



Jäteveden hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämmityksessä

Tähtinen Toni

Opinnäytetyö, AMK

Maaliskuu 2024

Insinööri (AMK), rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma

Tähtinen, Toni

Jäteveden hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämmityksessä

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Toukokuu 2024, 32 sivua.

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Opinnäytetyö tehtiin Mäntän Kaukolämpö ja Vesihuolto Oy:n toimeksiantona, joka toteutettiin tutkimuksellisenä kehittämistyömenetelmänä Mäntän Puhdistamo Oy:n liittyvään hankkeeseen hukkalämmön talteenottojärjestelmän mahdollisuuksista ja järkevyydestä rakentamiskustannuksiin suhteutettuna. Kustannuksissa ei huomioitu järjestelmäpaketille mahdollisesti tarvittavaa suojatilaa, joka Suomen olosuhteissa olisi kuitenkin melko välttämätön.

Mittaustulosten suurien eroavaisuuksien takia työssä jouduttiin melko radikaalistikin vähentämään lämmön talteenotosta saatavaa hyötysuhdetta esittämään sen kannattavuutta. Kustannuksiin liittyvät arvot saatiin toimeksiantajan esittämältä järjestelmän toimittajalta.

Opinnäytetyö on jaoteltu siten, että ensin esitellään hukkalämmön talteenottoprojektiin liittyvät toimijat, mistä siirryttiin tutkimaan järjestelmien soveltuvuutta kerätä hukkalämpö osaksi kaukolämpöä ja siihen liittyviä toteutettuja projekteja ja siitä työ jatkui kartoittamaan annettuihin mittaustuloksiin soveltuvinta lämpöpumppulaitosta. Projektiin soveltuvimman lämpöpumppulaitoksen löytymisen jälkeen alkoi kustannuksien vertailu lämmöntuotosta saatuihin tuloksiin. Koska projekti oli kaikkien osalta uusi ja lämpötila- ja virtaamavaihtelut olivat suuria ja osaltaan vain arvailtavissa, niin opinnäytetyössä pyrittiin myös löytämään lisäselvityksiin liittyviä jatkokysymyksiä tarkentamaan investoinnin järkevyyttä.

Opinnäytetyöhön saadut datat olivat toimeksiantajalta sekä laitevalmistajalta, joten niihin vaikuttamiseen ei tässä työssä pyritty. Kaikki päätelmät tehtiin saatuihin tietoihin nojaten.

Avainsanat (asiasanat)

Lämmön talteenotto, jätevesi, kaukolämpö, hukkalämpö

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Tähtinen, Toni

Utilisation of waste heat from wastewater in district heating

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2024, 32 pages.

Degree Programme in Construction and Civil Engineering Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

The thesis was commissioned by Mäntän Kaukolämpö ja Vesihuolto Oy and it was carried out as a research development method for a project related to Mäntän Puhdistamo Oy on the possibilities and rationality of a waste heat recovery system in relation to construction costs. The costs did not consider the possible space needed to protect the system package, which would, nevertheless, be quite necessary in the Finnish circumstances.

Due to the large differences in the measurement results, the work had to drastically reduce the efficiency obtained from heat recovery to present its profitability. Cost-related values were obtained from the system vendor presented by the sponsor.

The first part of the thesis presents the actors related to the waste heat recovery project. The next part discusses the suitability of the systems for collecting waste heat as part of district heat and the related implemented projects, and the final part maps out the heating and cooling plant most suitable for the given measurement results. After finding the most suitable heating and cooling plant for the project, a comparison of costs with the results obtained from heat production began. Since the project was new for everyone and the temperature and flow variations were large and partly only guessable, the thesis also sought to find follow-up questions related to further studies to clarify the rationality of the investment.

The data received for the thesis was from the client and the equipment manufacturer, so there was no effort to influence them in the thesis. All conclusions were reached based on the information received.

Keywords/tags (subjects)

Heat recovery system, wastewater, district heating, waste heat

Miscellaneous (Confidential information)

Sisältö

1	JOHDANTO	6
2	LÄMPÖPUMPPUJEN SOVELTUVUUS KAUKOLÄMMÖN TUOTANTOON	8
2.1	Lämmöntuotto	8
2.2	Savukaasupesuri ongelmana	10
2.3	Pumppumahdollisuudet ja -tekniikat.....	10
2.3.1	Pumppumahdollisuudet	10
2.3.2	Pumpputekniikat.....	11
2.3.3	Lämmönsiirtimet.....	13
3	PÄÄPERIAATE LÄMMÖN TALTEENOTOSTA JÄTEVEDESTÄ	14
4	MÄNTÄN KAUKOLÄMPÖVERKOSTON JA PUHDISTAMON ESITTELY	17
4.1	Mäntän Kaukolämpö ja Vesihuolto Oy:n kaukolämpöverkosto	17
4.2	Mäntän Puhdistamo Oy	17
4.3	Lämmöntarpeet.....	21
4.4	Pysyvyyssäyrät	22
5	Toteutuneiden kohteiden esittely	24
5.1	Lahti Energian lämpöpumppulaitos	24
5.2	Kymen Vesi Oy:n Mussalon jätevedenpuhdistamo	24
6	Mittaustulokset	25
6.1	2,2 MW- pumppujärjestelmä	25
6.2	4,4 MW- pumppujärjestelmä	26
7	TEKNISTALOUELLINEN TARKASTELU	27
7.1	Budjettihinnat	27
7.2	Investointikustannukset.....	27
8	TULOSTEN ANALYYSI	28
9	LUOTETTAVUUS JA EETTISYYS	29
10	JOHTOPÄÄTÖKSET	29
	Lähteet	32

Kuviot

Kuvio 1.	Kaaviokuva ylijäämälämmön määritelmästä. (Motiva Oy, 2013.)	8
Kuvio 2.	Lämpölaitosyhdistyksen suosituskäyrä. (Laukkanen, 2018, 10.)	9
Kuvio 3.	Hukkalämmön käyttö eri lämpötilatasoilla. (Heikkilä & Kiuru, 2014.)	11
Kuvio 4.	Suomen suurin lämpöpumppu. (Fortum, 2021.)	11

Kuvio 5. Yksinkertaisen absorptiolämpöpumpun periaatekuva. (Koljonen & Sipilä, 1998.)	13
Kuvio 6. Kuvaus Pättiniemen puhdistamon prosessikaaviosta. (Hänninen, 2024.).....	16
Kuvio 7. Prosessikaavio Mäntän Puhdistamolta. (Hänninen, 2023.)	18
Kuvio 8. Karttakuva Mäntän kaukolämpöverkostosta. Verkosto merkitty oranssilla. (MKVOY, n.d.)	21

Taulukot

Taulukko 1. Käyttöenergian mukaiset lämpöpumpputyypit. (Motiva, 2013.)	12
Taulukko 2. Tiedot lähtevän jäteveden määristä 2021-2023. (Kotiaho, 2023.)	15
Taulukko 3. Mäntän Puhdistamo Oy:n jätevesimäärät 2011- 2015. (AVI, päätös 2017, 21.)	20
Taulukko 4. Jäteveden kuormitus puhdistamolle 2014. (AVI, päätös 2017, 20.)	20
Taulukko 5. Vuoden 2022 päiväkohtainen pysyvyyskäyrä. (Tirkkonen, 2024.)	22
Taulukko 6. Vuoden 2022 pysyvyyskäyrä suurimmasta tuotosta pienimpään. (Tirkkonen, 2024.)	23
Taulukko 7. Vuoden 2022 pysyvyyskäyrä suurimmasta tuotosta pienimpään. (Tirkkonen, 2024.)	25
Taulukko 8. Calefa Oy:n laskelma lämmöntuotosta 2,2 MW:n järjestelmällä.	26
Taulukko 9. Calefan laskelma lämmöntuotosta 4,4 MW:n järjestelmällä. Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.	

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää jätevedestä talteen otetun hukkalämmön hyödyntämistä kaukolämmössä, jolla punnitaan investoinnin järkevyyttä. Opinnäytetyö tehdään tilaustyönä Mäntän Kaukolämpö ja Vesihuolto Oy:lle. Tärkeimpänä tässä opinnäytetyössä on kuitenkin saada vastaus yritykselle koituvista riskeistä, jos hanke päätetään toteuttaa. Tämän lisäksi on tavoitteena saada toimeksiantajalle tietoa toteutuksen kannattavuudesta sekä kustannuksista ja tätä lähdetään tarkastelemaan tutkimuksellisen kehitystyön menetelmällä. Tähän päädyttiin, koska työ perustuu suurelta osin saadun aineiston analysointiin ja niistä tehtäviin johtopäätöksiin ja annettu toimeksiannon pääpaino on työelämän kehittämässä, tässä tapauksessa saada tuotettua kaukolämpöä varten kilpailukykyisempää lämpöenergiaa.

Saatu aineisto tukeutuu pääosin sähköpostihaastatteluihin saatuihin aineistoihin, joita tarkastellaan ja kyseenalaistetaan vertaamalla arvoja vallitseviin olosuhteisiin ja siitä riippuviin tarpeisiin. Opinnäytetyöstä on ajankäytöllisistä syistä rajattu eri skenaarit jätevesivirtaaman suuresta muutoksesta johtuvat tarkastelut, skaalautuvuus, skenaarioiden taloudellinen tarkastelu, herkkyystarkastelut, sähkön hintakehitys ja kaukolämmön käytön muutokset pois. Tärkeimpinä tutkimuskysymyksinä esitän, riittävätkö jäteveden virtaamat ja lämpötilat, onko investointi tuottoon nähden järkevää?

Aineiston avulla on pyrkimys saada joko ratkaisuja ongelmiin ja mahdollisuuksiin tai vaihtoehtoisesti lisäkysymyksiä selvitettäväksi. Jokainen tämänlainen lämpöpumppulaitos on oma ”yksilönsä”, joka perustuu saadun raaka-aineen olosuhteisiin ja osa järjestelmän teknisestä tiedosta halutaan toimittajan puolelta pitää salassa. Tämä johtaa tutkimuksessa väistämättä siihen, että aivan täyttävä varmuutta järjestelmän soveltavuudesta voida saavuttaa. Lähdeaineistoa etsitään verkosta toteutuneiden hankkeiden raportoinneista, kirjallisuudesta sekä valmistajilta.

Jäteveden hukkalämmön talteenottoa on tarkasteltu jo aiemminkin muissa lähteissä ja opinnäytetöissä. Tarkasteltava kohde on suhteessa pieni, vain reilun 9000 asukkaan kaupunki. Mänttä-Vilp-

pulan alue on ollut 80- luvulta asti muuttotappiollinen, joka oli yksi syy Mäntän ja Vilppulan kuntaliitosneuvotteluille. Neuvotteluiden tuloksena vuonna 2009 tehdyn kuntaliitoksen myötä Mänttä ja Vilppula yhdistyivät.

Ennen kuntaliitosta Mänttä, niin kuin Vilppulakin toteutti itse omien jätevesiensä puhdistuksen. Mäntässä se toteutettiin Pättiniemen jätevedenpuhdistamolla ja Kolhossa sekä Vilppulassa olivat omat Vilppulan kunnan alaiset puhdistamonsa. Vuosien mittaan jätevedenpuhdistamon toiminta keskitettiin kokonaisuudessaan Mänttään ja Vilppulan kunnan aikaiset puhdistamot lopetettiin. Tähän oli osasyynä tarkentuneet ympäristönsuojeluun liittyvät lait ja asetukset sekä tietysti kustannustehokkuus.

Ennen 2009 syntynyttä kuntaliitosta Mäntän jäteveden puhdistuksen hoiti Metsä-Serla Oy. Kun jäteveden määrä lisääntyi ja jäteveden käsittelyprosessi kehittyi, sen toiminta ulkoistettiin Kemira Operon Oy:lle. Kemira Operon Oy hoiti toimintaa aina vuoden 2018 loppuun asti, jonka jälkeen Mänttä-Vilppulan kaupungin ja Metsä Tissue Oyj:n yhteisomistuksessa oleva Mäntän Puhdistamo Oy aloitti toimintansa.

Hukkalämmön talteenottoa ajatellen voisi kuvitella, että pitkät etäisyydet vaikuttavat jäteveden lämpötilan laskuun niin paljon, ettei hukkalämmöllä olisi enää merkityksellistä vaikutusta sen talteenottoon. Mäntän jätevedenpuhdistamon ja Kolhon kauimmaisen siirtopumppaamon etäisyys on kuitenkin yli 20 km. Tässä muuttujana on kuitenkin Mäntän paperitehtaan läheisyys jätevedenpuhdistamoon, josta prosessista kulkeutuva jätevesi nostaa jäteveden lämpötilaa huomattavasti ennen sen saapumista jätevedenpuhdistamolle.

Tässä opinnäytetyössä toimitaan JAMK:n eettisiä periaatteita noudattamalla ja tarkastelemalla hyvän tieteellisen käytännön toteutumista koko kirjoitusprosessin ajan.

Lyhenteet:

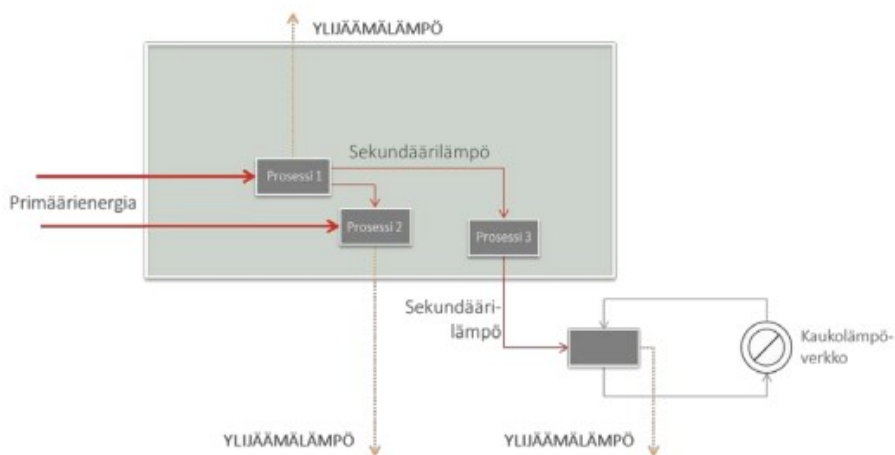
MKVOY= Mäntän Kaukolämpö ja Vesihuolto Oy

JAMK= Jyväskylän ammattikorkeakoulu

2 LÄMPÖPUMPPUJEN SOVELTUVUUS KAUKOLÄMMÖN TUOTANTOON

2.1 Lämmöntuotto

Ylijäämälämpöä kutsutaan myös lämpöenergiavirraksi tai tässä tapauksessa hukkalämmöksi (Kuvio 1). Hukkalämpöä poistuu tuotantolaitoksista niin jäähdytysveden, savukaasujen, poistoilmojen ja esim. lauhdelämmön mukana koneellisessa ilmanvaihdossa. Tässä asiayhteydessä suurin vaikutus tämän tutkimuksen kannalta tulee tuotantolaitoksen jäähdytysvedestä. (Kataikko & Maaskola, 2014.)



Kuvio 1. Kaaviokuva ylijäämälämmön määritelmästä. (Motiva Oy, 2013.)

Tutkimuksessa todettiin, että mitään tarkkoja arvioita virtaamasta ja sen lämpötilasta ei voida esittää, joten tämä on tehtävä täysin arvioimalla vuodenaikojen sääolosuhteet sekä virtaaman määrä. Koska tarkoitus on kuitenkin saada tietoa investoinnin kannattavuudestakin, niin tutkimuksessa tullaan käyttämään varovaisen suurta varmuusvähennystä. Yhtenä suurena kysymysmerkkinä on Metsä Tissuen 12.2.2024 julkistama lehdistötiedote Mäntän tehtaan 100 miljoonan euron investointiin, jolla tuotantoa tullaan kehittämään kestäväen kehityksen suuntaan. Tätä avataan tarkemmin edellä.

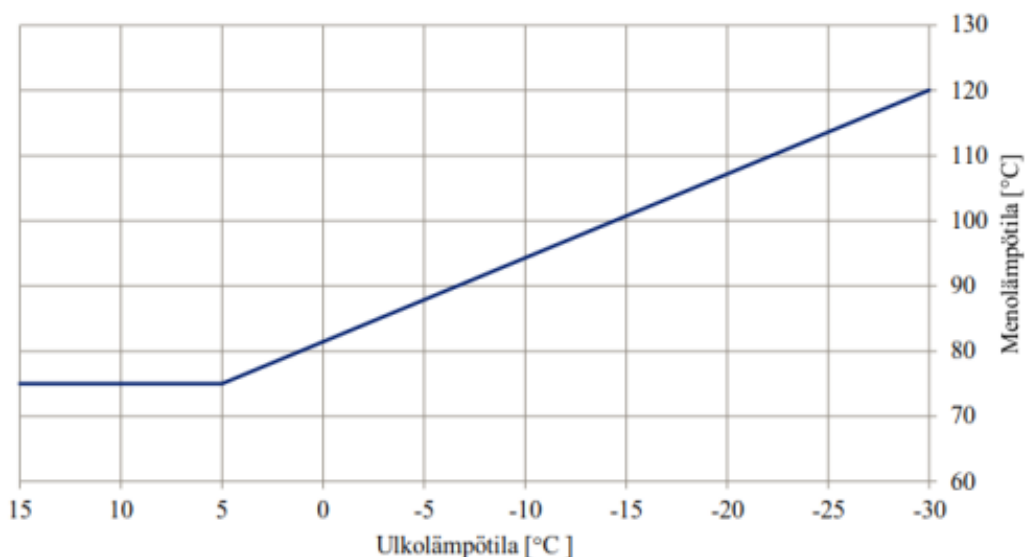
Sääolosuhteet Suomessa ovat melko haastavia tulkittavia, mutta tässä käytämme sitä oletusta, että vuoden aikana on kolme kiinteistöjen lämmitysjaksoa kuukautta, jolloin lämmityskausi

kalenterivuoden aikana kestää 9 kuukautta. Tero Kotiahon tekemän arvion mukaan vuoden kylmien kuukausien aikana käsitellyn jäteveden eli lähtevän veden lämpötila on 10°C:een alapuolella vajaan 1/3:n verran tuosta 9 kuukaudesta, jos talvi on Suomessa poikkeuksellisen kylmä viime vuosiin verrattuna. Vuodenvaihde 2023–2024 onkin tältä osin ollut poikkeuksellinen pitkiin aikoihin, joten tämä puoltaa hyvinkin perustetta hukkalämmön talteen ottokauden arviointiin. Näihin lähtökohtiin verraten tutkimuksessa päädyttiin arvioinnin osalta siihen, että lämmön talteen ottoa voidaan toteuttaa kalenterivuonna kuuden kuukauden ajanjaksolta.

Mäntän Kaukolämpö ja Vesihuolto Oy:n toimitusjohtaja Heikki Tirkkoselta saadun tilaston vuodelta 2023 perusteella myytyä kaukolämpöenergiaa vuositasolla oli 42 GWh. 4,4 MW:n lämpöpumppulaitokselle luvataan varovaisella suhdeluvulla tuottoa 41 000 MWh:a eli 41 GWh:a. Tarkeempi selvitys laskennasta on osoitettu mittaustuloksissa. (Rahkola, 2023.)

Kaukolämmön lämpötilan tarve eri vuodenaikoina perustuu vuonna 1978 menovesilämpötilaryhmän tekemään tutkimukseen, jossa toteutettiin Lämpövesiyhdistyksen suosituskäyrä (Kuvio 2). Suorituskäyrästä ilmeeseen ulkolämpötilaan suhteutetusti tarvittava menoveden lämpötila. Tutkimus toteutettiin Lahden kaupungin sähkölaitoksille tehdyin testiajoin.

Menolämpötilan säädön ongelmana on, ettei siinä huomioida verkon todellista kysyntää, pumpun tarvetta, eikä ajankohtaan liittyvää kysyntää. (Laukkanen, 2018.)



Kuvio 2. Lämpölaitosyhdistyksen suosituskäyrä. (Laukkanen, 2018, 10.)

2.2 Savukaasupesuri ongelmana

Kuten yleensä kaikissa voimalaitoksissa, niin kuin Mäntän Energiallakin, ongelmaksi muodostuu savukaasupesuri. Lämpöpumppulaitoksen tuottama lämpöenergia on tavoitteena siirtää kaukolämmön paluuvesiverkostoon. Koska projektin tarkoituksena on toteuttaa kytkentä ennen kuin paluuvesi siirtyy voimalaitokselle, savukaasupesurin hyötysuhde pienenee paluueden esilämmityksestä. Yksi ratkaisu voisi olla pesurin ohittaminen erillisellä linjalla, mutta miten se taas vaikuttaisi savukaasupesurin toimintaan, voi tuottaa uusia haasteita. Ongelma on kuitenkin tiedostettu ja tässä tutkimuksessa asian oletetaan olevan ratkaistu. (Järvenranta, 2014.)

2.3 Pumppumahdollisuudet ja -tekniikat

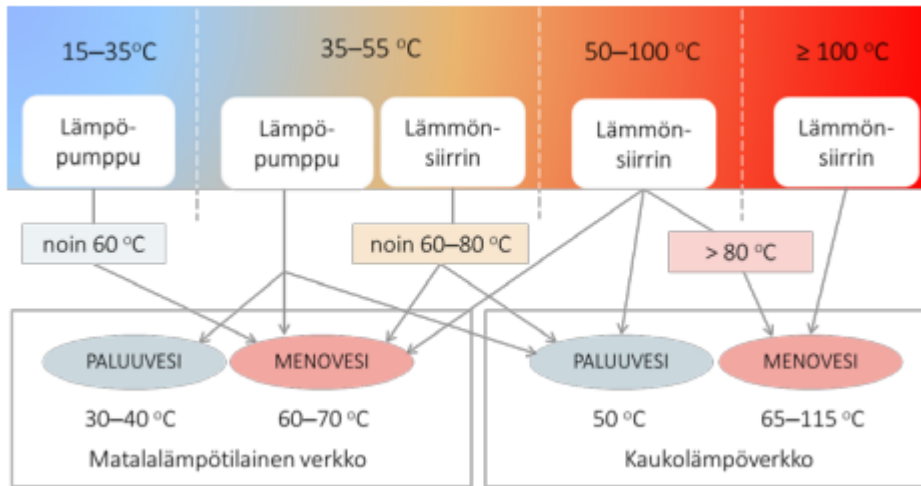
Toimeksiantajan puolelta esitetyn toiveen takia hukkalämmön talteenoton pumppumahdollisuuksista ja tekniikoista pyydettiin Calefa Oy:ltä. Calefa Oy markkinoi 100-prosenttisesti kotimaassamme valmistamaa AmbiHeat®-lämpöpumppulaitosta, joita valmistetaan ja testataan Ikaalisissa. Laitos tuottaa lämpöä kaikista ympäristönsä tarjoamista vaihtoehdoista, kuten ilmasta, maasta, vesistöistä, auringosta ja teollisuuden hukkalämmönlähteistä. Laitos tarjoaa lämmityksen lisäksi mahdollisuuden viilennykseen. Sen toiminta on pienhiukkasvapaata ja laitos on hiljainen, joten se soveltuu, vaikka asutuksen lähelle. Modulaarisia lämpöpumppulaitosmalleja on kahdeksan erilaista, 350 kilowattista 10 megawattiin. Calefa Oy tarjoaa myös laitokselle etäseurannan ja elinkaaripalvelut. (Calefa, 2022.)

2.3.1 Pumppumahdollisuudet

Lähempään tarkasteluun otettiin Calefa Oy:n 2,3 MWh-, 4,4 MWh- ja 5,5 MWh-lämpöpumppulaitokset. Suurempiin tuotantolaitoksiin toteutettavat lämmön talteenottojärjestelmät ovat aina tapauskohtaisia. Ylijäämälämmön hyödyntämisen peruseriaatteisiin vaikuttaa lämpötilataso, lämpötehon (entalpian) suuruus, lämpövirran väliaine ja faasi (kaasu, höyry, neste, ilma, jne.), väliaineen kemialliset ominaisuudet ja väliaineen puhtaus. Jos näistä tekijöistä yksikin osoittautuu epäsuotuisaksi, saattaa lämmön hyödyntäminen muuttua joko kannattamattomaksi tai täysin hyödyttömäksi. Koska vaikuttavia asioita on useita, jokainen lämpölaitos suunnitellaan aina tapauskohtaisesti. (Heikkilä & Kiuru, 2014.)

2.3.2 Pumpputekniikat

Alla olevasta kaaviosta (Kuvio 3) selviää hukkalämmön eri lämpötilatasoista saadun talteen otetun lämpöenergian hyödyntäminen lämmitysverkostossa. Muita vastaavia tekniikoita ovat mm. savukaasupesuri, jätelämpökattila, tavalliset lämmönvaihtimet tai kuten tässä tapauksessa tulee olemaan, lämpöpumppu (kuvio 4). (Heikkilä & Kiuru, 2014.)



Kuvio 3. Hukkalämmön käyttö eri lämpötilatasoilla. (Heikkilä & Kiuru, 2014.)

Lämpöenergian siirtäminen kaukolämpöön toteutetaan vielä saatujen tietojen perusteella vain mekaanisella eli höyrynpuristuslämpöpumpputekniikalla, johtuen jäteveden alhaisesta lämpötilasta. Alla olevasta taulukosta näkee käyttöenergiamuodon mukaan siihen soveltuvan pumpputyypin, joka kyseiseen vaihtoehtoon parhaiten soveltuu (Taulukko 1). Jos kustannukset käyttöenergian osalta ovat edulliset, voisi myös absorptiolämpöpumpputekniikka tulla kyseeseen. Tekniikkaa ohjaa kuitenkin tässä tapauksessa alhainen veden lämpötila. (Kataikko & Maaskola, 2014, 20–22.)



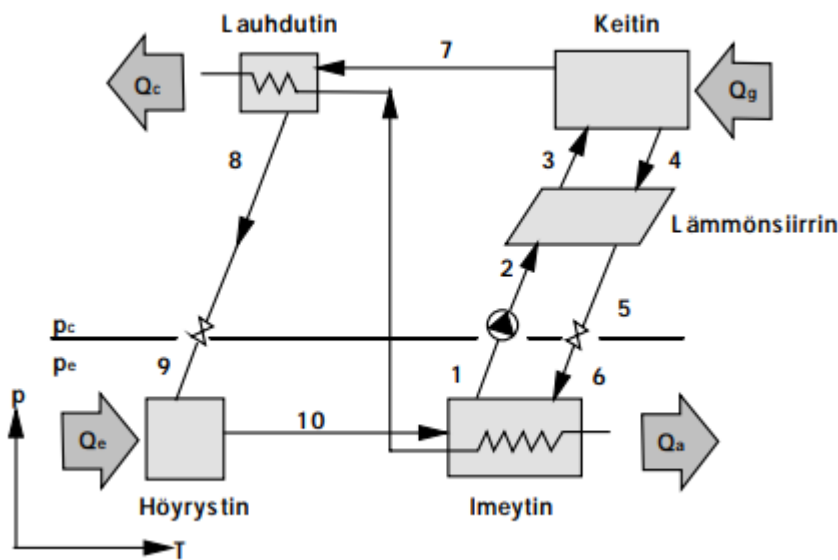
Kuvio 4. Suomen suurin lämpöpumppu. (Fortum, 2021.)

Taulukko 1. Käyttöenergian mukaiset lämpöpumpputyypit. (Motiva, 2013.)

	Mekaaninen lämpöpumppu	Absorptio-lämpöpumppu	Absorptio-lt:n muunnin	Höyryn komprimointi	Termo-kompressori
Käyttöenergia	sähkö	kuuma vesi tai höyry	lämpö	sähkö	höyry
Max. luovutus-lt.	95 (120) °C	95 °C	150 °C	200 °C	180 °C
Lämpötilan nosto	20–90 °C	30–65 °C	30–50 °C	5–30 °C	5–20 °C
Max. teho	Lähes rajoittamaton sarjaan kytketyillä järjestelmillä	Lähes rajoittamaton	Lähes rajoittamaton	Lähes rajoittamaton	Lähes rajoittamaton
COP	2,6–7,5	1,5–1,7	0,4–0,5	3–30	1,5–5
Kiertoaine	halogenoidut hiilivedyt, ammoniakki, hiilivedyt, CO ₂	vesi/litium-bromidi, ammoniakki/vesi	vesi/litium-bromidi	vesihöyry, hiilivetyhöyry	vesihöyry
Osakuormainaisuudet	+	++	++	+	+/-
Investointi	-	-	-	+/-	+
Sisäinen korrosioherkkyys	ei esiinny	seurattava	seurattava	seurattava	seurattava
Sisäinen likaantuminen	ei esiinny	ei esiinny	seurattava	seurattava	seurattava
Melu	+/-	++	++	+/-	--
Edut	luotettava	luotettava, yksinkertainen vähän ylläpitoa säädettävyys 0 -100 % kestävyys	yksinkertainen vähän ylläpitoa säädettävyys kestävyys	pieni lämmönsiirto-pinta-ala	yksinkertainen edullinen ei liikkuvia osia ei likaantumisongelmia
Haitat	ei sovi korkeille lämpötiloille nopea käynnistys (0→100 % ~2 min) säädettävyys haastavissa mitoitusolosuhteissa	suuri sis. lämmönsiirto-pinta-ala suhteellisen hidas käynnistys (0 →100 % ~ 10 min) tyhjän varmistus tarvitaan kerran viikossa	suuri sis. lämmönsiirto-pinta-ala hidas käynnistys suuri tarvittava ylijäämä- lämpövirtaus	pieni dT sopii vain tietyille höyryille	pieni dT vain tietyille höyryille melu
Yleisimmät sovellukset	lämmitys kuivaus	lämmön talteenotto	erikoiskohteet	höyrystys tislaukset	höyrystys tislaukset

Mekaanisella lämpöpumpulla voidaan lämpöä ottaa talteen varsin alhaisista lämpötiloista, jo alle 10°C:sta hyötysuhteella $COP > 2,5$. Teoreettisesti laskettaessa mekaanisen lämpösuhdetta, laskenta perustuu sisäisen kierron lauhtuttimen lämpötila jaettuna pumpun tuottamalla sisäisen kierron lämpötilaerolla. Eli mitä vähemmän kiertoprosessin sisäistä lämpötilaa tarvitsee nostaa, sitä parempi hyötysuhde saadaan aikaan. Mekaanisen lämpöpumpun huonoihin puoliin kuuluu sen huonot säätöominaisuudet eli ne ovat lähtökohtaisesti joko päällä tai ei.

Kun liuotin tai kylmäaine tai näiden ainepari liukenee, sen käyttäytymistä kutsutaan absorptiksi, joka tietyssä paineessa ja lämpötilassa saa aikaan tasapainon kaasun, höyryn ja nesteeseen absorboituneen kaasun välillä. Kun painetta ja/tai lämpötilaa muutetaan, kaasua tai höyryä sitoutuu tai vapautuu. (Koljonen & Sipilä, 1998, 12.) Tähän ilmiöön perustuu absorptiojäähdytysprosessi, jota käytetään absorptiolämpöpumpuissa (Kuvio 5). Absorptiolämpöpumpun hyviin ominaisuuksiin kuuluu laajempi säädettävyys. Tehonsäätö on joko portaaton tai 0...100 % säätöalueella. Tehonsäätö toteutetaan prosessiin käytettävän käyttölämmön lämpötehoa muuttamalla. (Maaskola & Kataikko, 2014, 21.)



Kuvio 5. Yksinkertaisen absorptiolämpöpumpun periaatekuva. (Koljonen & Sipilä, 1998.)

2.3.3 Lämmönsiirtimet

Lämmönsiirtimiä on kahdenlaisia, jotka soveltuvat hukkalämmön talteenottoon jätevedestä, rekuperatiiviset lämmönsiirtimet ja regeneratiiviset lämmönsiirtimet. Lämmönsiirtimen tehtävänä on siirtää lämpö yhdestä virtaavasta nesteestä toiseen. Lämmön siirtyminen perustuu pääasiassa konvektioon eli johtumiseen. Rekuperatiivisessa lämmönsiirtimessä lämpö johtuu levyn tai seinämän läpi nesteestä toiseen (Vaillant, 2024). Regeneratiivisessa lämmönsiirtimessä neste virtaa edes takaisin kiinteän rakenteen läpi, jolloin rakenne joko luovuttaa lämpöä tai varastoi sitä (Kisho, 2019).

3 PÄÄPERIAATE LÄMMÖN TALTEENOTOSTA JÄTEVEDESTÄ

Mäntän Puhdistamo Oy:lle saapuvan jäteveden lämpötila vaihtelee vuodenaikojen mukaan. Prosessinohitaja Tero Kotiahon syksyllä tekemän tarkastelujakson aikana sääolosuhteet muuttuivat 10°C:n lämpötiloista äkillisesti alle -20°C:n pakkaslukemiin. Tässä tarkastelussa lokakuun 26. päivänä 2023 jäteveden saapuessa puhdistamolle, jäteveden lämpötila oli pääsääntöisesti vielä 19,5–21°C:ksen lukemissa. Kylmän sääjakson alkaessa lokakuun lopulla ja pakkasen laskiessa alle -20°C:een, kovimmillaan -30°C:een lukemiin, jäteveden lämpötila putosi 8,5°C:een, mutta nousten kovimman pakkasjakson jälkeen 14.11.2023 mennessä 18°C:een.

Jätevedestä talteen otettava lämpöenergia otetaan käsitelystä vedestä eli kun jätevesi on kulkenut koko puhdistamon prosessin läpi. Tero Kotiahon mukaan prosessin aikana veden lämpötila tekee suuriakin vaihteluita. Jos virtaama on pientä ja sääolosuhteet poikkeuksellisen kylmät, voi jäteveden lämpötila olla ennen vesistöön laskemista 4°C:ssa. Jos taas virtaama on normaalia tai suurempaa, lähtevän veden lämpötila voi hyvinkin olla jopa 17°C:een lukemissa.

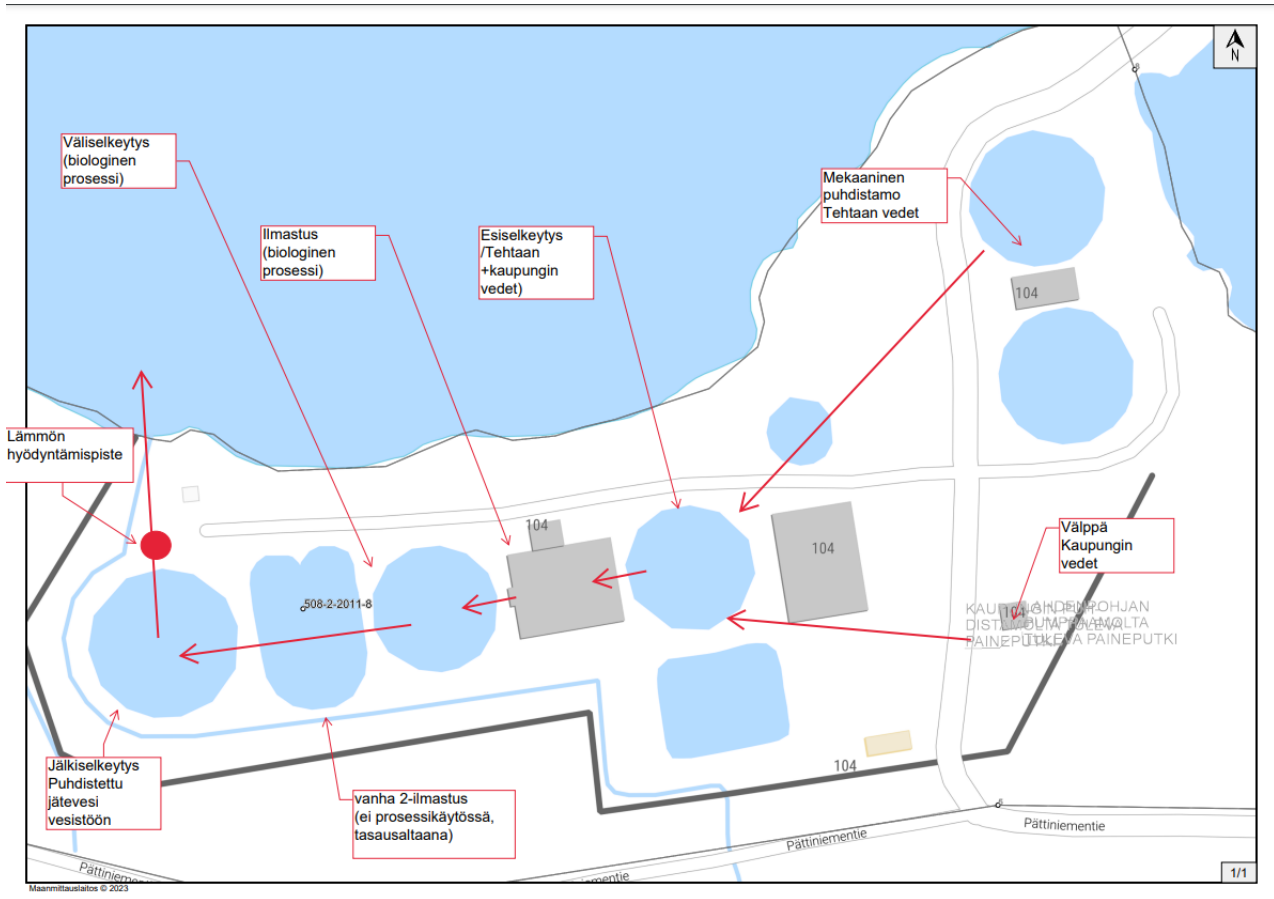
Tero Kotiahon tekemässä määrällisessä tarkastelussa 1/2021–10/2023 aikana prosessissa käsiteltyä, lähtevää vettä saatiin alimmillaan 319806 m³ kuukaudessa ja ylimmillään 646803 m³ kuukaudessa (Taulukko 2).

Taulukko 2. Tiedot lähtevän jäteveden määristä 2021-2023. (Kotiaho, 2023.)

Kuukausi	2021	2022	2023
tammikuu	478219	435561	474560
helmikuu	430248	389830	377927
maaliskuu	517625	491677	404438
huhtikuu	627317	621803	514923
toukokuu	557200	646803	467210
kesäkuu	457397	526240	319806
heinäkuu	464442	513897	402936
elokuu	467273	471401	407683
syyskuu	440933	413279	463965
lokakuu	465907	480808	514165
marraskuu	444579	441591	---
joulukuu	405103	385118	---

Yksinkertaisuudessaan lämmön talteenoton toiminnan pääperiaate toimii samanlailla, kuten kylmäkoneistoissa ja lämpöpumpuissa. Prosessin laitteistoon kuuluu vähintään neljä pääkomponenttia: höyrystin, kompressori, lauhdutin ja paisuntalaite. Käsitelty jätevesi johdetaan kulkemaan höyrystimellä kylmäaineputkiston läpi, jolloin lämpöenergia siirtyy kylmäaineeseen. Lämpöenergiaa sitonut kylmäaine höyrystyy, jonka jälkeen kompressori imee höyrystynyttä kylmäainetta ja puristaa sitä korkeampaan paineeseen. Paineistettuna kylmäaineen lämpötila nousee ja talteen otettu lämpöenergia siirretään kaukolämpöverkoston. Kun kylmäaine on kulkenut prosessin läpi, se palaa jäähtyneenä takaisin höyrystimelle. (Kaappola, Hirvelä, Jokela, Kianta, 2021.)

Alla olevassa karttakuvassa (Kuvio 6) on esitetty Pättiniemen jätevedenpuhdistamon prosessilinja. Kuvasta löytyy suunnitellulle lämmön talteenottojärjestelmälle suunniteltu paikka.



Kuvio 6. Kuvaus Pättiniemen puhdistamon prosessikaaviosta. (Hänninen, 2024.)

4 MÄNTÄN KAUKOLÄMPÖVERKOSTON JA PUHDISTAMON ESITTELY

4.1 Mäntän Kaukolämpö ja Vesihuolto Oy:n kaukolämpöverkosto

Mäntän Kaukolämpö ja Vesihuolto Oy on perustettu vuonna 1988 huolehtimaan Mäntän kaupungin infrasta. Kuntaliitos Vilppulan kanssa toteutettiin 1.1.2009, jolloin myös Vilppulan infrasta huolehtiminen siirtyi MKVOY:lle. Mänttä- Vilppulan kaupunki omistaa 100 % MKVOY:stä.

MKVOY:n tehtäviin kaukolämmön osalta kuuluu myydä lämpöä sekä ylläpitää kaukolämpöverkosta Mäntän alueella. Kaukolämpö itsessään tuotetaan Mäntän Energia Oy:ssä.

Vilppulassa kaukolämmön tuotannosta sekä verkoston ylläpidosta vastaa Loimua Oy.

Vuonna 2021 Mäntän kaukolämpöverkoston kuului asiakkaita 195 kpl ja rakennettua kaukolämpöverkosta Mäntän alueella oli vuonna 2021 yhteensä noin 26 km. MKVOY:n kokonaisliikevaihto oli 5,7 m€, josta lämmönmyyntiä oli 47,7 GWh hintaan 73,72 €/ MWh. Työntekijöiden määrä oli 12 kpl. (MKVOY, 2021)

4.2 Mäntän Puhdistamo Oy

Vuoden 2019 alusta Mänttä- Vilppulan jäteveden puhdistusprosessi siirtyi Mäntän Puhdistamo Oy:n hoidettavaksi. Tätä ennen tehtävä oli Kemira Operon Oy:n hallinnassa. Mäntän Puhdistamo Oy on Metsä Tissue Oyj:n ja Mäntän Kaukolämpö ja Vesihuolto Oy:n yhteisomistuksessa oleva yritys ja omistussuhteiltaan MKVOY omistaa 54 %:a ja Metsä Tissue Oyj 46 %:a yrityksestä. Jäteveden puhdistusprosessin uusittu ympäristölupa on ollut voimassa 2020 alusta alkaen. (Hänninen, 2023.)

Mäntän Puhdistamon palveluksessa on vakituisesti kolme henkilöä, ammattinimikkeiltään puhdistamon vastaava hoitaja, laitospäällikkö ja käyttöpäällikkö. Puhdistamon kunnossapitoon liittyvät toimenpiteet sähkö- ja automaatiotekniikan sekä mekaaniset huollot toteutetaan ostamalla palvelut pääosin ulkopuolisilta yrityksiltä. Jätevesinäytteiden analysoinnin ja raportoinnin hoitaa Kokemäenjoen vesistön vesiensuojeluyhdistys ry ja edellä mainitun yhdistyksen omistama KVVY Tutkimus Oy (KVVY 2023). Jäteveden puhdistusprosessissa käytettävät kemikaalit ovat Haarla ja Flinkenberg. (Hänninen, 2023.)

Vuositasolla käsitellystä vesimäärästä eriytetään n. 10 700 tonnia kuivattua lietettä. Kuivattu liete poltetaan Mäntän Energia Oy:ssä, josta talteen saatu energia siirretään esimerkiksi kaukolämpö-verkostoon. (Hänninen, 2023.)

Vuoden 2023 aikana valmistuneita kehitystoimenpiteitä Mäntän Puhdistamolla oli teknisen veden otto lähtevästä vedestä, sameusmittauksen ja fosforianalysointin asennus, MBR- kalvotekniikan selvitystyö, biohajoavan koagulantin käyttöönotto ja sen annostelu lähtevän veden virtauksen mukaan automaatiomuunnoksilla, 2-ilmastus vara-/ tasauskäytössä ja kehitysryhmän perustaminen yhdessä Metsä Tissue Oyj:n kanssa. Tulevia projekteja ovat lietteen kuivauksen uusiminen ja selvitys jäteveden hyödyntämisestä lämmöntalteenotossa (Hänninen, 2023). Alla olevassa kuvassa (Kuvio 7) on esitetty prosessin eri vaiheet.



Kuvio 7. Prosessikaavio Mäntän Puhdistamolta. (Hänninen, 2023.)

Taulukossa 3. kuvataan jäteveden käsittelyprosessia. Mänttä- Vilppulan kaupungin viemäriverkoston kuuluvien kiinteistöjen jätevedet virtaavat ensimmäiseksi jätevedenpuhdistamon välppälle (Hänninen, 2023). Välppäys on jäteveden esikäsittely, jossa kaikki karkeat kiintoaineet erotellaan jätevedestä. (Temmes, 2023.)

Kun kaupungin jätevesi on välppäty se jatkaa kulkuaan jätevedenpuhdistamolla esiselkeytykseen, jossa se yhdistyy Metsä Tissue Oyj:n tuotantoprosessista kulkeutuviin jätevesiin. Tässä prosessin vaiheessa jätevedestä laskeutetaan suurin osa kiintomuodossa olevasta raakalietteestä. (Temmes, 2023.)

Esiselkeytyksen jälkeen jätevesi ilmastetaan. Ilmastuksessa jätevedelle annetaan bioprosessin ylläpitoon ravinteita sekä riittävä määrä happea. Tämän prosessin myötä raakalietteestä muodostuneet liukoissa muodossa olleet, esimerkiksi fosfori, BOD ja erilaiset ravinteet, muuttuvat kiinteäksi bakteerikasvustoksi ja täten helpommin poistettavaksi ilmastusaltaasta. Bakteerikasvuston määrä pyritään pitämään altaassa vakiona prosessin ylläpitämiseksi. (Temmes, 2023.)

Anja Temmeksen esittämän (n.d.) jäteveden käsittelyselostuksen mukaan jälkiselkeytyksessä laskeutetaan saostuskemikaalien avulla loppu lietemassa eli palautusliete pohjalle. Pintaan jäävä puhdas jätevesi jatkaa kulkuaan takaisin vesistöön. Forssan vesihuoltoliikelaitos (n.d.) kutsuu tätä vaihetta väliselkeytykseksi, joka kuvastaa asiaa tarkemmin Mäntän Puhdistamon toiminnan kannalta. Forssan vesihuoltoliikelaitoksen jäteveden käsittelyn toimintaperiaatteen mukaan väliselkeytetty vesi ohjataan flotaatioon ja palautusliete pumpataan takaisin ilmastusaltaaseen valikoituneemman mikrobipopulaation kasvattamiseksi. Oman selvitykseni mukaan kuitenkin prosessin vaiheet on kuvattu Temmeksen että Forssan vesiliikelaitoksen esittäminä samaa tarkoittavina, riippuen aina jätevedenpuhdistamon toteuttamasta puhdistusprosessista ja tuotantolinjan rakenteesta. Flotaatiossa jätevedestä poistetaan loput kiintoaineet dispersiovedellä, jonka avulla kiintoaine nousee pintaan kaavittavaksi ja puhdistettu jätevesi jatkaa matkaansa vesistöön.

Mäntän Puhdistamo Oy käsittelee koko Mänttä-Vilppulan viemäriverkostosta tulevan jäteveden (Taulukko 3). Suurin jäteveden tuottaja Mänttä-Vilppulassa vuonna 2014 oli Metsä Tissue Oyj ja Mäntän Energia Oy, jotka sijaitsevat samalla kiinteistöllä. Suhteutettuna vuonna 2014 Metsä Tissue ja Mäntän Energian virtaama oli 12 842 m³/d, kun koko Mänttä-Vilppulan kaupungin luku oli 3585 m³/d (Taulukko 4). Loppuvirtaama koostuu mekaanisesta ja patoallasvedestä. (AVI, päätös 2017, 20.)

Raakavesi, jota jätevedenpuhdistamolla käytetään, on Metsä Tissue Oyj:n omalla vesilaitoksella mekaanisesti puhdistettua vettä, jota saadaan paperitehtaan yläpuoliselta, Keurusselän pintavedestä. Mekaanisesti puhdistettua raakavettä käytetään Mäntän Puhdistamolla kemikaalien liuoi-

tusvetenä, lietekuivainten pesuvedenä sekä jätevedenpuhdistamolta löytyvistä letkukeloista saatavana pesuvedenä noin 257 000 m³. (AVI, päätös 2017, 12–13).

Taulukko 3. Mäntän Puhdistamo Oy:n jätevesimäärät 2011- 2015. (AVI, päätös 2017, 21.)

Vuosi	Käsitelty vesimäärä m ³ /d
2011	18 735
2012	20 995
2013	20 457
2014	18 818
2015	16 505

Taulukko 4. Jäteveden kuormitus puhdistamolle 2014. (AVI, päätös 2017, 20.)

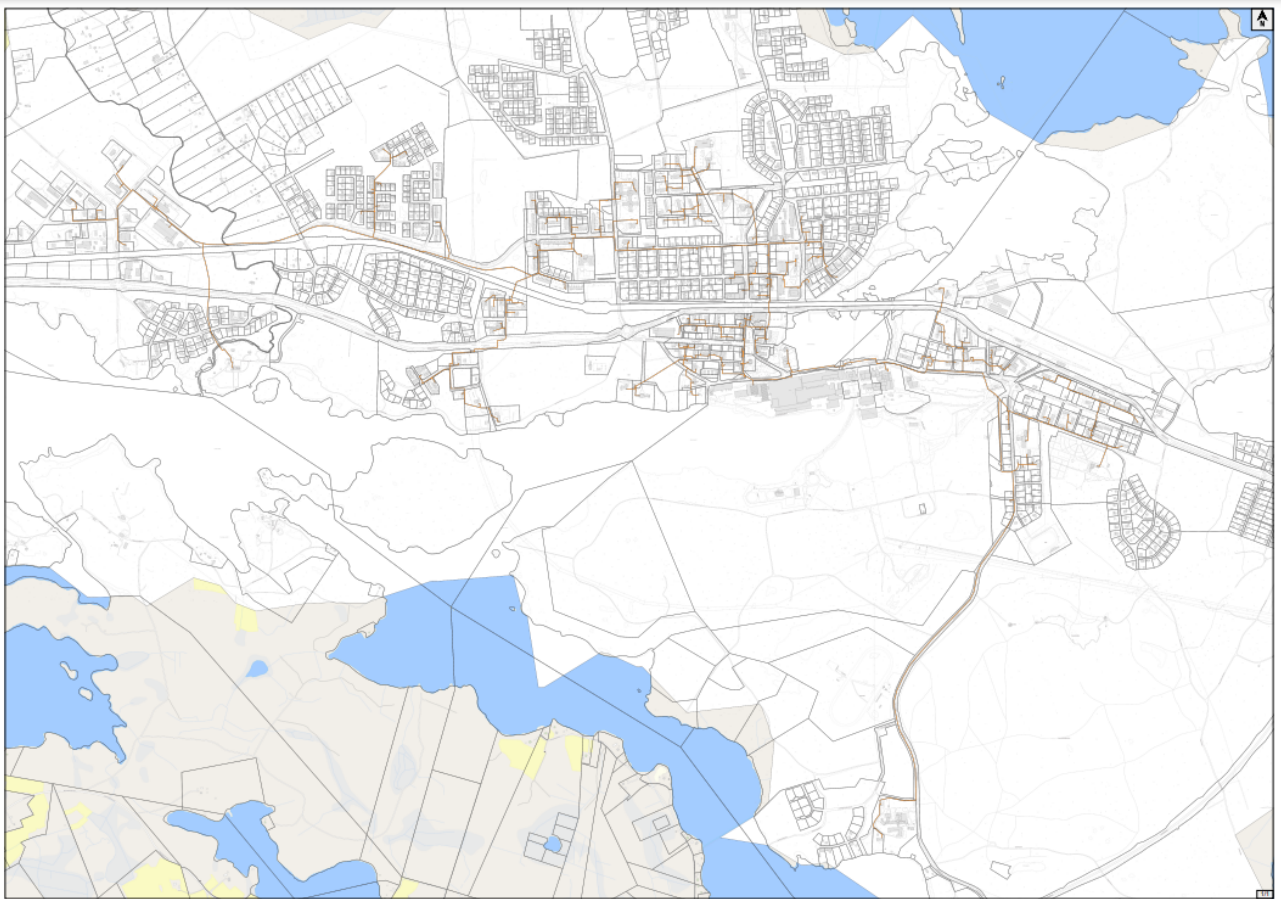
Vuosi 2014	Metsä Tissue Oyj ja Mäntän Energia	Mänttä- Viippula	Mekaaninen ja patoallasvesi	Yhteensä
Virtaama, m ³ /d	12 842	3 585	2 391	18 818
Kiintoaine, kg/d (mg/l)	5 458 (425)	616 (172)	9 (3,8)	6 083 (322)
BOD ₇ , kg/d (mg/l)	1 872 (141)	437 (122)	-4	2 305 (122)
COD _{Cr} , kg/d (mg/l)	8 432 (657)	1 262 (352)	-119	9 575 (507)
Kokonaistyppe, kg/d (mg/l)	52 (4,0)	127 (35,4)	0	179 (9,49)
Kokonaisfosfori, kg/d (mg/l)	2,3 (0,18)	19 (5,3)	0,3 (0,13)	21,6 (1,14)

Koska jätevedenpuhdistamo sijaitsee paperitehtaan, Metsä Tissuen Oyj:n yhteydessä, saapuvan jäteveden lämpötila pysyy melko korkealla. Kesäkuussa 2023 vastaavan puhdistamonhoitaja Tero Kotiahon kanssa käydyn keskustelun mukaan kesäaikaan jäteveden lämpötila on keskimäärin +27°C ja talvellakin n. +18°C. Jäteveden lämpötilan osalta se mahdollistaisi hyvinkin hukkalämmön talteenoton, jota ei vielä tänä päivänä tehdä. Suurin tarkastelu hukkalämmön talteenotto- projektin toteutumiseksi onkin virtaaman riittävyys laitevalmistajan suunnittelemaa laitteistoa varten ja pyrkimys saada tietoisuuteen investoinnin järkevyys.

4.3 Lämmöntarpeet

Mänttä-Vilppulassa toimii kaksi toisistaan erillään olevaan lämmöntuotantolaitosta ja kaukolämpöyhtiötä. Vilppulassa lämmöntuotannosta ja kaukolämmön jakelusta vastaa Loimua Oy. Mäntässä ja Kolhossa kaukolämmön jakelusta ja lämmöntuotannosta Kolhossa vastaa Mäntän kaukolämpö ja Vesihuolto Oy. Kolhossa kaukolämmön kulutus on verraten pientä ja siellä lämmöntuotanto toteutetaan pääasiassa pellettilämmityksenä, johon tässä opinnäytetyössä ei oteta kantaa.

Mäntässä lämmöntarpeina ovat pääasiassa yksityisten kiinteistöt sekä julkiset rakennukset, kuten esim. koulut ja kaupungintalo, sairaanhoitopiirin kiinteistöt sekä Mänttä-Vilppulan kaupungin omistamat kiinteistöt, kuten esim. asuinkerrostalot, ym. (Kuvio 8). Mäntän paperitehdasta lukuun ottamatta teollisuuden käytössä ei juurikaan kaukolämpö ole käytössä. Kaikkienensa vuonna 2023 asiakkaita kaukolämmön piirissä oli 194 kpl. (Tirkkonen, 2024.)



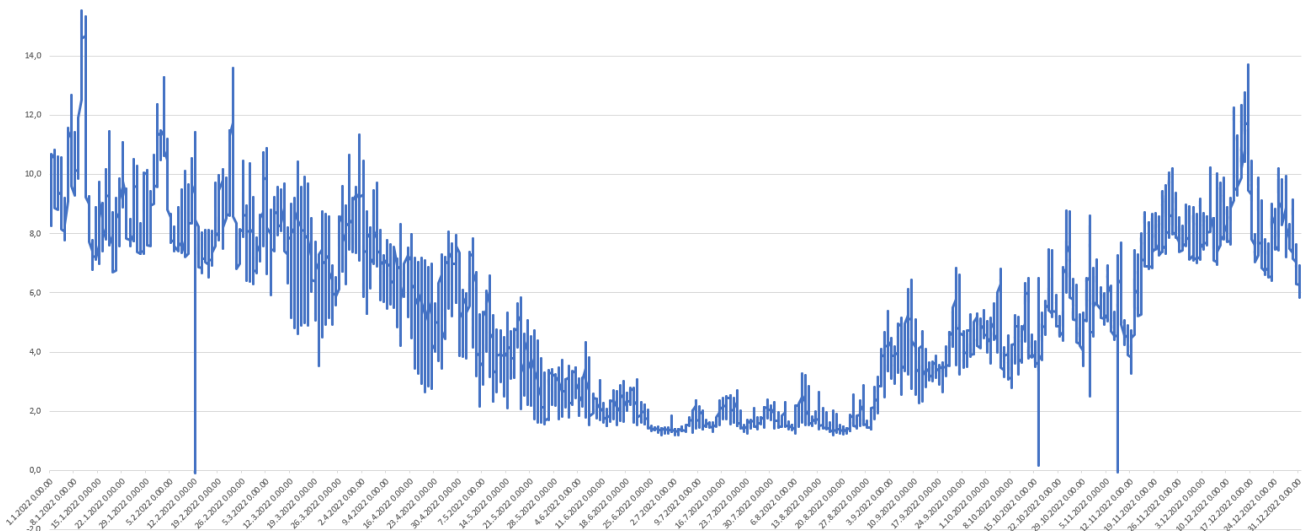
Kuvio 8. Karttakuva Mäntän kaukolämpöverkostosta. Verkosto merkitty oranssilla. (MKVOY, n.d.)

4.4 Pysyvyyskäyrät

Mäntän Energia Oy toimii kaukolämmitysverkon lämmöntuotantolaitoksena. Mäntän Energia sijaitsee Mäntän paperitehtaan ohessa, kuten Pättiniemen jätevedenpuhdistamo. Lämmöntuotannon mitoituksessa hyödynnetään pysyvyyskäyrää, josta nähdään tuotetun lämpöenergian määrä tiettyinä ajanjaksoina. Tuotetun lämpöenergian tehoa mitataan KL-teholla, jonka yksikkönä on MW eli megawatti. Mäntän Energialla pysyvyyskäyrälle mitoitetaan tulos joka tasatunti. (Mäkelä, V-M ja Tuunanen, J. 2015, 28–31.)

Alla olevasta taulukosta (Taulukko 5.) nähdään Mäntän Energia Oy:n koko 2022 vuoden päiväkohtainen lämmöntuoton pysyvyyskäyrä. Toisessa taulukossa (Taulukko 6.) ilmoitetaan vuoden 2022 lämmöntuotto suurimmasta päiväkohtaisesta tuotosta pienimpään tuottoon. Pienin lämmöntuotto osuu yleensä lämpimille kesäpäiville, jolloin huoneistojen tai muiden tilojen lämmitys on pois käytöstä.

Taulukko 5. Vuoden 2022 päiväkohtainen pysyvyyskäyrä. (Tirkkonen, 2024.)



5 Toteutuneiden kohteiden esittely

5.1 Lahti Energian lämpöpumppulaitos

Yhtenä Calefa Oy:n hankkeena oli Lahti Energian Ali-Juhakkalan jätevedenpuhdistamo, johon toteutettiin 5 MW:n Calefa AmbiHeat- lämpöpumppulaitos. Lahti Energian lämpöjohtaja Jarkko Kovanen kertoo hukkalämmön talteenoton tapahtuvan keskimäärin 9°C:sta jätevedestä, jonka lämpötila laskee järjestelmässä 1–2°C:seen ennen sen laskemista Porvoonjokeen. Saadusta lämpöenergiasta saadaan tuotettua kaukolämpöverkoston jopa 90°C:sta vettä. (Lahti Energia, n.d.)

Hankkeessa pyrittiin korvaamaan fossiilisten polttoaineiden käyttöä, tässä tapauksessa maakaasun. Uuden lämpöpumppulaitoksen ansiosta kaukolämmön vanha tuotantolaitos vähensi hiilidioksidipäästöjään 1700 tonnia vuodessa. Lahti Energialla on noin 8900 lämpöasiakasta. (Lahti Energia, n.d.)

5.2 Kymen Vesi Oy:n Mussalon jätevedenpuhdistamo

Toinen Calefa Oy:n toteuttama hanke toteutettiin Kymen Veden Mussalon jätevedenpuhdistamolla, jonne ohjautuu Kotkan, Kouvolan, Pyhtään ja Haminan jätevedet. Hukkalämmön talteenottoprojekti yksi tärkeimmistä tavoitteista oli pienentää hiilijalanjälkeä ja lähemmäksi hiilineutraaliutta. (Kymen Vesi, n.d.)

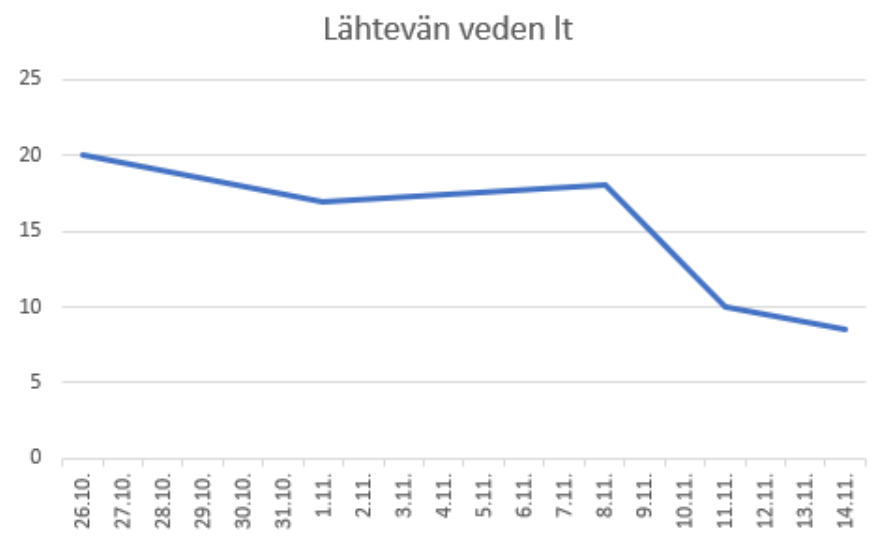
Calefa Oy:n asentama lämpöpumppujärjestelmä tuottaa 90 % järjestelmän 1100 MWh:n tuottamasta lämpöenergiasta ja se hyödynnetään omien kiinteistöjen sekä käyttöveden lämmittämiseen. Loput 10 % lämpöenergiasta tuotetaan sähkökattiloilla. (Ukko Emmi-Maria, 23.6.2021.)

Kymen Vedellä työskentelevä Emmi-Maria Ukko kertoo, että projekti aloitettiin tammikuussa 2021 ja vaikka järjestelmä suunniteltiin otettavaksi käyttöön heinäkuussa 2021, niin se saatiin jo kuu-kautta aiemmin toimintaansa. Samalla hän kertoo, ettei projektin aikana tullut mitään yllätyksiä ja budjetissa pysyttiin. (Vuori, 23.6.2021.)

6 Mittaustulokset

Lähtevän veden lämpötilan seurantajakso jäi suunniteltua lyhyemmäksi, mitä alun perin oli tarkoitus. Koska yllätyksiä saattaa aina tulla, niin näin kävi tälläkin kertaa. Syys-lokakuun vaihteessa 2023 jätevedenpuhdistamolla huomattiin lämpötila-anturin näyttävän todellisuutta korkeampia lämpötilalukemia. Anturit uusittiin ja vanhoja tietoja ei voitu epävarmuustekijöiden vuoksi käyttää. Tästä syystä seurantajakso jäi lyhyeksi, mutta laitevalmistajan mielestä arvoja saadaan hyödynnettyä, koska ulkoilman lämpötilamuutos tapahtui radikaalisti. Lyhyellä aikavälillä lämmin jakso kääntyi hyvinkin kylmäksi, jolloin seurantajakson loppuajasta saatiin lähtevän veden lämpötilalle realistisia arvoja, mitä ei varmastikaan koko viime vuoden ajalta olisi muuten saatu. Alla olevasta taulukosta (Taulukko 7.) nähdään lähtevän veden lämpötilamuutos.

Taulukko 7. Vuoden 2022 pysyvyyskäyrä suurimmasta tuotosta pienimpään. (Tirkkonen, 2024.)



6.1 2,2 MW- pumppujärjestelmä

Ensimmäisenä vaihtoehtona (Taulukko 8), jossa tarkasteltiin puhdistusprosessista lähtevän veden määrää ja lämpötilaa, tarjottiin 2,2 MW:n tuottoteholla, mitoitusasteessa 0°C olevaa pumppujärjestelmää. Laskelmia tarkasteltiin 13°C:ssa olevan lähtevän veden jäädyttämistä 10°C:n lämpötilaan, josta saadaan riittävä määrä hukkalämpöä käytettäväksi. Laskelmien mukaan 2,2 MW:n järjestelmällä saadaan tuotettua n. 2,5 MW tehoa ja jätevedestä voidaan tuottaa lämpöä ympäri

vuoden, ulkolämpötilasta riippumatta. Hyötysuhde järjestelmässä riippuu kylmäpuolen lämpötilasta ja kuinka korkeaa lämpötilaa verkkoon halutaan tuottaa. (Calefa, 2023.)

Taulukko 8. Calefa Oy:n laskelma lämmöntuotosta 2,2 MW:n järjestelmällä.

Hukkalämmön kapasiteetti min.	
Hukkalämmön energia kW	5386,5
Hukkalämmön energia MW	5,4
Veden tiheys 1000 kg/m ³	1000
Veden ominaislämpökapasiteetti 4,2 kJ/kg°C	4,2
Veden kulutus m ³ /h	513
delta t (13 -> 4°C)	9
yksikkömuunninkerroin kJ/KWh	3600

6.2 4,4 MW- pumppujärjestelmä

Edelliseen, pienempään järjestelmään verrattuna tällä järjestelmällä (taulukko 9) lähtevän veden 13°C lämpötilasta hukkalämpöä voidaan ottaa 9°C asti talteen. Järjestelmä tuottaa n. 5 MW tehoa, joka on jo tuplasti enemmän pienempään järjestelmään verrattuna. Tälläkin voidaan ulkolämpötilasta huolimatta tuottaa lämpöä ympäri vuoden ja hyötysuhde riippuu kylmäpuolen lämpötilasta ja halutusta, tuotetusta lämpötilasta. Molemmissa järjestelmissä vaihteluväliksi ehdotetaan 2,5–3,5 riippuen edellä mainituista muuttujista.

Taulukko 9. . Calefan laskelma lämmöntuotosta 4,4 MW:n järjestelmällä.

Hukkalämmön kapasiteetti max.	
Hukkalämmön energia kW	9125
Hukkalämmön energia MW	9,1
Veden tiheys 1000 kg/m ³	1000
Veden ominaislämpökapasiteetti 4,2 kJ/kg°C	4,2
Veden kulutus m ³ /h	869
delta t (13 -> 4°C)	9
yksikkömuunninkerroin kJ/KWh	3600

7 TEKNISTALOUDELLINEN TARKASTELU

7.1 Budjettihinnat

2,2 MW- järjestelmän kokonaistoimituksen budjettihinnaksi on arvioitu n. 1,8 m€ (alv. 0 %) ja 4,4 MW- järjestelmän budjettihinta kokonaistoimitukselle on arvioitu olevan n. 3 m€ (alv. 0 %) Hinnat perustuvat Calefa Oy:n myyntipäällikkö Sami Rahkolan vastaamaan hintakyselyyn.

7.2 Investointikustannukset

Calefa Oy:n myyntipäällikkö Sami Rahkolalta saamien laskelmien mukaan pienemmällä järjestelmällä lämmöntuotoksi on arvioitu 8300 tunnin mukaan n. 20 000 MWh vuodessa. Suuremmalla järjestelmällä 41 000 MWh/v. Nämä laskelmat perustuvat kuitenkin siihen, että jätevedenpuhdistamon lähtevän veden lämpötila on aina vähintään 13°C ja lämpöä käytetään tasaisesti vuoden ympäri. Aiempiin arvioihimme perustuen nämä tuottolaskelmat joudutaan puolittamaan kesäajan ja kylmien kausien vuoksi. Tällöin todellisemmat tuotot olisivat pienemmällä järjestelmällä n. 10 000 MWh ja suuremmalla, 4,4 MWh:n järjestelmällä 20 500 MWh.

Tuotetun energian hinta on sähkönhinta jaettuna kulutetun ja tuotetun energian suhdelukua eli COP:ta. Eli jos esimerkiksi sähkönhinta on 60 € MWh, niin se jaetaan myyjän lupaamalla hyötysuhteella 2,5, niin kaavaksi saadaan $60 \text{ € MWh} / 2,5 = 24,50 \text{ €/MWh}$.

Suuremmalla järjestelmällä tuotetun energian hinnaksi määräytyy yllä käytetyn laskentakaavan mukaisesti sama tulos, mutta koska tuottoa on enemmän, niin järjestelmä tuottaa määrällisesti enemmän megawattitunteja enemmän.

Näin ollen pienemmän järjestelmän vuotuiset rahallisesti mitatut tuotot olisivat n. 245 000 € ja suuremmalla järjestelmällä n. 500 000 €. Vuonna 2022 voimaan tullut lakimuutos mahdollistaa kaukolämpöyhtiön tuottaa lämpöpumpulla energiaa verkostoon veroluokan II mukaisesti (sähköverolaki 4 §:n 3 mom.). Veroluokassa 2. veron osuus oli vuonna 2022 0,07812 c/kWh, joka on megawateiksi muutettuna 78,12 c/MWh. (Verohallinto, 2022.)

Tämä muuttaa tuotto-osuuden 23,72 €/MWh, joka laskee pienemmän järjestelmän vuotuisen tuoton n. 237 000 euroon ja suuremmalla järjestelmällä n. 486 000 euroon. Calefa Oy:n Sami Rahkolan mukaan hankkeeseen voidaan hakea tukea Business Finlandilta, jonka määrä on 15–20 %. Tämä edellyttää kuitenkin hyväksytyä päätöstä. Jos tarkastellaan 4,4 MWh- lämpölaitosta, niin investointimenot Calefan tarjoamalle järjestelmälle tulee 3 000 000 € ja saatuja tuottoja 486 000 €/v. Tähän tulee huomioida järjestelmän laskennalliset huoltokustannukset, jotka ovat Sami Rahkolalta saatujen tietojen mukaan 0,8–1 %/v investointisummasta. Jos otamme tarkasteluun varmemman luvun eli 1 %:n mukaan, niin tällöin huoltokustannukset ovat n. 30 000 €/v. Tämä vähentää saadut vuosituotot n. 436 000 euroon. Jos käytettävänä on ulkopuolista rahoitusta, siihen sidottu korko on myös laskelmassa huomioitava.

8 TULOSTEN ANALYYSI

Kestävän kehityksen kannalta mikään siihen liittyvä investointi ei ole turhaa. Mutta taloudelliselta kannalta asiaa on syytä tarkastella investoinnin kannattavuuden osaltakin. Tähän opinnäytetyöhön oli laitevalmistaja antanut kaksi lämmöntuotantolaitoksen mallia tarkasteltaviksi. Pienempi järjestelmä on halvempi, mutta tuotoltaan vähäisempi, kuin kalliimpi järjestelmä. Hinta/ laatu- suhteeltaan ei valinnassa ole suurta poikkeamaa eli suuremmalla investoinnilla saa rahaa vastaan tasasuhteessa tuottoa enemmän. Ja vaikka kustannuksiin myönnettäisiin Business Finlandin tukeakin, sen vaikutus on prosentuaalisesti sama, oli investointi sitten pienempi tai suurempi. Nopealla analysoinnilla, tuotteen hinta ei muutu, vaikka ostaisit määrällisesti enemmän.

Laadullisestikin tuote on ihan sama. Valmistaja on sama, tekniikka on sama, mutta toinen järjestelmä tuottaa vain enemmän, koska komponentit ovat suurempia. Näistä syistä ei tästäkään lähes tymissuunnasta voida tehdä sen suurempia hankintapäätöksiä. Jos haluaa kerralla investoida enemmän tuottavaan järjestelmään, niin silloinhan kannattaa sijoittaa suurempaan järjestelmään.

Lämmöntalteenottolaitokset ovat ottaneet kehityksessään suuren harppauksen viimeisen vuosikymmenen aikana. Lämpöenergiaa saadaan otettua talteen alhaisistakin lämpötiloista. Tämä on yksi merkittävimmistä syistä, jota kannattaisi syvemminkin tarkastella.

Hankkeen suurimpana riskinä on paperitehtaan omat mahdolliset investoinnit hukkalämmön talteen ottamiseksi. 12.2.2024 Metsä Group antoi lehdistötiedotteen, jossa se kertoi tekevänsä merkittävän investoinnin Mäntän pehmopaperitehtaalle. Investointiohjelman koko luokka on noin 100 miljoonaa euroa. Investoinnin tarkoitus on kehittää tuotanto- ja ympäristötehokkuutta jalostuskoneita ja paperikoneita modernisoimalla sekä parantaa energia- ja vesitehokkuutta. (Metsä Group, 2024.)

9 LUOTETTAVUUS JA EETTISYYS

Aineiston luotettavuuden osalta asioita täytyy katsoa pienellä varauksella. Toisen puolen aineistosta on toimittanut toimeksiantaja ja toisen puolen lämpöpumppujärjestelmää myyvä osapuoli, joten täysin riippumatonta aineistoa ei tähän tutkimukseen ole saatu. Tässäkin tutkimustyössä törmättiin järjestelmän toimittajalta saatujen tuloksien lievään ”kaunisteluun”, jotka kuitenkin saatiin kolmannella korjauskerralla uskottavimmiksi. Silti tuloksiin tehtiin omien analysointien perusteella varmuusvähennyksiä, koska Suomessa olosuhteet ovat sellaisia, ettei lämmön talteenotto voi olla kannattavaa, esimerkiksi kovilla pakkasilla. Tutkimustyön eettisyydessä on kuitenkin pyritty noudattamaan JAMK:n eettisiä periaatteita.

10 JOHTOPÄÄTÖKSET

Oman analysointini perusteella, ympäristötehokkuuteen 100 miljoonan euron sijoituksen tekevä Metsä Group tulee ottamaan huomioon hukkalämmön talteenoton toteuttamassaan projektissa. Projektin tärkeimpänä tavoitteena on kuitenkin ensisijaisesti vähentää vedenkulutusta prosessissa. Yksi asia tutkimaani hanketta kuitenkin puoltaa, jäteveden käsittelyprosessin vaatima lämpötila. Jos prosessin loppuvaiheessa lähtevän veden lämpötila saadaan pidettyä 13°C:ssa, niin tällöin hukkalämmön talteenotto onnistuu vuoden ympäri. Tämä tarkoittaa sitä, että jäteveden saapuessa käsittelylaitokselle prosessoitavaksi, sen lämpötilan tarvitsee olla 17–18°C:ssa kylmimmissäkin olosuhteissa. Yksi selvittämisen arvoinen asia on myös talteen otetun energian hyödyntäminen lähtevän veden esilämmityksessä ennen lämmön talteenottojärjestelmään saapumista. Paljonko se kuluttaa saadusta energiasta? Ja vaikka paperitehtaan jätevedestä otettaisiin hukkalämpöä jo ennen

jätevedenpuhdistamolle saapumista talteen, niin mikä olisi sen lämpötila? Tämäkin asia on varmasti sellainen, mistä pystyttäisiin asiakkaan kanssa sopimaan, koska jäteveden käsittelyprosessiinkin vaatii vedeltä tietyn vähimmäislämpötilan. Ja koska tässä tapauksessa toimeksiantaja on suunnitellut hukkalämmön talteen ottoa prosessin loppuvaiheeseen, ennen sen laskemista vesistöön, voisi hanke olla potentiaalisestikin mahdollista.

Järjestelmäsopivuus on mietittävä myös hankkeen takaisinmaksuajan näkökulmasta. Mitä kauemmin rahoituksen takaisinmaksu kestää, sitä järkevämpi on sijoittaa isompaan järjestelmään. Pitkällä aikavälillä suurempi lämmöntalteenottolaitos tuottaa enemmän energiaa ja lainan takaisinmaksun jälkeen sen tuotto on luonnollisesti suurempi.

Kun Metsä Group antoi 12.2.2024 julkisuuteen edellä mainitun tiedotuksen, se kuitenkin kertoo siitä, että tehtaan elinkaarta ollaan pidentämässä. Pelkästään investointiohjelman toteutusajaksi on laskettu viisi vuotta eli hanke oli valmis vuoteen 2030 mennessä (Metsä Group, 2024). Artikkelin ei kuitenkaan kerro, miten uudistukset vaikuttavat paperinvalmistusprosessissa käytettävän veden määrään. Jollei suuria vaikutuksia kuutiomäärissä ole, silloin hukkalämmön talteen oton ainoaksi ongelmaksi jää jäteveden lämpötila.

Toisesta näkökulmasta arvioidessa hankkeen järkevyyttä on investointiin käytetyn rahan siirtymisen asiakashintoihin. Kuinka paljon se tulisi vaikuttamaan ihmisten ostopäätökseen pysyä kaukolämmön piirissä? Joka tapauksessa investointi on luokaltaan asiakasmäärään nähden suuri, joten uusia asiakkaita tarvitaan enemmän, että hanke kannattaa. Pelkkä lämpöenergian halpa tuottaminen ei riitä, sille tarvitaan myös kysyntää. Jos hukkalämmön talteenotto tuottaa edes osaltaan uutta hukkalämpöenergiaa, ei toteutus ole missään mielessä järkevää. Kiinteistöihin asennettava kaukolämpöjärjestelmäkään ei ole itsessään halpa investointi kiinteistön omistajalle, joten uusien asiakkaiden hankinnassa tarvitaan hyvää puhujaa. Ja jos kaukolämmön hinta nousee korkeaksi, niin asiakashankintatyö voi olla varsin haastavaa.

Nykyteknologialla, miten lämmöntalteenottolaitokset ovat kehittyneet, teettäisin vielä lisäselvityksiä edellä esittämiini kysymyksiin. Suoraan en hanketta kaataisi, koska kyseessä on kuitenkin kestävä kehitykseen liittyvä hanke.

Heikki Tirkkoselta saatujen tietojen valossa suuremmalla eli 4,4 MW:n järjestelmällä olisi periaatteessa jo omalla tuotannollaan melko hyvät edellytykset saavuttaa Mäntän kaukolämpöön, vuositasolla varovaisesti arvioiden, puoleen vuoteen riittävä lämpöenergiämäärä.

Lähteet

23/2017/1. Dnro LSSAVI/6632/2015. Ympäristölupapäätös. Länsi- ja Sisä- Suomen Aluehallintovirasto. PDF- tiedosto. Julkaistu 24.3.2017. Viitattu 25.10.2023.

AmbiHeat. Ympäristön energiaa hyödyntävä päästötön lämpöpumppulaitos. 2022. PDF-esite Calefa Oy:n www-sivuilla. Julkaistu 7.12.2022. Oy. Viitattu 25.10.2023. <https://calefa.fi/ambiheat/>

Fortum viestintä, 24.6.2021. Fortumin Suomen suurin lämpöpumppu korvaa fossiilista kaukolämpötuotantoa jäteveden hukkalämmöllä. Paikallistiedote. Fortum Oy. Viitattu 24.3.2024. <https://www.fortum.fi/media/2021/06/fortumin-suomen-suurin-lampopumppu-korvaa-fossiilista-kaukolampentuotantoa-jateveden-hukkalammolla-0>

Harmaala, P. 18.12.2021. Lahteen tuleva lämpöpumppulaitos hyödyntää jäteveden lämpöä ja on maailman johtavaa teknologiaa. Verkkojulkaisu. Calefa Oy. Viitattu 13.2.2024. <https://calefa.fi/lahteen-tuleva-lampopumppulaitos-hyodyntaa-jateveden-lampoa-ja-on-maailman-johtavaa-teknologiaa/>

Heikkilä, I. & Kiuru, T. Huhtikuu 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen. Ylijäämälämpöenergia-analyysit. Verkkojulkaisu. Helsinki: Motiva Oy. Viitattu 21.3.2024. https://www.motiva.fi/files/10216/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Ylijaamalampenergia-analyysit.pdf

Hänninen, Timo. 6.11.2023. Prosessikaavio Mäntän Puhdistamosta. Sähköinen tiedonanto. Viitattu 23.3.2024.

Järvenreuna, J. 2014. Savukaasupesuri parantaa lämpöyhtiön kannattavuutta. Viitattu 15.2.2024. <https://promaintlehti.fi/Tuotantotehokkuuden-kehittaminen/Savukaasupesuri-parantaa-lampoyhtion-kannattavuutta>

Kaappola, E., Hirvelä, A., Jokela, M. & Kianta, J. 2023. Kylmätekniikan perusteet. 4. painos. Turenki: Hansaprint Oy. Viitattu 25.10.2023.

Kataikko, M & Maaskola, I. 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen. Lämpöpumppu- ja ORC-sovellukset. Verkkojulkaisu. Motiva Oy. Viitattu 22.3.2024. https://www.motiva.fi/files/10217/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Lampopumppu-ja_ORC-sovellukset.pdf

Kisho. 27.3.2019. Regeneratiivisen lämmönvaihtimen peruseriaate. Verkkosivusto. Kisho Corporation Co., Ltd. Viitattu 24.3.2024. <https://fi.kisho-nano-coating.com/info/basic-principle-of-regenerative-heat-exchanger-37477940.html>

Koljonen, T. ja Sipilä, K. 1998. Uudemman absorptiojäähdytystekniikan soveltaminen kaukolämmityksessä. Tiedote. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus. Espoo: Libella Painopalvelu Oy. Viitattu 24.3.2024. <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/1998/T1926.pdf>

Kotiaho, Tero. 2023. Vastaava hoitaja. Suullinen tiedonanto Mäntän Puhdistamolla kesäkuussa. Viitattu 25.10.2023.

Kotiaho, Tero. 24.11.2023. Vastaava hoitaja. Mäntän Puhdistamon arvoja. Sähköinen tiedonanto. Viitattu 23.3.2024.

KVVY. 2023. www-dokumentti Kokemäenjoen vesistön vesiensuojeluyhdistys ry:n kotisivuilla. Viitattu 24.11.2023. <https://kvvy.fi/kvvy/kvvy/>

Lahti Energia. N.d. Yritysesittely. www-sivusto. Viitattu 13.2.2024. <https://www.lahtienergia.fi/lahti-energia/yritysesittely/>

Laukkanen, J. 27.9.1918. Kaukolämmön menolämpötilan optimointi. www-dokumentti. Pöyry. Viitattu 13.2.2024. https://www.lsta.lt/files/events/2018-10-25%20Euroheat/2018-09-27/27_180927-3-Finnish-Track-Jouni-Laukkanen.pdf

Linnermo, Joanna. 12.2.2024. Metsä Group suunnittelee merkittävää investointiohjelmaa pehmo-paperitehtaalleen Mänttään. Lehdistötiedote. www-artikkeli. Metsä Group. Viitattu 13.2.2024. <https://www.metsagroup.com/fi/uutiset-ja-julkaisut/tiedotteet/2024/metsa-group-suunnittelee-merkittavaa-investointiohjelmaa-pehmo-paperitehtaalleen-manttaan/>

Maaskola, I. ja Kataikko, M. Tammikuu 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen. Lämpöpumppu- ja ORC- sovellukset. Verkkojulkaisu. Helsinki: Motiva Oy. Viitattu 24.3.2024. https://www.motiva.fi/files/10217/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Lampopumppu_ ja_ORC-sovellukset.pdf

Metsä Group. 12.2.2024. Metsä Group suunnittelee merkittävää investointiohjelmaa pehmo-paperitehtaalleen Mänttään. Lehdistötiedote. Viitattu 26.2.2024. <https://www.metsagroup.com/fi/uutiset-ja-julkaisut/tiedotteet/2024/metsa-group-suunnittelee-merkittavaa-investointiohjelmaa-pehmo-paperitehtaalleen-manttaan/>

Mäkelä, V-M ja Tuunanen, J. 2015. Suomalainen Kaukolämmitys. Tammerprint Oy. Viitattu 12.2.2024.

Mäntän Kaukolämpö ja Vesihuolto Oy. 2021. Mäntän Kaukolämpö ja Vesihuolto verkostosijainnit. www-dokumentti. Viitattu 12.2.2024. https://www.mkvoy.fi/_files/ugd/7996ef_d2db9624a2494314ac688f8b48a429bb.pdf

Mäntän Kaukolämpö ja Vesihuolto Oy. 2021. Yleistietoa. WWW- dokumentti. Viitattu 25.10.2023. <https://www.mkvoy.fi/puhdistamo-oy>

Oikeusministeriö. 30.12.1996. Laki sähkön ja eräiden polttoaineiden valmisteverosta. www-sivusto. Edita Lakitieto Oy. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1996/19961260>

Puhdistusprosessi. N.d. Forssan vesihuoltoliikelaitos. www-sivusto. Viitattu 26.11.2023.
<https://forssanvesihuoltoliikelaitos.fi/jateveden-kasittely/>

Rahkola, Sami. Myyntipäällikkö, Calefa Oy. 24.11.2023. Järjestelmät. Sähköinen tiedonanto. Viitattu 12.2.2024.

Temmes, A. N.d. Jäteveden käsittely- näin prosessi etenee. Promisti. 2023. Viitattu 24.11.2023.
<https://www.promisti.fi/jateveden-kasittely/>

Tirkkonen, Heikki. 13.2.2024. Kaukolämmön tietoutta ja mittaustuloksia. Sähköinen tiedonanto. Viitattu 23.3.2024.

Vaillant Group. 2024. Mikä on lämmön talteenotto?. Verkkosivusto. Vaillant Group. Viitattu 24.3.2024. <https://www.vaillant.fi/asiakkaat/neuvoja-ja-tietoa/lammitussyssanasto/master-heat-recovery-1925014.html>

Verohallinto. Sähkön veroluokat ja verotuksen korjaaminen. 29.3.2022. www-sivusto. Viitattu 12.2.2024. <https://www.vero.fi/syventavat-vero-ohjeet/ohje-haku-sivu/107822/s%C3%A4hk%C3%B6n-veroluokat-ja-verotuksen-korjaaminen/>

Vuori, P. 23.6.2021. Calefa. "Tämä on ollut yksi merkittävin yksittäinen toimenpide" - Kymen Veden Mussalon jätevedenpuhdistamo saavutti hiilineutraalisuustavoitteen. www-artikkeli. STT-info. Viitattu 13.2.2024. <https://www.sttinfo.fi/tiedote/69913220/tama-on-ollut-merkittavin-yksittainen-toimenpide---kymen-veden-mussalon-jatevedenpuhdistamo-saavutti-hiilineutraalisuustavoitteen?publisherId=68350554>