaltaassa
- Kaupalliset ratkaisut
  - o COOLIT jäähdytin, W-Rix Oy.
  - o Jäähdytystornit.

Näiden lisäksi esitellään jäähdytysnesteen faasimuutoksen vaatimaan energiaan perustuva höyrystävä jäähdytysmenetelmä, joka on ainakin teoriassa sovitettavissa kaikkiin lämmönvaihdintyyppiin ratkaisuihin.

### 7.1 Ilmastusilman jäähdyttäminen lämmönvaihtimella

Ilmastusaltaan jäähdytys voitaisiin toteuttaa ilmastuskompressorin jälkeen asennettavalla lämmönvaihtimella. Tällöin ei olisi tarvetta jäähdytystorneille ja altaasta haihtuvan veden määrä vähenee huomattavasti pienentäen legionellabakteerin tartuntariskiä asemalla.

Lämmönvaihtimen tehoa on myös helppo säätää tilanteen mukaan. Altaan lämpötilan mukaan voidaan säätää esimerkiksi fluidin virtausta lämmönvaihtimessa, jolloin sen jäähdytysteho muuttuu.

Kappaleessa 5 (Prosessin vaikutus lämpötilaan) on laskettu teoreettinen vedestä poistettava lämpöteho. Arvioidaan veden ja ilman välistä lämpötilaeroa, jolla saadaan poistettua riittävästi lämpöä altaasta, ratkaisemalla kaavasta 1. lämpötilaero. Jos ilmalla haluttaisiin poistaa vedestä lämpötehoa 5915 kW täytyy veden ja ilman lämpötilaeron olla seuraava:

$$\Delta T_{\text{vesi-ilma}} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} * C_p}$$

Kaava 4. Lämmön siirtyminen kuljetuksessa, josta on ratkaistu lämpötilaero (Mäkelä ym. 2016, 111).

Kaavaan sijoitetaan seuraavat arvot:

- $\dot{Q} = 5915 \text{ kW}$
- $\dot{m} = 7,887 \text{ kg/s}$
- $C_p = 1,005 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

Lämpötilaeroksi saadaan noin 749 K

Tämä tarkoittaa, että ilman olisi oltava 749 astetta kylmempää kun veden, mikä ei ole mahdollista, koska se alittaisi absoluuttisen nolapisteen. Tämän arvion perusteella ilmastusilman jäähdyttäminen ei yksin riitä altaan lämpötilan laskemiseen halutulle tasolle, mutta sitä voidaan käyttää laskemaan altaaseen kohdistuvaa lämpökuormaa ohessa muiden jäähdytysratkaisujen kanssa.

## 7.2 Altaaseen tulevan veden jäähdyttäminen

Ilmastusaltaan vettä voidaan jäähdyttää asentamalla tornien paikalle lämmönvaihtimet, joiden läpi vettä voidaan johtaa. Tällainen ratkaisu on suhteellisen helposti toteutettavissa, sillä se voidaan sijoittaa suoraan jäähdytystornien paikalle. Haittana on lämmönsiirtopintojen likaantuminen. Jätevesi on lämmönvaihtimen kannalta ongelmallinen lämpövirta sen sisältämien lika-aineiden takia (Motiva 2016, 5).

Kappaleessa 5 laskettiin poistettavan lämpötehon määrän olevan 5915 kW käyttäen maksimiarvoja mittaushistorian ajalta.

Tarkastellaan ideaalilämmönvaihdinta, jossa lämpökapasiteettivirtojen lämpötilaero toisiopuolella on nolla. Materiaalin oletetaan olevan teräs (Lämmönjohtavuus 45 W/m<sup>2</sup>·K) (Valtanen 2016, 438). Lämmönsiirtopinnan paksuudeksi oletetaan 1 mm. Jäähdytettävä jätevesi on 42,1 °C lämpöistä ja jäähdyttävänä aineena 23 °C lämpöinen raakavesi. Käytetään lämmön ainekerroksen läpi johtumisen kaavaa, josta ratkaistaan lämmönsiirtopinta-ala. Tällöin lämmönsiirtopinta-ala ideaalitapauksessa on:

$$\dot{Q} = \lambda * A * \frac{\theta}{d}$$

Kaava 5. Lämmön siirtyminen ainekerroksen läpi (Mäkelä ym. 2016, 111).

$$A = \frac{\dot{Q} * d}{\lambda * \theta}$$

Kaava 6. Pinta-ala ratkaistu kaavasta 5.

Tehdään kaavaan seuraavat sijoitukset:

- $\dot{Q} = 5915 \text{ kW}$
- $d = 1 \text{ mm}$
- $\lambda = 45 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $\theta = 19,1 \text{ K}$

Lämmönsiirtopinta-alaksi saadaan noin  $5,84 \text{ m}^2$ .

Lukema on pieni, mutta laskutapa olettaa täydellisen lämmönsiirtymisen pinnan läpi eivätkä huomioi massavirtoja lämmönvaihtimen läpi. Samassa ideaalisessa lämmönvaihtimessa logaritmisiksi lämpötilaeroksi saadaan ratkaisemalla se lämmönvaihtimen tehon yhtälöstä (Motiva 2016, 4). Kaavaan tarvittava lämmönsiirtokerroin saadaan yksikötarkastelulla ainekerroksen lämmönvastuksen käänteislukuna.

$$R = \left[ \frac{\text{m}^2 * \text{K}}{\text{W}} \right]$$

Kaava 7. Ainekerroksen lämmönvastuksen yksikkö (Mäkelä ym. 2016, 111).

Kun kaavasta 7. tehdään käänteisluku, muuttuu se seuraavaan muotoon:

$$\frac{1}{R} = \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{K}} \right] = h$$

Kaava 8. Lämmönsiirtymiskerroin.

Tällöin lämmönsiirtymiskertoimeksi saadaan  $4500 \text{ W/m}^2\text{K}$

Lämmönvaihtimen mitoitussyhtälö on seuraava:

$$\phi = U * \Delta T_{ln}$$

Kaava 9. Lämmönvaihtimen mitoitussyhtälö (Springerin (1998) mukaan (ks. Motiva 2016, 4)).

Kun kokonaislämmönsiirtokerroin  $U$  puretaan ja ratkaistaan yhtälöstä logaritminen lämpötilaero, yhtälö saa seuraavan muodon:

$$\Delta_{ln} = \frac{\phi}{h * A}$$

Kaava 10. Logaritminen lämpötilaero ratkaistuna lämmönvaihtimen mitoitussyhtälöstä.

Sijoitetaan kaavaan seuraavat arvot:

- $\phi = 5915 \text{ kW}$
- $h = 4,5 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$
- $A = 5,84 \text{ m}^2$

Logaritmiseksi lämpötilaeroksi saadaan noin 225 K

Logaritminen lämpötilaero kuvaa keskimääräistä lämpökapasiteettivirtojen lämpötilaeroa. Tämä tulkitaan siten, että esimerkin ideaalilämmönvaihtimessa keskimääräinen lämpötilaero ainevirtojen välillä on 225 K. Tässä tapauksessa logaritminen lämpötilaero on hyvin suuri, huomioiden järjestelmän suhteellisen matalat lämpötilat.

Arvioitu ideaalilämmönvaihtimen teho vaikuttaa lupaavalta. Koska lämmönsiirtopinta-ala ja laskennassa käytetty massavirtojen lämpötilaero ovat suhteellisen pieniä, on tällaista lämmönvaihdinta mahdollisuus kasvattaa ja korvata raakavesi esimerkiksi nestemäisellä työllä. Lämmönsiirtopinta-alan kaksinkertaistaminen puolittaa vaaditun logaritmissen lämpötilaeron.

$\epsilon$ -NTU-menetelmällä voidaan määrittää lämmönsiirtopinta-alan kokoa silloin, kun tiedossa on ainoastaan sisääntulolämpötilat ja jäädytettävän virtauksen ulostulolämpötila. Arviointi perustuu lämmönvaihtimen tehokkuuden ja NTU-luvun väliseen relaatioon. (Bergman ym. 2011, 722)

Mallinnetaan tähän tapaukseen vastavirtalämmönvaihdinta. Vastavirtalämmönvaihdinta alettiin arvioida omalla excel-laskurilla. Koska tässä tapauksessa ei ollut tiedossa



jäähdyttävän ainevirran massavirtaa, valittiin se muuttujaksi. Laskennan iterointi aloitettiin massavirralla 1 kg/s kasvattaen sitä aina 1 kg/s/iteraatio. Lämpimän veden massavirta oli 200 kg/s. Lämmönsiirtokerroin  $U = 4,5 \text{ kW/m}^2\text{K}$ . Molemmilla puolilla lämmönvaihdinta lämpökapasiteetit olivat  $4,2 \text{ kJ/kg}^*\text{K}$ . laskenta iteroitiin 200 kertaa. Laskenta eteni seuraavasti:

Laskettiin lämpökapasiteettivirrat  $C_h$  ja  $C_c$  sekä luotiin määrittely lämpökapasiteettivirroille  $C_{min}$ ,  $C_{max}$ .  $C_r$ . (Bergman ym. 2011, 722-732)

Seuraavaksi määritettiin kylmän ainevirran ulostulolämpötila:

$$T_{c,o} = T_{c,i} + \frac{q}{\dot{m}_c C_{p,c}}$$

Kaava 11. Kylmän ainevirran ulostulolämpötila (Bergman ym. 2011, 732).

Seuraavaksi määritettiin suurin mahdollinen lämmönsiirtoteho:

$$q_{max} = C_{min} * (T_{h,i} - T_{c,i})$$

Kaava 12. Teoreettinen maksimi lämmönsiirtoteho (Bergman ym. 2011, 731).

Teoreettisesta lämmönsiirtotehosta laskettiin  $\varepsilon$ -luvun mukaan todellinen lämmönsiirtoteho.  $\varepsilon$ -luvulle asetettiin oletukseksi arvo 0,9. Laskurilla pyrittiin etsimää lämmönvaihdinta, joka toimii tällä tehokkuudella.

$$q = \varepsilon * q_{max}$$

Kaava 13. Todellinen lämmönsiirtoteho (Bergman ym. 2011, 732).

Seuraava vaihe oli laskea NTU-luku vastavirtalämmönvaihtimen  $\varepsilon$ -NTU relaation avulla.

$$NTU = \frac{1}{C_r - 1} * \ln\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon * C_r - 1}\right)$$

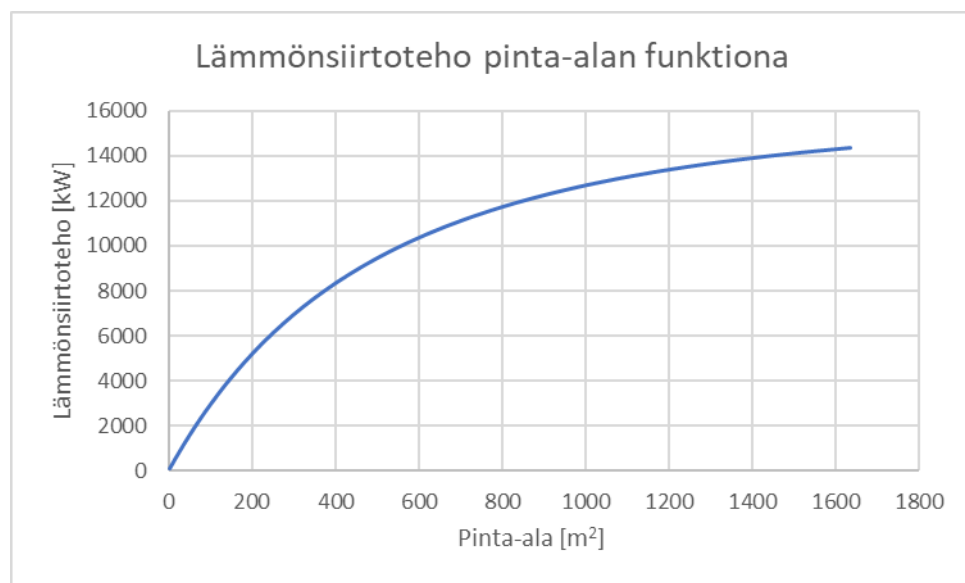
Kaava 14. Vastavirtalämmönvaihtimen  $\varepsilon$ -NTU relaatio (Bergman ym. 2011, 725).

Lopuksi laskettiin vaadittu lämmönsiirtopinta-ala NTU-luvusta:

$$A = \frac{NTU * C_{min}}{U}$$

Kaava 15. Pinta-ala NTU-luvusta (Bergman ym. 2011, 723).

Laskennan iteroitien tuloksena saadut lämmönsiirtotehot koottiin seuraavaan kuvioon pinta-alan funktiona.



Kuvio 6. Lämmönsiirtoteho pinta-alan funktiona.

Laskennan tulosten tarkastelussa havaittiin, että lämmönsiirtopinta-alalla 247 m<sup>2</sup> saavutettiin noin 6000 kW lämmönsiirtoteho. Tämänkokoinen lämmönvaihdin olisi riittävä korvaamaan yhden jäädytystornin. 247 m<sup>2</sup> on suhteellisen suuri, mutta ei mahdoton pinta-ala lämmönsiirtimelle. Esimerkiksi 30 mm teräsputkesta rakennettuna putken pituus olisi 2620 m. Muuntotyypisillä lämmönvaihtimilla, materiaaleilla ja jäädytysaineilla voidaan päästä toisenlaisiin tuloksiin ja jatkokehittäessä tulisi tarkastella tähän tapaukseen optimaalisinta mallia. Esimerkiksi nestemäisellä tyypellä jäädytettäessä voidaan oletettavasti käyttää pienempää lämmönsiirtopinta-alaa suuremman lämpötilaeron vuoksi.  $\epsilon$ -NTU menetelmän ja ideaalilämmönvaihtimen tulosten vertailussa havaitaan, että ideaalitapaus antaa hyvin erilaisen tuloksen verrattuna  $\epsilon$ -NTU menetelmään.

Tämän ratkaisun heikkoutena on lämmönvaihtimen alttius likaantumiselle ja tukkeutumiselle. Tukkeutumisalttiutta voidaan kompensoida lämmönvaihtimen kanavia suurentamalla, mutta se myös heikentää lämmönsiirtotehoa. Alttius likaantumiselle ei muutu tai se mahdollisesti nopeutuu alenevan virtausnopeuden seurauksena. Likaantuminen aiheuttaa lämmönsiirtotehon heikkenemistä ja virtauspoikkipinta-alan pienenemistä, josta seuraa suurempi virtausvastus ja painehäviö. Tämä puolestaan vaikuttaa käyttökustannuksiin. (Motiva 2016, 3)

Jos kukin torni korvataan sitä vastaavalla lämmönvaihtimella, on mahdollista kytkeä yksi lämmönvaihdin irti piiristä puhdistuksen ajaksi samalla kuin muut ovat toiminnassa. Kun lämmönvaihtimia on useampia, mahdollistuu yksittäisen lämmönvaihtimen huolto muiden ollessa käytössä. Jäähdytystornit on sijoitettu prosessissa neutralointi- ja ilmastusaltaan väliin. Tornien ollessa käytössä vesi otetaan neutralointialtaasta, kierrätetään tornien läpi ja palautetaan ilmastusaltaaseen. Kukin torneista on PI-kaavion mukaan yksittäin erotettavissa, jolloin lämmönvaihtimetkin olisivat vastaavasti erotettavissa huoltoa varten. Jäteveden sisältämät lika-aineet ovat pääosin orgaanista ainesta, joten ne voidaan poistaa kemiallisesti liuottamalla. Liuotus voidaan toteuttaa esimerkiksi määräajoin siten, että yksi lämmönvaihdin kytkeytyy irti piiristä ja liuotin alkaa kiertämään lämmönvaihtimen läpi. Liuotimesta riippuen saattaa olla tarpeen vielä huuhdella lämmönvaihdin puhtaalla vedellä, jotta liuotinjäämät eivät kulkeudu ilmastusaltaaseen ja vahingoita sen bakteerikantaa. Liuotinkemikaalin valinnassa tulee huomioida sen yhteensopivuus lämmönvaihtimen materiaalien kanssa. (Motiva 2016, 19)

### 7.3 Altaassa olevan veden jäähdyttäminen

Jäähdytys toteutetaan laskemalla altaaseen putket, joissa virtaa esimerkiksi järvestä otettua raakavettä. Tällaisen ratkaisun heikkoutena on lämmönsiirtopinojen likaantuminen. Altaaseen laskettuna järjestelmän puhdistaminen on vaikeaa, joten likaantumisen tulee tapahtua hyvin hitaasti ja lämmönsiirtopinnoilta vaaditaan todennäköisesti jotakin erikoiskäsittelyä, jolla likaantuminen saadaan estettyä, mutta se ei saisi heikentää lämmönsiirtokykyä merkittävästi. (Tiinanen 2017, 28)

Koska ilmastusaltaassa on jatkuva sekoitus ilmastimien toimesta, tällainen ratkaisu voi toimia suhteellisen tehokkaasti. Ilman sekoitusta vaarana on, että vesi jäähtyy liiaksi putken läheisyydestä. Sekoitus auttaa myös lämmönsiirripintoja pysymään puhtaina. Tämä perustuu korkeisiin virtausnopeuksiin pinnan läheisyydessä. (Motiva 2016, 3)

Tarkastellaan altaaseen upotetun jäähdytyksen toimivuutta teoriassa. Altaasta pyritään poistamaan lämpötehoa 5 915 kW (ks. kappale 5). Oletetaan altaassa kiertävän putken ainevahvuudeksi 4 mm ja putkien oletetaan olevan terästä ja putken sisällä virtaa 23°C lämpöinen raakavesi. Tällöin lämmönsiirtokertoimeksi saadaan edellisen mallin tapaan 45 W/mK. Oletetaan veden lämpötilaksi 42,1 astetta. Altaassa ei saisi olla näin lämmin, mutta lukema kuvastaa, mikä olisi altaan lämpötila ilman mitään jäähdytystä. Ideaalitapaksessa riittäväksi lämmönsiirtopinta-ala saadaan sijoittamalla edellisessä kappaleessa esitettyyn kaavaan 6. seuraavat arvot:

- $\dot{Q} = 5915 \text{ kW}$
- $d = 4 \text{ mm}$
- $\lambda = 45 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- $\Delta T = 19,1 \text{ K}$

Pinta-alaksi saadaan ideaalitapauksessa 27m<sup>2</sup>.

Teoriassa halkaisijamitaltaan 10 mm teräsputkea kiertäisi altaassa 859 metriä. Putken halkaisijan kaksinkertaistaminen puolittaa vaaditun pituuden. Käytännössä tämä ratkaisu vaatii lisää arviointia mm. altaan sekoittumisen osalta, jotta voidaan välttyä lämmön epätasaiselta jakautumiselta altaassa.

#### 7.4 Höyrystävä jäähdytys

Kahdessa edellisessä tapauksessa päästään kompaktilla lämmönvaihtimella suuriin jäähdytystehoihin, jos jäähdyttävä aine höyrystyy lämmönvaihtimessa. Höyrystävä jäähdytin voi toimia suljetulla tai avoimella kierrolla. Avoimessa kierrossa jäähdytysnestettä kiehuu jatkuvasti pois, joten sitä tulee lisätä jatkuvasti. Useimmat höyrystävät jäähdytinsysteemit ovat suljettuja ja höyry lauhtuu nesteeksi lauhttimessa. Jäähdytyskierto voi olla painovoimainen tai pumppuavusteinen. Painovoimaisessa kierrossa lauhtuminen tapahtuu höyrystimen yläpuolella, jolloin lauhtunut jäähdytysneste tippuu takaisin höyrystimeen. Pumppuavusteinen kierto on samankaltainen, kuin normaalissa neste-neste lämmönvaihtimessa. Poikkeuksena on nesteen höyrystyminen lämmönvaihtimessa. Höyrystyminen vaatii paljon energiaa, joten suuria lämpötilaeroja ei tarvita. (Stone 1999, 497-499).

Avoin kierto asettaa rajoituksia jäähdytysnesteelle, koska höyryt leviävät ympäristöön. Käytännössä tämä tarkoittaa, että jäähdytys tapahtuisi raakavedellä. Avoimessa kierrossa ei tarvita lauhdutinta, sillä höyry johdetaan järjestelmästä ympäröivään ilmaan.

Suljetun kierron käyttö sallii muitakin nesteitä, mutta se vaatii lauhduttimen. Suljetun kierron höyrystävä jäähdytin toimii käytännössä lämpöpumpuna. Lämpöpumppuja voidaan kytkeä kaskadiin. Kaskadikytkennän etuna on kohtuullisempi höyrystimen alipaine samalla kuin kytkennän kylmän ja kuumen päädyn lämpötilaero saadaan korkeaksi. Tämä parantaa lämpöpumpun hyötysuhdetta. (Moran & Shapiro 1993, 421-422)

Tässä sovelluksessa veden kiehumispistettä tulee laskea, jotta höyrystyminen tapahtuu prosessijätevesille ominaisissa lämpötiloissa. Tämä tapahtuu alipaineistamalla höyrystimen toisiopuoli. Jotta veden kiehumispiste olisi 35 °C:ssä on absoluuttisen paineen oltava 5,269 kPa (Valtanen 2016, 397). Helpommin kiehuvia nesteitä voidaan höyrystää korkeammilla paineilla.

Jos jätevettä halutaan jäähdyttää esimerkiksi 6 000 kW teholla saadaan vaadituksi veden massavirraksi noin 2,66 kg/s. Veden höyrystymislämpönä on käytetty 2260 kJ/kg (Mäkelä ym. 2016, 178). Tähän tulokseen on päästy ratkaisemalla höyrystymiseen tarvittavan energian kaavasta massa ja muokkaamalla se massavirraksi.

$$Q = m * r$$

Kaava 16. Höyrystymiseen tarvittava lämpöenergia (Valtanen 2016, 194).

Kun massa muutetaan massavirraksi, muuttuu energia tehoksi.

$$\dot{Q} = \dot{m} * r$$

Kaava 17. Höyrystymiseen tarvittava teho.

Ratkaisemalla tästä massavirta saa kaava seuraavan muodon:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{r}$$

Kaava 18. massavirta ratkaistuna höyrystymiseen tarvittavasta tehosta.

Sijoitetaan kaavaan seuraavat arvot:

- $\dot{Q} = 6\,000 \text{ kW}$
- $r = 2260 \text{ kJ/kg}$

jäähdytysnestemassavirraksi saadaan 2,66 kg/s

Ainakin teoriassa höyrystävällä jäähdytyksellä aikaansaadaan suuret jäähdytystehot suhteellisen pienellä jäähdytysnesteen massavirralla. Veden käytön etuna on sen vaarattomuus, soveltuvuus avoimeen kiertoon ja saatavuus. Haittana on suuri alipaineen tarve, joka lisää investointikustannuksia. Höyrystävän jäähdyttimen tehoa voidaan muuttaa alipainetta säätämällä.

## 7.5 Kaupalliset ratkaisut

Tähän kappaleeseen on kerätty erilaisia olemassa olevia kaupallisia ratkaisuita, jotka voivat sopia Kirkniemen tapaukseen.

### 7.5.1 COOLIT jäähdytin

W-rix oy tarjoaa kaupallista yhdistettyä ilmastus- ja jäähdytysratkaisua nimeltään COOLIT jäähdytin. Tätä suihkujäähdytintyyppistä ratkaisua markkinoidaan mm. metsäteollisuuden jätevesien jäähdytykseen. (waterix 2019.)

COOLIT jäähdyttimillä on mahdollista toteuttaa samanaikaisesti sekä jäähdytys, että ilmastus, siten, että erillisiä ilmastusta ennen asennettavia jäähdytystorneja ei tarvitse. Jäähdytin on sijoitettava ulkoilmaan ja altaan halkaisijan on oltava vähintään neljä metriä. (waterix 2019.)

COOLIT jäähdytin on toimintaperiaatteeltaan suihkujäähdytin ja sen toiminta perustuu lämmön haihtumiseen ilmastimen suihkusta. Ilmastin pumppaa vettä altaan pohjalta.

Pinnalla vesi suihkutetaan ilmaan, jolloin vesipisaroista haihtuu lämpöä ja vesi ilmastuu samalla. Lopulta jäähdytetty vesi päätyy takaisin altaaseen ilmastettuna. (Waterix 2019.)

COOLIT jäähdyttimien jäähdysteho on enimmillään 8 700 kW ja suihkun halkaisija 14 m. Teho on ilmoitettu 60 °C vedessä (Waterix 2019). Kirkniemen jätevesiaseman esiselkeytetty jätevesi on ollut tässä työssä käytetyn mittaushistorian aikana enintään 42,1 °C. Tämä tarkoittaa, että 8 700 kW lämmönsiirtotehoa ei todennäköisesti saavutettaisi kyseisellä laitteella.

### 7.5.2 Uudet jäähdystornit

Uusia jäähdutustorneja on tarjoavat ainakin Sondex-Tapiro Oy ja vanhat tornit toimittanut Jacir air treatment. Jäähdystorneja on tarjolla sekä avoimella- että suljetulla kierrolla. Vanhoissa jäähdystorneissa on havaittu legionellabakteeria, jota ei ole voitu myrkyttää tornin avoimen kierron vuoksi. Ainakin Jacir kertoo myös avoimen kierron jäähdystorniensa olevan legionellavapaita (Jacir 2019). Avoimen kierron jäähdystorneissa suuttimien tukkeutuminen on ongelma, koska jäähdystettävä jätevesi sisältää kiintoaineita jotka kerääntyvät suuttimiin ja tukkivat ne. Avoimen kierron jäähdystorneissa lämmönsiirtotehoa voi olla jopa 11 000 kW (sondextapiro 2019; Jacir 2019).

Suljetun kierron jäähdystornit on varustettu lämmönvaihtimella, joka erottaa jäähdystornikierron jätevesikierrosta. Tällainen ratkaisu ei ole altis tukkeutumaan tornin osalta, mutta lämmönvaihdin on silti altis likaantumiselle. Suljetun kierron jäähdystorneilla ei päästä yhtä korkeisiin lämmönsiirtotehoihin kuin avoimilla, mutta niissäkin enimmillään 4 000 kW asti. (Jacir 2019.)

## 8 LOPPUPÄÄTELMÄ

Tässä työssä tarkastelluista ratkaisuista koostettiin vertailutaulukko, jossa on rasti ruutuun periaatteella vertailtu eri vaihtoehtoja. Taulukkoa voi tarkastella siten, että laskeaan jokaisen ratkaisun saamat pisteet yhteen ilman painotusta tiettyihin ominaisuuksiin. Tällöin Lupaavimmalta vaikuttaa altaaseen virtaavan veden jäähdytys lämmönvaihtimella. Kaupallisista ratkaisuista eniten pisteitä sai suljetun kierron jäähdytystorni. Tässä vertailussa ei ole huomioitu ratkaisujen kustannuksia, sillä kaikki ratkaisut ovat ainakin jossakin määrin sovelluksen mukaan räätälöityjä. Tämän vuoksi ei voida luotettavasti vertailla kustannuksia.

Taulukko 1. Jäähdytysratkaisujen vertailu.

	Riittää yksin	Toimii apujäähdyttimenä	Jäähdytystehon säädettävyys Legionellavapaa	Voidaan liittää höyrystälviään jäähdytykseen	Helppo huollettavuus	Merkittävä likaantumisalttius	Valmiiden ratkaisujen saatavuus
Ilmastusilman jäähdytys		X	X	X	X	X	
Altaaseen tulevan veden jäähdytys	X		X	X	X	X	
Altaassa olevan veden jäähdytys	X		X	X	X		X
Jäähdytystorni (suljettu kierto)	X		X			X	X
Jäähdytystorni (Avoin kierto)	X						X
COOLIT -jäähdytin	X					X	X

Ilmastusilman jäähdyttäminen havaittiin ainoaksi yksinään riittämättömäksi ratkaisuksi. Tämä johtuu ilman ja veden lämpökapasiteettivirtojen suuresta erosta. Ratkaisua voidaan käyttää apujäähdyttimenä, mutta ilmastuksen osuus kokonaislämpökuormasta on hyvin pieni. Tämän vuoksi ilmastuksen jäähdytys ei todennäköisesti olisi kustannustehokasta.

Altaassa olevan veden jäähdytys on verrattavissa altaaseen virtaavan veden jäähdytykseen. Ratkaisevana erona näillä on huollettavuus, joka on haasteellista altaaseen upotetussa lämmönvaihtimessa. Lisäksi upotettavan lämmönvaihtimen suunnittelussa



tulee huomioida veden riittävä sekoittuminen. Tällä varmistetaan lämmön tasainen jakautuminen altaassa ja hidastetaan lämmönsiirtopintojen likaantumista.

Jos vanhat jäähdytystornit päätetään uusiksi, on suljetun kierron jäähdytystorni selkeästi parempi vaihtoehto. Uusien tornien tulee olla suljetulla kierrolla varustettuja. Vaikka uusien avoimen kierron torneissa sanotaan olevan legionellavapaita, tulee tukkeutuminen kuitenkin ongelmaksi (Jacir 2019). Suljetun kierron tornien huipputehot ovat enimmillään 4 000 kW (Jacir 2019). Jos aikaisempien tornien teoreettinen jäädytyskapasiteetti (25 110 kW) halutaan säilyttää, joudutaan suljetun kierron torneja asentamaan yksi enemmän (Jacir Air Treatment 2006, 2). Jäähdytystornien uusiminen ei kuitenkaan poista jäähdytystehon riippuvuutta ilmanlämpötilasta, joka on nykyisissä torneissa merkittävä syy riittämättömään jäähdytystehoon.

Waterix:n suihkujäähdyttimet vaativat paljon tilaa altaasta, enimmillään 14 metriä (waterix 2019). Kyseessä on suihkujäähdytin, joka suihkuttaa altaassa olevaa jätevettä ilmaan, joten voidaan olettaa, että legionellaongelma pysyy samanlaisena, kuin vanhojen tornien kanssa, joista se lähti leviämään jäteveden haihtumisesta syntyvän vesihöyryn mukana.

Nykyiset jäähdytystornit vaikuttavat olleen uutena raskaasti ylimitoitettuja. Jätevesistä poistettava lämpökuorma on mittaushistoriasta saatujen lukujen perusteella enimmillään noin 6 000 kW luokkaa. Jäähdytystornien yhteenlaskettu teho on 12 555 kW (Jacir Air Treatment 2006, 2). Jacirin esitteessä annetut arvot viittasivat, että ensiö ja toisio- puolen lämpötilaero olisi 15 °C ja jäähdytetty vesi olisi 30 °C (Jacir Air Treatment 2006, 2). Mittaushistorian mukaan ainakaan välillä 1.1.2015-8.10.2019 ei näin suuria esiselkeytetyn veden lämpötiloja ole ollut. Tornien mitoitusperusteista ei ole tietoa, joten lämmönsiirtotehon määrittämiseen käytetystä ilmanlämpötilastakaan ei ole tietoa.

Ilmanlämpötilalla on lähes suora vaikutus raakaveden lämpötilaan. Tämä johtuu todennäköisesti järvestä pumpattavan raakaveden otto paikan mataluudesta ja siitä johtuvasta herkkyydestä ilmanlämpötilan vaihtelulle. Tämä heikentää raakaveden jäähdytysominaisuuksia, mutta se on kuitenkin huomattavasti ilmaa viileämpää. Yhtä vahvaa korrelaatiota ei löytynyt ilman ja esiselkeytetyn veden lämpötilan eikä ilman ja ilmasutusallas 2:n lämpötilojen välillä, mutta kuitenkin merkittävän suuri. Tämä tarkoittaa, että jossain määrin ilmanlämpötila vaikuttaa vedestä ilmaan jäähdytyksen lisäksi myös jätevesiasemalle tulevien vesien lämpötilaan.

## LÄHTEET

(Chudoba 1989, Kähkösen 2000, 13 mukaan)

(Gray 1995, Kähkösen 2000, 37 mukaan)

(Gray 2004, Luhtaniemen 2017, 20 mukaan)

(Halttunen 1999, Kähkösen 2000, 13-14 mukaan)

(Laukkanen 1990, Kähkösen 2000, 13-14 mukaan)

(Springer 1998 Motivan 2016, 4 mukaan)

(Vuoriranta 1989, Kähkösen 2000, 20 mukaan)

Bergman, T; Lavine, A; Incropera, F; Dewitt, D. 2011. Fundamentals of heat and mass transfer. 722-732. John Wiley & sons, inc.

Hakala, I; Myllymäki, J; Saarinen R. 2012. Rihmaopas. 5-7. Lounais-Suomen vesiensuojeluyhdistys.

Ilmasto-oppaan WWW-sivut 2019. Viitattu 15.10.2019. <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/suomen-muuttuva-ilmasto/-/artikkeli/74b167fc-384b-44ae-84aa-c585ec218b41/ennustettu-ilmastonmuutos-suomessa.html>.

Ilmatieteenlaitoksen WWW-sivut 2019. Viitattu 13.10.2019. <https://ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus#!/>.

Jacir Air Treatment 2006. M-real Kirkniemi extension cooling tower model vap253 grids. 1-2. Esite. Asiakirja Kirkniemen arkistossa.

Jacir Air Treatmentin WWW-sivut 2019. Viitattu 17.10.2019. [https://www.jacir.fr/en/closed-cooling-tower/index\\_fa3\\_8b47.html](https://www.jacir.fr/en/closed-cooling-tower/index_fa3_8b47.html).

Kemiran WWW-sivut 2019. Viitattu 13.10.2019. <https://www.kemira.com/products/aluminum-sulfate/>.

Kähkönen, J. 2000. Kirkniemen tehtaiden jätevedenpuhdistamon toimivuusselvitys. 9-65. Tampereen teknillinen korkeakoulu.

Moran, M & Shapiro, H. 1993. Fundamentals of engineering thermodynamics. 421-422. John Wiley & sons, inc.

Motiva 2016. Energiatehokas lämmönsiirto- esitys. 4-19.

M-real Kirkniemi extension cooling tower model vap253 grids. 2006. Esite. Asiakirja Kirkniemen arkistossa.

Mäkelä, M; Soininen, L; Tuomola, S; Öistämö, J 2016. Tekniikan kaavasto. 99-178. Tammer-tekniikka.

Mäkipää, J 2007. Kirkniemen paperitehtaan jätevesipäästökartoitus. 7-10. Tampereen ammattikorkeakoulu

- Pietiläinen, O-P & Räike, A. 1999. Typpi ja fosfori Suomen sisävesien minimiravinteina. 7. Suomen ympäristökeskus
- Pöyry 2000. Kirkniemen jätevesiaseman prosessi- ja instrumentointikaavio.
- Ruosteenoja, K; Jylhä, K; Kämäräinen, M. 2016. Climate projections for Finland under the RCP forcing scenarios. 24-25. Finnish meteorological institute.
- Sappi 2003. Yksinkertaistettu prosessikaavio.
- Sappi 2018. EMAS-ympäristöselonteko. 7-10. Sappi.
- Sappi 2018. Jätevedenpuhdistamon mitoitustiedot.
- Sappi 2018. Tehdasvalokuva.
- Sappi 2018. Tehdasvalokuvasta otettu suurennos.
- Sappin WWW-sivut 2019. Viitattu 24.10.2019. <https://www.sappi.com/fi/kirkniemi-mill>
- Sondex-Tapiron WWW-sivut 2019. Viitattu 17.10.2019. <https://www.sondextapiro.fi/fi/tuotteet/jaahdytystornit>.
- Stone, R 1999. Introduction to internal combustion engines. 497-499. Department of engineering science university of oxford.
- Terveyskirjaston WWW-sivut 2019. Viitattu 17.10.2019. [https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p\\_artikkeli=dlk00580#s2](https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=dlk00580#s2).
- Tiinanen, V 2017. Lämmönsiirtimien likaantumisen seuranta. 28. Oulun ammattikorkeakoulu.
- Valtanen, E 2016. Tekniikan taulukkokirja. 194-438. Genesis-kirjat.
- Waterix:n WWW-sivut 2019. Viitattu 17.19.2019. <http://www.waterix.fi/en/products/coolit-jaahdyttimet/>.