

Maisterin Advanced Energy Solutions koulutusohjelma

Lämpövarastointitekniikat jäteveden lämmön varastoimiseksi Suomessa

Joni Palin

Copyright ©2022 Joni Palin

Tekijä Joni Palin

Työn nimi Lämpövarastointitekniikat jäteveden lämmön hyödyntämiseksi Suomessa.

Koulutusohjelma Advanced Energy Solutions

Pääaine Sustainable Energy Conversion Processes

Vastuuopettaja/valvoja Apulaisprofessori Annukka Santasalo-Aarnio

Työn ohjaaja(t) Konsta Turunen (DI)

Päivämäärä 28.02.2022

Sivumäärä 75

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Lämpövarastojen ja hukkalämmönlähteiden entistä laajempi hyödyntäminen on välttämätöntä hiilineutraaliuden saavuttamiseksi. Lämmöntalteenotto jätevedestä on merkittävä lämmönlähde ja se on nykyisinkin käytössä monissa kaupungeissa, kuten Helsingissä ja Espoossa. Diplomityössä selvitettiin kahdella tapaustutkimuksella uusia tapoja hyödyntää puhdistetusta jätevedestä talteen otettavaa lämpöä. Työssä käytettiin dataa Helsingin Viikinmäen ja Espoon Suomenojan jätevedenpuhdistamoilta.

Ensimmäisessä tapaustutkimuksessa tutkittiin, voidaanko jätevedenpuhdistusprosessin tehokkuutta parantaa lämmittämällä puhdistamolle saapuvaa jätevettä puhdistetusta vedestä saatavalla lämmöllä. Tavoitteena oli selvittää, kuinka lämpimäksi saapuvaa jätevettä on mahdollista lämmittää, mitkä lämmityksen kustannukset ovat ja miten se vaikuttaa puhdistusprosessin typenpoiston vaatimaan alustilavuuteen.

Toisessa tapaustutkimuksessa selvitettiin jäteveden lämmön kausivarastointiin sopivia lämpövarastointitekniikoita. Tapaustutkimuksen päätavoite oli vertailla latenttilämpövarastojen ja tuntuvaan lämpöön perustuvien lämpövarastojen soveltumista jäteveden lämmön kausivarastointiin. Toinen tavoite oli määrittää käytettävälle lämpövarastolle sopiva koko.

Tulosten perusteella saapuvan jäteveden lämmitys voi olla kannattavaa joissain tapauksissa. Kannattavuuden lämpötilarajana voidaan pitää 9 °C:ta, jonka yläpuolella lämmityksen kustannukset alkavat kasvaa voimakkaasti. Varastokapasiteetillaan noin 10 000 MWh:n lämpövarasto olisi teknisesti ja taloudellisesti toteutettavissa. Suurten tuntuvaan lämpöön perustuvien lämpövarastojen kustannukset ovat edelleen huomattavasti latenttilämpövarastoja matalampia. Toisaalta latenttilämpövaraston varastotilavuus voisi olla alle 50 % vedellä täytetyn tuntuvaan lämpöön perustuvan lämpövaraston varastotilavuudesta. Kaupunkiympäristössä, jossa on niukasti tilaa suurien vedellä täytettyjen lämpövarastojen sijoittamiseen, lämpövarastojen suuri energiatiheys on oleellista.

Avainsanat Lämpövarastot, lämpövarastointi, jätevedenpuhdistus, lämmöntalteenotto, hukkalämpö, latenttilämpövarastot

Author Joni Palin		
Title of thesis Thermal energy storage technologies for the utilization of wastewater heat in Finland		
Programme Advanced Energy Solutions		
Major Sustainable Energy Conversion Processes		
Thesis supervisor Assistant professor Annukka Santasalo-Aarnio		
Thesis advisor(s) Konsta Turunen, M.Sc. (Tech)		
Date 28.02.2022	Number of pages 75	Language Finnish

Abstract

An extensive utilization of thermal energy storages and waste heat is necessary to achieve carbon neutrality. Wastewater heat recovery is a significant waste heat source, and it is widely used in cities such as in Helsinki and Espoo. New ways to utilize recovered heat from treated wastewater were analysed in two case studies of this thesis. Used data is from Viikinmäki wastewater treatment plant in Helsinki and Suomenoja wastewater treatment plant in Espoo.

The aim of the Case study 1 is to research if the efficiency of the wastewater treatment process can be improved by transferring heat from the treated wastewater to the inflow of the wastewater. Following questions were investigated. To what temperature the incoming wastewater can be heated? What are the costs of the wastewater heating? How the heating affects the required process volume of the nitrogen removal in wastewater treatment plants?

In Case study 2 suitable heat storage technologies for the seasonal heat storage using the heat of the wastewater were studied. The main objective of the Case study 2 is to compare the suitability of latent heat storages and sensible heat storages as a seasonal heat storage that uses wastewater as a heat source. Furthermore, a practical storage capacity was determined for the heat storage.

Conclusions of the Case study 1 were that heating of the inflow of the wastewater can be profitable in certain cases. For example, by raising the minimum temperature of the inflow of the wastewater in Viikinmäki to 11.5–12 °C, the required process volume of the nitrogen removal could be decreased 7–8%. However, 9 °C can be considered as a limit of a temperature target of the heating above which the costs of the heating start to rise sharply. For instance, in 2018 costs of the electricity consumption due to heating in Viikinmäki wastewater treatment plant would have been ca. 13,000€ when the temperature target is 9 °C and ca. 157,000€ when the target is 11 °C. Case study 2 concluded that a 10 000 MWh heat storage would be technically and economically feasible. Investment costs for large-scale sensible heat storages are still considerably lower than for latent heat storages. Suitable sensible heat storage technologies are PTES and CTES. On the other hand, a storage volume of the latent heat storage could be less than 50% of a storage volume of the sensible heat storage. Higher energy density of thermal energy systems is relevant in an urban environment with limited space for large water storages. Sodium sulfate could be suitable phase change material for seasonal latent heat storage.

Keywords Thermal energy storage systems, heat storages, wastewater treatment, heat recovery, waste heat, latent heat storages, sensible heat storages

Sisälllys

Esipuhe	7
Symbolit ja lyhenteet	8
Symbolit	8
Operaattorit.....	8
Lyhenteet.....	9
1 Johdanto	10
2 Lämpövarastot.....	12
2.1 Lämpövarastojen kysyntä ja rooli energijärjestelmässä.....	12
2.2 Tuntuvaan lämpöön perustuvat lämpövarastot	13
2.2.1 Nestemäisiä väliaineita käyttävät lämpövarastot	15
2.2.2 Kiinteitä väliaineita käyttävät lämpövarastot.....	20
2.2.3 Lämmön kausivarastot.....	20
2.3 Latenttilämpövarastot.....	21
2.3.1 Faasimuutosmateriaalit	22
2.3.2 Latenttilämpövarastojen rakenne ja lämmönsiirto	26
2.3.3 Faasimuutosmateriaalien kapselointi.....	28
2.3.4 Lämmönsiirron tehostaminen faasimuutosmateriaaleissa.....	29
2.4 Kemialliset lämpövarastot	29
2.4.1 Kemiallisiin reaktioihin perustuvat lämpövarastot	30
2.4.2 Sorptioprosesseihin perustuvat lämpövarastot	31
3 Jätevedenpuhdistusprosessi	32
3.1 Lämpötilan vaikutukset typenpoistoon	32
3.2 Pääkaupunkiseudun jätevedenpuhdistamot	33
3.2.1 Viikinmäen jätevedenpuhdistamo	34
3.2.2 Suomenojan jätevedenpuhdistamo.....	35
3.2.3 Blominmäen uusi jätevedenpuhdistamo	35
3.3 Jätevedenpuhdistamoiden lämmöntalteenotto	36
4 Tutkimusaineisto ja -menetelmät.....	38
4.1 Tutkimusaineisto.....	38
4.1.1 Suomenojan jätevedenpuhdistamon data	39
4.1.2 Viikinmäen jätevedenpuhdistamon data.....	39
4.1.3 Datankäsittely.....	40

4.2	Tapaustutkimus 1: Saapuvan veden lämpötilan optimointi lämpövaraston avulla.....	42
4.2.1	Puhdistettavan jäteveden tavoitelämpötila lämmityksen jälkeen	43
4.2.2	Saapuvan jäteveden lämmitys lämpötilatavoitteisiin	44
4.3	Tapaustutkimus 2: Puhdistetun jäteveden lämmön kausivarastointi	45
4.3.1	Kaukolämmön kysyntä ja lämmöntalteenotto puhdistetusta jätevedestä	46
4.3.2	Lämpövaraston kapasiteetti.....	47
4.3.3	Tuntuvaan lämpöön perustuva lämpövarasto	48
4.3.4	Latenttilämpövarasto	48
4.3.5	Lämpövarastojen investointikustannukset.....	49
5	Tulokset	50
5.1	Tapaustutkimus 1	50
5.1.1	Tavoitelämpötilat ja lämmitystehot	50
5.1.2	Vaikutukset typenpoistoon ja ilmastustilavuuteen	54
5.2	Tapaustutkimus 2.....	56
5.2.1	Lämpövaraston koko ja käyttö	57
5.2.2	Lämpövarastojen vertailu	59
5.3	Aineiston ja tulosten luotettavuuden arviointi.....	66
5.3.1	Aineiston luotettavuus	66
5.3.2	Tapaustutkimus 1: tulosten luotettavuus.....	67
5.3.3	Tapaustutkimus 2: tulosten luotettavuus	67
6	Johtopäätökset	69
	Lähteet	71

Esipuhe

Tämän diplomityön lähtökohtana oli uusien lämpövarastointitekniikoiden tutkiminen jäteveden lämmöntalteenottoon soveltuen. Lämpövarastot ovat kiinnostaneet minua opintojeni aikana ja olen pyrkinyt suuntaamaan opintojani mahdollisuuksien mukaan niihin. Olen kiitollinen saamastani mahdollisuudesta tehdä diplomityöni lämpövarastoinnista Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulun Konetekniikan laitoksen Energy Conversion -tutkimusryhmässä, jossa minulla oli erinomaiset olosuhteet työni tekemiseen.

Kiitän valvojaani Annukka Santasalo-Aarniota aiheen parissa työskentelystä kanssani ja työn aikana annetusta tärkeästä palautteesta, joka on mahdollistanut työn valmistumisen. Kiitän myös suuresti ohjaajaani Konsta Turusta, jonka antamat kommentit ja neuvot ovat olleet korvaamattoman tärkeitä diplomityön edistymiselle.

*Haluaisin kiittää myös diplomityöni datan tarjonneita osapuolia työni mahdollisestamisesta ja kaikkia muita projektin osapuolia, jotka ovat kommentoineet ja seuranneet työni edistymistä. Kiitän myös Energy Conversion -tutkimusryhmän työtovereitani hienosta ilmapiiristä ajoittain hie-
man poikkeuksellisinakin aikoina.*

Lopuksi haluan kiittää perhettäni ja kumppaniani tuesta tämän työn ja opiskelujeni aikana sekä erityisesti Aaro Piiraista erinomaisesta opiskeluseurasta opiskeluvuosieni aikana.

Helsinki 28.2.2022

Joni Palin

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

Q	lämpöenergia [J]
m	massa [kg]
c_p	ominaislämpökapasiteetti [kJ/(kgK)]
T	lämpötila [K]
s	sulamislämpö [kJ/kg]
T_m	sulamispiste [°C]
ρ	tiheys [kg/m ³]
H_{out}	lämpöpumpun lämpöteho [MW]
P_{in}	lämpöpumpun käyttämä sähköteho [MW]
V	tilavuus [m ³]
k	lämmönjohtavuus [W/(Km)]
\dot{V}	virtaama [m ³ /s]
T_{in}	tulevan jäteveden lämpötila [°C]
T_{out}	puhdistetun jäteveden lämpötila [°C]
V_{in}	tuleva virtaama [m ³ /s]
V_{summa}	tulovirtaamien summa [m ³ /s]
H	lämpöteho [MW]
t	aika (h)
P	sähköteho [MW]
H_{LT}	lämmitysteho [MW]
H_{LTO}	lämmöntalteenottoteho [MW]
η_{ls}	lämmönsiirron hyötysuhde
\dot{m}	massavirta [kg/s]
η	hyötysuhde
E	sähköenergia [MWh]
C	kustannus [€]
C_E	sähköenergian kustannukset [€]
C_V	investointikustannukset varastotilavuutta kohden [€/m ³]
C_Q	investointikustannukset lämpövarastointikapasiteettia kohden [€/Wh]

Operaattorit

Δ	muutos
----------	--------

Lyhenteet

ATES	pohjavesilämpövarasto (aquifer thermal energy storage)
CTES	luolalämpövarasto (cavern thermal energy storage)
TTES	säiliölämpövarasto (tank thermal energy storage)
PTES	allaslämpövarasto (pit thermal energy storage)
BTES	porakaivolämpövarasto (borehole thermal energy storage)
CHP	sähkön ja lämmön yhteistuotanto (combined heat and power)
COP	lämpöpumpun hyötysuhde (coefficient of performance)
min.	minimi
ka.	keskiarvo
maks.	maksimi
LTO	lämmöntalteenotto
LT	lämmitysteho
sol	kiinteä
liq	neste
KL	kaukolämpö
PK	peruskuorma
JV	jätevesi
SHS	tuntuvaan lämpöön perustuva lämpövarasto (sensible heat storage)
LHS	latenttilämpövarasto (latent heat storage)

1 Johdanto

Helsinki on luopumassa kivihiilen käytöstä energiantuotannossa vuonna 2024 ja tavoittelee hiilineutraaliutta vuoteen 2030 mennessä [1]. Myös monet muut kaupungit siirtyvät jatkuvasti kohti hiilineutraaliutta vähentämällä fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Tällä hetkellä suurin osa Helsingin kaukolämmöstä tuotetaan kuitenkin edelleen fossiilisilla polttoaineilla niiden osuuden ollessa vuonna 2020 lähes 90 % [2]. Tämä tarkoittaa, että tulevina vuosina uusiutuvien energianlähteiden ja hukkalämmön hyödyntämisen osuutta on kasvatettava runsaasti osana kaukolämmön tuotantoa.

Uusiutuvien energianlähteiden lisääminen aiheuttaa kuitenkin ongelmia energiantuotannossa. Ongelmat johtuvat energiantuotannon vaihtelevuudesta ja epävarmuudesta useiden uusiutuvien energianlähteiden tapauksessa. Uusiutuvien energianlähteiden tapauksessa energiankysyntä -ja tuotanto eivät usein vastaa toisiaan, mikä johtuu esimerkiksi kaukolämmön kysynnän kasvamisesta talvisin, jolloin auringosta saatavaa lämpöä on saatavilla niukasti. Kysynnän ja tarjonnan eriaikaisuutta voidaan tasoittaa lämpövarastoilla, joihin lämpöenergiaa voidaan varastoida, kun sitä on tarjolla kysyntää enemmän.

Yksi suuri hukkalämmön lähde, jota jo hyödynnetään useissa kaupungeissa, kuten Helsingissä on jäteveden lämpö. Helsingin jätevedet käsitellään Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla, jonne johdetaan jätevedet myös useasta muusta Uudenmaan kunnasta. Puhdistamo käsittelee yli 800 000 asukkaan jätevedet, joten laitoksen läpi kulkeva lämpömäärä on hyvin suuri. [3]. Helsingissä puhdistetusta jätevedestä otetaan lämpöä talteen Katri Valan lämpöpumppulaitoksella [4]. Pääkaupunkiseudun toinen jätevedenpuhdistamo on Espoon Suomenojan jäteveden puhdistamo, joka kuitenkin korvataan vuonna 2022 uudella Blominmäen jätevedenpuhdistamolla [5].

Tämä diplomityö toteutetaan osana Lämmöntalteenoton energiatase kaupungissa ja vaikutus jätevesien käsittelyyn (JV-LÄMPÖ) -hanketta, joka on pääkaupunkiseudun ja Turun seudun vesi- ja energialaitosten muodostaman hankekonsortion vuosina 2021–2022 toteutettava hanke. Hankkeessa tutkitaan jäteveden sisältämän lämpöenergian hyödyntämistä ja eri lämmöntalteenottotapojen vaikutuksia jätevedenpuhdistamoille ja koko viemärointi-alueelle. Hankkeessa pyritään selvittämään, mikä on paras tapa hyödyntää jäteveden lämpöä, kun sekä hyödynnettävissä oleva energia että vaikutukset jäteveden käsittelyyn ja viemärointiin huomioidaan. [6]. Tutkimusaineistona käytetään mittausdataa jätevedenpuhdistamoilta sekä dataa kaukolämmön kysynnästä Helsingissä.

Diplomityössä selvitetään lämpövarastointi- ja lämmöntalteenottotekniikoiden käyttöä jäteveden lämmön hyödyntämiseksi Suomessa kahdessa erilaisessa käyttötarkoituksessa. Diplomityön ensimmäisenä tavoitteena on analysoida puhdistetun jäteveden lämmön hyödyntämistä uusilla tavoilla. Jätevedenpuhdistusprosessille aiheutuu haittaa puhdistamolle saapuvan

jäteveden matalista lämpötiloista, joten diplomityön ensimmäinen tutkimuskysymys on:

1. Mitä hyötyjä jätevedenpuhdistusprosessissa saadaan aikaan käyttämällä puhdistetun jäteveden lämpöä puhdistamolle tulevan jäteveden lämmittämiseen jaksoina, joina tuleva jätevesi on kylmimmillään?

Lämpövarastojen ottaminen osaksi energiajärjestelmää on oleellista hiilineutraaliuden saavuttamiseksi, joten diplomityön toinen tavoite on tarkastella mahdollisuuksia jäteveden lämmön kausivarastointiin. Tarkastelussa vertaillaan vielä vähäisemmässä käytössä olevia latenttilämpövarastoja laajemmassa käytössä oleviin tuntuvaan lämpöön perustuviin lämpövarastoihin. Täten saadaan vielä seuraavat tutkimuskysymykset:

2. Millä lämpövarastointitekniikoilla jäteveden lämmön kausivarastointi on mahdollista ja kannattavinta toteuttaa?
3. Mikä on sopiva ja toteutettavissa oleva koko lämpövarastolle?

Puhdistusprosessin tehostamisen tarkastelu on rajattu vaikutuksiin typenpoistoon, joka on lämpötilalariippuvaisin jätevedenpuhdistuksen vaihe [43]. Typenpoisto vaatii suuren allastilavuuden, joten sen tehostamisella on mahdollista saada aikaan huomattavia vaikutuksia puhdistusprosessissa. Lämpövarastojen vertailun osalta tarkastelu on rajattu tuntuvaan lämpöön perustuviin lämpövarastoihin, joista on saatavilla runsaasti referenssitapauksia, ja latenttilämpövarastoihin, joiden kehittyminen taloudellisesti kannattaviksi suuren mittakaavan lämmön kausivarastoiksi on mahdollisesti tapahtumassa tulevaisuudessa.

Diplomityö muodostuu kirjallisuuskatsauksesta ja kahdesta tapaustutkimuksesta, joissa käytetään dataa Viikinmäen ja Suomenojan jätevedenpuhdistamoilta. Kirjallisuuskatsaus koostuu luvuista 2 ja 3, jotka käsittelevät lämpövarastointitekniikoita sekä pääkaupunkiseudun jätevedenpuhdistamoita ja jätevedenpuhdistusprosessia jäteveden lämpötilan näkökulmasta. Tapaustutkimus 1 tarkastelee puhdistamoille saapuvan jäteveden lämpötilan nostamista puhdistetusta jätevedestä saatavalla lämmöllä. Tapaustutkimuksessa 2 selvitetään jäteveden lämmön kausivarastointia erilaisia lämpövarastoja käyttämällä. Luvussa 4 esitellään käytettävä tutkimusaineisto sekä metodit. Luvussa 5 käydään läpi tapaustutkimusten tulokset sekä arvioidaan aineiston ja tulosten luotettavuutta. Lopuksi diplomityön johtopäätökset käydään läpi luvussa 6.

2 Lämpövarastot

Lämpövarasto on lämpöenergian varastointiin tarkoitettu järjestelmä. Lämpöä voidaan varastoida eri käyttötarkoituksia varten ja varastointiaika vaihtelee eri varastotyyppien välillä. Lämpövarastot jakautuvat toimintaperiaatteensa mukaan kolmeen eri ryhmään, jotka ovat tuntuvaan lämpöön perustuvat lämpövarastot (sensible heat storage systems), latenttilämpövarastot (latent heat storage systems) ja kemialliset lämpövarastot (thermochemical heat storage systems). [7]. Eri lämpövarastointitekniikat eroavat toiminnaltaan, ominaisuuksiltaan ja mahdollisilta käyttökohteiltaan toisistaan. Kyseiset tekniikat ja niiden erot esitellään tässä luvussa.

Lämpövarastoihin varastoidaan energiaa myöhempää käyttöä varten ja näin voidaan tasata eroja tuotannon ja kulutuksen välillä. Eroja syntyy päivittäin sekä vuodenajoinnain ja näiden erojen tasaamiseksi tarvitaan hyvin erilaisia lämpövarastoja. Lämpövarastoihin voidaan myös varastoida lämpöä matalassa lämpötilassa, jolloin puhutaan kylmän varastoinnista. Tällöin varastoa voidaan käyttää jäähdytykseen kaukokylmäverkossa vastaavasti kuin lämpövarastoja käytetään lämmitykseen kaukolämpöverkossa. Kylmän varastoinnissa varastolämpötila on matalampi kuin jäähdytyksen kohteen lämpötila, jolloin lämpöä siirtyy varastoon, kun varastoa puretaan. [8]. Lämpövaraston toiminta koostuu lataus-, varastointi- ja purkamisvaiheista [7].

2.1 Lämpövarastojen kysyntä ja rooli energijärjestelmässä

Hiilineutraali tai vähähiilinen energijärjestelmä ja uusiutuvien energialähteiden laajamittainen käyttö edellyttää järjestelmän osaksi lämpövarastoja. Esimerkiksi Helsingin kaukolämmöstä vuonna 2020 tuotettiin edelleen fossiililla polttoaineella 88,9 % [2]. Helsingin ja Helenin tavoite on kuitenkin lopettaa kivihiilen käyttö vuonna 2024 ja olla hiilineutraali vuoteen 2030 mennessä [1]. Fossiiliset polttoaineet ovat useita uusiutuvia energialähteitä, kuten tuuli- ja aurinkovoimaa käytännöllisempiä energialähteitä lämmöntuotannossa. Tämä johtuu uusiutuvien energialähteiden tuotannon vaihtelevuudesta ja epävarmuudesta. Vaihtelua esiintyy sekä lyhyellä aikavälillä, kuten vuorokauden sisällä, johtuen esimerkiksi tuulen nopeuden vaihtelusta ja auringonpaisteen puutteesta öisin että vuodenaikojen mukaan. Lisäksi vaihtelua esiintyy vuosien välillä esimerkiksi vesivoiman tuotannossa, sillä kuivina vuosina virtaavat joissa ovat pienempiä ja säännöstelyaltaiden pinnat matalammalla. Fossiililla polttoaineella kysynnän vaihteluihin on pystytty vastaamaan tehokkaasti tuotantoa lisäämällä tai vähentämällä. [9]

Uusiutuvien energialähteiden vaihtelusta ja tuotannon vähentymisestä talvisin seuraa niiden käytön lisäämisen yksi suurimmista ongelmista alueilla, joissa on kylmät talvet. Lämmön kysyntä on suurinta kylmimpinä aikoina eli silloin, kun useimpien uusiutuvien energialähteiden tarjonta on vähäisintä. [9]. Tuotannon vaihtelun lisäksi myös kysynnässä esiintyy

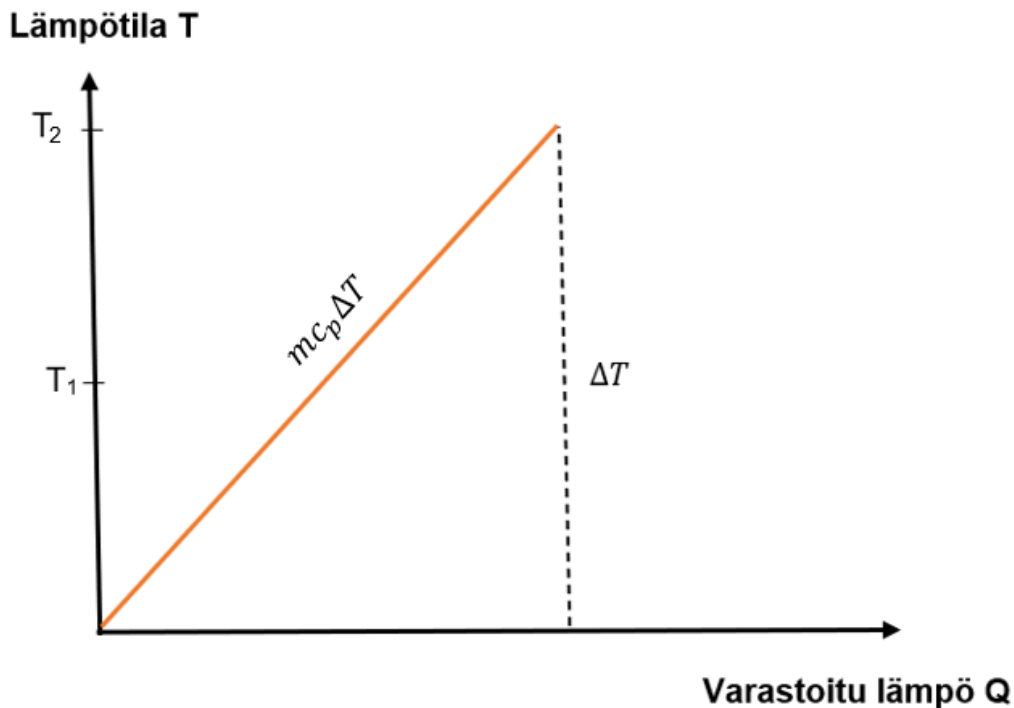
vaihtelua ja piikkejä. Vuorokauden sisällä kysyntäpiikkejä aiheuttaa esimerkiksi ihmisten samanaikainen lämpimän veden kulutus aamuisin. Pidemmät kysyntäpiikit johtuvat lämmityksen tarpeen lisääntymisestä kylminä pakkasjaksoina. Kasvaneeseen kysyntään on haastavaa vastata uusiutuvien energiälähteiden tuotannolla, koska niiden tuotantoa ei usein voi säätää suuremaksi, vaan tuotanto on jatkuvasti mahdollisimman suurta. Tätä ongelmaa voidaan paikata lämpövarastoilla. Lämpövarastoihin voidaan varastoida lämpöenergiaa silloin, kun tuotantoa on saatavilla ylimäärin kysyntään verrattuna. Kun taas kysyntä ylittää tuotannon, lämpövarastoja voidaan purkaa ja näin tasata kysynnän ja tuotannon eriaikaisuutta. [10]. Lämpövarastoja on sekä lyhytaikaisen vaihtelun että kausittaisen vaihtelun tasaamiseen ja puhutaan lyhytaikaisista lämpövarastoista ja lämmön kausivarastoista [9].

Lämpövarastoilla on rooli myös sähkömarkkinoilla, jossa niillä saadaan lisättyä joustoa yhdessä lämmöntuotannon jouston kanssa. Suurin osa esimerkiksi Helsingin sähköä tuottavista laitoksista on CHP-laitoksia eli ne tuottavat sekä lämpöä että sähköä hyvällä hyötysuhteella. Kesäisin lämmön kysyntä on matalaa, mutta sähkön kulutuksessa saattaa esiintyä korkeampia jaksoja. Kun lämpöä voidaan tuottaa lämpövarastoon, CHP-laitoksia voidaan ajaa ajoittain, vaikka lämmön kulutus ei vastaisi laitoksen tuotantoa kyseisellä hetkellä. Tällä tavalla saadaan joustavuutta sähköntuotantoon, ja myös lämmöntuotantoon kesäisin, kun tarvittava lämpö voidaan tuottaa isoilla laitoksilla ajoittain. [11]

2.2 Tuntuvaan lämpöön perustuvat lämpövarastot

Yksinkertaisin ja käytetyin tapa varastoida lämpöä on väliaineen lämpötilan nostaminen, jolloin on kyse tuntuvaan lämpöön perustuvista lämpövarastoista (sensible heat storage). Niissä lämpöenergia varastoituu materiaalien sisäenergiaksi lisääntyneenä lämpöliikkeenä. Tuntuvaan lämpöön perustuvaan lämpövarastoon varastoitu tai siitä saatava lämpöenergia voidaan laskea kaavalla (1), kun tiedetään varastomateriaalin massa, ominaislämpökapasiteetti ja lämpötilan muutos ladatun ja puretun varaston välillä, jota Kuva 1 havainnollistaa. [8]. Käyrän kulmakertoimen määrittää materiaalin lämpökapasiteetti c , joka saadaan materiaalin massan m ja ominaislämpökapasiteetin c_p tulona

$$Q = mc_p\Delta T. \quad (1)$$



Kuva 1: Tuntuvaan lämpöön perustuvassa lämpövarastossa varastoidun lämmön määrä on lämmitettävän materiaalin massan, ominaislämpökapasiteetin ja lämpötilan muutoksen tulo.

Tuntuvaan lämpöön perustuvia lämpövarastoja on monenlaisia ja niiden koko vaihtelee kotitalouksien varastoista suuriin kausivarastoihin, joihin voidaan varastoida lämpöä kaupungin tarpeisiin pitkäksi aikaa [12]. Useimmiten varastoväliaineena käytetään vettä johtuen sen useista hyvistä ominaisuuksista, joita käydään läpi luvussa 2.2.1. Joissain tapauksissa vesi ei ole kuitenkaan sopivin väliaine ja muita käytettyjä materiaaleja ovat esimerkiksi suolat, kallio ja betoni. Lämpövaraston väliaineelta vaaditaan korkeaa ominaislämpökapasiteettia ja tiheyttä sekä hyvää lämmönjohtavuutta. Lisäksi väliaineen tulee pysyä halutussa olomuodossa varaston käyttölämpötiloissa. [13]

Tuntuvaan lämpöön perustuvat lämpövarastot voidaan jaotella varastointimateriaalin perusteella varastoihin, joissa väliaine on vettä tai muuta nestettä ja varastoihin, joissa käytetään kiinteää väliainetta. Varastot voidaan myös jakaa varastointilämpötilan mukaan matalan ja korkean lämpötilan varastoihin tai varastoinnin keston mukaan lyhytaikaisiin varastoihin ja kausivarastoihin [13].

Maanalaisiin lämpövarastot (UTES) kattavat suurimman osan tuntuvaan lämpöön perustuvista lämmön kausivarastoista. Yksi maanalaisen lämpövarastojen eduista on ympäri vuoden tasaisena pysyvä lämpötila maaperässä, joka on etenkin talvella huomattavasti maanpinnan lämpötilaa korkeampi. Maaperässä lämpötila vaihtelee vuodenaikojen mukaan 20 metrin syvyydelle asti, jossa lämpötila voi olla 2 °C korkeampi kuin maanpinnan

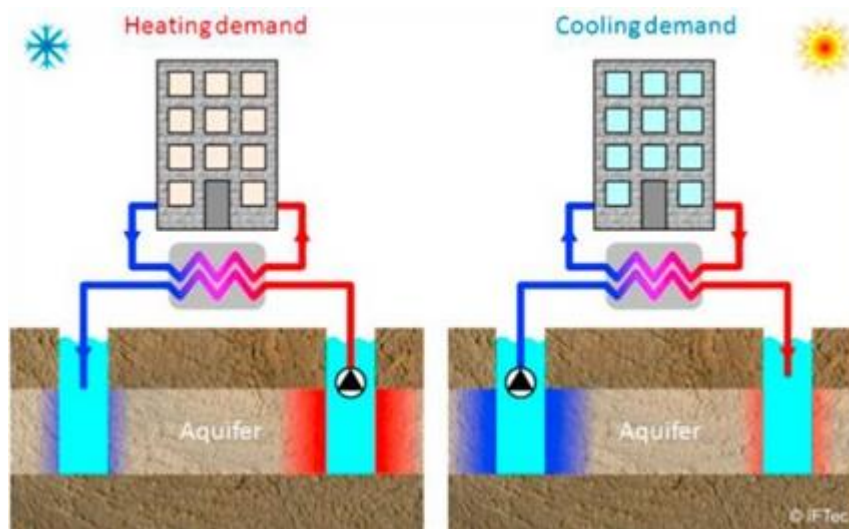
keskilämpötila, ja syvemmillä lämpötila nousee noin 1 °C:lla 35 metriä kohden. Esimerkiksi porakaivolämpövaraston syvyys voi olla 300 metriä, jolla syvyydellä maakuoren lämpötila on jo 8 °C korkeampi kuin 20 metrissä. [14]. Toinen maanalaisten lämpövarastojen etu on tilan säästäminen maanpinnalla. Suuren varastointikapasiteetin tuntuvaan lämpöön perustuvat lämpövarastot vaativat suuren tilavuuden. Porakaivolämpövaraston väliaineen tilavuus on myös suuri, mutta maan pinnalta varasto vie hyvin vähän tilaa ja se voidaan sijoittaa esimerkiksi parkkipaikan alle. Toisaalta maanalaisilla lämpövarastoilla voi olla suuret rakennuskustannukset ja pienemmän kokoluokan varastot voi olla siksi järkevämpää sijoittaa maan päälle. [12]

2.2.1 Nestemäisiä väliaineita käyttävät lämpövarastot

Yleisin varastomateriaali on vesi, jolla on monia ominaisuuksia, jotka tekevät siitä erinomaisen väliaineen lämmön varastointiin. Vedellä on suuri ominaislämpökapasiteetti (4,184 kJ/(kg·K)) ja suhteellisen korkea tiheys, minkä ansiosta lämmön varastointitiheys sekä painoa että tilavuutta kohti on suuri [15]. Vesi on myös helposti käsiteltävä materiaali, jota on saatavilla runsaasti eikä se ole vaarallista tai ympäristölle haitallista. Vettä voidaan käyttää myös lämmönsiirtonesteinä, jolloin sitä voidaan pumpata suoraan varastosta käyttökohteeseen, joskin varastot ja lämmönsiirtoputket erotetaan toisistaan usein lämmönvaihtimilla. Myös lämmönsiirtoputkisto toimii siis lämpövarastona, kuten kaukolämpöverkoissa. Vettä lämmönvarastoinnin väliaineena käytäviä tuntuvaan lämpöön perustuvia lämpövarastojen tyyppisiä ovat esimerkiksi pohjavesi-, luola-, säiliö- ja allaslämpövarastot. [7]. Suhteellisen matalasta kiehumispisteestä johtuen vesi ei kuitenkaan sovellu korkean lämpötilan varastoihin. Näissä lämpövarastoissa käytetään väliaineena esimerkiksi suoloja sulassa olomuodossa. Vesisäiliötä voidaan myös paineistaa, jolloin veden kiehumispistettä saadaan nostettua.

Pohjavesilämpövarastossa (aquifer thermal energy storage, ATEs) maanalaista pohjavesiesiintymää käytetään lämpövarastona yhdistämällä se lämmitysjärjestelmään porakaivolla. Pohjavettä esiintyy maaperässä kiviaineksen, kuten hiekan, soran ja hiekkakiven seassa. Myös kiviaineeseen varastoituu lämpöä, kun pohjavesilämpövarastoa lämmitetään. Sijainneissa, joissa sopivia pohjavesiesiintymiä esiintyy, pohjavesilämpövarastot ovat usein edullisin ja helpoin lämpövarasto toteuttaa [12]. Juomavetenä käytettäviä pohjavesiesiintymiä ei kuitenkaan voi käyttää lämpövarastointiin. Pohjavesilämpövarastoja käytetään sekä lämmön että kylmän varastointiin ja ne jaotellaan lämpövarastoihin, kylmävarastoihin ja yhdistettyihin lämpö- ja kylmävarastoihin [12]. Kylmävarastojen varastointihyötysuhde on yleensä korkea, ja se voi olla vaihdella kausivarastoissa välillä 70–100 %. Lämpövarastoissa tapahtuu suurempia häviöitä ja hyötysuhde vaihtelee välillä 50–80 %. [12]

Suurin osa pohjavesilämpövarastoista varastoi sekä lämpöä että kylmää. Yhdistetyissä lämpö- ja kylmävarastoissa käytetään erillisiä kaivoja lämmön ja kylmän varastointiin. Schmidtin et al. [16] esitellessä pohjavesivaraston suunnittelua Kuva 2 esittää pohjavesivaraston toiminnan periaatteen. Korkeammassa lämpötilassa olevasta kaivosta tai kaivoista otetaan vettä, kun lämpöä halutaan siirtää varastosta lämmitettävään kohteeseen, ja lämpö siirretään lämmitysverkkoon korkeammassa lämpötilassa lämpöpumpuilla, mitä esittää kuvan vasen puoli (heating demand). Jäähdyntynyt vesi johdetaan lämpöpumpuilta kylmävaraston kaivoon tai kaivoihin. Jäähdytystä tarvittaessa, kuten kesällä prosessi kulkee päinvastaiseen suuntaan, mitä kuvataan kuvan oikealla puolella (cooling demand). Kylmävaraston ympäristöä viileämpi vesi toimii lämpönieluna jäähdytysverkossa, kun lämpöpumput siirtävät siihen lämpöä, jonka jälkeen vesi johdetaan lämpövarastoon. Lämpöpumppujen korkeasta hyötysuhteesta johtuen yhdistettyjen lämmön ja kylmän pohjavesilämpövarastot toimivat hyvällä hyötysuhteella, joka voi olla erikseen lämpöä tai kylmää varastoivia varastoja korkeampi. Vaikka pohjavesivarasto voi käyttää suurta määrää vettä, ei sitä kulu hukkaan, sillä vesi kiertää kaivojen välillä.



Kuva 2: Periaatekuva pohjavesilämpövarastosta lämmitys- ja jäähdytyskausilla. [16]

Luolalämpövarasto (cavern thermal energy storage, CTES) on kalliioon louhittu vedellä täytetty luola. Luolalämpövarastoja on rakennettu jo olemassa oleviin luoliin, joita on aikaisemmin käytetty esimerkiksi öljyvarastoina tai kaivoksina. Luolalämpövaraston lataus ja purkuteho voi olla hyvin suuri, sillä sen määrittää pumppausteho. Jos käytössä on sopivaa kallioperää, johon luolan louhiminen on mahdollista, on luolalämpövarasto hyvä vaihtoehto rakennetuille alueille, sillä se ei tarvitse maanpäällistä tilaa.

Suurin luolalämpövarastojen käyttöä rajoittava tekijä on niiden rakentamisen erittäin suuret kustannukset, joiden takia varastotyyppi ei ole yleinen. Valmiita luolastoja lämpövarastoiksi muuttamalla kustannuksissa voidaan kuitenkin säästää huomattavia määriä. Samoin tilaa säästyy tiiviissä kaupunkiympäristössä, jos varasto sijoitetaan valmiiseen luolaan maan alle, sillä luolalämpövarastojen tilavuudet ovat suuria ja vastaavan kokoisen maanpäällisen lämpövaraston käyttämä pinta-ala olisi hyvin suuri. [12]. Esimerkiksi Helen on ottamassa käyttöön Helsingin Mustikkamaan vanhoihin öljyluoliin rakennettua luolalämpövarastoa ja suunnittelee Kruunuvuorenrantaan toista lämpövarastoa [11].

Mustikkamaan luolalämpövarasto on kaukolämmön lyhytaikaiseen varastointiin suunniteltu varasto, jossa vesi on korkeassa lämpötilassa. Varastosta voidaan siis purkaa lämpöä suoraan kaukolämpö verkkoon ilman tarvetta nostaa lämpötilaa lämpöpumpuilla. Kaukolämmön tarpeessa on Helsingissä suurimpina talven kulutushuippuina 500 MW ero, josta Mustikkamaan lämpövarastosta saatavalla 120 MW teholla voidaan tasata merkittävä osa, ja näin vähentää suurikulutusellisten huipputehoa tuottavien lämpölaitosten tarvetta. Varastoa ladataan öisin pienemmän kulutuksen aikana ja puretaan päivisin, jolloin lämmön kysyntä on runsasta. Varaston tilavuus on 260 000 m³, lämpövarastointikapasiteetti 11 600 MWh ja toimintalämpötila 45–100 °C. Varaston suuren koon ansiosta varastoa täydellä teholla purettaessa siitä riittää lämpöä noin neljäksi vuorokaudeksi, joten varastoa käytetään viikkotasoiseen säätelyyn pelkkien vuorokauden sisäisten kulutushuippujen tasaamisen sijaan. Varasto lisää joustoa myös sähkömarkkinoilla ja lämmön tuotannossa kesäisin, kuten luvussa 2.1 tuotiin esiin. [11]

Kruunuvuorenrannan öljyluoliin suunnitteilla oleva luolalämpövarasto on matalan lämpötilan kausivarasto, johon varastoidaan merivedestä kesäisin. Talvella lämpöä käytetään lämmityksessä Kruunuvuorenrannan alueella. Varaston toimintalämpötila 2–24 °C, joten lämpöä siirretään alueen lämmitysverkkoon lämpöpumpuilla. Luolien tilavuus on noin 300 000 m³ eli suurempi kuin Mustikkamaan lämpövaraston tilavuus, mutta matalasta lämpötilasta johtuen varastosta saatava teho on vain noin 3 MW ja vuosituotanto 6–7 GWh Mustikkamaan 140 GWh verrattuna. [11]. Toisaalta Kruunuvuorenrannan varastoon varastoitava lämpö on uutta merivedestä talteen otettua lämpöä verrattuna Mustikkamaan lämpövarastoon varastoitavaan lämpöön, joka tuotetaan esimerkiksi voimalaitoksessa. Lämmin merivesi onkin ekologinen lämmönlähde, jonka hyödyntäminen vaatii lämpövaraston, sillä suurin lämmöntarve esiintyy talvisin.

Säiliölämpövarasto (tank thermal energy storage, TTES) on yleisimmin vedellä täytetty säiliö, joka voi olla valmistettu vahvistetusta betonista tai ruostumattomasta teräksestä [10]. Suuret säiliöt on usein sijoitettu ainakin osittain maan alle, sillä ne vaativat suuren määrän tilaa, mutta voivat myös sijaita maan päällä. Säiliöissä on tehokas eristys, koska suurien säiliöiden iso pinta-ala aiheuttaa muuten suuret lämpöhäviöt.

Säiliölämpövarastot ovat erittäin yleisiä lämpövarastoja, sillä käytännössä jokaisessa talossa on lämminvesivaraaja, joka on pienen mittakaavan säiliölämpövarasto. Säiliölämpövarastot voivat olla kuitenkin myös suurempia. Esimerkiksi Helenin Salmisaaren voimalaitoksella on tilavuudeltaan 20 000 m³ säiliölämpövarasto ja Vuosaaren voimalaitoksella tilavuudeltaan 25 000 m³ varasto [9,10]. Salmisaaren lämpövaraston varastointikapasiteetti on noin 1 000 MWh ja Vuosaaren noin 1 250 MWh ja molemmat voidaan purkaa 100 MW teholla [19]. Säiliölämpövarastoilla voidaan tasata vuorokauden sisäisiä vaihteluita kaukolämmön kysynnässä. Säiliölämpövarastojen tilavuus on alle 100 000 m³, joten niiden käyttö rajoittuu kaukolämpöverkon kausivarastoja pienemmän mittakaavan varastoiksi [10]. Suurien säiliölämpövarastojen rakennuskustannukset ovat myös suuria, joten useiden varastojen rakentaminen ei ole kannattavaa verrattuna muihin varastotyypeihin, joista voidaan rakentaa suurempia [10]. Säiliölämpövarastojen kustannukset vaihtelevat 100–500 €/m³ välillä riippuen muun muassa säiliöiden koosta [16].

Lämmön kerrostuneisuus on tärkeä varastojen hyötysuhteeseen ja toimintalämpötilaan vaikuttava tekijä nestemäisiä väliaineita käyttävissä lämpövarastoissa. Säiliölämpövarastoissa lämmön kerrostuminen on voimakasta johtuen niiden lieriömäisestä eli tavallisesti kapeasta ja korkeasta muodosta [10]. Lämmön kerrostuminen tarkoittaa tiheämmän viileämmän veden painumista varaston pohjalle ja lämpötilan nousua kohti varaston pintaa. Lämmön kerrostuminen on lämpövarastoissa hyvä ominaisuus, sillä viileä vesi voidaan lisätä varaston pohjalle, ja varastosta otettava lämpö tai vesi voidaan ottaa varaston pintakerroksesta, jossa on korkein lämpötila. Näin varastossa pysyy korkeassa lämpötilassa olevaa vettä eivätkä vesimassat pääse sekoittumaan. Lämmön kerrostuneisuuden säilymiseksi varastossa veden tulo ja lähtökanavat on sijoitettava mahdollisimman lähelle pohjaa ja pintaa, eikä varastoon lisättävä vesi saa aiheuttaa turbulenssia tai olla merkittävästi eri lämpötilassa kuin ympärillä oleva vesi, jotta se ylös noustessaan ei aiheuta virtauksia säiliössä [10].

Allaslämpövarasto (pit thermal energy storage, PTES) on maahan kaivettu ja useimmiten vedellä täytetty kuoppa, joka eristetään vähintään pinnaltaan. Schmidin et al. [16] mukaan allasta varten kaivettavan maa-aineksen soveltuessa korotettujen seinämien rakennusmateriaaliksi, säästetään rakennuskustannuksissa, joten allaslämpövarastojen sijaintiin vaikuttaa sopivan maaperän esiintyminen. Lämpöeristykseen käytetyt materiaalit ovat kalliita, joten sivureunojen ja pohjan eristäminen ei välttämättä ole kannattavaa [16]. Sen sijaan pohja ja altaan reunat vuorataan vettä pitävillä materiaaleilla, kuten polymeereillä tai metalleilla. Polymeerit ovat metalleja edullisempia, mutta niiden käyttöä rajoittaa matalampi lämmönkestävyys, joka on useiden polymeerien kohdalla korkeintaan 90 °C. Myös höyryn korkea vuorauksen läpäisykyky korkeissa lämpötiloissa on huono puoli polymeerien käytössä. [16]. Dahash, et al. [10] mukaan myös veden ja soran seosta voidaan käyttää,

mutta tällaisen seoksen ominaislämpökapasiteetti on vettä matalampi, joten saman varastointikapasiteetin saavuttamiseksi varaston tilavuutta pitää kasvattaa. Lämmön kerrostuneisuus vaikuttaa varaston tehokkuuteen myös allaslämpövarastossa. Allaslämpövarastot ovat useimmiten muodoltaan pohjaa kohti kapenevia, kuten ylösalaisin olevan katkaistun pyramidin muotoisia [10]. Allaslämpövarastot ovat säiliölämpövarastoja vaikeammin huollettavissa esimerkiksi vuotojen tapauksessa. Toisaalta niistä voidaan tehdä säiliöitä suurempia ja rakennuskustannukset ovat matalampia. Tanskassa on tilavuudeltaan 203 000 m³ allaslämpövarasto, josta on Kuva 3 ennen sen täyttämistä vedellä. Suurten allaslämpövarastojen kustannukset ovat noin 20–40 €/m³, kun varastotilavuus on muutettu vesiekvivalenteiksi [20][21]. Ekvivalenteiksi muuttaminen on tarpeen, sillä allaslämpövarastoissa väliaine voi olla veden ja soran seosta, jolloin varaston lämpövarastointikapasiteetti ei ole esimerkiksi varastotilavuudeltaan vastaavan vesisäiliön kapasiteetin kokoinen. [16].



Kuva 3: Varastotilavuudeltaan 203 000 m³:n allaslämpövarasto Tanskan Vojensissa [22].

Kohteissa, joissa lämpöä varastoidaan veden kiehumispistettä korkeammissa lämpötiloissa, voidaan käyttää suoloja sulassa olomuodossa tai öljyä tuntuvaan lämpöön perustuvien lämpövarastojen väliaineena. Sulasuolojen toimintalämpötila ulottuu 600 °C asti, joten ne ovat paras ratkaisu hyvin korkeita lämpötiloja saavuttavissa keskittävissä aurinkovoimaloissa [23]. Keskittäviin aurinkovoimaloihin on kehitetty esimerkiksi aurinkosuolaksi kutsuttua NaNO₃-KNO₃ nanofluidia, jonka sulamispiste on 222 °C. Nanofluideissa sulaan suolaan lisätään oksideja, kuten alumiini- pii- tai kuparioksidia nanopartikkeleiksi, jotka nostavat fluidin ominaislämpökapasiteettia. [13].

2.2.2 Kiinteitä väliaineita käyttävät lämpövarastot

Porakaivolämpövarasto (borehole thermal energy storage, BTES) on yleisin lämpövarastotekniikka, jossa lämpö varastoidaan kiinteään väliaineeseen. Porakaivolämpövarastossa lämmitettävä väliaine on maaperä ja lämpöä siirretään veden mukana, joka kiertää maahan poratuissa porakaivoissa. Porakaivot porataan yleensä muutaman metrin välein ja niiden syvyys vaihtelee 30 metristä jopa 200 metriin. Porakaivoihin asennetaan U-putkia, joissa vesi kiertää siirtäen lämpöä maaperään varastoa ladattaessa tai pois maaperästä, kun varastoa puretaan. [24]

Porakaivolämpövaraston etuja ovat joustavuus suunnittelussa, kuten laajennettavuus ja vähäinen maanpäällinen tilantarve sekä sopivuus useimpiin sijainteihin. Varastoa voidaan laajentaa tarvittaessa poraamalla lisää kaivoja olemassa olevien viereen. Dahash et al. [10] mukaan porakaivolämpövarastossa varastotilavuutta tarvitaan 3–5 kertaa enemmän kuin vesisäiliössä saman energiamäärän varastoimiseksi, koska energiatiheys lämmitetyssä maaperässä on huomattavasti matalampi kuin vedessä. Porakaivojen lisäksi varasto ei vaadi maaperään suuria rakenteita, kuten veden pitäviä seiniä, joten suuri varastotilavuus ei johda samalla tavalla suuriin rakennuskustannuksiin kuin esimerkiksi luolalämpövarastoissa. Porakaivovarasto voidaankin sijoittaa moneen paikkaan, kunhan maaperä on poraamisen ja lämmönvarastoinnin kannalta sopivaa. Huonoja puolia ovat suuret porauskustannukset verrattuna pohjavesilämpövarastoon, joka vaatii vain muutaman kaivon. Porakaivolämpövaraston lämpöhäviöt ovat myös suhteellisen korkeat, ja ne voivat olla maaperästä riippuen 40–60 % [24]. Porakaivolämpövaraston hyötysuhdetta laskevat varaston läpi virtaavat pohjavedet, joiden mukana lämpöä poistuu, joten varaston sijainnin valinnassa pyritään välttämään pohjaveden virtauksia. Lämpöä siirtyy kuitenkin ympäröivään maaperään joka tapauksessa eikä porakaivovaraston hyötysuhde tavallisesti yllä eristettyjen lämpövarastojen, kuten allas- tai säiliölämpövaraston tasolle [9]. Toinen maaperän ominaisuus, joka vaikuttaa porakaivolämpövaraston sijainnin valintaan on kallioperän lujuus. Luja kiviaines voi kasvattaa varaston porauskustannuksia huomattavasti [9]. Lisäksi kaupunkiympäristössä maanalaiset rakenteet ja yhdyskuntatekniikka aiheuttavat rajoituksia paikoille, joissa poraaminen on mahdollista. Muualla pohjavesiesiintymien lisäksi ja kaivostoiminta voi rajoittaa varaston rakentamista [25].

2.2.3 Lämmön kausivarastot

Lämpövarastoja, jotka soveltuvat suuren varastointikapasiteetin varastoiksi käytetään kausivarastoina. Näitä varastoja ovat pohjavesi-, luola-, allas- ja porakaivolämpövarastot. Myös säiliölämpövarastoja voidaan käyttää lämmön kausivarastointiin pienemmän mittakaavan järjestelmissä, kuten talokohtaisissa tai useista omakotitaloista koostuvissa lämmitysjärjestelmissä,

joissa lämmönlähteenä käytetään esimerkiksi aurinkoenergiaa tai maalämpöä. [9]

Nykyään lämmön kausivarastot ovat etenkin suurien varastointikapasiteettien tapauksessa tavallisesti tuntuvaan lämpöön perustuvia lämpövarastoja, mutta myös esimerkiksi latenttilämpövarastoa voidaan käyttää kausivarastona. Tällöin kyseessä voi olla yksittäisen rakennuksen lämmittäminen. Esimerkiksi Demirel ja Öztürk [26] käsittelevät artikkelissaan kasvihuoneen lämmitysjärjestelmää, jossa 6 000 kg parafiinia sisältämä latenttilämpövarasto on yhdistetty aurinkokeräimiin. Furbo et al. [27] tutkimuksessa tanskalaisen matalaenergiatalon lämmittämiseen riittää 36 m² aurinkolämmitysjärjestelmä, kun siihen liitetään latenttilämpövarasto, jonka tilavuus on 6 m³. Kyseisessä lämpövarastossa faasimuutosmateriaali on natriumasetatitrihydraatti, joka alijäähtyy vakaasti. Vakaa alijäähtyminen on oleellista alijäähtymistä hyödyntävissä kausivarastoissa, jotta faasimuutosmateriaalissa ei pääse tapahtumaan ennenaikaista kiteytymistä eli varastoiduin energian purkautumista, mikä johtaisi suuren energiamäärän hukkaamiseen. Kappaleessa 212.3.1 käsitellään kylmäkiteytymistä hyödyntäviä faasimuutosmateriaaleja, jotka stabiilin alijäähtymisensä takia ovat potentiaalisia materiaaleja lämmön kausivarastoihin.

2.3 Latenttilämpövarastot

Latenttilämpövarastojen toiminta perustuu aineiden latenttilämmön eli olomuodon muutokseen vaadittavan lämmön hyödyntämiseen. Materiaalin sulamiseen vaadittava energia on

$$Q = ms, \quad (2)$$

jossa s on materiaalin sulamislämpö. Materiaalien höyrystymislämpö on sulamislämpöä suurempi, mutta lämpövarastoissa on usein käytännöllisempää käyttää sulamislämpöä johtuen materiaalin suuremmasta tiheydestä nesteinä kuin kaasuina, matalammista lämpötiloista sekä paremmasta hallittavuudesta [28]. Latenttilämpövarastoissa käytetään faasimuutosmateriaaleja (phase change material, PCM), joiden sulamispiste on sopivalla välillä, jotta materiaaleissa saadaan aikaan faasimuutos varaston toimintaan sopivalla lämpötilaerolla [28]. Faasimuutosten aikana lämpötila pysyy vakiona, joten materiaalin lämpötila ei muutu sulamisen tai jähmettymisen aikana, mutta energiaa saadaan varastoitua enemmän samaan tilavuuteen ja massaan materiaalia, kuin ominaislämpökapasiteettiin perustuvissa tuntuvaan lämpöön perustuvissa lämpövarastoissa. Esimerkiksi veden ominaislämpökapasiteetti 4,186 kJ/(K*kg) on huomattavasti sulamislämpöä 333 kJ/kg pienempi massayksikköä kohden [15].

Fleischer [28] tuo ilmi, että faasimuutosmateriaaleja voidaan käyttää aktiivisen lämmön varastoinnin lisäksi passiivisessa lämmön varastoinnissa,

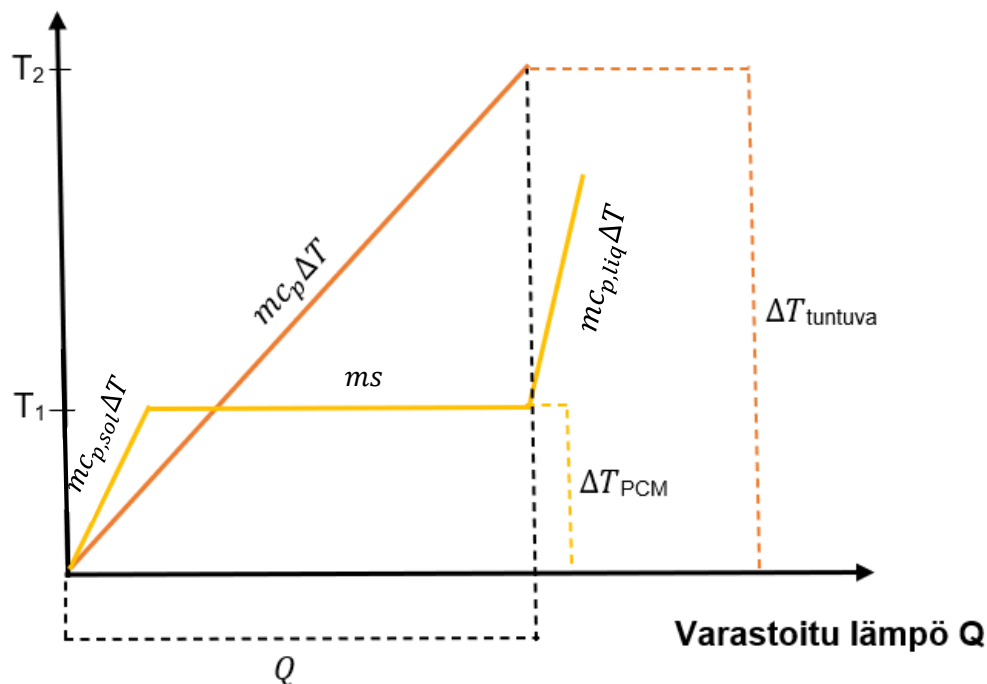
kuten lämpösäätelyssä esimerkiksi elektroniikassa ja rakennusmateriaaleissa tasaamaan lämpötilamuutoksia. Lämpösäätelyssä esimerkiksi lämpöä tuottavien elektronisten komponenttien lämpötilaa säädellään sitomalla lämpöenergiaa faasimuutosmateriaaliin suurimman käytön hetkillä, jolloin lämpötila on korkein. Rakennusmateriaaleissa käytettävät faasimuutosmateriaalit pitävät rakennukset tasaisessa lämpötilassa ja vähentävät esimerkiksi ilmastoinnin tarvetta erityisesti sijainneissa, joissa on suuret lämpötilavaihtelut vuorokauden sisällä, kuten aavikoilla. Rakennusmateriaalit toimivat myös tuntuvaan lämpöön perustuvina lämpövarastoina, kun niihin varastoituu lämpöä niiden lämpötilan vaihdellessa ympäristön lämpötilan mukaan. Vaadittavia ominaisuuksia materiaaleilta lämpösäätelyssä ovat pitkä sulamisaika, jotta systeemin koko kierto voidaan kattaa ja hyvä materiaalin reagointi nopeisiin lämpötilan muutoksiin niin, että lämpö siirtyy tehokkaasti koko materiaalin massaan [28].

2.3.1 Faasimuutosmateriaalit

Täydellistä faasimuutosmateriaalia, jolla olisi kaikki tavoitellut ominaisuudet ei ole Fleischerin [28] mukaan olemassa. Materiaalia valittaessa tuleekin tarkastella kokonaisuutta ja asettaa jotkin ominaisuudet toisten edelle. Ominaisuuksien priorisointi riippuu käyttökohteesta. Seuraavaksi käydään läpi faasimuutosmateriaaleilla olennaisia ominaisuuksia.

Sulamispiste on tärkeä ominaisuus faasimuutosmateriaalille, koska faasimuutoksen on tapahduttava vallitsevissa olosuhteissa eli sulamispisteen on oltava matalampi kuin lämpölähteen lämpötila mutta korkeampi kuin ympäristön lämpötila. Materiaalin sulamislämpö (J/kg) määrittää latenttilämpövaraston energianvarastointikapasiteetin, joten se on yksi tärkeimmistä lämpövarastossa käytettävän faasimuutosmateriaalin ominaisuuksista. Suurella sulamislämmöllä varastoitava energiamäärä voidaan maksimoida tai käytettävä materiaalin määrä minimoida sovelluksissa, joissa varastoitava energiamäärä on vakio. Materiaaleilla, joilla on suuri sulamislämpö, on tavallisesti myös suuri ominaislämpökapasiteetti, joka kasvattaa energianvarastointikapasiteettia, sillä latenttilämpövarastojen lämpövarastointikapasiteetti muodostuu kokonaisuudessaan sulamislämmön lisäksi tuntuvasta lämmöstä lämpötilan ollessa sulamispisteen ala- tai yläpuolella. Kuva 4 osoittaa, että latenttilämpövarastossa sama määrä lämpöä voidaan varastoida huomattavasti pienemmällä lämpötilan muutoksella ($\Delta T_{PCM} = T_1$) kuin tuntuvaan lämpöön perustuvassa lämpövarastossa ($\Delta T_{tuntuva} = T_2$), vaikka jälkimmäisessä varastossa varastomateriaalin ominaislämpökapasiteetti olisi pienempi kuin ensimmäisessä. Faasimuutosmateriaaliksi kannattaa siis valita materiaali, jolla on mahdollisimman suuri sulamislämpö, jos materiaalin muut ominaisuudet ovat sopivia. [28]

Lämpötila T



Kuva 4: Lämpötila varastoidun lämmön funktiona latenttilämpövarastossa ja tuntuvaan lämpöön perustuvassa lämpövarastossa.

Faasimuutosmateriaalien tulee olla riittävän stabiileja sekä kemiallisesti että fysikaalisesti. Stabiilius vaikuttaa materiaalin kestävyuteen, kun se käy läpi toistuvia faasimuutoksia ja sen reaktioihin muiden materiaalien, kuten faasimuutosmateriaalin suojakuorten metallien kanssa. Faasimuutosmateriaalin ei tulisi syövyttää suojakuoren metallia eikä olla herkästi syttyvää. [28]

Lämmönsiirtonopeus materiaalin määrittää, kuinka herkästi lämpövarasto reagoi lämpötilan muutoksiin ja faasimuutoksiin kuluvaan aikaan eli kuinka nopeasti varasto voidaan ladata tai purkaa, mikä kertoo varastosta saatavan tehon. Faasimuutosmateriaalin lämmönjohtavuudella on suuri vaikutus lämmönsiirtonopeuteen. Matala lämmönjohtavuus voi aiheuttaa tilanteen, jossa materiaalista sulaa tai jähmettyy vain uloin kuori, jossa lämmönsiirtoa tapahtuu. Esimerkiksi uloin osa voi jähmettyä tai ylikuumentua ohi sulamispisteen samalla materiaalin sisuksen pysyessä alkuperäisessä faasissa. Ongelma on yleisempi materiaalin jähmettyessä kuin sulaessa, sillä materiaalin sulamista tehostaa luonnollinen konvektio aineessa, kun taas jähmettyminen tapahtuu lähinnä lämmönjohtumisen kautta. Useimmilla faasimuutosmateriaaleilla on suhteellisen matala ja osalla erittäin matala lämmönjohtavuus, mistä johtuen lämmönsiirtoa materiaaliin pitää usein tehostaa erilaisilla keinoilla, joita käsitellään luvussa 2.3.4. [29]

Edellä mainittujen ominaisuuksien lisäksi on tavoiteltavaa, että faasimuutosmateriaalin tiheyden muutos faasien välillä on mahdollisimman pieni.

Taulukko 1: Faasimuutosmateriaalien ominaisuuksia [28], [30], [31].

Materiaali	T_m (°C)	s (kJ/kg)	c_p (kJ/(kg·K))	ρ (kg/m ³)	k (W/(K·m))
Orgaaniset faasimuutosmateriaalit					
Oktadekaani	29	244	2,150 (sol) 2,180 (liq)	814 (sol) 724 (liq)	0,358 (sol) 0,152 (liq)
Trikosaani	48,4	302,5	2,181 (liq)	777,6 (liq)	0,124 (liq)
Oleiinihappo	13	75,5	1,744 (liq)	871 (liq)	0,103 (liq)
Steariinihappo	69	202	2,830 (sol) 2,380 (liq)	965 (sol) 848 (liq)	0,172 (liq)
Epäorgaaniset faasimuutosmateriaalit: Suolat ja suolahydraatit					
CaCl ₂ · 6H ₂ O	29	170– 192	1,420	1802 (sol) 1562 (liq)	1,008 (sol) 0,561 (liq)
NaCl	802	492	0,853	2160 (sol)	5,0
Metallit					
Gallium	29,8	80,1	0,237	5907	29,4
Magnesium	648	365	1,27 (sol) 1,37 (liq)	1740	156
Alumiini	661	388	0,9	2700	237

Suuri tiheysero aiheuttaa suuren tilavuuden muutoksen faasimuutoksessa, mikä vaikeuttaa lämpövaraston suunnittelua ja toimintaa. [28]

Kolme eri luokkaa, joihin faasimuutosmateriaalit jaetaan ovat orgaaniset materiaalit, epäorgaaniset materiaalit sekä eutektiset materiaalit [32]. Taulukko 1 listaa eräitä orgaanisia ja epäorgaanisia faasimuutosmateriaaleja ja niiden olennaisia ominaisuuksia. Suurin osa käytössä olevista faasimuutosmateriaaleista on orgaanisia materiaaleja, joita ovat parafiinit, rasvahapot, esterit ja alkoholit [29]. Orgaanisten materiaalien etuja ovat suuret sulamislämmöt, edullisuus ja muun muassa elektroniikan sovelluksiin sopivat alhaiset sulamislämpötilat. Sulamislämpötilat ovat etenkin parafiineilla epätarkkoja ja sulamista ennen materiaali pehmentyy. Ne myös säilyttävät suorituskykynsä lämpökierrossa eivätkä syövytä useimpia muita materiaaleja. Orgaanisten materiaalien suurin puute on huono lämmönjohtavuus, joka aiheuttaa suuren resistanssin lämpövirralle materiaalissa [28]. Muita huonoja puolia ovat usean orgaanisen materiaalin kohdalla syttymisherkkyys ja suuri tilavuuden muutos faasien välillä [29].

Epäorgaanisia faasimuutosmateriaaleja ovat monet suolat ja suolahydraatit, kuten natriumkloridi ja esimerkiksi monien oksidien, karbonaattien ja sulfaattien hydroksidit sekä metallit [32]. Tässä kappaleessa käydään ensin läpi suoloja ja suolahydraatteja, sillä niillä on samankaltaiset ominaisuudet. Suolilla ja niiden hydraateilla on monia parempia ominaisuuksia verrattuna orgaanisiin yhdisteisiin. Niillä on korkeat ja tarkat sulamislämpötilat, jotka soveltuvat paremmin esimerkiksi energian varastointiin aurinkokeräimistä. Suolojen ja suolahydraattien sulamislämmöt ovat samaa suuruusluokkaa

kuin orgaanisten yhdisteiden, mutta suuremmista tiheyksistä johtuen sulamislämmöt tilavuusyksikköä kohden ovat suurempia epäorgaanisilla materiaaleilla [29]. Suurimpia etuja ovat orgaanisia materiaaleja paremmat lämmönjohtavuudet, jotka ovat kuitenkin huomattavasti metalleja huonompia ja pienemmät tiheyden muutokset faasien välillä. Suolien ja suolahydraattien käyttöä faasimuutosmateriaaleina rajoittaa niiden metalleille aiheuttama korroosio, joka lyhentää varastojen käyttöikää nostaten samalla kustannuksia. Monet epäorgaaniset yhdisteet ovat epävakaita toistuvissa lämpötilojen muutoksissa. Suolat saattavat hajota osiin toistuvissa sykleissä ja hydraattien vesi erottuu ja höyrystyy usein pois kuumennuksessa. [28]

Metallit ovat vähiten käytetty epäorgaanisten faasimuutosmateriaalin ryhmä johtuen niiden matalista sulamislämmöistä. Metallit ovat kuitenkin lupaava materiaalityyppi varastoihin, jotka toimivat korkeissa lämpötiloissa johtuen niiden hyvästä lämmönjohtavuudesta, korkeista sulamispisteistä ja vakaista ominaisuuksista korkeissa lämpötiloissa. Lupaavia metalleja korkeissa lämpötiloissa toimiviksi faasimuutosmateriaaleiksi ovat sinkki, magnesium ja alumiini seoksineen. (Fleischer, 2015) Esimerkiksi alumiinin ja piin seos $AlSi_{12}$ on ominaisuuksiltaan potentiaalinen faasimuutosmateriaali korkeisiin lämpötiloihin, sillä sen sulamispiste on $576\text{ }^{\circ}C$, ja sulamislämpö 560 kJ/kg sekä lämmönjohtavuus sulana $160\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ovat molemmat suuria [33].

Eutektiset faasimuutosmateriaalit ovat seoksia, joiden sulamispisteet riippuvat seosmateriaalin suhteista, joten seostamalla voidaan luoda eri tarkoituksiin sopivia faasimuutosmateriaaleja. Eutektisten materiaalien etuja ovat suuret tiheydet ja hyvät lämmönjohtavuudet, mutta niiden sulamislämmöt ja ominaislämpökapasiteetit ovat tyypillisesti matalia. [32]

Alijäähtyminen on useiden faasimuutosmateriaalin ominaisuus, jota voidaan käyttää hyväksi varaston toimintaa suunniteltaessa. Lämpövarastojen suurimpia ongelmia ovat lämpöhäviöt, joita ympäristön lämpötilaa korkeampi lämpövaraston lämpötila aiheuttaa. Osa faasimuutosmateriaaleista voi jäähtyä sulamispistettä matalampaan lämpötilaan säilyttäen edelleen nestemäisen olomuodon, jolloin puhutaan alijäähtymisestä. Nestemäisessä olomuodossa materiaaliin on varastoitunut sulamisessa sitoutunut lämpö, mutta lämpöhäviöt ovat pieniä lämpötilan ollessa lähellä ympäristön lämpötilaa [34]. Kun alijäähtyneessä materiaalissa tapahtuu kiteytyminen eli jäähmettyminen kiteiseen muotoon, sulamislämmön verran energiaa vapautuu. Jos kiteytyminen tapahtuu spontaanisti, varastoitu lämpö purkautuu ennenaikaisesti, johon voivat johtaa esimerkiksi paine-erot ja epäpuhtaudet materiaalissa, joista kiteytyminen voi lähteä liikkeelle [34].

Turunen et al. [35] käsittelee artikkelissaan tutkimusta, jossa tutkitaan erytritolia ristosilloitetussa natriumpolyakrylaattimatriisissa faasimuutosmateriaalina. Eräät sokerialkoholit, kuten erytritoli alijäähtyvät vakaasti, jolloin riski ennenaikaiseen kiteytymiseen ei ole niin suuri kuin monilla muilla materiaaleilla. Kun materiaalin lämpötila laskee lasittumispisteen

alapuolelle, se lasittuu eli materiaali on tällöin amorfisessa kiinteässä muodossa. Lasittuneessa muodossa materiaali jää kunnolla kiteytymättä, koska molekyyileillä ei ole tarpeeksi liike-energiaa kiderakenteen muodostamiseen. Kiderakenne on matalaenergisin tila ja sen muodostumisessa sulamislämmön verran energiaa vapautuu, joten sulamislämpöä voidaan varastoida lasittuneessa materiaalissa vuosia. Varastoitu sulamislämpö voidaan purkaa nostamalla materiaalin lämpötilaa pisteeseen, jossa kiteytyminen voi tapahtua, jolloin on kyse kylmäkiteytymisestä.

2.3.2 Latenttilämpövarastojen rakenne ja lämmönsiirto

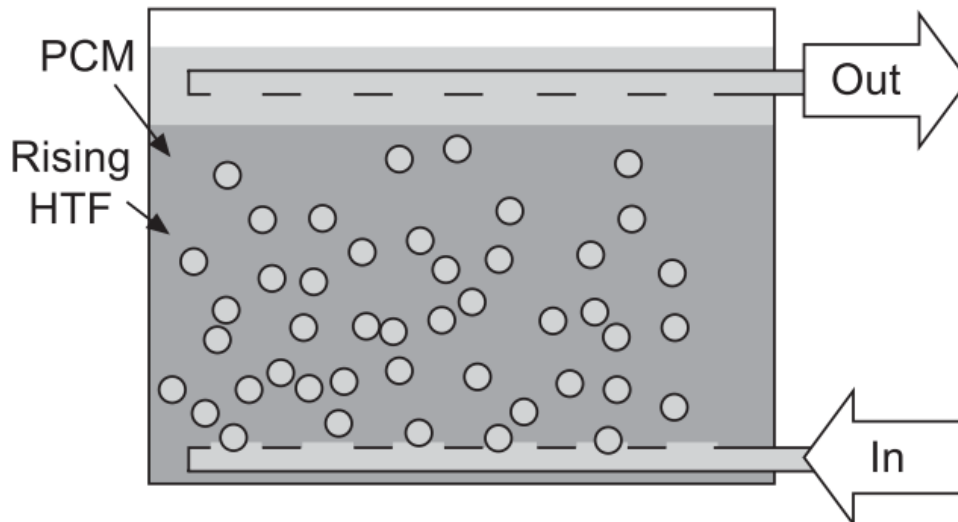
Faasimuutosmateriaali sijoitetaan useimmiten suojakuoreen latenttilämpövarastoissa, jotta nestemäisessä muodossa olevaa ainetta voidaan hallita ja tilavuudenmuutokset pystytään huomioimaan paremmin. Suojakuoret eivät kuitenkaan ole ainut tapa faasimuutosmateriaalin sijoittamiseen latenttilämpövarastossa, sillä materiaali voi olla myös suorassa kontaktissa lämmönsiirtonesteen seassa. Faasimuutosmateriaalin matalan lämmönjohtavuuden takia lämmönsiirtoa materiaaliin joudutaan usein edistämään erilaisilla keinoilla, joita esitellään luvussa 2.3.4. Mehlingin ja Cabezan [36] mukaan lämmönsiirto voidaan toteuttaa latenttilämpövarastoissa kolmella eri tavalla, jotka käydään läpi tässä luvussa.

Yksinkertaisimmissa latenttilämpövarastoissa lämmönsiirto toteutetaan suojakuoren ulkopinnalta. Näiden varaston teho on tavallisesti matala johdun hitaasta lämmönsiirrosta. Tämän tyyppin lämpövarastoja voidaan käyttää esimerkiksi lämmönsäätelyyn kylmäsäilytyksessä tai elektroniikan lämpötilan tasaamisessa. Yksinkertainen esimerkki kyseisestä varastotyypistä on kylmälaukku, jonka sisällä on jäädytetty kylmäpakkaus. [36]

Toinen vaihtoehto on toteuttaa lämmönsiirto varaston sisäisiltä lämmönsiirtopinnoilta, jolloin lämmönsiirtoneste siirtää lämpöä varastoon ja sieltä ulos. Tyypillinen sisäisiä lämmönsiirtopintoja käyttävä varasto on lämmönvaihdintyyppinen varasto, jossa toisella lämmönvaihtimen puolella on faasimuutosmateriaalia ja toisella lämmönsiirtonestettä. Lämmönvaihdin koostuu tyypillisesti varaston läpi kulkevista putkista, joissa lämmönsiirtoneste virtaa. Lämmönvaihdintyyppisissä latenttilämpövarastoissa faasimuutosmateriaalin osuus on suuri, sillä varaston kokonaistilavuudesta 95 % voi olla faasimuutosmateriaalia, minkä seurauksena varastointikapasiteetti tilavuusyksikköä kohden eli varastointitiheys on suuri. [36]

Varaston sisäisiltä pinnoilta tapahtuva lämmönsiirto on kyseessä myös moduulityyppisessä latenttilämpövarastossa, jossa faasimuutosmateriaali on sijoitettu lämmönsiirtonesteessä olevien moduuleiden sisään. Moduulit voivat olla muodoltaan eri mallisia, kuten palloja tai särmiöitä ja ne voidaan valmistaa esimerkiksi metallista. Moduulityyppisen varaston etu on valmistuksen joustavuus, sillä samankokoisten moduulien valmistaminen on kustannustehokasta. Samoista moduuleista voidaan rakentaa eri kokoisia

varastoja moduulien määrää muuttamalla. Moduulityyppisessä varastossa lämmönsiirtonesteen osuus on yleensä suurempi kuin muissa varastoissa, joissa lämmönsiirto tapahtuu varaston sisäpinnoilta, mistä johtuen varastosta saatava teho on matalampi. [36]



Kuva 5: Latenttilämpövarasto, jossa lämmönsiirtoneste (HTF) ja PCM-materiaali ovat suorassa kosketuksessa toistensa kanssa. [36]

Lämmönsiirto varaston sisäpinnoilta voidaan toteuttaa myös suoralla kontaktilla faasimuutosmateriaalin ja lämmönsiirtonesteen välillä. Tämän tyyppin varastossa lämmönsiirtoneste pumpataan faasimuutosmateriaalin pohjalle tai pinnalle kuplina ja aineiden tiheyserosta johtuen se nousee tai laskee sulan faasimuutosmateriaalin läpi samalla jähmettämällä sitä, mitä kuvaa Kuva 5. Tapauksessa, jossa faasimuutosmateriaali on tiheämpää, lämmönsiirtoneste on jähmettyneen faasimuutosmateriaalin pinnalla. Kun faasimuutosmateriaalia sulatetaan, kuumaa lämmönsiirtonestettä pumpataan faasimuutosmateriaalin pohjalle, ja lämmönsiirtonesteelle muodostuu reitti ylös läpi sulavan faasimuutosmateriaalin. Lämmönsiirtonesteen kiertoa ja sitä kautta lämmönsiirtoa voidaan tehostaa käyttämällä sähkövastuksia lämmönsiirtonesteelle reitin sulattamiseen [37]. Kuljettuaan faasimuutosmateriaalin läpi lämmönsiirtoneste siirretään putkessa lämpölähteeseen, jos varastoa ladataan tai varaston lämpöä käytettäessä lämpönieluun, josta se palaa uudelleen pumpattavaksi faasimuutosmateriaaliin. Etuja faasimuutosmateriaalin ja lämmönsiirtonesteen suorassa kontaktissa ovat aineiden liikkeestä syntyvä lämmönvirtaus, joka parantaa lämmönsiirtoa ja varaston yksinkertaisuus lämmönvaihtimien ja niiden aiheuttaman lämmönjohtumisen heikentymisen puuttuessa. Varastoon ei tarvitse myöskään tehdä muita parannuksia lämmönjohtavuuteen, sillä se on jo valmiiksi korkea. Jotta järjestelmä toimisi, tulee lämmönsiirtonesteellä ja faasimuutosmateriaalilla olla selkeä tiheysero eivätkä ne saa sekoittua tai reagoida keskenään.

Esimerkkejä faasimuutosmateriaaleista ja lämmönsiirtonesteistä, joita voidaan käyttää yhdessä suoran kontaktin latenttilämpövarastoissa ovat parafiini ja vesi sekä suolahydraatit ja öljy. [36]

Kolmas lämmönsiirron toteutustapa on vaihtaa koko lämpövaraston väliaine, joka sisältää faasimuutosmateriaalin. Faasimuutosmateriaali on pienien mikro- tai nanoluokan komponenttien sisällä, jotka lämmönsiirtonesteen kanssa muodostavat faasimuutosnesteeseen, joka säilyy juoksevana eri lämpötiloissa ja jota voidaan käsitellä, kuten nestettä. Jos faasimuutosmateriaali ei liukene lämmönsiirtonesteeseen, ne voivat myös muodostaa homogeenisen seoksen ilman kapselointia. Sulamislämmön hyödyntämisen ansioista faasimuutosnesteeseen voidaan varastoida enemmän lämpöä kuin samaan määrään esimerkiksi vettä voitaisiin, ja lämmönsiirtokerroin on muita latenttilämpövarastotyyppisiä parempi, koska varaston väliaine virtaa ja faasimuutosmateriaali on pienissä kappaleissa. Lämpövarastointikapasiteetiltaan faasimuutosneste kuitenkin häviää latenttilämpövarastoille, joissa faasimuutosmateriaalin osuus on suurempi. [36]

Edellä mainitut varastotyypit eroavat toisistaan lämmönsiirron toteutuksen perusteella ja faasimuutosmateriaalin sijoittamisessa. Porrastetussa latenttilämpövarastossa voidaan käyttää näitä tekniikoita, mutta eroavaisuutena siinä käytetään useaa faasimuutosmateriaalia. Kun lämpövarasto toimii suurella lämpötilaerolla, optimaalinen varaston toiminta voidaan saavuttaa monella faasimuutosmateriaalilla, joiden sulamispiste kasvaa portaittain. Suurella lämpötilaerolla väliaineen lämmittämiseen perustuvan lämpövaraston ja latenttilämpövaraston varastoimat lämpömäärät tasoittuvat lähemmäksi toisiaan, kun pienemmällä erolla latenttilämpövarasto pystyy varastoimaan huomattavasti enemmän lämpöä. Usealla faasimuutosmateriaalilla varastoitava lämpömäärä samalla lämpötilavälillä saadaan korkeammaksi, koska suurempi osa lämmöstä kuluu latauksessa faasimuutoksiin lämpötilannousun sijaan. [32]

2.3.3 Faasimuutosmateriaalien kapselointi

Suojakuoret ovat yksinkertaisimmillaan metallisia kapseleita, mutta myös monimutkaisempia polymeerisiä rakenteita voidaan käyttää. Suojakuorta suunniteltaessa on otettava huomioon tiheyden muutos faasimuutoksessa, joka aiheuttaa tyhjän ilmatilan suojakuoren sisään aineen ollessa kiinteänä. Koska ilma on tehokas eriste, se huonontaa lämmönjohtavuutta. Lämpövarastot on suunniteltava niin, ettei lämpölähde ole ilman puolella eli tavallisesti yläpuolella suojakuorta. Suojakuoriin lisätään erilaisia lämmönsiirtoa parantavia rakenteita, kuten levyjä. Lisäksi suojakuorien materiaalia valittaessa on otettava huomioon sen yhteensopivuus faasimuutosmateriaalin kanssa, sillä etenkin epäorgaaniset faasimuutosmateriaalit syövyttävät monia metalleja. [38]

Faasimuutosmateriaaleja voidaan kapseloida eri kokoluokan kapseluihin. Makroskooppiset suojakuoret ovat useimmiten metallisia astioita, joissa vuotojen mahdollisuus pyritään estämään hitsauksilla ja minimoimalla saumojen määrä. Esimerkiksi muovista valmistettuja ohuita kalvoja voidaan kuitenkin käyttää faasimuutosmateriaalin kapselointiin tilanteissa, joissa niiden rakenteellinen kestävyys ei ole ongelma. Joustavien kalvojen, jotka sopeutuvat tilavuuden muutokseen etu on, ettei faasimuutoksissa jää tyhjää tilaa suojakuoren sisälle. Mikro- tai nanoluokan kapseluihin säilytety faasimuutosmateriaali voidaan sekoittaa muun materiaalin sekaan, kuten lämmönsiirtonesteeseen. [28]

2.3.4 Lämmönsiirron tehostaminen faasimuutosmateriaaleissa

Kuten taulukko 1 näyttää, useimpien muilta ominaisuuksiltaan hyvien eli matalan sulamispisteen ja korkean sulamislämmön faasimuutosmateriaalien lämmönjohtavuus on erittäin matala. Huono lämmönjohtavuus laskee lämpövaraston suorituskykyä ja saattaa aiheuttaa sen osien vaurioitumista. Sulava faasimuutosmateriaali voi ylikuumentua, jos lämpöä ei johdu tarpeeksi kiinteässä olomuodossa olevaan aineeseen. Samoin materiaalin jähmettyessä huono lämmönjohtavuus aiheuttaa jähmettymisen vain sen pinnalta. Paksuuntuva kiinteän aineen kerros entisestään huonontaa lämmönjohtavuutta. Fleischer [28] esittelee tapoja parantaa lämmönsiirtoa faasimuutosmateriaaleihin latenttilämpövarastoissa.

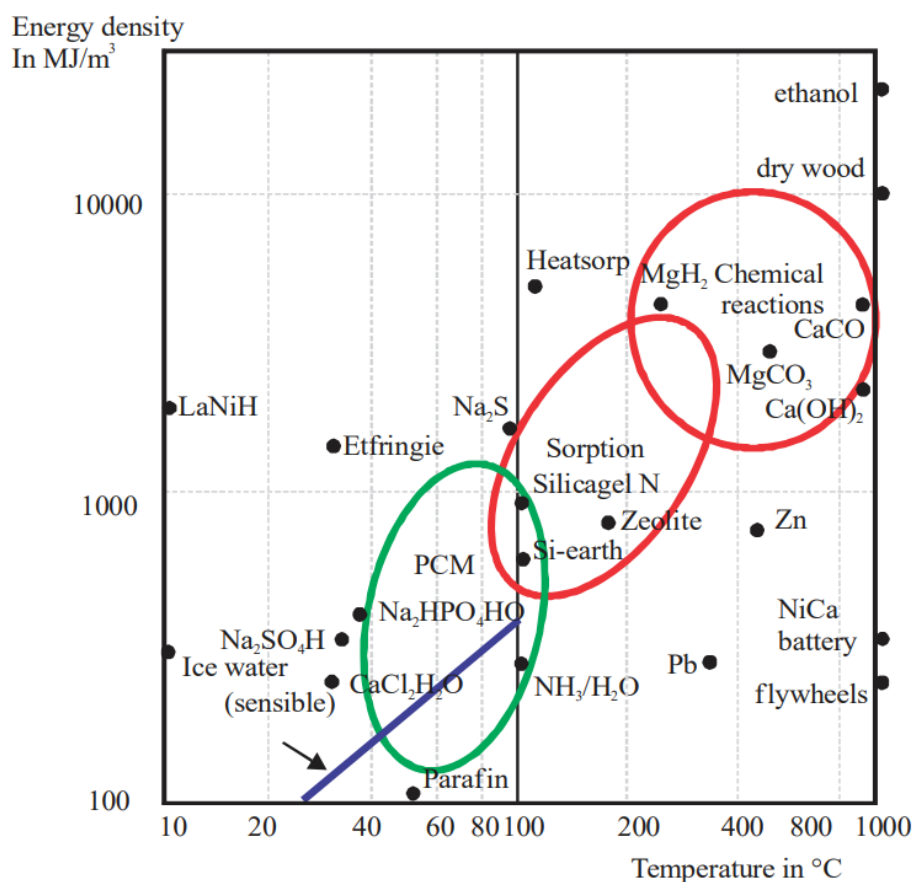
Makroskooppiset metalli- tai hiilikuituosat ovat yleisin ja yksinkertaisin tapa lämmönsiirron tehostamiseen. Sekä metalleilla että hiilikuidulla on hyvä lämmönjohtavuus, joka tekee niistä hyviä materiaaleja tähän tarkoitukseen. Hiilikuituosien etuina ovat keveys ja hyvä lämmönjohtavuus, eikä niissä esiinny korroosiota tai muita kemikaalisia reaktioita. Faasimuutosmateriaalin astiaan tai suojakuoreen voidaan rakentaa metallinen sisäänrakennettu lämpönieluna tai -lähteenä toimiva muoto, kuten palkkeja tai lieriöitä. [28]

Ohuet hiilikuitulangat, joista voidaan tehdä erilaisia lämpöä johtavia rakenteita faasimuutosmateriaalin sisään vievät vähän tilaa ja ovat kevyitä ratkaisuja lämmönsiirron parantamiseen. Metalleja tai hiilikuituja voidaan käyttää myös vaahtojen valmistukseen. Metall- tai hiilikuituvahto, jonka kuplat on täytetty faasimuutosmateriaalilla voi parantaa lämmönjohtavuutta jopa 80-kertaisesti. [28] Myös vaahtoissa huonona puolena on faasimuutosmateriaalin käytössä olevan tilan ja sitä kautta varastoitavan energiamäärän vähentyminen.

2.4 Kemialliset lämpövarastot

Kemiallisiin lämpövarastoihin liittyy suuria odotuksia ja kehittymismahdollisuuksia. Kuten Kuva 6 osoittaa, kemiallisten reaktioiden energiatiheddet

ovat suuria ja niistä vapautuvaa lämpöä hyödyntämällä voidaan saavuttaa korkeita lämpötiloja. Kemialliset lämpövarastot ovat myös ideaalisia lämmön kausivarastoinnissa, sillä varastoinnin aikana häviöt voivat olla käytännössä olemattomia, jos esimerkiksi reaktion aineet pidetään erillään toisistaan. Lämpökemialliset lämpövarastot jaetaan kemiallisiin reaktioihin ja sorptioprosesseihin perustuviin varastoihin. [39]. Toistaiseksi kemiallisia lämpövarastoja on lähinnä tutkimuskäytössä, johtuen esimerkiksi korkeista kustannuksista eikä tekniikka ole vielä laajamittaisessa käytössä esimerkiksi lämminvesivaraajissa [40].



Kuva 6: Useiden kemiallisen reaktioiden ja sorptioprosessien (punaiset ympyrät) energiatiheddet ovat korkeampia kuin tuntuvan lämmön (sininen) tai faasimuutosten (vihreä) [30].

2.4.1 Kemiallisiin reaktioihin perustuvat lämpövarastot

Kemiallisissa reaktioissa lähtöaineet reagoivat muodostaen reaktiotuotteita sitoen tai vapauttaen energiaa. Jos reaktiossa vapautuu energiaa, on kyseessä eksotermisen reaktion. Endotermisessä reaktiossa energiaa sitoutuu. Lämpövaraston tapauksessa oleellista on, että varastoa voidaan ladata ja purkaa,

joten varaston reaktioksi on valittava reaktio, joka on reversiibeli eli reaktio, joka voi tapahtua kumpaankin suuntaan. Kemiallisilla reaktioilla on korkea energiatiheys massaa kohti. Tilavuutta kohti energiatiheys riippuu reaktion lähtöaineiden ja tuotteiden tiheyksistä ja olomuodoista, ja kaasujen tapauksessa se on matalampi. [39]

Kemialliset reaktiot saattavat tarvita tietyn kynnyslämpötilan tai katalyytin, joten reaktion tapahtuminen voidaan estää helposti kyseisten tekijöiden puutteella. Tästä johtuen varastointiaika voi olla käytännössä rajaton pienillä häviöillä kemiallisissa lämpövarastoissa. Reaktion lähtöaineet voidaan myös pitää erillään toisistaan, ja näin estää reaktion tapahtuminen. Reaktioiden kynnyslämpötila on kuitenkin useiden reaktioiden käytön lämpövarastoinnissa esteenä. Jos kynnyslämpötila on hyvin korkea, on varaston käyttäminen useimmissa käyttökohteissa mahdotonta. Jos varaston lataamiseksi tarvitaan esimerkiksi 120 °C lämpötilassa olevaa lämpöä, ei varastoa voi käyttää kaukolämpöverkossa, sillä kaukolämmön lämpötila vaihtelee välillä 65–115 °C [41]. [39]

Esimerkki kemialliseen reaktioon perustuvasta lämpövarastosta on kalkin (CaO) ja kalsiumhydroksidin (Ca(OH)₂) reaktio. Tätä varastoa voidaan käyttää 400–600 °C lämpötiloissa ja sen energiatiheys on 373 Wh/kg. Reaktion vaatiman lämpötilan takia kyseistä lämpövarastoa on mahdollistaa käyttää esimerkiksi teollisuuden korkean lämpötilan hukkalämmön varastoimiseen. [39]

2.4.2 Sorptioprosesseihin perustuvat lämpövarastot

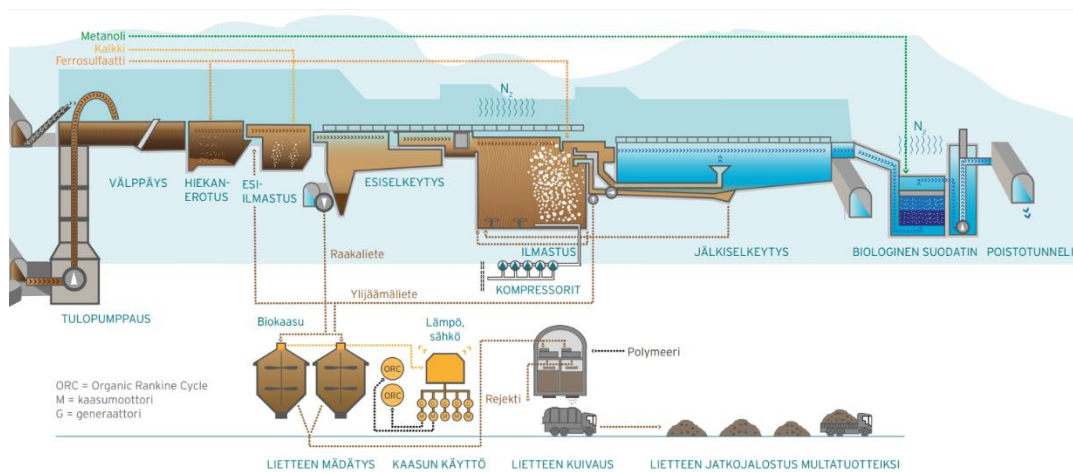
Sorptioprosesseilla tarkoitetaan adsorptio- ja absorptioprosesseita. Sorption käänteinen tapahtuma on desorptio. Sorptiossa energiaa vapautuu ja desorptiossa sitoutuu. Adsorptiolla tarkoitetaan prosessia, jossa kaasun molekyylit muodostavat kalvon kiinteään aineen pintaan. Absorptiossa puolestaan absorboivan aineen molekyylit absorboituvat toisen aineen sisään ilman kemiallista reaktiota. [42]

Adsorptiossa adsorboivan kaasumaisen aineen molekyylit muodostavat joko kemiallisia sidoksia adsorboituvan materiaalin atomien kanssa, jolloin puhutaan kemisorptiosta tai kiinnittyvät siihen heikommilla van der Waalsin voimilla, jolloin on kyse fysisorptiosta. Adsorptiossa sidosten muodostuminen vapauttaa energiaa, jolloin adsorptioon perustuvaa lämpövarastoa puretaan. Varastoa ladattaessa lämpöenergiaa sitoutuu rikkoen sidoksia tai voimia aineiden välillä. [42]

Esimerkkejä lämpövarastotarkoituksessa käytetystä absorptioreaktiosta on veden ja LiCl välinen absorptio, jossa varaston purkulämpötila on 30 °C ja energiatiheys 253–400 kWh/m³. Yleinen adsorptioprosessi lämpövarastoinnissa ja kosteuden poistossa ilmasta on veden adsorptio silikageeliin eli amorfiseen piidioksidiin, jossa vapautuu lämpöä 32 °C lämpötilassa. Prosessin energiatiheys on välillä 50–125 kWh/m³. [42]

3 Jätevedenpuhdistusprosessi

Tavallisesti jätevedenpuhdistamon prosessit sisältävät mekaanisen, biologisen ja kemiallisen puhdistusprosessin. Tyypillisesti jätevedenpuhdistamossa on ainakin seuraavat puhdistusvaiheet: välppäys, hiekanerotus, esiselkeytys, ilmastus ja jälkiselkeytys, kuten Viikinmäen jätevedenpuhdistamossa, jota Kuva 7 esittää. Biologiset prosessit ovat lämpötilan suhteen herkimpiä, sillä niissä käytettävät bakteerit vaativat tarpeeksi korkean lämpötilan kasvaakseen riittävällä nopeudella. [43]



Kuva 7: Viikinmäen jätevedenpuhdistamon puhdistusprosessi [3].

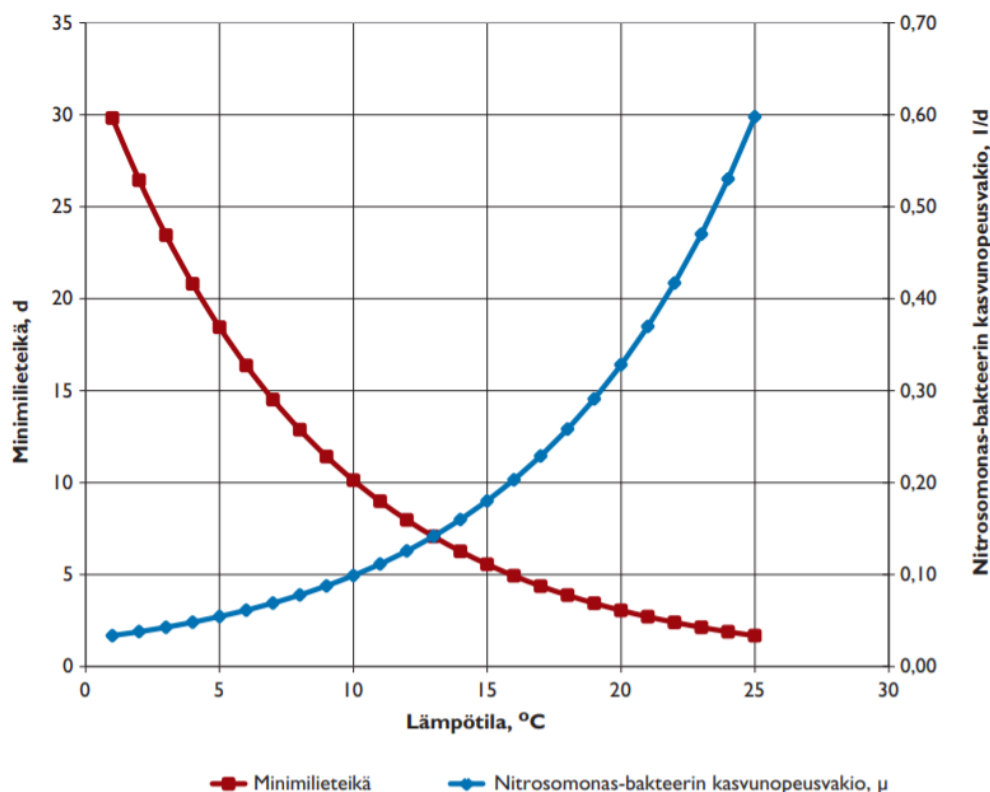
Jäteveden kaksi tärkeintä poistettavaa ravinnetta ovat vesistöjen rehevöitymistä aiheuttavat typpi ja fosfori. Typenpoisto on jätevedenpuhdistusprosessin herkimmin lämpötilan laskuun reagoiva osa. Puhdistamolle saapuvassa jätevedessä typpi on sitoutuneena orgaanisiin yhdisteisiin. Hydrolyysissä typpi hajotetaan ammoniummuotoon. [43]

3.1 Lämpötilan vaikutukset typenpoistoon

Varsinainen typenpoisto tapahtuu biologisella kaksivaiheisella prosessilla, jonka osat ovat nitrifikaatio ja denitrifikaatio. Prosessissa hyödynnetään bakteereja, jotka tarvitsevat typpeä ja happea elintoimintoihinsa. Nitrifikaatio tapahtuu ilmastusaltaissa ja siinä nitrifikaatiobakteerit tuottavat energiaa itselleen käyttäen ammonium-muodossa olevaa typpeä ja happea, jolloin typpi muuttuu lopulta nitraatiksi. Ilmastusaltaita käytetään aktiivilieteprosessissa, jossa mikrobit elävät vapaina lietteen seassa tai kiinnittyneinä orgaanisten tai epäorgaanisten hiukkasrykelmien pintaan, kun taas kantoaineprosessissa, kuten biologisessa suodattimessa, mikrobit ovat kiinnittyneet kasvualustaan [43]. Nitrifikaation tehokkuuteen eli poistetun typen osuuteen vaikuttaa muun muassa ilmastusaltan koko, viipymä altaassa ja

etenkin lämpötila. Jos lämpötila laskee alle 12 °C typenpoiston tehokkuus laskee merkittävästi. Tällöin hyväksytyjen typpipäästöjen saavuttamiseksi viipymää altaissa ja ilmastustilavuutta joudutaan kasvattamaan, mikä voi aiheuttaa ongelmia jätevedenpuhdistamoiden rajallisissa tiloissa. [43]. Kuva 8 punainen käyrä esittää lämpötilan vaikutuksen vaadittavaan lieteikään eli viipymään ilmastusaltaassa, jotta vaadittava typenpoisto saavutetaan. Kuvaajasta nähdään, että lämpötilan laskiessa nitrifikaatiobakteerien kasvunopeus laskee, mikä kasvattaa minimilieteikää. Kasvunopeusvakio alkaa laskea nopeasti 12 °C alapuolella.

Nitrifikaation jälkeen puhdistettava vesi siirtyy hapettomaan altaaseen, jossa denitrifikaatiobakteerit käyttävät nitraatin sisältämää happea pelkistäten nitraatin typpikaasuksi. Tyypeä ja fosforia poistuu prosessista myös ylijäämälietteen mukana, mutta niiden poistoa tehostetaan edellä kuvatulla biologisella typenpoistolla ja kemiallisella fosforinpoistolla. [43]

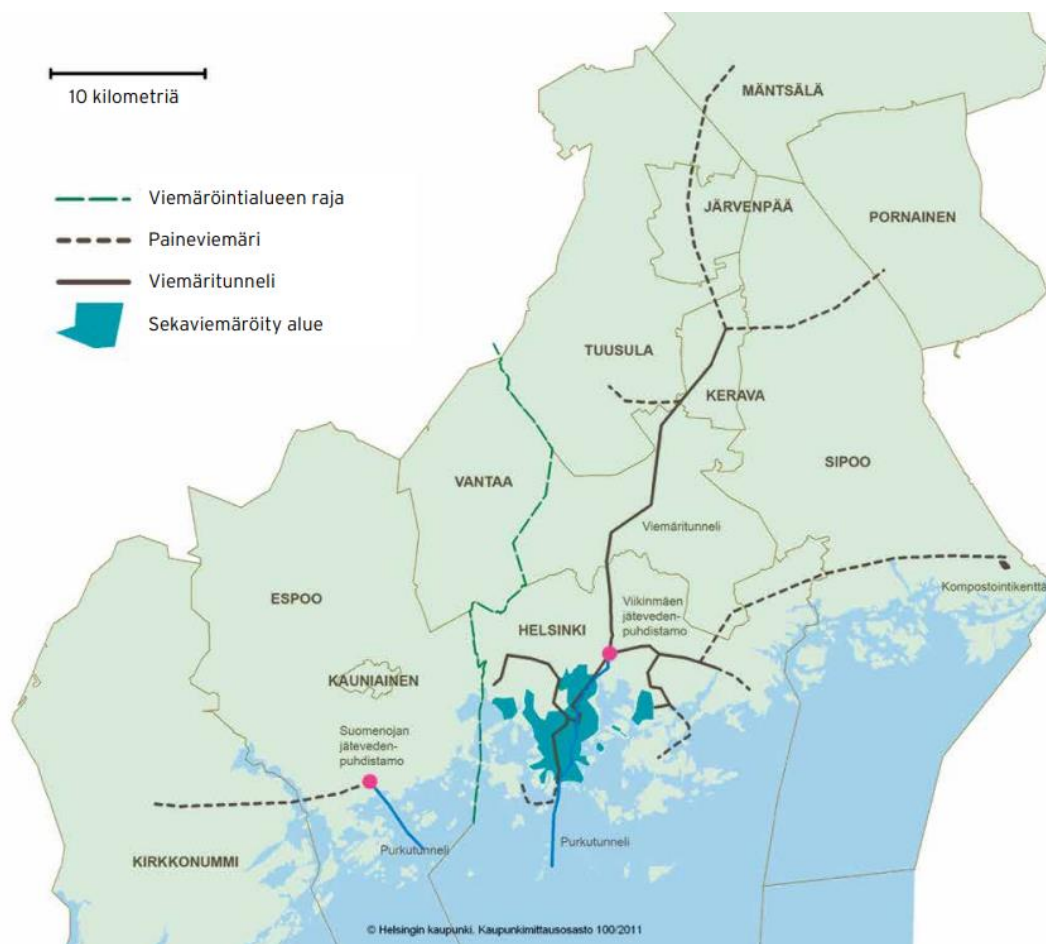


Kuva 8: Lämpötilan vaikutus nitrifikaationopeuteen ja lieteikään typenpoistossa. Kuva: Matti Valve [43].

3.2 Pääkaupunkiseudun jätevedenpuhdistamot

Pääkaupunkiseudun jätevedet käsitellään HSY:n kahdessa jätevedenpuhdistamossa Helsingin Viikinmäessä ja Espoon Suomenojalla. Pääkaupunkiseudun lisäksi puhdistamoille saapuu jätevesiä muualta Uudeltamaalta.

Kuva 9 esittää jätevedenpuhdistamoiden viemäröntialueet. Siitä voidaan myös nähdä, että suuri osa Helsingin kantakaupungista on sekaviemäröityä aluetta eli aluetta, jossa hulevedet johdetaan jätevesiviemäriin. [3]



Kuva 9: Viikinmäen ja Suomenojan jätevedenpuhdistamoiden viemäröntialueet ja alueiden pääviemärit [3].

3.2.1 Viikinmäen jätevedenpuhdistamo

Viikinmäen jätevedenpuhdistamo on pohjoismaiden suurin jätevedenpuhdistamo ja se käsittelee yli 800 000 ihmisen jätevedet ja alueen teollisuuden jätevesiä. Puhdistamolle johdetaan jätevedet Helsingistä, Itä-Vantaalta, Tuusulasta, Keravalta, Järvenpäästä, Sipoosta, Mäntsälästä ja Pornaisista. Keskimääräinen puhdistamolle saapuva jäteveden virtaama on 280 000 m³ vuorokaudessa, mutta suurimmillaan se voi olla jopa 600 000 m³ vuorokaudessa. Puhdistamon jätevedenkäsittely tapahtuu kallioon louhituissa luolastoissa aktiivilieteprosessina. Puhdistamolla on yhdeksän ilmastusallasta, joiden tilavuus on yhteensä 103 500 m³. Puhdistusprosessissa erotettavasta lietteestä tuotetaan biokaasua, jota käytetään sähkön- ja lämmöntuotantoon.

Typen reduktio eli poistettavan typen osuus puhdistamolla on 91 % ja fosforin 97 %. [3]. Viikinmäessä puhdistetun jäteveden lämpöä hyödynnetään Katri Valan lämpöpumppulaitoksella, jota käsitellään luvussa 3.3 [4]. Pääkaupunkiseudun väkimäärän odotetaan kasvavan tulevaisuudessa ennestään, joka lisää puhdistamon jo ennestään suurta kuormitusta. Tämän diplomityön ensimmäisessä tapaustutkimuksessa tutkitaan mahdollisuuksia puhdistamon prosessin tehostamiseen saapuvaa jätevettä lämmittämällä.

3.2.2 Suomenojan jätevedenpuhdistamo

Espoon Suomenojan jätevedenpuhdistamolla käsitellään 310 000 ihmisen ja Ämmässuon kaatopaikan jätevedet sekä teollisuuden jätevesiä. Puhdistamolle saapuvan jäteveden keskimääräinen virtaama on noin 100 000 m³ vuorokaudessa ja jätevesiä saapuu Espoosta, Kauniaisista, Kirkkonummelta sekä Länsi-Vantaalta. Jätevedenpuhdistamo on vanhanaikainen kattamaton ulkolaitos, ja laitos toimii aktiivilieteprosessilla. Typenpoisto toteutetaan denitrifikaatio-nitrifikaatio -prosessilla kymmenessä ilmastusaltaassa, joiden tilavuus on yhteensä 36 000 m³. [5]. Puhdistamolla puhdistetun veden lämmöntalteenotto tapahtuu Suomenojan voimalaitoksen lämpöpumppulaitoksella, jota käsitellään luvussa 3.3 [44].

Väkimäärän kasvaessa ja esimerkiksi ravinnepäästöjen rajojen tiukentamisessa Suomenojan puhdistamon kapasiteetti ei riitä kaikkien alueen jätevesien käsittelemiseen, joten se on poistumassa käytöstä, kun Espoon Blominmäkeen valmistuu uusi jätevedenpuhdistamo, joka esitellään luvussa 3.2.3 [45].

3.2.3 Blominmäen uusi jätevedenpuhdistamo

Espoon Blominmäkeen vuonna 2022 valmistuva jätevedenpuhdistamo korvaa Suomenojan käytöstä poistuvan jätevedenpuhdistamon. Jätevedenpuhdistamo rakennetaan maan alla sijaitsevaan luolastoon ja tulee käsittelemään alueelta, jolla asuu noin 400 000 ihmistä. Puhdistamolla käsitellään jätevedet Espoosta, Kauniaisista, Kirkkonummelta, Siuntiossa ja Vantaan länsiosista. Puhdistamo on mitoitettu puhdistamaan 550 000 asukkaan jätevedet 2040-luvulla perustuen arvioihin alueen väkiluvun kasvusta. Puhdistamon kapasiteettia voidaan tarvittaessa laajentaa vastaamaan yli miljoonan asukkaan jätevedentuotantoa laajentamalla puhdistamon maanalaisia tiloja. Puhdistettu jätevesi poistetaan uuden purkutunnelin kautta Suomenojan jätevedenpuhdistamon purkutunneliin, jota pitkin se poistetaan merelle. [45]. Myös luvussa 3.3 käsiteltävä Suomenojan voimalaitoksen lämpöpumppulaitos pysyy käytössä, kun Blominmäessä puhdistetusta jätevedestä otetaan talteen lämpöä siellä [44].

3.3 Jätevedenpuhdistamoiden lämmöntalteenotto

Jätevedenpuhdistamoilla on käytössä tavallisesti lämmöntalteenotto, joka kerää osan puhdistetun veden lämmöstä talteen ennen sen poistamista esimerkiksi mereen. Viikinmäellä puhdistettu vesi kulkee Helenin Katri Valan lämpöpumppulaitoksen läpi, jossa tuotetaan kaukolämpöä ja -jäähdytystä [4]. Suomenojan puhdistetusta jätevedestä tuotetaan kaukolämpöä ja jäähdytysteho puolestaan Fortumin Suomenojan voimalaitoksen lämpöpumppulaitoksessa [44].

Katri Valan lämpöpumppulaitoksella on kuusi käytössä olevaa ja yksi rakenteilla oleva lämpöpumppu. Laitoksen tuottaa nykyisellään 123 MW:n teholla lämpöä ja 82 MW:n teholla jäähdytystä. Tavoitteena on seitsemännen lämpöpumpun valmistuminen vuonna 2023, jonka jälkeen laitoksen teho on 155 MW kaukolämmöntuotannon ja 103,5 MW jäähdytyksen osalta. [4]. Suomenojan voimalaitoksen lämpöpumppulaitos tuottaa kaukolämpöä noin 70 MW teholla [44].

Poistettavan veden lämpötilan on suotavaa olla lähellä meriveden lämpötilaa poistosijainnissa, jolloin vaikutus ympäristöön jää mahdollisimman pieneksi. Mereen poistettaessa poistoputki sijaitsee kauempana rannasta ja niin syvällä, että meriveden lämpötila putken läheisyydessä on tasaisen matala. Esimerkiksi Viikinmäen puhdistamolta poistuvat puhdistetut jätevedet johdetaan avomerelle 16 km pitkää purkutunnelia pitkin [3]. Täten vesi voidaan poistaa puhdistamolalta hyvin matalassa lämpötilassa, kuten 2 °C, jota käytetään tässä työssä veden poistolämpötilana.

Kun veden lämpötila laskee, jäljellä olevan lämmön talteenotto vaikeutuu ja siihen kuluva sähköenergia lämpöenergiayksikköä kohden kasvaa. Lisäksi veden ominaisuudet muuttuvat sen lämpötilan laskiessa lähelle sulamispistettä, koska veteen alkaa muodostua jääkiteitä, jotka vaikuttavat muun muassa veden virtaukseen.

Turun Kakolan jäteveden lämpöä talteen ottavan lämpöpumppulaitoksen kaukolämpöteho on 21 MW ja sähköä laitos käyttää 6,5 MW:n teholla eli laitoksen hyötysuhde (COP) on 3,23 [46]. Helen selvittää lämmöntalteenottoa kaksi asteisesta merivedestä talvisin, joten valitun poistolämpötilan voi olettaa olevan toteutettavissa. Meriveden lämmöntalteenotossa veden poistolämpötila olisi noin 0,5 °C ja suunnitellun merivesilämpöpumppulaitoksen tuottamasta lämmöstä noin 60 % saataisiin merivedestä ja loput sähköstä [47]. Lämpöpumpun hyötysuhde (COP) voidaan laskea lämpöpumpun tuottaman lämpötehon ja sen kuluttaman sähkötehon suhteena [48]. [47]. Lämpöpumpun hyötysuhde on siis

$$COP = \frac{H_{out}}{P_{in}}, \quad (3)$$

joten merivesilämpöpumppulaitoksen hyötysuhteeksi saataisiin

$$COP = \frac{0,4 * P + 0,6 * H}{0,4 * P} = \frac{1}{0,4} = 2,5.$$

Lämmöntalteenoton hyötysuhde kylmästä merivedestä on näin ollen matalampi kuin esimerkiksi Kakolan lämpöpumppulaitoksen hyötysuhde. Heleen selvityksessä tutkitaan myös mahdollisuutta sulamislämmön hyödyntämiseen merivedestä, jolloin mereen poistettaisiin jään ja veden seosta. Selvityksen tulosten perusteella voidaan puhdistetun jäteveden kannattavaa poistolämpötilaa tarkastella uudelleen. [47]

4 Tutkimusaineisto ja -metodit

Diplomityössä selvitetään jäteveden lämmön hyödyntämistä eri tavoilla, kuten lämpövarastoinnilla, jonka osalta tutkitaan innovatiivisten tekniikoiden, kuten latenttilämpövarastojen käyttöä verrattuna tuntuvaan lämpöön perustuviin lämpövarastoihin. Diplomityön tutkimusosuus perustuu kahteen tapaututkimukseen, joissa jäteveden lämmön hyödyntämistä tutkitaan eri lähtökohdista. Tapaukset eroavat toisistaan niin saatavilla olevien lämmönlähteiden, lämmön käyttökohteiden kuin lämpövarastointitekniikoiden osalta.

Ensimmäisessä tapauksessa jätevedenpuhdistamolta lähtevästä vedestä talteen otettua lämpöä käytetään laitokselle saapuvan veden lämpötilan nostamiseen. Saapuvan jäteveden korkeamman lämpötilan ansiosta typenpoiston tehokkuus on puhdistamolla parempi, jolloin tutkitaan saadaanko sen vaatimaa ilmastustilavuutta rajoitettua [43]. Tavoitteena on selvittää, saadaanko saapuvan veden lämmittämällä aikaan tehokkaampi typenpoisto, jolloin vaadittu ilmastustilavuus pienenee. Saapuvan jäteveden lämpötilaa kannattaa nostaa etenkin jaksoina, joina lämpötila on matalimmillaan, koska typenpoisto pitää mitoittaa ilmastusaltaan alimman lämpötilan mukaan. Tutkimuksessa käytetään mittausdataa kummaltakin jätevedenpuhdistamolalta.

Toisen tapaututkimuksen tavoite on eri lämpövarastointitekniikoiden vertailu lämmön kausivarastoinnissa. Myös tässä tapauksessa lämmöntalteenotto tapahtuu puhdistetusta ja jätevedenpuhdistamolalta poistuvasta vedestä.

4.1 Tutkimusaineisto

Tässä diplomityössä tutkimusaineistona käytetään HSY:n Viikinmäen ja Suomenojan jätevedenpuhdistamoilta saatua dataa, jota on vuosilta 2018–2021. Data sisältää mittaustuloksia tunneittain jätevesien virtaamista ja lämpötiloista eri vaiheista puhdistusprosessia. Datassa esiintyy häiriöitä sekä virtaamien että lämpötilojen osalta, ja ajoittain mittauksia puuttuu pitkiltä aikajaksoilta, mikä rajoittaa datan käyttöä laskelmissa ja edellyttää tarvittavien arvojen interpolointia ja skaalaamista saatavilla olevan datan perusteella. Lämpövarastointia selvitetään sekä kausivarastoinnin, että lyhytaikaisen varastoinnin näkökulmasta. Luotettavien tulosten saamiseksi mittausdataa tarvitaan kokonaiselta vuodelta, jotta jäteveden lämpötilan ja virtaaman kausittaisten vaihteluiden vaikutus pystytään huomiomaan. Toisessa tapaututkimuksessa käytetään lisäksi Helenin avointa dataa kaukolämmön kysynnästä Helsingissä tunneittain vuosilta 2018–2020 [49].

4.1.1 Suomenojan jätevedenpuhdistamon data

Suomenojan jätevedenpuhdistamon mittausdata sisältää kolmessa prosessin eri vaiheessa tehdyt lämpötilamittaukset: jätevedenpuhdistamolle saapuvan jäteveden, ilmastuksessa prosessin keskivaiheilla sekä puhdistetun ja laitokselta lähtevän veden lämpötilat. Jäteveden virtaamasta dataa on puhdistamolle saapuvan jäteveden osalta sekä tasauslammikon pinnankorkeudesta. Tasauslammikkoon ohjataan korkeilla virtaamilla saapuvaa jätevettä esiselkeytyksestä. Mittausdatassa esiintyy häiriöitä tulevan virtaaman mittauksessa sekä lähtevän lämpötilan mittauksessa. Ajanjaksona 26.2.2018-27.3.2019 lämpötilan mittausdata on häiriötöntä ja virtaaman mittauksessa esiintyy vain lyhyitä häiriöitä, joten laskelmiin käytetään kyseisen aikavälin mittausdataa. Tällöin puuttuvia arvoja joudutaan interpoloimaan mahdollisimman vähän, ja siitä aiheutuvat virheet jäävät pieniksi.

Vuoden 2018 talvi oli poikkeuksellisen lämmin ja vähäluminen, minkä myös taulukko 3 osoittaa saapuvan jäteveden korkeampana keskiarvolämpötilana. Koko vuoden sademäärä oli tavallista alhaisempi kuivan kevään ja kesän takia, mikä näkyy taulukossa pienempänä virtaamana johtuen hulevesien pienemmästä määrästä viemäristössä [50]. Suomenojalle valitaan kuitenkin edellä mainittu tarkastelujakso täydellisten datajaksojen puutteen vuoksi. Lisäksi laitoksen käytöstä poiston takia Suomenojan laitokselle tehtäviä laskelmia käytetään lähinnä vertailukohtana ja mallina suomalaisesta jätevedenpuhdistamosta. Taulukko 2 kokoaa keski-, minimi- ja maksimiarvoja jäteveden lämpötiloille ja virtaamille 26.2.2018-27.3.2019 Suomenojan jätevedenpuhdistamolla. Ennen arvojen laskemista data on täydennetty puuttuvien mittausten osalta luvussa 4.1.3 esitellyillä tavoilla.

Taulukko 2: Suomenojan jätevedenpuhdistamon virtaaman ja tulevan sekä puhdistetun jäteveden lämpötilojen pienimmät ja suurimmat arvot sekä keskiarvot 1.3.2018-28.2.2019.

	\dot{V} (m ³ /s)	T _{in} (°C)	T _{out} (°C)
Min.	0,35	6,9	6,5
Ka.	1,08	14,1	14,0
Maks.	2,79	19,5	20,8

4.1.2 Viikinmäen jätevedenpuhdistamon data

Viikinmäen jätevedenpuhdistamon mittausdata sisältää tunneittain lämpötilamittaukset neljässä kohdassa prosessia sekä puhdistamolle saapuvan veden virtaaman. Lämpötilan mitataan saapuvasta jätevedestä, prosessin alussa olevassa hiekanerotuksessa, ilmastuksessa ja puhdistamolta lähtevästä suodatetusta vedestä. Datassa esiintyy ajoittaisia lyhyitä häiriöitä jaksolla 1.1.–19.10.2018. Tulevan veden lämpötilasta on dataa vain vuoden

alusta 19.10.2018 saakka, joten Viikinmäen tulevan lämpötilan sijasta käytetään prosessin alkupuolella olevaa hiekanerotuksen lämpötilaa, jossa esiintyy vain lyhyitä häiriöjaksoja.

Taulukko 3: Viikinmäen jätevedenpuhdistamon virtaaman keskiarvot ja suurimmat arvot sekä tulevan ja puhdistetun jäteveden lämpötilojen pienimmät ja suurimmat arvot sekä keskiarvot vuosina 2018–2020.

	2018	2019	2020
\dot{V} (m³/s)			
Ka.	2,95	3,40	3,47
Maks.	7,52	8,46	9,02
T_{in} (hiekanerotuksessa) (°C)			
Min.	6,8	7,4	6,8
Ka.	15,1	14,4	14,6
Maks.	20,4	19,3	20,2
T_{out} (°C)			
Min.	9,0	8,9	7,8
Ka.	16,2	15,5	15,6
Maks.	20,7	20,1	20,1

Hiekanerotuksen lämpötilaa voidaan käyttää laskuissa tulevan jäteveden lämpötilan sijaan, koska mittauspiste on ennen ilmastusta ja laskuissa tarvittavat lämpötilat ovat jäteveden lämpötila ennen ilmastusaltaita ja puhdistetun veden lämpötila. Viikinmäen datasta valitaan käyttöön vuodet 2018–2020, joista tehdään erikseen laskelmat. Näin saadaan vertailtua eri vuosia eikä lämpimämmän talven vaikutus vääristä koko työn tuloksia. Taulukko 3 esittää Viikinmäen jätevedenpuhdistamon jäteveden lämpötilojen ja virtaamien keskiarvoja sekä suurimpia ja pienimpiä arvoja vuosina 2018–2020.

4.1.3 Datankäsittely

Johtuen Suomenojan mittausdatassa esiintyvistä häiriöistä tulevan virtaaman mittauksessa joudutaan laskemaan arvioita puuttuville arvoille. Mittaus puuttuu aikavälillä 26.2.2018–27.3.2019 yhteensä kuuden tunnin ajalta, joten aiheutuva virhe jää joka tapauksessa pieneksi, vaikka interpoloimalla saadut arvot eivät olisi tarkkoja. Korvaavana tietona on annettu mittaus ”tulovirtaamien summa”. Tässä mittauksessa tapahtuvat muutokset seuraavat melko tarkasti tulevan virtaaman muutoksia, joten tulevan virtaaman virhemittaukset voidaan korvata tulovirtaamien summassa tapahtuvien muutosten perusteella tehdyillä arvioilla. Arvioksi saadaan mittauksista ”tuleva virtaama” ja ”tulovirtaamien summa”

$$V_{in,x} = V_{in,x-1} * \left(\frac{V_{summa,x}}{V_{summa,x-1}} \right), \quad (4)$$

jossa $V_{in,x}$ on tuleva virtaama ajanhetkellä x , $V_{in,x-1}$ on tuleva virtaama tuntia ajanhetkeä x aikaisemmin, $V_{summa,x}$ on tulovirtaamien summa ajanhetkellä x ja $V_{summa,x-1}$ on tulovirtaamien summa tuntia ajanhetkeä x aikaisemmin.

Lähtevälle virtaamalle ei ole erikseen arvoja datassa. Lähtevä virtaama voidaan kuitenkin laskea tulevasta virtaamasta, kun tiedetään veden viipymä jätevedenpuhdistamolla ja vedestä poistettavien aineiden eli lietteen tilavuus. Viikinmäessä mädätykseen tulevan lietteen määrä on 2 400–2 900 m³/d eli keskimäärin 2 650 m³/d, joka vähennetään saapuvasta virtaamasta [3]. Suomenojalla saapuvasta virtaamasta vähennetään esisakeutukseen saapuvan sekalietteen määrä eli 900 m³/d [5]. Muita virtaamasta poistettavia aineita, kuten välppäyksessä poistettavaa kiintoainesta tai hiekkaa, ei tässä oteta huomioon, koska niiden määrät eivät ole yhtä merkittäviä. Esimerkiksi Viikinmäestä esikäsitelyssä erotetaan vedestä jätettä yhteensä 530 000 kg vuodessa eli keskimäärin noin 1 500 kg päivässä. Näin ollen poistettavan aineen tilavuus ei ole merkittävä suureen puhdistamolle saapuvaan virtaamaan nähden. Samoin puhdistusprosessissa veteen lisättävien kemikaalien, kuten ferrosulfaatin ja metanolin tilavuus jätetään huomioimatta poistuvassa virtaamassa, koska niiden osuus virtaamasta on pieni. Viikinmäellä kemikaaleja lisätään vuodessa enintään 15 230 tonnia eli päivittäin keskimäärin noin 41 tonnia, joka muodostaa pienen osan puhdistamolle päivittäin saapuvasta keskimääräisestä 290 000 tonnin massavirrasta. [3]

Veden viipymät laitoksilla voidaan laskea viipymistä eri prosessin vaiheissa. Viikinmäellä pisimmät viipymät vedellä ovat ilmastuksessa (8,0 h) ja jälkiselkeytyksessä (9,0 h). Yhteensä puhdistettavalla vedellä kestää laitoksen läpi kulkemisessa 22 tuntia. [3]. Suomenojalla viipymä on yhteensä noin 20 tuntia [5]. Lähtevä virtaama Viikinmäellä on siis

$$\dot{V}_{t, out} = \dot{V}_{t-22 h, in} - \frac{2650 \frac{m^3}{d}}{24*3600}, \quad (5)$$

ja Suomenojalla vastaava on

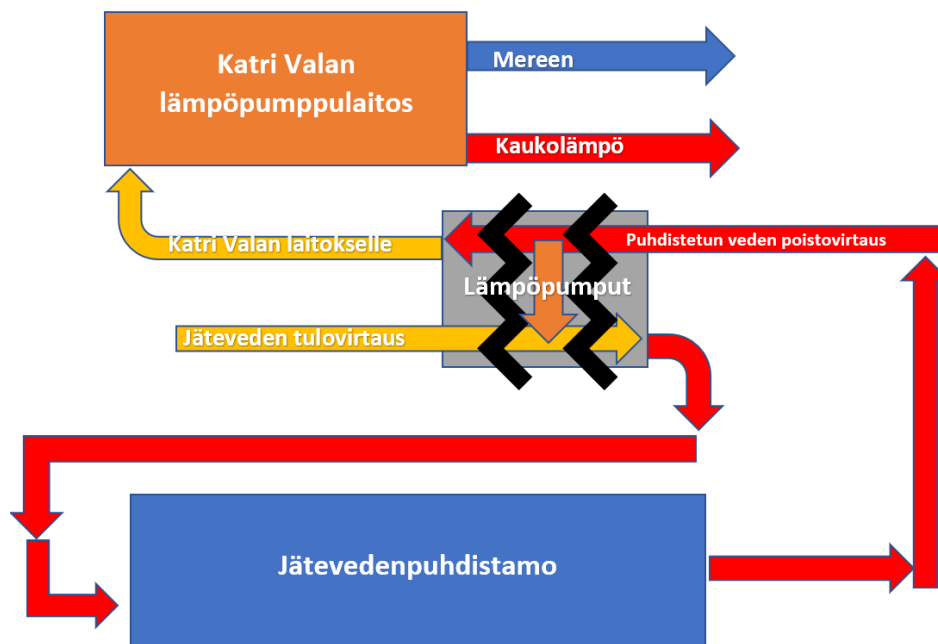
$$\dot{V}_{t, out} = \dot{V}_{t-20 h, in} - \frac{900 \frac{m^3}{d}}{24*3600}. \quad (6)$$

Kaavoissa virtaama ajanhetkellä t on \dot{V}_t ja x tuntia aiemmin \dot{V}_{t-x} . Viikinmäen mittausdatassa esiintyy yksittäisiä puuttuvia arvoja, joten niiden paikalle on laskettu korvaavat arvot lineaarisella interpolaatiolla.

4.2 Tapaustutkimus 1: Saapuvan veden lämpötilan optimointi lämpövaraston avulla

Tässä tapaustutkimuksessa selvitetään mahdollisuuksia optimoida jätevedenpuhdistusprosessia lämmöntalteenoton ja jätevedenpuhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilan nostamisen avulla. Jätevedenpuhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötila vaihtelee vuodenajan mukaan voimakkaasti ja viileä jätevesi aiheuttaa ongelmia puhdistusprosessissa. Suurin vaikutus puhdistettavan jäteveden lämpötilan laskulla on typenpoiston toimintaan, jota on käsitelty luvussa 3. Jos saapuvan jäteveden lämpötilaa voidaan nostaa, typenpoiston edellyttämä ilmastusaltaiden vähimmäistilavuus laskee. Jäteveden virtaamien kasvaessa väkiluvun mukana, on hyödyllistä rajoittaa prosessin vaatimaa allastilavuutta, sillä lisäkapasiteetin rakentaminen on kallista ja sille saattaa esiintyä rajoituksia laitoksen koon puolesta.

Tapaustutkimuksen tavoite on laskea, kuinka paljon energiaa puhdistamolle saapuvan jäteveden lämmittäminen eri lämpötilatavoitteisiin vaatisi ja mitä vaikutuksia lämpötilatavoitteilla olisi puhdistamon ilmastustilavuuteen ja typenpoistoon. Kuva 10 esittää tapaustutkimuksessa 1 selvitettävän saapuvan veden lämmitysprosessin Viikinmäen jätevedenpuhdistamon tapauksessa. Puhdistetusta jätevedestä siirretään lämpöä tulevan jäteveden virtaukseen, jonka jälkeen puhdistettu vesi kulkee Katri Valan lämpöpumppulaitok-
selle.



Kuva 10: Saapuvan jäteveden lämmittämisen prosessikaavio Viikinmäen tapauksessa, jossa puhdistettu jätevesi kulkee Katri Valan lämpöpumppulaitoksen kautta.

Jätevedenpuhdistamolta poistettavasta vedestä talteen otettava lämpö käytetään saapuvan jäteveden lämmittämiseen. Saapuvan veden lämpötilaa nostetaan siis lämpöpumpuilla, joiden lämmönlähteenä käytetään puhdistetun veden virtausta. Suora lämmönsiirto lämmönvaihtimella virtausten välillä ei olisi teknisesti kannattavaa johtuen saapuvan ja puhdistetun jäteveden pienestä lämpötilaerosta. Lämmönsiirron tulee olla tarpeeksi nopeaa, ja ajoittain puhdistetun veden lämpötila laskee lämmöntalteenoton seurauksena saapuvan jäteveden lämpötilan alapuolelle, joten lämmönsiirrosta virtausten välillä tarvitaan lämpöpumppuja. Tavoitteena on tilanne, jossa talteen otettava lämpö riittää vuoden jokaisena päivänä saapuvan veden lämpötilan nostamiseen haluttuun tavoitteeseen. Jätevedenpuhdistamoiden läpi kulkevat vesimäärät ja tätä kautta lämpöenergian määrät ovat huomattavan suuria. Kun saapuvaa jätevettä vielä lämmitetään, ja puhdistetusta vedestä otetaan lämpö talteen, voidaan koko laitoksen vesimassa nähdä lämpövarastona. Jos jätevedenpuhdistamon yhteyteen rakennetaan kaukolämpöverkon osaksi lämmön kausivarasto, voidaan jäteveden sisältämiä suuria energiamääriä käyttää tehokkaasti hyödyksi. Johtuen erittäin suurista jäteveden virtaamista ja sitä kautta siirrettävän lämmön suuresta määrästä on myös mahdollista, että tapaustutkimuksen tuloksena on saapuvan jäteveden lämmityksen kannattamattomuuden toteaminen.

4.2.1 Puhdistettavan jäteveden tavoitelämpötila lämmityksen jälkeen

Kuten luvussa 3.1 todetaan, typenpoiston tehokkuuteen puhdistusprosessissa vaikuttaa voimakkaasti jäteveden lämpötila. Alle 12 °C lämpötiloissa typenpoiston vaatima ilmastustilavuus ja minimilieteikä alkavat nousta nopeasti. Tämä tarkoittaa, että puhdistusprosessia varten tarvitaan suurempia ilmastusaltaita kuin korkeammassa lämpötilassa. Tästä johtuen saapuva jätevesi kannattaa pyrkiä lämmittämään vähintään 12 °C lämpötilaan, jolloin vaadittavasta ilmastustilavuudesta saadaan merkittävä osa poistettua.

Puhdistusprosessi ja ilmastustilavuus on mitoitettava suurimman tarvittavan kapasiteetin ja tilavuuden mukaan, jotta typenpoistossa päästään vaadittaviin rajoihin myös kyseisinä jaksoina. Lyhyetkin kylmät jaksot puhdistamolalle saapuvan jäteveden lämpötilassa aiheuttavat sen, että ilmastustilavuus on mitoitettava suuremmaksi tai typpipäästöt laitokselta nousevat. Tämä vaikutus on erityisen suuri, koska Helsingin kantakaupunki on suurelta osin sekaviemäröityä aluetta ja lumien sulaessa viemäristöön vuotaa eniten hulevesiä, jolloin jäteveden lämpötila laskee samaan aikaan kun virtaama kasvaa [3]. Sekä kasvanut virtaama että alempi lämpötila edellyttävät ilmastusaltailta suurempaa kapasiteettia.

Puhdistamoille saapuvat virtaamat ovat kuitenkin erittäin suuria, joten lämmityksessä suuren lämpötilaeron aikaansaaminen on hyvin haasteellista. Tämä vaatisi suuren talteen otettavan lämpömäärän puhdistetusta vedestä sekä suuren lämmitystehon ennen jätevedenpuhdistamoa, mihin kuluu myös

paljon sähköä. Seuraavaksi luvussa 4.2.2 määritetään tarvittavat tehot lämmöntalteenotolle ja tulevan jäteveden lämmitykselle kullekin saapuvan jäteveden lämmityksen lämpötilatavoitteelle.

4.2.2 Saapuvan jäteveden lämmitys lämpötilatavoitteisiin

Jäteveden sisältämä lämpömäärä Q voidaan laskea kaavalla (1). Massa m voidaan puolestaan esittää tiheyden ja tilavuuden avulla

$$m = \rho V. \quad (7)$$

Jätevedestä saatava lämpöteho H voidaan laskea massavirrasta ja jäteveden entalpian muutoksesta

$$H = \dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{m}c_p\Delta T. \quad (8)$$

Lämpöteho voidaan esittää myös lämpömäärän ja kuluneen ajan suhteena

$$H = \frac{Q}{t}. \quad (9)$$

Joten jätevedenpuhdistamolle saapuvan veden lämmittämiseen tavoitelämpötilaan $T_{tavoite}$ tunnissa ($t = 1$ h) kuluva energiamäärä wattitunneissa on

$$Q = \rho V c_p \Delta T t = \rho V c_p (T_{tavoite} - T_{in}) t. \quad (10)$$

Seuraavaksi, jokaiselle tunnille lasketuista lämmityksessä siirrettävistä lämpömääristä voidaan etsiä Excelin MAKS-funktiolla suurimmat arvot kullekin tavoitelämpötilalle. Suurin lämmitysteho $H_{LT, maks}$ puolestaan saadaan MAKS-funktiolla tunneittaisista lämmitystehon arvoista. $H_{LT, maks}$ kertoo suurimman lämmitystehon, joka vuoden aikana tarvitaan, jotta jäteveden lämmittäminen haluttuun lämpötilaan on mahdollista. Lämmitykseen kuluvan lämmön kattamiseen tarvittava lämmöntalteenoton teho H_{LTO} saadaan jakamalla lämmitysteho lämmönsiirron hyötysuhteella

$$H_{LTO} = \frac{H_{LT}}{\eta_{ls}}, \quad (11)$$

jossa hyötysuhde muodostuu putkissa ja lämmönvaihtimissa tapahtuvista lämpöhäviöistä ja pumppauksen hyötysuhteesta. Suurissa kaukolämpöputkissa tapahtuvat lämpöhäviöt ovat tyypillisesti 4–10 % [51]. Koska laitoksen sisällä kulkevat putket ovat melko lyhyitä ja siirrettävät lämpömäärät suuria, voidaan putkissa tapahtuvien lämpöhäviöiden olettaa olevan 5 %. Muiden lämpöhäviöiden määrän voidaan olettaa olevan noin 10 %, koska laitteet ovat

suuria eikä pumppausta tarvita pitkälle matkalle tai suurelle korkeuserolle. Jäteveden lämmitykseen kuluva sähköenergia E voidaan laskea kullekin tunnille lämpöpumppujen hyötysuhteesta

$$E = Q_{LTO} * \frac{1}{COP}. \quad (12)$$

Viikinmäen ja Suomenojan jätevedenpuhdistamoiden tuloksia voidaan vertailla keskenään, kun otetaan huomioon puhdistamoiden kokoero, jonka määrittämiseen voidaan käyttää virtaamien eroja. Keskimääräinen virtaama oli 1.3.2018-28.2.2019 Suomenojan jätevedenpuhdistamolla 1,0848 m³/s ja vuonna 2018 Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla 2,9453 m³/s. Suomenojan jätevedenpuhdistamon tuloksille, kuten sähkönkulutukselle voidaan laskea arvioita perustuen laitosten kokoeroon. Arvioita vertaamalla todellisiin tuloksiin voidaan arvioida, kuinka kannattavaa tulevan jäteveden lämmittäminen on eri jätevedenpuhdistamoilla. Suomenojan tuloksille saadaan verrattavat arviot virtaamien suhteesta

$$X_{Suomenoja} = X_{Viikinmäki} * \frac{V_{Suomenoja}}{V_{Viikinmäki}} = 0,368 * X_{Viikinmäki}, \quad (13)$$

jossa X on tulos, jota halutaan verrata Suomenojan datasta laskettuun tulokseen. Tulevan jäteveden lämmittämisen kuluttaman sähköenergian kustannukset C_E lasketaan kulutetun sähköenergian ja lämmityskuukausien pörsisähkön verollisen keskihinnan tulona

$$C_E = E * \text{sähkön hinta}. \quad (14)$$

4.3 Tapaustutkimus 2: Puhdistetun jäteveden lämmön kausivarastointi

Tässä tapaustutkimuksessa tutkitaan lämmönvarastoimista puhdistetusta jätevedenpuhdistamolalta poistuvasta vedestä. Lämpövarasto on kausivarasto, johon lämpöä varastoidaan käytettäväksi talvisin kaukolämmityksessä. Kausivaraston täyttöä ja purkamista säädellään kaukolämmön kysynnän mukaan. Kaukolämmön kysyntä saadaan Helenin avoimesta datasta tunneittaisesta kaukolämmön kysynnästä Helsingissä [49]. Kaukolämmön kysyntää ja jätevedestä saatavaa lämpö määrää vertaillaan tunneittain ja varastoa täytetään ja puretaan erotuksen perusteella. Tapaustutkimuksen tavoite on vertailla eri lämpövarastotekniikoita ja selvittää eri faasimuutosmateriaalien sopivuutta kyseisessä käytössä. Tutkimuksessa selvitetään latenttilämpövaraston toimivuutta verrattuna tuntuvaan lämpöön perustuvaan lämpövarastoon.

Tapaustutkimuksessa 2 pyritään selvittämään seuraavat tutkimuskysymykset.

- Kuinka suureksi lämpövaraston kapasiteetti kannattaa mitoittaa?
- Kuinka suuri osa kaukolämmön kysynnästä voidaan kattaa lämpövarastolla?
- Mikä vertailtavista lämpövarastotyypeistä on sopivin tässä tapauksessa käytettäväksi lämpövarastoksi?
- Kuinka suuren varastotilavuuden lämpövarasto vaatii eri toteutustavoilla ja mitkä ovat niiden kustannukset?

Tapaustutkimuksessa 1 puhdistetun veden lämpöä käytetään saapuvan jäteveden lämmittämiseen. Kun puhdistamolta poistettavasta vedestä otetaan lämpö talteen, saadaan tapauksessa 1 puhdistamolle saapuvaan veteen lisätty lämpö hyötykäyttöön myös prosessin ulkopuolella.

Kaukolämmön kysynnästä on saatavilla avointa dataa vain Helsingistä ja Viikinmäen jätevedenpuhdistamon virtaamista ja lämpötiloista on virheettömämpää dataa useammalta vuodelta kuin Suomenojalta. Tästä johtuen tässä tapauksessa laskuihin käytetään vain Viikinmäen jätevedenpuhdistamon dataa.

Tutkimuksessa vertaillaan kolmea eri lämpövaraston toteutustapaa toisiinsa. Ensimmäinen vertailtava lämpövarastotyyppi on tuntuvaan lämpöön perustuva lämpövarasto, jossa käytetään vettä varaston väliaineena. Kaksi muuta lämpövarastoa ovat latenttilämpövarastoja, joissa erona on käytettävän faasimuutosmateriaalin sulamispiste.

4.3.1 Kaukolämmön kysyntä ja lämmöntalteenotto puhdistetusta jätevedestä

Taulukko 4 sisältää kaukolämmön lämpötehon ja Viikinmäellä puhdistetusta jätevedestä saatavan lämpötehon arvoja, joita vertaamalla huomataan, että kaukolämmön kysyntä on aina suurempi kuin Katri Valan lämpöpumppulaitoksen jätevedestä tuottama kaukolämpöteho, joka on maksimissaan 155 MW, joten mikäli jätevedestä saatava lämpö käytettäisiin aina ensisijaisesti kaukolämpönä, ei varastoitavaksi riittäisi lämpöä ollenkaan. Voidaan kuitenkin olettaa, että käytössä on myös muita hiilineutraaleja lämmönlähteitä, jotka kattavat osan kaukolämmön kysynnästä. Tehdään oletus, että vuoden ympäri kaukolämmön peruskuormaksi tuotetaan 250 MW:n teholla lämpöä. Tätä peruskuormaa käytetään kaukolämpönä ensisijaisesti normaaleissa olosuhteissa ja siitä käytetään nimitystä H_{PK} .

Kaukolämmön peruskuormaa voidaan mahdollisesti kattaa tulevaisuudessa esimerkiksi teollisuuden hukkalämmöllä tai pienydinreaktorien tuottamalla kaukolämmöllä, jolloin Katri Valan lämpöpumppulaitoksen tuottama lämpöä riittää varastoitavaksi. Todellisuudessa varastoitava lämpö voi

olla taloudellisempaa ottaa jostain muusta lähteestä ja peruskuormana tuotettava lämmön määrä voi olla eri suuruinen eri vuodenaikoina. Esimerkiksi merivesilämmön talteen otton taloudellisuus vaihtelee voimakkaasti meriveden lämpötilan mukaan. CHP-voimalaitokset tuottavat myös tulevaisuudessa lämpöä peruskuormaksi, sillä sähkön- ja lämmön yhteistuotannolla saadaan parempi hyötysuhde ja sähköntuotantoa tarvitaan ympäri vuoden. Jotta tutkimus jäteveden lämmön varastoimisesta saadaan toteutettua, käytetään edellä esiteltyä oletusta. Kaukolämmönkysyntä täytetään tässä tapauksessa käyttäen seuraavassa järjestyksessä lämmönlähteitä, mikäli niitä on saatavilla:

1. Kaukolämmön peruskuorma, kuten CHP-voimalaitokset, teollisuuden hukkalämpö ja pienydinreaktorit
2. Jäteveden lämmöntalteenotto Katri Valan lämpöpumppulaitokselta
3. Jäteveden lämmöntalteenotolla ladattava lämpövarasto
4. Muut kaukolämmönlähteet, kuten biopolttoaineet, sähköllä tuotettava lämpö sekä muut lämpövarastot

Taulukko 4: Maksimi-, minimi- ja keskiarvot kaukolämmön lämpöteholle (H_{KL}), jätevedestä talteen otettavissa olevalle lämpöteholle ($H_{LTO, maks.}$) ja Katri Valan lämpöpumppulaitoksen jätevedestä talteen ottamalle lämpöteholle ($H_{LTO, Katri Vala}$).

	H_{KL} (MW)	$H_{LTO, maks.}$ (MW)	$H_{LTO, Katri Vala}$ (MW)	Erotus: $H_{LTO, Katri Vala} - h_{KL}$ (MW)	Erotus: $H_{PK} - H_{KL}$ (MW)
Maks.	2390	498	155	-11,3	83,7
Min.	166	0,243	0,243	-2290	-2390
Ka.	776	162	141	-635	-713

Taulukko 4 esittää viimeisessä sarakkeessaan kaukolämmön peruskuorman lämpötehon ja kaukolämmön kysynnän erotuksen. Koska erotus on suurimmillaan 83,7 MW, olisi koko Helsingin kaukolämmön tarve ollut kyseisenä hetkenä mahdollista kattaa ilman jätevedestä saatavaa kaukolämpöä. Niinä tunteina, joina erotus on positiivinen, lämpövarastoa olisi voitu ladata koko jäteveden lämmöntalteenoton teholla 155 MW.

4.3.2 Lämpövaraston kapasiteetti

Lämpövaraston vaadittava kapasiteetti voidaan laskea talteen otettavan lämpömäärän Q_{LTO} ja kaukolämmön kysynnän Q_{KL} erotuksista. Kun peräkkäisiä erotuksia summataan, suurin erotuksien summan itseisarvo on suurin energiamäärä, joka varastoituisi lämpövarastoon, mikäli lämpövaraston kapasiteetilla ei olisi rajoja. Tällaisessa ideaalisessa esimerkissä lämpövarastoon

mahtuisi niin paljon lämpöä kuin sitä on tarjolla, jolloin kaikki ylijäämä-
lämpö saataisiin hyötykäyttöön.

Lämpövaraston lämmöllä ei yleensä kannata kattaa koko sen hetkistä kau-
kolämmön kysyntää, vaikka varastossa riittäisi varastoitua lämpöä. Lämpö-
varastolla kannattaa pyrkiä kattamaan suurimpia lämmön kysyntäpiikkejä
niin, että varaston lämpöä riittää mahdollisimman pitkälle aikavälille talven
aikana. Toisaalta lämpövarasto on pyrittävä tyhjentämään kylmien säiden ai-
kana ennen kevättä, jotta siitä saadaan suurin hyöty. Tässä tapauksessa läm-
pövarastoa puretaan perustuen kaukolämmön kysynnän (Q_{KL}) suuruuteen.
Lämpövarastoa puretaan, jos kysyntä ylittää 1 150 MW, ja purkamista raja-
taan vähentämällä kysynnästä 650 MWh, jolloin varastosta purettava läm-
pömäärä lasketaan

$$Q_{varasto,out} = Q_{KL} - Q_{PK} - Q_{LTO} - 650 \text{ MWh}, \quad (15)$$

jossa on Q_{PK} kaukolämmön peruskuormalla tuotettu lämpömäärä (250 MWh
tunnissa ja Q_{LTO} on jäteveden lämmöntalteenoton suuruus (maks. 155 MWh
tunnissa).

4.3.3 Tuntuvaan lämpöön perustuva lämpövarasto

Ensimmäinen vertailtava lämpövarasto on tuntuvaan lämpöön perustuva
lämpövarasto, jossa varastoinnin väliaineena käytetään vettä. Varasto voi-
daan toteuttaa esimerkiksi luola- tai allaslämpövarastona. Kun lämpövaras-
tossa tapahtuva lämpötilan muutos on ΔT , kaavasta (10) saadaan tilavuus

$$V = \frac{Q}{\rho c_p \Delta T}, \quad (16)$$

jonka lämpömäärän Q varastoiminen vaatii tuntuvaan lämpöön perustu-
vassa lämpövarastossa.

4.3.4 Latenttilämpövarasto

Latenttilämpövaraston varastointikapasiteetti voidaan laskea kaavalla (2),
joten faasimuutosmateriaalin massa lämpömäärän Q varastoimiseksi on

$$m = \frac{Q}{s}. \quad (17)$$

Jos latenttilämpövarastossa varastointimateriaalin lämpötilaa lasketaan
kiinteässä olomuodossa varastoa purettaessa tai nostetaan sulassa olomu-
dossa varastoa ladattaessa, sulamislämmön lisäksi lämpöä saadaan varastoi-
tua tuntuvana lämpönä, jolloin varastoidun lämmön määrä on yhteensä

$$Q = m(c_{p,sol}\Delta T_{sol} + s + c_{p,liq}\Delta T_{liq}). \quad (18)$$

Kun sulan faasimuutosmateriaalin lämpötilaa nostetaan, lämpövaraston vaatimaksi tilavuudeksi sulassa olomuodossa saadaan

$$V_{liq} = \frac{Q - ms}{\rho_{liq}c_{p,liq}\Delta T_{liq}}. \quad (19)$$

4.3.5 Lämpövarastojen investointikustannukset

Eri lämpövarastovaihtoehtojen investointikustannuksia voidaan arvioida referenssikohteiden avulla. Referenssilämpövarastot ovat todellisia lämpövarastoja, jotka ominaisuuksiltaan vastaavat tutkimuksessa vertailtavia lämpövarastoja, ja joiden investointikustannuksista on löydettävissä tietoa. Referenssilämpövarastojen investointikustannukset varastotilavuutta kohden ovat

$$C_V = \frac{C}{V}. \quad (20)$$

Lämpövarastoon varastoitua kilowattituntia lämpöä kohden investointikustannukset ovat

$$C_Q = \frac{C}{Q}. \quad (21)$$

Latenttilämpövaraston tapauksessa merkittävä osa kustannuksista aiheutuu faasimuutosmateriaalin hinnasta. Kustannusarviot latenttilämpövarastoille lasketaan vaaditun varastotilavuuden mukaan luolalämpövarastona, johon lisätään massan ja faasimuutosmateriaalin kilohinnan perusteella laskettavat faasimuutosmateriaalin kustannukset

$$C_{LHS} = C_V * V + m * C_{PCM}. \quad (22)$$

5 Tulokset

5.1 Tapaustutkimus 1

Ensimmäisen tapaustutkimuksen tavoitteena on ollut selvittää jätevedenpuhdistusprosessin tehostamista puhdistetusta jätevedestä saatavaa lämpöenergiaa kierrättämällä. Jätevedenpuhdistusprosessissa typenpoisto tapahtuu aktiivilieteprosessissa ilmastusaltaissa ja sen tehokkuuteen vaikuttaa voimakkaasti lämpötila. Matalammissa lämpötiloissa typenpoiston vaatima minimilietekä on pidempi ja tätä kautta vaadittu ilmastustilavuus puhdistamolla suurempi. [43]

Puhdistetussa jätevedessä on runsaasti lämpöenergiaa, ja mikäli sitä voitaisiin siirtää saapuvaan jäteveeseen, olisi mahdollista parantaa typenpoiston tehokkuutta jätevedenpuhdistamoilla. Tutkimuksen pääpainopiste on selvittää, kuinka paljon energiaa puhdistetussa jätevedessä on saatavilla ja, millä lämpölämpötiloilla ja energiankulutuksella sen siirtäminen saapuvaan jäteveeseen on mahdollista. Näistä tuloksista pyritään tulkitsemaan lämpötilatasot, jotka lämmityksellä voisi olla taloudellisesti ja teknisesti mahdollista saavuttaa. Tämä tapaustutkimus keskittyy vain typenpoiston vaatiman ilmastustilavuuden tarkasteluun eikä muiden puhdistusprosessin osa-alueiden vaatimuksia tai lämpötilamuutosten vaikutuksia niihin tarkastella tässä diplomityössä.

5.1.1 Tavoitelämpötilat ja lämmitystekhot

Luvussa 4.2.2 läpi käydyillä tavoilla lasketut tulokset energiamääristä ja tehoista on esitetty tämän luvun taulukoissa kullekin vuodelle ja laitokselle. Taulukko 5 sisältää Viikinmäen tulokset vuosilta 2018–2020. Taulukko 6 kokoa Suomenojan jätevedenpuhdistamon tulokset ajalta 1.3.2018–28.2.2019. Lämmitykseen kuluva sähköenergia E tarkoittaa koko vuoden aikana kuluva sähköenergian määrää. Taulukko 5 ja Kuva 12 osoittavat, että vuonna 2018 kokonaissähkönkulutus olisi ollut huomattavasti pienempi kuin muina vuosina, mikä vahvistaa vuoden olleen lauha ja vähäluminen, jolloin lämmitys vaatii vähemmän energiaa. Vuonna 2018 lämmityksen vaatimat tehot ovat kuitenkin vuotta 2019 suurempia, joten suurin piikki saapuvan kylmän veden määrässä oli vuonna 2018 suurempi kuin 2019. Vuonna 2020 vaaditut lämmitystekhot ovat suurimpia, kuten myös kokonaissähkönkulutus. Kuten myös Kuva 12 osoittaa, vuosien 2019 ja 2020 sähkön kokonaiskulutukset ovat hyvin lähellä toisiaan.

Taulukko 6 kokoa Suomenojan tulokset, joita voidaan verrata Viikinmäen tuloksiin vuodelta 2018, kun otetaan huomioon puhdistamoiden virtaamien erot. Kaavasta (13) saadaan vertailtavaksi arvioksi vaadittavalle lämmitystekholle minimilämpötilan 10 °C saavuttamiseksi Suomenojan jätevedenpuhdistamolla 36,5 MW, kun Viikinmäellä vastaava vuonna 2018 oli 99,0 MW, joka nähdään taulukosta 5. Sähkönkulutukselle Suomenojalla

Taulukko 5: Tulevan jäteveden lämmityksen vaatimat lämpömäärät, lämpötehot ja sähköenergia lämpötilatavoitteittain Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla vuosina 2018–2020.

T _{tavoite}	Q _{lämmitys, maks./d} (MWh/d)	H _{LT, maks.} (MW)	H _{LTO, maks.} (MW)	E (MWh)
2018				
7	5,5	5,5	6,4	1,99
8	102	36,7	42,9	53,2
9	392	67,8	79,3	242
10	896	99,0	116	897
11	1 460	130	152	2 880
12	2 030	161	189	7 590
13	2 640	192	225	17 800
14	3 280	224	261	34 200
15	3 910	255	298	53 500
2019				
7	0,0	0,0	0,0	0,0
8	62,5	18,3	21,4	67,0
9	453	49,0	57,3	711
10	1 140	79,8	93,3	3 110
11	1 830	111	129	9 150
12	2 520	141	165	19 700
13	3 210	172	201	35 100
14	3 900	203	237	55 600
15	4 590	234	273	80 500
2020				
7	17,5	7,67	8,97	6,14
8	411	40,2	47,0	188
9	1 140	73,8	86,3	956
10	1 920	108	126	3 090
11	2 690	142	166	7 970
12	3 470	176	206	17 600
13	4 250	210	246	33 400
14	5 030	244	286	55 700
15	5 810	279	326	82 700

vastaava laskutoimitus puolestaan antaa 330 MWh, kun Viikinmäellä sähkönkulutus vuonna 2018 oli 897 MWh.

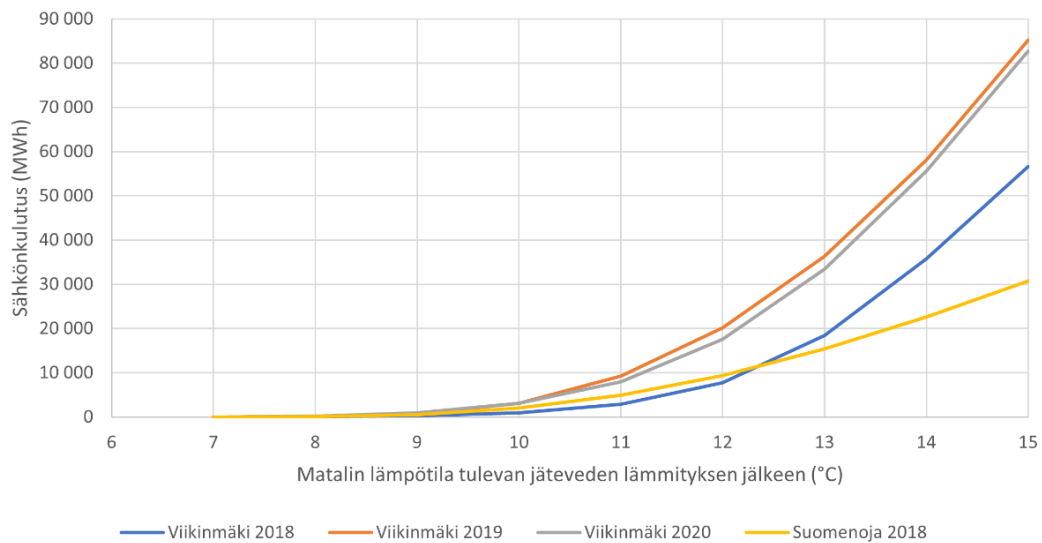
Taulukko 6 osoittaa, että Suomenojan jätevedenpuhdistamolla vaadittava lämmitysteho minimilämpötilalle 10 °C oli 25,0 MW ja vuoden sähkönkulutus 1 960 MWh. Luvuista voidaan päätellä, että Suomenojalla vaadittavat suurimmat lämmitystehot ovat suhteessa virtaamiin Viikinmäkeä pienempiä, mutta vuoden aikana lämmityksessä siirrettävä lämpömäärä ja tätä kautta sähkönkulutus huomattavasti suurempi. Syy suhteessa pienempään

tarvittavaan lämmitystehoon voi olla Suomenojalle saapuvat pienemmät virtaamapiikit sulamisvesien aikaan johtuen Helsingin kantakaupungissa yleisestä sekaviemäröinnistä. Suurempi lämmitystarve puolestaan voi johtua suuremmista lämpöhäviöistä Suomenojalla kylminä vuodenaikoina johtuen siitä, että puhdistamon ilmastusaltaat sijaitsevat ulkoilmassa toisin kuin Viikissä.

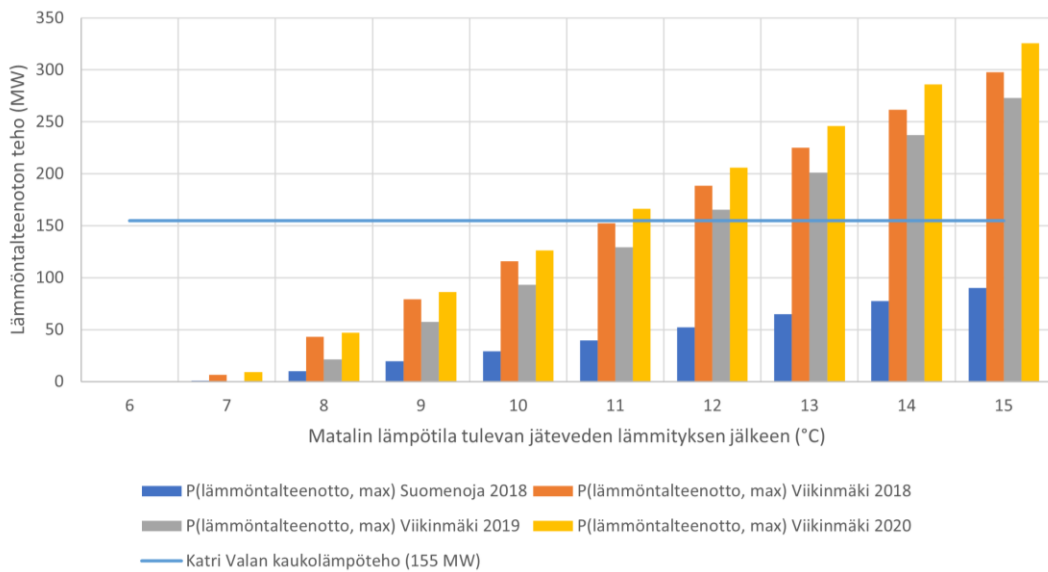
Taulukko 6: Tulevan jäteveden lämmityksen vaatimat lämpömäärät, lämpötehot ja sähköenergia lämpötilatavoitteittain Suomenojan jätevedenpuhdistamolla 1.3.2018–28.2.2019.

T_{Tavoite}	$Q_{\text{lämmitys, maks./d}}$ (MWh)	$H_{\text{LT, maks.}}$ (MW)	$H_{\text{LTO, maks.}}$ (MW)	E (MWh)
7	0,9	0,7	0,84	0,31
8	45,2	8,6	10,1	54,7
9	226	16,7	19,6	533
10	464	25,0	29,3	1 960
11	705	33,8	39,6	4 900
12	947	44,7	52,2	9 340
13	1 190	55,5	64,9	15 400
14	1 430	66,3	77,5	22 600
15	1 670	77,1	90,2	30 760

Taulukosta 5 ja kuvista 11 ja 12 huomataan, että saapuvan jäteveden lämmittäminen vähintään lämpötilaan 11 °C on mahdollista Katri Valan kaukolämpötehoa vastaavalla 155 MW:n lämmitysteholla kaikkina vuosina paitsi 2020. Minimilämpötilan 9 °C saavuttaminen on mahdollista suurimmillaan (2020) alle 74 MW:n lämmitysteholla, ja sähkön kokonaiskulutus on tällöin alle 1 000 MWh. Huomataan, että sähkönkulutus alkaa nousemaan voimakkaammin lämpötilojen 9–10 °C välillä, joten voidaan tulkita, ettei minimilämpötilan asettaminen ainakaan tätä korkeampiin lämpötiloihin ole taloudellisesti kannattavaa.



Kuva 12: Sähkön vuosikulutus saapuvan jäteveden lämmittämiseksi tavoitelämpötilan funktiona vuosittain jätevedenpuhdistamoilla.



Kuva 11: Suurimmat lämmöntalteenottotehot, jotka Viikinmäen ja Suomenojan jätevedenpuhdistamoilla vaaditaan eri vuosina lämpötilatavoitteittain.

Esimerkiksi Viikinmäessä vuonna 2018 tulevan jäteveden lämmityksen tavoitelämpötilan ollessa 11 °C lämmitystä olisi tarvittu tammi–toukokuussa ja marras–joulukuussa. Taulukko 5 osoittaa, että sähkönkulutus oli tällöin yhteensä 2 880 MWh. Näiden kuukausien pörssisähkön verollinen keskihinta oli 54,43 €/MWh, joten koko vuoden tulevan jäteveden lämmityksen 11 °C minimilämpötilaan kuluttaman sähköenergian kustannukset kaavan (14) mukaan ovat noin 157 000 € (pohjadata [52]).

Minimilämpötilojen 8 tai 9 °C saavuttaminen olisi ollut puolestaan mahdollista huomattavasti pienemmillä sähköenergian kustannuksilla 2 896 € ja

13 180 €. Vuonna 2020 11 °C minimilämpötilan saavuttaminen olisi pörsisähkön 31,56 €/MWh keskihinnalla maksanut kulutetun sähköenergian osalta noin 252 000 €, mikä osoittaa, että jätevedenpuhdistamolle saapuneiden kylmien sulamisvesien määrä oli huomattavasti suurempi, jolloin tarvetta lämmitykselle olisi ollut enemmän (pohjadata [52]).

Suomenojan jätevedenpuhdistamolla tulevan jäteveden lämmityksen minimilämpötilan 9 °C vaatima sähköenergia olisi 57,72 €/MWh:n keskihinnalla maksanut jopa 30 760 €, joka on huomattavan suuri kustannus verrattuna Viikinmäen kustannukseen, kun otetaan huomioon laitosten kokoero. Tämä kertoo Suomenojan suuremmasta lämmitystarpeesta virtaamaa kohden (pohjadata [52]).

Puhdistusprosessin matalimman lämpötilan sijasta voidaan myöskin tarkastella, kuinka paljon energiaa vaatisi saapuvan jäteveden lämpötilan nostaminen aina esimerkiksi yhdellä asteella. Jätevesilämpö-projektin työpaketissa 3 oli lähtökohtana nimenomaan saapuvan jäteveden keskilämpötilan laskun vaikutukset typpikuormaan [53]. Jotta kyseisen työn tuloksiin saadaan yhtymäkohtia ja vertailtavia tuloksia, taulukko 7 esittää sähkönkulutuksen vuosittain kokonaisuudessaan ja päivää kohti, jos saapuvan jäteveden lämpötilaa nostettaisiin jatkuvasti yhdellä asteella. Lisäksi taulukossa esitetään sähkön kokonaiskulutus, kun lämpötilaa nostetaan yhdellä asteella saapuvan jäteveden lämpötilan ollessa alle 12 °C. Huomataan, että lämpötilan jatkuva nostaminen vaatii runsaasti energiaa verrattuna aiemmin esitettyihin tuloksiin minimilämpötilojen nostamisesta. Myös tapauksessa, jossa tulevaa jätevettä lämmitetään sen lämpötilan ollessa alle 12 °C, sähköenergian kulutus on huomattavan suurta. Samalla lämmönsiirron määrällä tulevan veden minimilämpötila olisi mahdollista nostaa välille 11–12 °C kussakin tapauksessa.

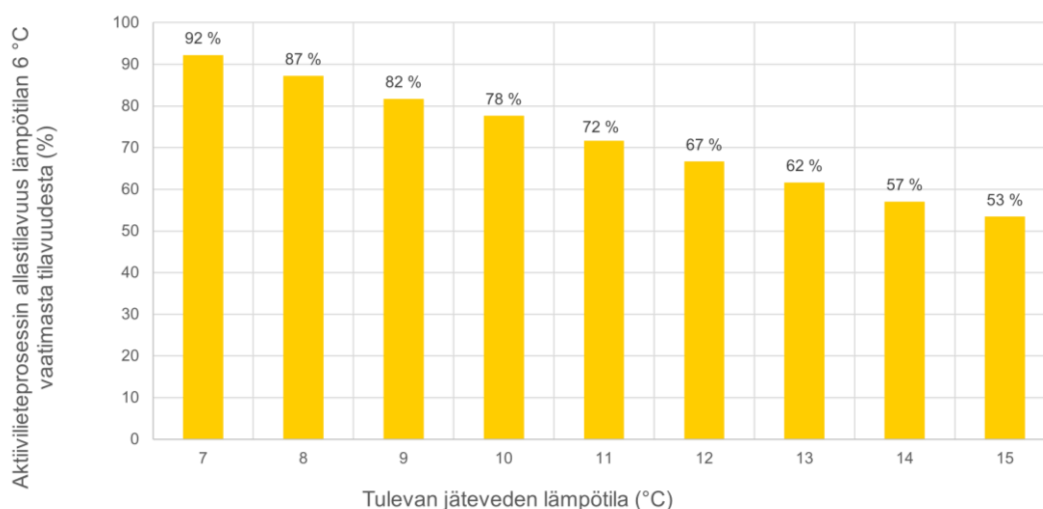
Taulukko 7: Viikinmäen (2018–2020) ja Suomenojan (1.3.2018–28.2.2019) jätevedenpuhdistamoille saapuvan jäteveden lämmittämiseen yhdellä asteella kuluva sähköenergia.

Vuosi	E (MWh)	E/d ka. (MWh)	E ($T_{in} < 12$ °C) (MWh)
2018 (Viikinmäki)	40 900	112	6 750
2019 (Viikinmäki)	47 700	131	12 800
2020 (Viikinmäki)	48 900	134	12 000
1.3.2018-28.2.2019 (Suomenoja)	15 800	43,3	5 200

5.1.2 Vaikutukset typenpoistoon ja ilmastustilavuuteen

Tämän tapaustutkimuksen tavoite on selvittää saapuvan jäteveden lämmityksellä saavutettavia hyötyjä puhdistusprosessin typenpoistossa. Kuten Ahonen [53] diplomityössään työssään tuo ilmi typenpoiston vaatima

aktiivilieteprosessin tilavuus kasvaa saapuvan jäteveden lämpötilan las-
kiessa ja kasvu on astetta kohden voimakkaampaa, mitä kylmemmistä läm-
pötiloista on kyse. Kuva 13 on tehty perustuen Ahosen työssä simuloituihin
tuloksiin prosessin tilavuuden kasvusta lämpötilan laskiessa. Tässä tapauk-
sessa kuvaajassa saapuvan jäteveden lämpötila 6 °C on asetettu vertailuta-
soksi, jonka edellyttämä prosessin tilavuus vastaa 100 % tilavuutta. Kun tu-
levan jäteveden lämpötilaa nousee, vaadittu ilmastustilavuus pienenee eli
tulolämpötilalle 7 °C vaadittu tilavuus on 92 % alkuperäisestä, ja lämpöti-
lalle 12 °C 67 % alkuperäisestä tilavuudesta. Kyseisessä työssä lämpötilan
laskeminen asteella tarkoittaa tulovirtauksen keskilämpötilan laskua as-
teella.



Kuva 13: Aktiivilieteprosessin vaatima allastilavuus verrattuna jäteveden tu-
lolämpötilaan 6 °C, kun tulolämpötila nousee. Kuvaaja muodostettu Ahosen
[53] diplomityön tuloksista.

Vertailukelpoisten tulosten saamiseksi lämmityksen vaikutuksista typen-
poiston vaatimiin ilmastustilavuuksiin, taulukko 8 kokoaa saapuvan jäteve-
den lämpötilakeskiarvot niiltä tunneilta, joihin lämpötila on alle 12 °C. Taulu-
kossa on esitetty lämpötilat, joihin tulevan jäteveden lämpötila pitää nostaa,
jotta kylmien jaksojen keskiarvo nousisi asteella. Nähdään, että minimiläm-
pötilan on oltava Suomenojalla 11,25 °C ja Viikinmäessä 11,5–12,0 °C. Kuva
13 osoittaa, että yhden celsiusasteen nousu lämpötilojen 11–12 °C välillä joh-
taa tarvittavan ilmastustilavuuden pienenemiseen noin 7 % ja lämpötilojen
10–11 °C välillä noin 8 %. Kuten luvussa 3.2 mainitaan, ilmastustilavuus Vii-
kinmäen jätevedenpuhdistamolla on 103 500 m³ ja Suomenojalla 36 000 m³.
Viikinmäellä ilmastustilavuuden pienentyminen 7 % vastaisi siis 7 245 m³ ja
Suomenojalla ilmastustilavuuden pienentyminen 8 % vastaisi 2 880 m³. Ku-
ten aiemmin todettu, lämmityksen kannattavuus alkaa kuitenkin laskea jo
tavoitelämpötilan 9 °C yläpuolella. Tämäkin lämmityslämpötila saa aikaan
lämpötilakeskiarvojen nousua, jolla vaadittavaa ilmastustilavuutta saadaan

pienennettyä rajatusti. Tässä tapauksessa käytettiin lämpötilakeskiarvon nousua celsiusasteella, jotta voitiin käyttää apuna Ahosen [53] tuloksia ilmastustilavuuksien muutoksista lämpötilan muuttuessa asteittain.

Taulukko 8: Jätevedenpuhdistamoille saapuvan jäteveden lämpötilan keskiarvot vuosittain niiltä tunneilta, joina saapuvan jäteveden lämpötila on alle 12 °C ja lämmityksessä tavoiteltavat minimilämpötilat, jotta lämpötilakeskiarvo nousee 1 °C.

	Suomenoja 2018	Viikinmäki 2018	Viikinmäki 2019	Viikinmäki 2020
$T_{in, ka.}$ (°C), kun $T_{in} < 12$ °C	10,35	11,00	10,54	10,77
$T_{tavoite}$ (°C)	11,25	12,00	11,50	11,75
$\Delta T_{in, ka.}$ (°C) tuntien osalta, joina $T_{in} < 12$ °C	1,00	1,00	1,01	1,00

5.2 Tapaustutkimus 2

Tapaustutkimus 2 keskittyy jäteveden lämmön kausivarastoinnin mahdollisuuksiin. Lämmöntalteenotto tapahtuu tässäkin tapauksessa puhdistetusta jätevedestä. Talteen otettavaa lämpöä varastoidaan lämmön kausivarastoon, jonka varastointikapasiteetin suuruus päätetään perustuen olemassa oleviin lämpövarastoihin ja saatavissa olevaan lämpömäärään. Kausivaraston mahdollisia toteutustapoja vertaillaan keskenään ja todellisiin lämmön kausivarastoihin. Tässä tutkimuksessa selvitetään kahden eri sulamispisteen faasimuutosmateriaalin käyttöä latenttilämpövarastossa verrattuna tuntuvaan lämpöön perustuviin lämpövarastoihin.

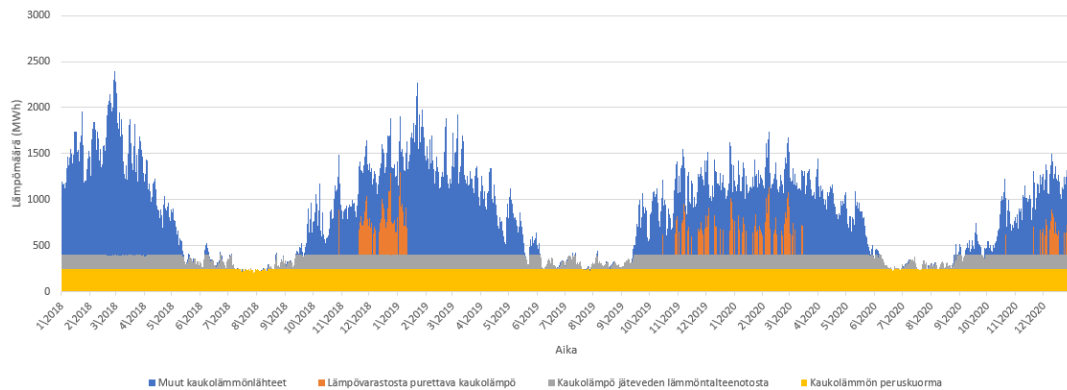
Ensimmäiseksi tapaustutkimuksessa selvitettiin luvussa 4.3.1, kuinka paljon puhdistusta jätevedestä on saatavissa lämpöä ja miten paljon eri kokoisilla lämpövarastoilla voidaan kattaa kaukolämmön kysyntäpiikkejä Helsingissä.

Seuraavaksi valitaan käytettävät lämpövarastojen väliaineet ja faasimuutosmateriaalit perustuen haluttuihin ominaisuuksiin. Tuntuvaan lämpöön perustuvan lämpövaraston väliaine ja varastotyyppi valitaan varastolta vaadittavien ominaisuuksien ja sijainnin perusteella. Faasimuutosmateriaaleiksi valitaan materiaalit kahteen eri tavalla ladattavaan lämpövarastoon. Ensimmäisen faasimuutosmateriaalin sulamispiste on niin matala, että varastoa voidaan ladata suoraan puhdistella jätevedellä. Viimeisessä vertailtavassa lämpövarastossa käytetään faasimuutosmateriaalia, jonka sulamispiste on hieman korkeampi, jolloin lämpövarastoa ladataan puhdistetusta

jätevedestä talteen otetulla lämmöllä, jonka lämpötilaa nostetaan lämpöpumpuilla.

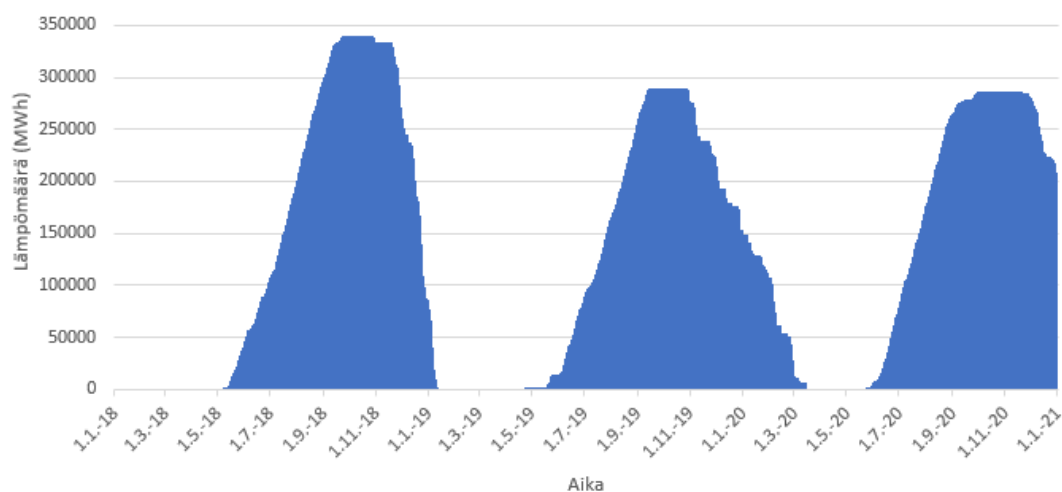
5.2.1 Lämpövaraston koko ja käyttö

Lämpövarastolle määritetään varastointikapasiteetti luvussa 4.3.2 esitettyjen asioiden, kuten kaukolämmön kysynnän ja jäteveden lämmöntalteenoton perusteella. Kuva 14 esittää rajoittamattoman varastointikapasiteetin lämpövaraston purkamista kaukolämmön kysynnän mukaan. Tässä tapauksessa lämpövarastoon varastoidaan kaikki lämpö, joka kaukolämmön kysynnän täyttämisen jälkeen jää ylijäämäksi. Lämpövaraston ideaalinen maksimikapasiteetti on 339 958 MWh. Lämpövarastoa puretaan niinä tunteina, joina kaukolämmön kysyntä ylittää 1 150 MW ja purettava lämpömäärä saadaan kaavalla (15).

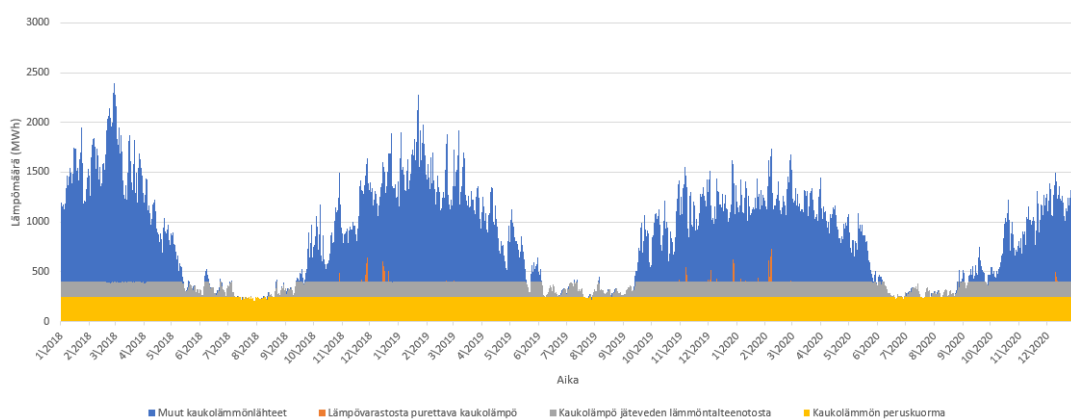


Kuva 14: Todellinen tunneittainen kaukolämmönkysyntä Helsingissä vuosina 2018–2020 (sininen). Kuvaajaan on lisätty kaukolämmön peruskuorman, jäteveden lämmöntalteenoton ja lämpövarastosta (rajoittamaton varastointikapasiteetti).

Kuva 16 osoittaa, ettei lämpövaraston optimointi ole tällä tavalla paras mahdollinen, sillä varasto saadaan ladattua täyteen vain vuonna 2018 ja muina vuosina varastoitu lämpömäärä jää noin 50 000 MWh pienemmäksi. Myöskään lämpövaraston purkamisen ei ole optimaalista vuosien 2018–19 välillä, sillä varasto tyhjenee nopeasti noin kuukauden aikana eikä suurimpien kysyntäpiikkien kattamiseen riitä enää lämpöä. Vuosien 2019–20 välillä varaston purkamisen on optimaalisempaa ja lämpöä riittää lähes koko korkeimman kysynnän jaksolle.) purettavan lämmön osuudet.



Kuva 16: Lämpövaraston täyttöaste vuosina 2018–2020, kun varaston kapasiteettia ei rajoiteta ja suurin varastoitu lämpömäärä on 339 958 MWh.



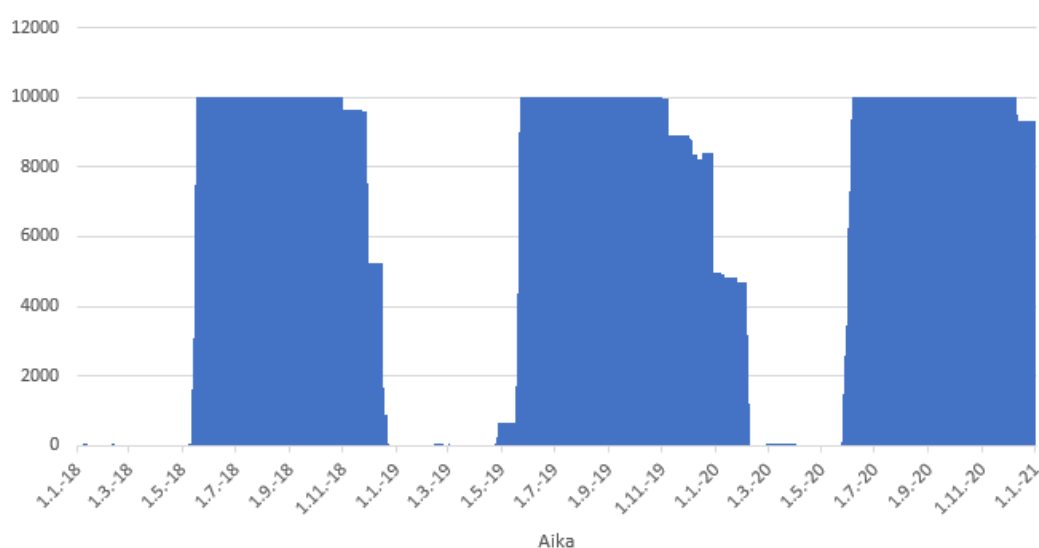
Kuva 15: Todellinen tunneittainen kaukolämmönkysyntä Helsingissä vuosina 2018–2020 (sininen). Kuvaajaan on lisätty kaukolämmön peruskuorman, jäteveden lämmöntalteenoton ja lämpövarastosta (10 GWh) purettavan lämmön osuudet.

Todellisuudessa lämpövaraston koko on rajattava pienemmäksi eikä kaikkea tässä tapauksessa tarjolla olevaa ylijäämälämpöä pystytä varastoimaan. Kapasiteetiltaan rajoitettu lämpövarasto, jota Kuva 15 esittää toimii samalla toimintaperiaatteella kuin edellä esitelty ideaalisen suuri lämpövarasto, mutta varastointikapasiteetti on 10 000 MWh. Varaston purkamista rajoitettava erotus (ks. kaava (15)) on tässä tapauksessa asetettu pienemmäksi ja kaukolämmön kysynnän raja, jolla varastoa puretaan suuremmaksi, jotta varasto ei tyhjenisi heti kaukolämmön kysynnän noustessa.

Lämpövaraston kapasiteetiksi valitaan tässä tapauksessa 10 000 MWh, joka on tarpeeksi suuri energiamäärä kaukolämmön kysyntäpiikkien tasamiseen kausittaisesti etenkin, yhdessä muiden Helsingin lämmön kausivarausten kanssa. 10 000 MWh on myös varastokoko, jonka toteuttamista

voidaan pitää mahdollisena ja kannattavana, sillä vastaavan kokoluokan varastoja on jo myös Helsingissä, kuten luvussa 2.2.1 tuotiin esiin.

Kuva 17 tuo esiin, että lämpövaraston, jonka varastointikapasiteetti on 10 000 MWh lataaminen täyteen tapahtuu käytettävissä olevilla lämpömäärillä hyvin lyhyen ajan sisällä. Lämpövarastoa kannattaa purkaa tarvittaessa myös talven ulkopuolella, jotta siitä saadaan mahdollisimman suuri hyöty, kunhan varmistetaan, että varasto ehditään ladataan talveksi täyteen. Asetetuilla rajoilla myös purkaminen tapahtuu muutamissa jaksoissa melko lyhyen jakson aikana. Jos lämpövaraston purkaminen asetetaan tarkemmin suurimpien kaukolämmön kysyntäpiikkien kattamiseen, varastoitua lämpöä saadaan riittämään pidemmälle ajalle talvisin.



Kuva 17: Kapasiteetiltaan 10 000 MWh:n lämpövaraston täyttöaste vuosina 2018–2020, kun lämpövarastoa puretaan, kuten Kuva 15 osoittaa.

5.2.2 Lämpövarastojen vertailu

Tässä luvussa vertaillaan toisiinsa kolmea erilaista lämpövarastoa, jotka mahdollisesti sopivat luvussa 4.3.2 kuvatulla tavalla käytettävän lämmön kausivaraston toteuttamiseen. Kullekin vertailtavalle lämpövarastolle valitaan sopivin varastointimateriaali niin, että varasto toimii tavoitellulla tavalla ja on kustannuksiltaan mahdollisimman edullinen. Vertailtaviksi lämpövarastoiksi valitaan seuraavat lämpövaraston toteutustavat:

1. Tuntuvaan lämpöön perustuva lämpövarasto, jonka väliaineena käytetään vettä
 - a. Vertaillaan kategorian kahta eri varastotyyppiä
2. Latenttilämpövarasto, jota ladataan suoraan puhdistetun jäteveden lämpötiloja hyödyntämällä
 - a. Faasimuutosmateriaalin sulamispiste on lämpövaraston latauskaudella matalampi, kuin puhdistetun jäteveden lämpötila

3. Latenttilämpövarasto, jota ladataan puhdistetusta jätevedestä talteen otettavalla lämmöllä
 - a. Lataamiseen käytettävän veden lämpötilaa nostetaan lämpöpumpuilla eli faasimuutosmateriaalin sulamispiste voi olla korkeampi kuin kohdassa 2.

Tuntuvaan lämpöön perustuvassa lämpövarastossa väliaineena käytetään vettä, koska lämpöä veteen varastoitaessa varaston tilavuus pysyy kohtuullisen suuruisena johtuen vesilämpövaraston suuresta energiatiheydestä verrattuna moniin muihin väliaineisiin. Veden tapauksessa väliaineen hinta ei nosta varaston kustannuksia, jotka muodostuvat lähinnä rakennuskustannuksista. Porakaivolämpövarastoa ei valita vertailtavaksi lämpövarastoksi kaivojen suurten porauskustannusten ja merkittävien lämpöhäviöiden takia [10] [24]. Tuntuvaan lämpöön perustuvaa lämpövarastoa käytetään tutkimuksessa vertailukohtana latenttilämpövarastoihin. Vesi on käytetyin materiaali lämpövarastoissa, joten vastaavia lämpövarastoja, joissa käytetään vettä väliaineena, on runsaasti. Olemassa olevia lämpövarastoja voidaan käyttää referensseinä tämän tutkimuksen lämpövarastolle, jolloin sen ominaisuuksia ja kustannuksia voidaan arvioida.

Vesilämpövaraston toteutustapoja vertailtaessa käytetään referenssilämpövarastona Helenin Mustikkamaan luolalämpövarastoa, jonka lämpövarastointikapasiteetti on 11 600 MWh, varastotilavuus 260 000 m³ ja latauslämpötila 90 °C [11]. Sen perusteella lämpövaraston, jossa väliaine on pelkkää vettä ja lämpövarastointikapasiteetti on 10 000 MWh vaatima varastotilavuus on noin 224 000 m³. Suuri varastotilavuus sulkee säiliölämpövaraston pois mahdollisista lämpövarastoista, sillä säiliölämpövarastojen varastotilavuus ei ylitä 100 000 kuutiometriä ja useiden säiliöiden rakennuskustannukset olisivat erittäin suuret [10]. Pohjavesilämpövarastojen rakentaminen rakennetulle alueelle voi olla haastavaa eikä tarpeeksi suuria käytettävissä olevia pohjavesiesiintymiä välttämättä löydy. Vertailu tuntuvaan lämpöön perustuvien lämpövarastojen osalta tehdään luolalämpövarastojen ja allaslämpövarastojen välillä, sillä niiden koot voivat olla hyvin suuria ja niiden rakentaminen on mahdollista useimpiin sijainteihin.

Tuntuvaan lämpöön perustuvan lämpövaraston varastotilavuus lasketaan kaavalla (16). Taulukko 9 esittää varastotilavuuksia lämpövarastolle, jonka väliaine on vesi ja lämpövarastointikapasiteetti 10 000 MWh lämpövarastossa käytettävän lämpötilaeron mukaan. Huomataan, että Mustikkamaan lämpövaraston varastotilavuuden ollessa 260 000 m³ lämpötilaero ladatun ja puretun varaston välillä on kaavan (16) mukaisesti 38 °C. Mustikkamaan varasto ei ole kausivarasto ja sitä voidaan purkaa jopa 120 MW:n teholla varaston lämpötilan ollessa alimmillaan 45 °C. Jos lämpövarasto puretaan matlampaan lämpötilaan, saatava lämpöteho on pienempi, mutta myös varastotilavuutta saadaan pienennettyä. Lämpötilaerolla 70 °C varastotilavuus olisi enää noin 123 000 m³, joka on alle puolet Mustikkamaan lämpövaraston tilavuudesta.

Taulukko 9: Lämpövaraston varastotilavuuksia lämmitetyn ja jäähtyneen veden lämpötilaeron mukaan varastointikapasiteetin ollessa 10 GWh.

ΔT (°C)	V (m ³)
30	287 000
40	215 000
50	172 000
60	143 000
70	123 000

Luvussa 2.2.1 esiteltyyn luolalämpövaraston toteutuksessa suurimmat kustannukset syntyvät luolaston louhimisesta. Mikäli käytettävissä on valmis luolasto, kustannuksia voidaan saada rajattua merkittävästi. Helenin Mustikkamaan luolalämpövaraston tapauksessa luolasto oli valmiiksi olemassa ja lämpövaraston investoinnin arvo on noin 15 000 000 € [54]. Luolalämpövaraston etuja ovat sen maanalainen sijainti, joka säästää arvokasta tilaa kaupunkialueilla ja mahdollisuudet hyvään lämpöeristykseen verrattuna esimerkiksi porakaivolämpövarastoon. Huono puoli luolalämpövaraston toteutuksessa on rakennuskustannuksien suuruus, jos varastolle louhittaisiin uusi luolasto.

Yksi mahdollisuus lämpövaraston sijoittamiseen ovat Salmisaaren voimalaitoksen hiilivarastot, jotka kivihiilen käytön loppuessa Helsingissä vuonna 2024 jäävät mahdollisesti ilman käyttötarkoitusta. Salmisaareen on neljä maanalaisista hiilisiiloa, jotka ovat 65 metriä korkeita ja 40 metriä leveitä eli yhden siilon tilavuus on noin 81 700 m³ ja tilavuus yhteensä 327 000 m³ [55]. Siiloihin voisi sijoittaa luolalämpövaraston, joka täytettäisiin vedellä Mustikkamaan lämpövaraston tapaan. Kaavasta (16) voidaan laskea, että jos kaksi siiloista täytettäisiin vedellä, 10 000 MWh:n varastointikapasiteetin saavuttaminen vaatisi noin 53 °C:n lämpötilaeron lämpövaraston toiminnassa, joten lämpövarasto voisi toimia esimerkiksi lämpötilavälillä 40 °C–93 °C. Kun referenssilämpövarastona käytetään Mustikkamaan lämpövarastoa, voidaan laskea kustannusarvio esimerkiksi kahden hiilisiilon muuttamisesta luolalämpövarastoiksi perustuen varastotilavuuksiin. Kaavan (20) mukaan Mustikkamaan lämpövaraston tapauksessa investointikustannukset kuutiometriä kohden ovat 57,7 €/m³. Kahden Salmisaaren hiilisiilon tilavuus on yhteensä 163 400 m³, jonka muuttaminen lämpövarastoksi vastaavilla investointikustannuksilla maksaisi 9 430 000 €. Jos investointikustannukset puolestaan lasketaan kilowattituntia kohden, ne ovat Mustikkamaan lämpövarastolla kaavan (21) perusteella 1,29 €/kWh. Tällöin 10 000 MWh:n lämpövaraston hinta olisi 12 930 000 €.

Allaslämpövarasto puolestaan vaatisi runsaasti maanpäällistä tilaa, jota kaupunkiympäristössä ei usein ole saatavilla. Kuitenkin halutun kokoluokan allaslämpövaraston toteuttaminen olisi mahdollista, sillä esimerkiksi Tanskan Vojensissa sijaitsee varastotilavuudeltaan 203 000 m³:n

allaslämpövarasto. Allaslämpövaraston etu on suhteellisen edulliset investointikustannukset, jotka joidenkin suurien allaslämpövarastojen tapauksessa ovat vain 20 €/m³. [21]. Referenssilämpövarastoksi valitaan Tanskan Marstalissa sijaitseva allaslämpövarasto, jonka varastotilavuus on 75 000 m³ ja varastointikapasiteetti 5 430 MWh. Lämpövarasto toimii lämpötilavälillä 20–84 °C eli lämpötilaero on 64 °C. [56]. Lämpövaraston investointikustannukset olivat 2 630 000 € eli 35,1 €/MWh [21]. Kaavasta (21) lasketut investointikustannukset kilowattituntia kohden puolestaan ovat 0,48 €/kWh. Samalla lämpötilaerolla toimivan 10 000 MWh lämpövaraston tilavuus olisi kaavan (16) mukaan 134 440 m³, jolloin investointikustannuksiksi kaavasta (20) saadaan 4 719 000 €. Varastointikapasiteetin perusteella kaavan (21) mukaan laskettaessa investointikustannuksiksi saadaan 4 843 000 €. Allaslämpövaraston huono puoli on mahdollisesti luolalämpövarastoa suuremmat lämpöhäviöt, jotka Marstalin lämpövaraston tapauksessa ovat jopa 38 % [56].

Taulukko 10: Mahdollisesti latenttilämpövaraston faasimuutosmateriaaliksi sopivien materiaalien ominaisuuksia.

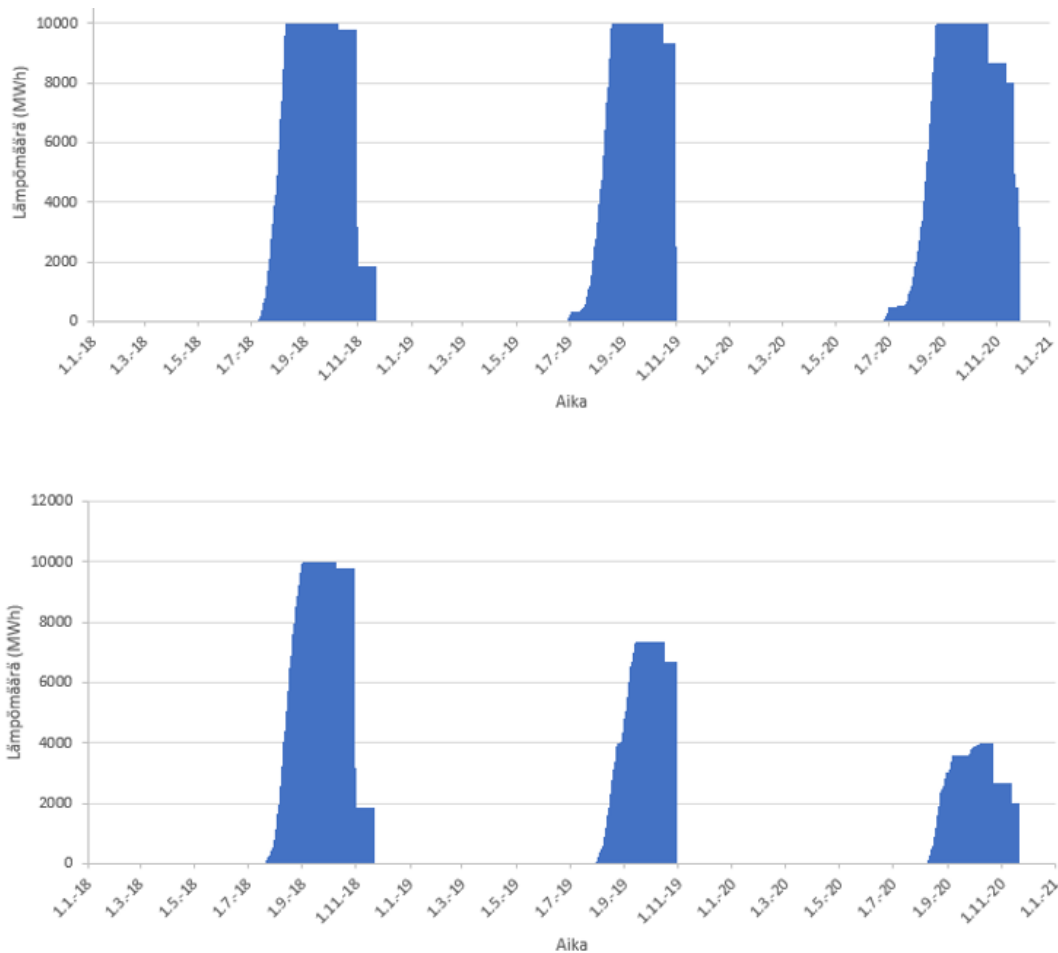
Materiaali	T_m (°C)	s (kJ/kg)	c_p (kJ/(kg·K))	ρ (kg/m ³)	k (W/(K·m))	Lähteet
Muura- haishappo	8	277	2,152	1 227	0,274	[57]
Oleiinihappo	13,5– 16,3	75,5	1,744 (liq)	871 (liq)	0,103 (liq)	[58], [59], [57]
Akryylihappo	13	115	2,050 (liq)	1 050	0,190	[60], [58], [57]
Etikkahappo	17	192	2,050	1 214	0,158	[57]
CaCl ₂ · 6H ₂ O	29	190	1,420	1 710	-	[30]
Glauberin suola (NaSO ₄ · 10H ₂ O)	32	251	2,090 (sol) 3,350 (liq)	1 485 (sol)	0,544	[58], [61]
ClimSel C7	4–8	135	-	1 400 (liq)	0,78 (sol) 0,59 (liq)	[62]
ClimSel C32	28– 32	145	-	1 500	0,76 (sol) 1,08 (liq)	[62]
ClimSel C48	48– 53	197	-	1 300 (liq)	0,76 (sol) 0,53 (liq)	[62]

Seuraavaksi valitaan latenttilämpövarastoissa käytettävät faasimuutosmateriaalit. Materiaalin valinta tehdään sulamispisteeltään sopivien

materiaalin välillä perustuen muiden ominaisuuksien vertailuun. Haluttavia ominaisuuksia ovat luvun 2.3.1 mukaisesti korkea sulamislämpö, riittävä lämmönjohtavuus ja mahdollisimman alhainen hinta. Myös ominaislämpökapasiteetti otetaan tarvittaessa huomioon, jos materiaalin lämmittäminen on mahdollista faasimuutoksen lisäksi. Taulukko 10 kokoaa eräiden faasimuutosmateriaalien ominaisuuksia, jotka ovat sopivia tässä tarkoituksessa käytettäville faasimuutosmateriaaleille.

Ensimmäiseksi valitaan matalan sulamislämpötilan faasimuutosmateriaali. Lämpövarastoa ladataan vain puhdistetun jäteveden lämpötilan ollessa korkeampi kuin faasimuutosmateriaalin sulamispiste ja lämpöä saadaan siirrettyä varastoon puhdistetun jäteveden lämpötilan ja sulamispisteen erotuksen mukaisesti kaavasta (8). Kuva 18 osoittaa, että faasimuutosmateriaalin sulamispiste voi olla korkeintaan 18 °C, jotta kapasiteetiltaan 10 000 MWh:n lämpövarasto olisi saatu kunakin vuonna ladattua täyteen. Tarkasteluun valittuja materiaaleja, joiden sulamispiste on korkeintaan 18 °C ovat muura-haishappo, oleiinihappo, akryylihappo, etikkahappo ja ClimSel C7. ClimSel on ruotsalaisen Climator Sweden AB:n PCM-tuotemerkki, jonka materiaalit ovat suolahydraattipohjaisia [62]. Sulamispisteeltään sopivista materiaaleista muura-haishapon (HCOOH) sulamislämpö selvästi suurin (277 kJ/kg). Lisäksi sekä ominaislämpökapasiteetti, tiheys että lämmönjohtavuus ovat suurempia kuin muilla materiaaleilla. Matalan sulamispisteen faasimuutosmateriaaliksi toiseen vertailtavaan lämpövarastoon valitaan täten muura-haishappo. Muura-haishapon hinta vaihtelee noin 0,35–1,0 €/kg välillä [63].

Viimeisen vertailtavan lämpövaraston lataus tehdään korkeammassa lämpötilassa olevalla lämmöllä, jonka lämpötila on nostettu lämpöpumpuilla puhdistetun jäteveden lämmöstä. Kaukolämmön minimilämpötila Helsingissä on 65 °C, jota käytetään tässä tapauksessa tuotettavan lämmön lämpötilana, joten faasimuutosmateriaalin sulamispisteen on oltava sitä matalampi [41]. Aineista, jotka taulukko 10 listaa, korkein sulamislämpö muura-haishapon jälkeen on natriumsulfaatti-dekahydraatilla, josta käytetään myös nimitystä Glauberin suola [61]. Sen sulamispiste on 32 °C, joten sillä täytetyn varaston lataaminen onnistuisi hyvin kaukolämmöllä eikä varastointi sulana aiheuttaisi suuria lämpöhäviöitä normaalin sisälämpötilan ja maaperän lämpötilan ollessa lähellä sitä. Nähdään, että natriumsulfaatilla on lisäksi hyvä lämmönjohtavuus, korkea tiheys ja se voi olla edullista suurina määrinä tilattuna (noin 0,07 €/kg) [64]. Tämän takia kolmannen vertailtavan lämpövaraston faasimuutosmateriaaliksi valitaan Glauberin suola.



Kuva 18: 10 000 MWh:n lämpövaraston täyttöaste faasimuutosmateriaalin sulamispisteen ollessa 18 °C (ylempi) ja 19 °C (alempi). Lämpövarastoa ladataan puhdistetun jäteveden lämmöllä, kun sen lämpötila on sulamispistettä korkeampi.

Kaavalla (17) saadaan latenttilämpövarastossa tarvittava faasimuutosmateriaalin massa, josta voidaan kaavalla (7) laskea varastotilavuus. Taulukko 11 esittää faasimuutosmateriaalin massat ja varastotilavuudet, kun faasimuutosmateriaalina käytetään muurahaishappoa ja natriumsulfaattia. Latenttilämpövarastoiden kustannusarviot on laskettu kaavalla (22). Jos faasimuutosmateriaalia voidaan lämmittää sulassa olomuodossa tai lämpötilaa laskea kiinteässä olomuodossa, saadaan lämpövarastointikapasiteettia samassa tilavuudessa kasvatettua entisestään. Taulukko 10 sisältää arvoja muun muassa materiaalien sulamislämmöille ja ominaislämpökapasiteeteille, joita käyttämällä kaavalla (19) saadaan 10 000 MWh:n natriumsulfaattia käyttävän latenttilämpövaraston varastotilavuudeksi 69 000 m³, kun sulaa faasimuutosmateriaalia lämmitetään 30 °C:lla eli lämpötilaan 62 °C faasimuutoksen jälkeen. Tällaisen lämpövaraston sijoittaminen olisi

varastotilavuuden puolesta mahdollista yhteen Salmisaareen hiilisiiloon. Ongelmaksi voisi muodostua materiaalin lämmönkestävyys kuumennuksessa.

Taulukko 11: Eri lämpövarastotyyppien toimintalämpötilat, varastomateriaalien massat, varastotilavuudet ja kustannusarviot 10 000 MWh:n lämpövarastointikapasiteetille.

Väliaine	Lämpövarastotyyppi	T (°C)	m (t)	V (m ³)	Kustannusarvio (€)
Vesi	SHS: CTES	40–93	163 400	163 400	9 430 000– 12 930 000
Vesi	SHS: PTES	20–84	134 440	134 440	4 719 000– 4 843 000
Muurahaishappo	LHS	n. 8	130 000	106 000	51 616 000
Glauberin suola	LHS	n. 32	143 000	96 600	15 671 000
Glauberin suola	LHS & SHS	32–62	102 000	69 000	11 192 000

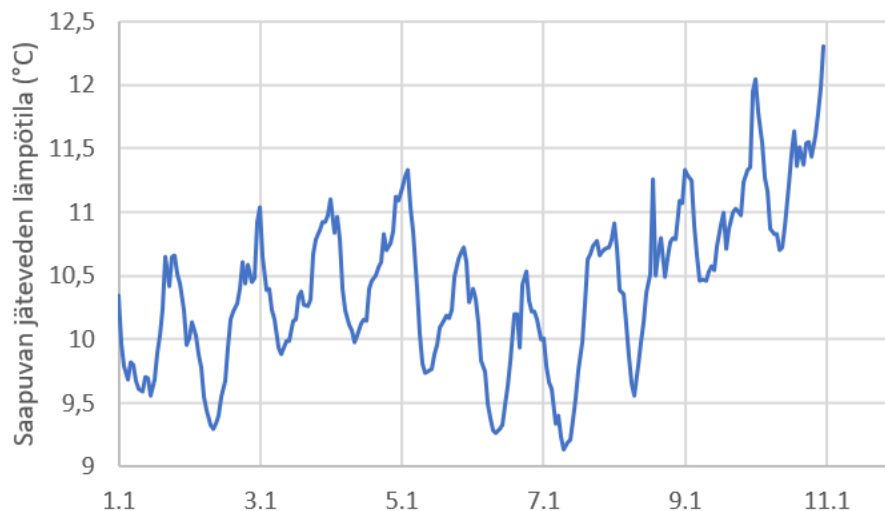
Taulukko 11 osoittaa, että latenttilämpövarastojen investointikustannukset olisivat todennäköisesti tuntuvaan lämpöön perustuvia lämpövarastoja suurempia huolimatta niillä saavutettavasta varastotilavuuden pienentymisestä. Suurten latenttilämpövarastojen rakentamisessa oleellista on käyttää edullista faasimuutosmateriaalia, jolla on korkea lämmönjohtavuus, sillä suuri osa kustannuksista muodostuu faasimuutosmateriaalin hinnasta. Korkea lämmönjohtavuus on oleellinen tekijä, jotta lämmönsiirto lämpövaraston sisällä on tehokasta ja varastoa saadaan purettua ja ladattua riittäväällä nopeudella eikä lämmönsiirron tehostaminen faasimuutosmateriaalissa aiheuta liian suuria lisäkustannuksia. Muurahaishapon huomattavan korkea hinta natriumsulfaattiin verrattuna nostaa muurahaishapolla täytettävän latenttilämpövaraston kustannukset todennäköisesti yli 50 miljoonaan euroon. Muurahaishappo voidaan muita varastomateriaaleja selvästi kalliimpana vaihtoehtona sulkea pois lämpövaraston toteutustavoista.

Puhtaasti hintaan perustuen allaslämpövarasto olisi paras vaihtoehto lämmön kausivarastoksi mutta johtuen sen vaatimasta suuresta pinta-alasta luolalämpövarasto voi kuitenkin olla parempi valinta kaupunkiympäristössä. Luolalämpövaraston rakentamisessa oleellista on löytää valmiiksi louhittu sijainti varastolle, sillä uuden luolaston louhimiskustannukset nostavat kustannusarviota huomattavasti.

5.3 Aineiston ja tulosten luotettavuuden arviointi

5.3.1 Aineiston luotettavuus

Diplomityössä käytettyjä aineistoja voidaan pitää luotettavina. HSY:n data jätevedenpuhdistamoilta sisältää jonkin verran puuttuvia mittauksia, mikä lisää tulosten epävarmuutta. Datasta on kuitenkin pyritty käyttämään jaksot, joina puuttuvia mittauksia on vähiten. Puuttuvat datajaksot ovat lähinnä muutamien tuntien pituisia ja interpoloimalla lasketut korvaavat arvot ovat todennäköisesti melko lähellä todellisia lämpötilojen ja virtaamien arvoja, sillä datassa esiintyy vain harvoin voimakkaita vaihteluita muutamien tuntien aikajaksojen sisällä ja saapuvan jäteveden lämpötila muuttuu useimmiten melko lineaarisesti ympäröivien mittausten välillä ja noudattaa tiettyä vuorokausivaihtelua, kuten Kuva 19 osoittaa. Muilta osin HSY:n dataa voi pitää hyvin luotettavana, sillä jätevedenpuhdistamoiden toiminta on tarkasti valvottua ja puhdistamoiden on seurattava tarkasti jäteveden virtaamia ja niiden lämpötiloja ympäristölupiensä mukaisesti [65].



Kuva 19: Viikinmäen jätevedenpuhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötila 1.–10.1.2018.

Jätevedenpuhdistamoilta on dataa usealta vuodelta, joten vuosien välisiä vaihteluita on pystytty arvioimaan tapaustutkimuksissa. Viikinmäen osalta dataa käytetään usealta vuodelta, jolloin vuosien välisiä tuloksia pystytään vertailemaan ja suhteuttamaan vallinneisiin sääoloihin, jotka vaikuttavat voimakkaasti jäteveden sisältämään lämpömäärään ja kaukolämmön kysyntään. Kolmen vuoden aikajakso ei kuitenkaan ole riittävän pitkä aika, jotta tuloksista voitaisiin tehdä johtopäätöksiä lämpötilaltaan ja jätevesien virtaamiltaan keskimääräisestä vuodesta. Sääolojen vaihtelevuus vuosien välillä pitää siis huomioida tuloksia arvioidessa eikä minkään vuoden tuloksia voida pitää varmuudella esimerkkinä tyypillisestä vuodesta.

Helenin avoin data kaukolämmön kysynnästä tunneittain Helsingissä on hyvin luotettavaa, sillä siinä ei esiinny ollenkaan häiriöitä puuttuvina arvoina. Kaukolämmön kysynnän seuraaminen on oleellista tuotannon mitoittamiseksi, joten datan voi olettaa olevan luotettavaa.

5.3.2 Tapaustutkimus 1: tulosten luotettavuus

Tapaustutkimus 1 keskittyy jäteveden lämpötilan vaikutuksiin ilmastustilavuuteen, joka on puhdistusprosessin suurimman allastilavuuden vaatima vaihe jälkiselkeytyksen kanssa [3]. Yksi suurimmista tapaustutkimuksen tulosten epäluotettavuutta lisäävistä tekijöistä on lämpötilan nousun vaikutukset prosessin muihin osa-alueisiin, joita ei huomioida tässä tapauksessa. Typenpoisto on kuitenkin voimakkaasti lämpötilariippuvainen prosessi, jonka tehokkuus paranee lämpötilan noustessa, joten lämpötilan nousulla ja vaa-ditulla ilmastustilavuudella on selvä yhteys.

Jäteveden lämmityksessä täytyy todellisuudessa huomioida jäteveden li-kaisuus. Jätevesi sisältää runsaasti orgaanista ja epäorgaanista materiaalia, joka saattaa huonontaa huomattavasti lämmityslaitteistojen toimintaa ja hyötysuhdetta likaamalla lämmönsiirtopintoja.

Kun verrataan Suomenojan tuloksia Viikinmäen tuloksiin, tulee ottaa huomioon Suomenojan datasta käytetty aikajakso, joka koostuu lähinnä tavallista lämpimämmästä ja kuivemmasta vuodesta 2018. Tuloksia on siis jätevedenpuhdistamoiden välillä järkevää verrata vain vuoden 2018 osalta. Siinäkin tapauksessa virheitä ja tulosten epäluotettavuutta aiheutuu siitä, ettei tiedetä aiheuttaako esimerkiksi kylmempi sää suuremmat lämpöhäviöt Suomenojan jätevedenpuhdistamolla, joka on kattamaton ulkolaitos.

5.3.3 Tapaustutkimus 2: tulosten luotettavuus

Toisessa tapaustutkimuksessa virheitä aiheutuu etenkin siitä, ettei suuren kapasiteetin latenttilämpövarastoista ole saatavilla juurikaan malliesimerkkejä, jolloin niiden toteutettavuus ja ominaisuudet perustuvat suurelta osin oletuksiin ja teoreettisiin arvoihin materiaalien ominaisuuksista.

Lämpövarastojen lataaminen ja purkaminen on toteutettu niin, että las-kelmien ja kuvaajien tekeminen Excelissä oli mahdollista ja käytännöllistä toteuttaa. Todellisuudessa lämpövarastoja kannattaa purkaa useimmiten huipputehoksi, sillä niiden purkaminen on useimmiten joustavaa ja sitä voidaan säädellä lyhyen ajan sisällä. Toisaalta taas esimerkiksi biovoimalaitoksen ylös- ja alasajo voi viedä pitkän ajan ja se voi aiheuttaa korkeat kustannukset varsinkin puhuttaessa tuntien sisällä tapahtuvista muutoksista kaukolämmön kysynnässä. Huipputeholla on siis usein erittäin suuret kustannukset, sillä sitä pitää tuottaa pienillä ja joustavilla tuotantotavoilla, kuten sähköllä tai dieselmoottoreilla, joiden lämmöntuotantokustannukset ja usein hiilidioksidipäästöt tuotettua lämpöyksikköä kohden ovat aina suuria

voimalaitoksia suuremmat. Jos lämpövarastojen purkaminen pystytään optimoimaan suurimpien lämmönkysyntäpiikkien aikaan, säästetään runsaasti kustannuksia ja hiilidioksidipäästöjä. Tässä työssä lämpövarastojen purkaminen kaukolämmöksi ajoitettiin ennen loppuja tuotantomuotoja käytännöllisyyden vuoksi, jotta lämpövaraston kokoa ja käyttöä saatiin muokattua helpommin haluttuun muotoon Excelissä.

Latenttilämpövarastojen kustannusarvioissa syntyy virheitä johtuen las-
kujen yksinkertaistamisesta. Suurten latenttilämpövarastojen rakentamisen on oletettu vastaavan vedellä täytettyjen luolalämpövarastojen rakentamista. Kustannusarvio muodostuu siis varaston rakennuskustannuksista ja faasimuutosmateriaalien hinnasta. Todellisuudessa latenttilämpövarastojen rakentaminen vaatisi erilaisia ratkaisuja kuin tavallisen luolalämpövaraston rakentaminen. Latenttilämpövarastoon pitäisi esimerkiksi tehdä parannuksia lämmönjohtumiseen rakenteilla varaston sisällä ja mahdollisesti erottelemalla faasimuutosmateriaalia pienempiin moduuleihin, jotta lämmön siirtyminen koko faasimuutosmateriaalin massaansa olisi tarpeeksi nopeaa. Nämä ratkaisut nostavat lämpövaraston kustannuksia muun muassa kasvattamalla varaston vaatimaa tilavuutta. Tässä työssä nämä asiat on jätetty pois kustannusarvioista, koska suurista latenttilämpövarastoista on saatavilla niukasti esimerkkejä ja kustannustietoja.

6 Johtopäätökset

Tässä diplomityössä on tutkittu jäteveden lämmön hyödyntämismahdollisuuksia kahdessa erilaisessa käyttötarkoituksessa. Jäteveden sisältämän lämmön määrää ja sitä, koska lämpöä on saatavilla, on selvitetty. Lämmön saatavuuden perusteella on tehty johtopäätöksiä lämmön hyödyntämismahdollisuuksista kahden tapaustutkimuksen avulla. Tapaustutkimuksessa 1 selvitettiin jätevedenpuhdistamoiden typenpoiston tehostamista käyttämällä puhdistetun jäteveden sisältämää lämpöä puhdistamoille saapuvan jäteveden lämmittämiseen, millä tavoiteltiin prosessin vaatiman allastilavuuden pienentämistä. Tapaustutkimuksessa 2 tutkittiin puhdistetusta jätevedestä talteen otettavan lämmön kausivarastoinnista erilaisilla lämpövarastotekniikoilla.

Ensimmäisessä tapaustutkimuksessa todettiin, että jätevedenpuhdistamoille saapuvan jäteveden lämpötilan nostaminen voi olla kannattavaa tietyissä tapauksissa korkeintaan muutamilla asteilla. Esimerkiksi Viikinmäen jätevedenpuhdistamolle saapuvan veden matalinta lämpötilaa nostamalla noin 6 °C:sta vuodesta riippuen 11,5–12 °C:seen voidaan typenpoiston vaatimaa ilmastustilavuutta pienentää noin 7–8 %. Lämmityksen aiheuttamiksi sähköenergian kuluksi saatiin tässä tapauksessa noin 157 000–252 000 €, kun taas matalimman puhdistamolle saapuvan veden lämpötilan nostaminen 9 °C:seen olisi maksanut sähköenergian osalta 13 200 €. Johtopäätöksenä on, että lämmityksen kustannusten nousu kiihtyy, kun matalinta puhdistamolle saapuvan veden lämpötilaa nostetaan yli 9 °C:seen. Lämmitys voi olla jossain tapauksissa kannattavaa pienillä lämpötilaeroilla, ja myös niillä pystytään laskemaan suurinta tarvittavaa ilmastustilavuutta.

Jäteveden lämmön kausivarastointi on tulevaisuudessa tärkeä osa energijärjestelmää muiden lämpölähteiden tarjonnan lisääntyessä lämpiminä vuodenaikoina ja fossiilisten polttoaineiden jatkuvan tuotannon loppuessa. Tästä syystä tapaustutkimuksessa 2 selvitetyn lämmön kausivaraston rakentaminen saattaa olla edessä jossain muotoa tulevina vuosina Helsingin luopuessa kivihilestä.

Toisessa tapaustutkimuksessa selvitettiin, että Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla puhdistettu vesi sisältää riittävästi energiaa suurenkin lämpövaraston lataamiseen, mikäli kesäisin on saatavilla myös muita hiilineutraaleja kaukolämmön lähteitä. Rajoittavaksi tekijäksi muodostuisi tässä tapauksessa lämpövaraston rakentamisen kustannukset. Toisen tapaustutkimuksen johtopäätös on, että tuntuvaan lämpöön perustuvat lämpövarastot ovat todennäköisesti edelleen kustannustehokkain tapa lämpövarastojen toteutukseen etenkin, jos käytettävissä on sopivia sijainteja esimerkiksi luola- tai allaslämpövarastolle. 10 GWh:n luolalämpövaraston, joka sijoitettaisiin valmiiseen luolastoon, kuten Salmisaaren hiilisiiloihin rakennuskustannuksiksi arvioitiin 9,4–12,9 miljoonaa euroa, kun samankokoinen allaslämpövarasto voisi olla mahdollista rakentaa alle 5 miljoonalla eurolla.

Latenttilämpövarastoa käyttämällä voitaisiin kuitenkin saavuttaa sama varastointikapasiteetti pienemmällä varastotilavuudella, jolloin varastointikapasiteettia on mahdollista rakentaa enemmän, mikä olisi erittäin hyödyllistä energiajärjestelmän toimivuuden kannalta. Sopivimmaksi faasimuutosmateriaaliksi todettiin natriumsulfaatti eli Glauberin suola, jota käyttämällä 10 GWh:n lämpövaraston varastotilavuus voisi olla noin 70 000 m³ ja investointikustannukset noin 11,2 miljoonaa euroa. Natriumsulfaattia käytettäessä jäteveden lämmön varastointiin lämpötilaa pitää nostaa lämpöpumpuilla johtuen puhdistetun veden alemmasta lämpötilasta natriumsulfaatin 32 °C:n sulamispisteen yläpuolelle.

Lämpövarastojen ja hukkalämmön hyödyntäminen on otettava laajamittaisesti käyttöön nopealla aikataululla hiilineutraaliuden saavuttamiseksi. Jätevesissä on runsaasti lämpöä, jota kuitenkin tarvitaan puhdistusprosesseissa ja hyödynnetään jo nykyään tehokkaasti kaukolämmön tuotannossa. Tulevaisuudessa lämpöä on kuitenkin tuotettava entistä enemmän kesäisin varastoon, ja jäteveden lämmön varastointi on yksi vaihtoehto. Tiheästi rakennetuilla kaupunkialueilla latenttilämpövarastojen rakentamisesta tulee tehdä tulevaisuudessa lisäselvityksiä. Pienempien kaupunkien ja kuntien jäteveden lämmön varastointiin tuntuvaan lämpöön perustuvat lämpövarastot säilyvät todennäköisesti lähitulevaisuudessa ensisijaisena valintana huomattavasti matalampien rakennuskustannuksien takia. Toisaalta latenttilämpövarastoja käyttämällä lämpöä on mahdollista varastoida pienellä lämpötilaerolla, jolloin lämpötilaa ei tarvitse nostaa lämpöpumpuilla.

Lähteet

- [1] Helen Oy, "Helen lopettaa hiilen käytön yli viisi vuotta suunniteltua aiemmin," *Helen Oy verkkosivut*, 2021. <https://www.helen.fi/uutiset/2021/helen-lopettaa-hiilen-kayton-yli-viisi-vuotta-suunniteltua-aiemmin>.
- [2] Helen Oy, "Energian alkuperä," *Helen Oy verkkosivut*, 2021. <https://www.helen.fi/helen-oy/energia/energiantuotanto/energia-alkupera>.
- [3] Helsingin seudun ympäristöpalvelut, "Viikinmäen jätevedenpuhdistamo," Helsinki, 2018.
- [4] S. Uusitalo, "Helen jatkaa investointeja hiilineutraaliuteen: Helsinkiin uusi, maailman suurimpiin kuuluva lämpöpumppu, joka mahdollistaa kivihiilen käytön vähentämisen nopeammin," *Helen Oy verkkosivut*, 2020. <https://www.helen.fi/uutiset/2020/uusi-lampopumppu>.
- [5] Helsingin seudun ympäristöpalvelut, "Suomenojan jätevedenpuhdistamo," 2014. [Online]. Available: <https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/vesihuolto/jatevedenpuhdistus/suomenoja/Sivut/default.aspx>.
- [6] Helsingin seudun ympäristöpalvelut, "Lämmöntalteenoton energiatase kaupungissa ja vaikutus jätevesien käsittelyyn," Helsinki, 2020. [Online]. Available: https://www.hsy.fi/globalassets/ymparistotieto/projektisivustot-ja-hanke-esittelyt/tiedostot/jatevesilampo/hankesuunnitelma_saavutettava.pdf.
- [7] S. Furbo, "Using water for heat storage in thermal energy storage (TES) systems," in *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*, L. F. Cabeza, Ed. Woodhead Publishing, 2015, pp. 31–47.
- [8] L. F. Cabeza, I. Martorell, L. Miró, A. I. Fernández, and C. Barreneche, "Introduction to thermal energy storage (TES) systems," in *Advances in Thermal Energy Storage Systems : Methods and Applications*, L. F. Cabeza, Ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015, pp. 357–415.
- [9] M. Lanahan and P. C. Tabares-Velasco, "Seasonal thermal-energy storage: A critical review on BTES systems, modeling, and system design for higher system efficiency," *Energies*, vol. 10, no. 6, 2017, doi: 10.3390/en10060743.
- [10] A. Dahash, F. Ochs, M. B. Janetti, and W. Streicher, "Advances in seasonal thermal energy storage for solar district heating applications: A critical review on large-scale hot-water tank and pit thermal energy storage systems," *Appl. Energy*, vol. 239, no. January, pp. 296–315, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.189.
- [11] T. Arponen, "Jättimäisillä luolalämpövarastoilla joustavuutta ja lisää uusiutuvaa energiaa," *Helen Oy*, 2018. <https://www.helen.fi/helen-oy/vastuullisuus/ajankohtaista/blogi/2018/jattimaisilla-luolalampovarastoilla-joustavuutta-ja-lisaa-uusiutuvaa-energiaa>.
- [12] K. S. Lee, *Underground Thermal Energy Storage*, 1. painos. Lontoo: Springer London, 2013.

- [13] M. Hafiz, A. Furqan, and J. Hamza Babar, *Thermal Energy Storage Storage Techniques, Advanced Materials, Thermophysical Properties and Applications*, 1. Singapore: Springer, 2021.
- [14] G. Florides and S. Kalogirou, "Ground heat exchangers-A review of systems, models and applications," *Renew. Energy*, vol. 32, no. 15, pp. 2461–2478, 2007, doi: 10.1016/j.renene.2006.12.014.
- [15] R. Seppänen *et al.*, *MAOL-taulukot*. Otava, 2013.
- [16] T. Schmidt *et al.*, "Design Aspects for Large-scale Pit and Aquifer Thermal Energy Storage for District Heating and Cooling," *Energy Procedia*, vol. 149, pp. 585–594, 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.08.223.
- [17] Helen Oy, "Salmisaaren voimalaitos," 2020. <https://www.helen.fi/helen-oy/energia/energiantuotanto/voimalaitokset/salmisaari>.
- [18] Helen Oy, "Vuosaaren voimalaitokset," 2020. <https://www.helen.fi/helen-oy/energia/energiantuotanto/voimalaitokset/vuosaari>.
- [19] City of Helsinki, "Helsinki Energy Challenge: Background material – Heating system in Helsinki," p. 40, 2019, [Online]. Available: <https://www.hel.fi/static/kanslia/energy-challenge/heating-system-in-helsinki.pdf>.
- [20] M. Guadalfajara, M. Lozano, and L. Serra, "Analysis of Large Thermal Energy Storage for Solar District Heating," in *Eurotherm Seminar #99 Advances in Thermal Energy Storage*, 2014, pp. 1–10, doi: 10.13140/2.1.3857.6008.
- [21] A. J. Kallesøe and T. Vangkilde-Pedersen, "Underground Thermal Energy Storage (UTES) – state-of-the-art, example cases and lessons learned.," 2019. [Online]. Available: https://www.heatstore.eu/documents/HEATSTORE_UTES State of the Art_WP1_D1.1_Final_2019.04.26.pdf.
- [22] A. Chatzidiakos, "Pit thermal energy storages: Denmark, experience and working systems," no. March. Ramboll UK, 2020, [Online]. Available: https://www.era.ac.uk/write/MediaUploads/Other documents/S2_05_MStorage_AC_PTES.pdf.
- [23] T. R. Shah and H. M. Ali, "Applications of hybrid nano fluids in solar energy , practical limitations and challenges : A critical review," *Sol. Energy*, vol. 183, no. November 2018, pp. 173–203, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.03.012.
- [24] F. M. Rad and A. S. Fung, "Solar community heating and cooling system with borehole thermal energy storage - Review of systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 1550–1561, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.03.025.
- [25] M. Reuss, "The use of borehole thermal energy storage (BTES) systems," in *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*, 2015, pp. 117–147.
- [26] Y. Demirel and H. Öztürk, "Thermoeconomics of seasonal latent heat storage system," *Int. J. ENERGY Res.*, vol. 30, pp. 1001–1012, 2006, doi: 10.1002/er.1206.
- [27] S. Furbo, J. Fan, E. Andersen, Z. Chen, and B. Perers, "Development of seasonal

- heat storage based on stable supercooling of a sodium acetate water mixture,” *Energy Procedia*, vol. 30, pp. 260–269, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2012.11.031.
- [28] A. S. Fleischer, *Thermal energy storage using phase change materials: Fundamentals and applications*, 1. painos., no. 9783319209210. Springer International Publishing, 2015.
- [29] F. Bruno, M. Belusko, M. Liu, and N. Tay, “Using solid-liquid phase change materials (PCMs) in thermal energy storage systems,” in *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*, L. F. Cabeza, Ed. Woodhead Publishing, 2015, pp. 201–246.
- [30] F. Cao, Y. Zheng, C. H. Chen, and R. Bonner, “Thermal energy storage with tunable melting point phase change materials,” *Int. Heat Transf. Conf.*, vol. 2018-Augus, pp. 4253–4259, 2018, doi: 10.1615/ihtc16.ecs.022260.
- [31] National Center for Biotechnology Information, “Sodium chloride,” *PubChem Compound Summary for CID 5234*, 2022. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Sodium-chloride>.
- [32] I. Sarbu and A. Dorca, “Review on heat transfer analysis in thermal energy storage using latent heat storage systems and phase change materials,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 43, no. 1, pp. 29–64, 2019, doi: 10.1002/er.4196.
- [33] J. Kotze, T. von Backstrom, and P. Erens, “High temperature thermal energy storage utilizing metallic phase change materials and metallic heat transfer fluids,” *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 135(3), no. 035001, pp. 1–6, 2013.
- [34] A. Safari, R. Saidur, F. A. Sulaiman, Y. Xu, and J. Dong, “A review on supercooling of Phase Change Materials in thermal energy storage systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 70, no. November 2016, pp. 905–919, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.272.
- [35] K. Turunen, M. R. Yazdani, A. Santasalo-Aarnio, and A. Seppälä, “Exceptional cold-crystallization kinetics of erythritol-polyelectrolyte enables long-term thermal energy storage,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 230, no. June, pp. 0–11, 2021, doi: 10.1016/j.solmat.2021.111273.
- [36] Harald Mehling; Luisa F. Cabeza, *Heat and cold storage with PCM*. Berliini: Springer Berlin/Heidelberg, 2008.
- [37] S. Guo, J. Zhao, W. Wang, G. Jin, and X. Wang, “Experimental study on solving the blocking for the direct contact mobilized thermal energy storage container,” vol. 78, pp. 556–564, 2015.
- [38] A. Castell and C. Solé, “Design of latent heat storage systems using phase change materials (PCMs),” in *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*, L. F. Cabeza, Ed. Woodhead Publishing, 2015, pp. 285–305.
- [39] M. Linder, “Using thermochemical reactions in thermal energy storage systems,” in *Advances in Thermal Energy Storage Systems : Methods and Applications*, Cambridge, 2015, pp. 357–415.

- [40] K. Belz, F. Kuznik, K. F. Werner, T. Schmidt, and W. K. L. Ruck, "Thermal energy storage systems for heating and hot water in residential buildings," in *Advances in Thermal Energy Storage Systems : Methods and Applications*, Cambridge, 2015, pp. 441–466.
- [41] Helen Oy, "Kaukolämpölaitteet," 2020. <https://www.helen.fi/lammitys-ja-jaahdytys/kaukolampo/nykyisille-asiakkaille/kaukolampolaitteet>.
- [42] U. Stritih and R. Koželj, "Materials and Numerical Analysis of Thermochemical Seasonal Solar Energy Storage for Building Thermal Comfort Applications: A Review," *Res. J. Environ. Sci.*, vol. 11, no. 4, pp. 177–191, 2017, doi: 10.3923/rjes.2017.177.191.
- [43] J. Laitinen, J. Nieminen, R. Saarinen, and S. Toivikko, *Paras käyttökelpoinen tekniikka (BAT) - Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamot*, vol. 3/2014, no. 3. 2014.
- [44] Fortum Oy, "Fortumin Suomen suurin lämpö-pumppu korvaa fossiilista kauko-läm-mön-tuo-tantoa jäteveden hukka-läm-möllä," *Fortum Oy verkkosivut*, 2021. <https://www.fortum.fi/media/2021/06/fortumin-suomen-suurin-lampopumppu-korvaa-fossiilista-kaukolammontuotantoa-jateveden-hukkalammolla-0>.
- [45] Helsingin seudun ympäristöpalvelut, "Uusi jätevedenpuhdistamo Blominmäkeen." [Online]. Available: https://niini.fi/wp-content/uploads/2021/02/HSY152_Uusi_jatevedenpuhdistamo_Bloinmakeen.pdf.
- [46] Turku Energia, "The wastewater utilization in Kakola heat pump plant," 2009.
- [47] Helen Oy, "Meriveden lämmöntalteenotto," *Helen Oy verkkosivut*, 2020. <https://www.helen.fi/helen-oy/energia/kehityshankkeet/biolampolaitokset/meriveden-lammontalteenotto>.
- [48] Gebwell Oy, "SCOP vai COP? Ota tehon vertailun keskeiset termit haltuun!," *Gebwell Oy verkkosivut*. <https://gebwell.fi/ajankohtaista/scop-vai-cop-ota-tehonenvertailun-keskeiset-termit-haltuun/>.
- [49] Helen Oy, "Open data: District heating power 2015-2020," *Helen Oy verkkosivut*, 2020. <https://www.helen.fi/en/company/responsibility/current-topics/open-data>.
- [50] Ilmatieteen laitos, "Vuoden 2018 sää," *Ilmatieteen laitos verkkosivut*. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/vuosi-2018>.
- [51] R. Lahdelma, "District heating and cooling - distribution." Aalto-yliopisto - Energiatekniikan laitos, Espoo, 2020.
- [52] Omavoima Oy, "Pörssisähkön kuukausihinnat," *Omavoima Oy verkkosivut*, 2022. <https://omavoima.fi/spot-sahkon-hintahistoria>.
- [53] M. Ahonen, "Effects of wastewater heat recovery on nitrogen removal in Finnish wastewater treatment plants," Aalto-yliopisto, 2021.
- [54] Helen Oy, "Jättimäinen luolalämpövarasto toteutetaan Helsingin Mustikkamaalle," *Helen Oy verkkosivut*, 2018.

https://www.helen.fi/uutiset/2018/mustikkamaa_toteutus.

- [55] Kalliosuunnittelu Oy Rockplan Ltd, "Salmisaaren hiilivarastot," *Kalliosuunnittelu Oy Rockplan Ltd verkkosivut*. <https://www.rockplan.fi/referenssit/salmisaaren-hiilivarastot/>.
- [56] T. Schmidt, "Monitoring results from large-scale solar thermal plants with long term storage in Marstal, Brødstrup and Dronninglund, Denmark," *4th International Solar District Heating Conference*. 2016, [Online]. Available: [http://solar-district-heating.eu/Portals/0/SDH Conference 2016/Presentations_SDH2016_day2.zip](http://solar-district-heating.eu/Portals/0/SDH%20Conference%202016/Presentations_SDH2016_day2.zip).
- [57] F. Cardarelli, *Materials Handbook*, 2. Aufl. London: Springer Verlag London Limited, 2008.
- [58] S. D. Sharma and K. Sagara, "Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review," *Int. J. Green Energy*, vol. 2, no. 1, pp. 1–56, 2005, doi: 10.1081/ge-200051299.
- [59] W. E. O'Connor, R. Warzoha, R. Weigand, A. S. Fleischer, and A. P. Wemhoff, "Thermal property prediction and measurement of organic phase change materials in the liquid phase near the melting point," *Appl. Energy*, vol. 132, pp. 496–506, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.07.045.
- [60] National Center for Biotechnology Information, "PubChem Compound Summary for CID 6581, Acrylic acid," 2022. .
- [61] M. G. De Paola, N. Arcuri, V. Calabrò, and M. De Simone, "Thermal and stability investigation of phase change material dispersions for thermal energy storage by T-history and optical methods," *Energies*, vol. 10, no. 3, 2017, doi: 10.3390/en10030354.
- [62] Climator Sweden AB, "ClimSel product data sheets," *Climator Sweden AB verkkosivut*, 2020. <https://www.climator.com/en/pcm-climsel/product-data-sheets>.
- [63] Made-in-China, "Formic acid price," *Made-in-China verkkosivut*, 2022. https://www.made-in-china.com/products-search/hot-china-products/Formic_Acid_Price.html.
- [64] Made-in-China, "Factory Direct Sale Bulk Industry Raw Material Sodium Sulphate Anhydrous 99%/ Glauber Salt Prices," *Made-in-China verkkosivut*. <https://jnrnqiang.en.made-in-china.com/product/HBvnPmUdbyYi/China-Factory-Direct-Sale-Bulk-Industry-Raw-Material-Sodium-Sulphate-Anhydrous-99-Glauber-Salt-Prices.html>.
- [65] Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY, "Jätevedenpuhdistus pääkaupunkiseudulla 2018," 2018.