



Jätejään sulatus ja sen hyödyntäminen jäähdytyksessä

Ville Tuominen

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2020

Talotekniikan tutkinto-ohjelma
LVI-talotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Talotekniikan tutkinto-ohjelma
LVI-talotekniikka

TUOMINEN VILLE:

Jätejään sulatus ja sen hyödyntäminen jäähdytyksessä

Opinnäytetyö 31 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Toukokuu 2020

Opinnäytetyön aiheena oli jätejään sulatus, ja siinä pohdittiin, millaisissa tilanteissa syntyy jätejäätä, kuinka se saadaan hävitettyä ja millaisia hyödyntämismahdollisuuksia sillä on. Jätejäällä tarkoitetaan jonkin toisen prosessin sivutuotteenä kertynyttä jäätä, josta pyritään pääsemään eroon. Tämän työn tavoitteena oli selvittää jätejäätä käsitteenä, luoda ohjeistus sen sulattamiselle ja kertoa, kuinka sitä voitaisiin hyödyntää.

Työssä ensin selvitettiin, missä jätejäätä syntyy, minkä verran ja kuinka sitä sulatetaan nykyisin. Lisäksi selvitettiin sulatusprosessin taustalla vaikuttavaa fysiikkaa ja aineen ominaisuuksia. Tiedot näihin saatiin kerättyä alaan liittyvästä kirjallisuudesta ja aiheeseen liittyvistä tutkimuksista

Työssä esitettiin, mitä pitää ottaa huomioon järjestelmää suunniteltaessa. Lisäksi kerrottiin, millainen järjestelmä esimerkiksi voisi olla käytännössä ja millaisia laitteita se vaatisi. Työssä lisäksi pohdittiin, kuinka jätejään sulattamista voitaisiin käyttää esimerkiksi kiinteistön jäähdytysenergiankulutuksen pienentämiseen hyödyntämällä faasimuutoksessa moninkertaisesti sitoutuvaa lämpöenergiaa. Sulaneelle vedelle myös pohdittiin mahdollisia käyttökohteita ja sen mahdollisia epäpuhtauksia ja niiden suodatuksen tarvetta.

Työn tuloksena saatiin ohjeistus jätejään sulatusjärjestelmän suunnittelussa huomioon otettaville asioille ja esitellään mahdollisuuksia jätejään sulatuksen hyödyntämiselle. Lopussa pohdittiin järjestelmän toteuttamiskelpoisuutta ja olisiko sillä laajempaa tarvetta esimerkiksi kunnan kaavoituksessa ja pohdittiin järjestelmän ympäristövaikutuksia. Mietittiin myös, millaisia jatkotutkimuksia asiasta voitaisiin tehdä.

Asiasanat: jätejää, faasimuutos

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Building Services Engineering
HVAC Building Services Engineering

VILLE TUOMINEN:

Waste Ice Melting and Its Utilization in Cooling

Bachelor's thesis 31 pages, appendices 0 pages
May 2020

The objective of this thesis was to gather information about waste ice. The thesis investigates how it is generated, how it can be disposed of and whether there are possibilities for utilizing it. The purpose was to clarify the concept of waste ice and create design guidelines for melting it.

The theoretical section explores where waste ice is generated and how it is melted today. In addition, the physics and properties of the substance behind the melting process are explained. Information for this section was gathered from literature in the field and from related studies. The work presented what should be considered when designing the system. In addition, it described the system how it should be in practice and kind of equipment it requires. The thesis also discusses how melting of waste ice could be used, for example, to reduce the cooling energy consumption of property by. Possible applications for molten water, and possible contaminants and the need for filtration is also discussed.

As a result, design guidelines for waste ice melting system was created and possibilities for utilizing it are also presented. Environmental impact and large-scale usage were also discussed.

Key words: waste ice, phase change

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	JÄTEJÄÄ	7
	2.1 Vesi	7
	2.2 Jätejään syntyminen ja määrä.....	7
	2.2.1 Hävittämisen nykytilanne	9
	2.3 Faasimuutos	9
	2.3.1 Sulaminen	10
	2.3.2 Jähmettyminen	10
3	FYSIIKKA TAUSTALLA	12
	3.1 Lämpömäärä	12
	3.1.1 Latentti- ja tuntuva lämpö	12
	3.1.2 Sulattamisen lämpömäärä	12
	3.1.3 Jään sulatus	13
	3.2 Lämmönsiirto.....	14
	3.2.1 Konvektio.....	14
	3.2.2 Johtuminen	15
	3.2.3 Säteily.....	16
4	SUUNNITTELUPERUSTEET	17
	4.1 Suunnittelussa huomioitavat asiat.....	17
	4.2 Järjestelmän vaatimat laitteet.....	19
	4.3 Jätejään hyödyntämismahdollisuudet	21
	4.3.1 Vapaajäähdyttäminen	22
	4.3.2 Koneellinen jäähdyttäminen	23
	4.3.3 PCMES – Phase Changing Material Energy Storage	24
	4.4 Sulatetun veden hyödyntäminen ja sen epäpuhtaudet.....	25
	4.4.1 Jäähallit	25
	4.4.2 Aorauslumi	26
5	YHTEENVETO	27
	5.1 Järjestelmän mahdollisuudet suurissa kokonaisuuksissa	27
	5.2 Kannattavuus ja ympäristö	27
	5.3 Pohdinta	28
	LÄHTEET	30

1 JOHDANTO

Suomen pohjoinen sijoittuminen maailman kartalla vaikuttaa siihen, että jää on hyvin tuttu aine meille kaikille. Sen lisäksi että se ympäröi meitä suuren osan vuodesta, siihen törmää myös muuallakin arkielämässä. Jään avulla saadaan pidettyä juomat kylmänä, pidetään kalat viileinä kauppojen kalatiskailla ja yhtä Suomen suosituinta urheilulajia, jääkiekkoa, harrastetaan sen päällä. Jäätä käytetään moniin tarkoituksiin ja sitä voi kerääntyä käytön jälkeen suuriakin määriä. Mutta entä kun ylimääräiseksi jääneestä jäästä halutaan päästä tehokkaasti eroon?

Tämän opinnäytetyön aiheena on jätejään sulatus. Työssä selvitetään tutkimusten ja asiantuntijalausuntojen perusteella missä ja kuinka paljon jätejäätä syntyy, kuinka sitä sulatetaan ja mitkä asiat sulatuksen mitoittamiseen vaikuttaa. Jätejääksi voidaan kutsua jäätä, jota syntyy tai hyödynnetään jossain toisessa prosessissa ja käytön jälkeen pyritään hävittämään. Paikkoja, joissa jätejäätä syntyy voi esimerkiksi olla ruokateollisuus ja jäähallit. Työssä lisäksi pohditaan, kuinka jätejään sulatusta voidaan hyödyntää rakennusten energiatehokkuuden parantamiseksi.

Aihe työhön tuli Granlund Tampere Oy:ltä, joka on monipuolinen talotekniikka-alan suunnittelutoimisto. Yrityksessä on jo muutamia jäänsulatusjärjestelmiä suunniteltu, mutta aiheesta ei ole hirveästi tehty tutkimuksia ja suunnitteluohjeistuksia. Tämän työn tavoitteena on selvittää jätejäättä käsitteenä, luoda perustaa sen sulatuksen suunnittelulle ja pohtia mahdollisuuksia sen hyödyntämiselle. Työtä olisi tarkoitus käyttää apuna jätejäänsulatusjärjestelmän suunnittelun lähtökohtana ja avustaa suunnittelijaa järjestelmän hahmottelussa. Tässä työssä keskitytään sulatukseen teoriassa eikä toimivuutta tarkastella mittauksilla.

Tehtyjen tutkimusten perusteella jää sopii hyvin jäähdystystarkoitukseen sen sulatuksessa sitoutuvan suuren energiamäärän takia ja hyvin suunnitellulla järjestelmällä voidaan kyetä saavuttamaan taloudellisia säästöjä. Lähes ilmaisen ja

puhtaan energianlähteen takia sulatusjärjestelmällä pystytään myös pienentämään energiantuotannon hiilijalanjälkeä. Jätejään sulatukseen tarkoitettuja toimivia järjestelmiä on onnistuttu rakentamaan mutta löytyy myös tapauksia, joita ei olla saatu toimimaan halutulla tavalla. Tämä osoittaa sen, että yhteneväisille suunnitteluohjeille olisi tarvetta.

2 JÄTEJÄÄ

Tässä luvussa tutustutaan aiheena olevaan jätejäähän ja pohditaan millaisia määriä sitä syntyy ja missä. Kerrotaan myös, mikä on sulatuksen nykytilanne ja miksi sitä sulatetaan. Lisäksi selitetään prosessin perustana oleva faasimuutos ja sen eri muodot.

2.1 Vesi

Vesi on väritöntä ja hajutonta ainetta, jota löytyy kaikkialta Maapallolta. Vesi koostuu miljardeista molekyyleistä ja jokainen molekyyli koostuu yhdestä happi- ja kahdesta vetyatomista, joita pitävät yhdessä vahvat kovalenttiset sidokset. Sitä löytyy Maasta kolmessa eri olomuodossa – kaasu, kiinteä ja neste. Olomuoto riippuu lämpötilasta (Fetter 2019).

Veden kiinteää olomuotoa kutsutaan jääksi, joka alkaa muodostua, kun veden lämpötila putoaa 0 °C. Lumi on myös veden kiinteä olomuoto, joka koostuu jääkiteistä.

2.2 Jätejään syntyminen ja määrä

Termiä jätejää voidaan käyttää jäästä, jota on hyödynnetty jossain prosessissa ja käytön jälkeen pyritään hävittämään. Tällaista jäätä voi esimerkiksi olla ruokateollisuudessa kuljettamisessa ja säilömisessä käytetty jää. Lisäksi jätejää on myös ruokakauppojen kalatiskailla käytettävä jäähile, joka päivän päätteeksi vaihdetaan uuteen. Tämän jäähileen määrä riippuu kaupan kalatiskin koosta ja hileen vaihtovälistä.

Myös jäähalleista syntyy jätejää, kun kentän huollon yhteydessä sieltä aurataan lunta pois. Tavallisesti tämä lumi kipataan pienemmissä jäähalleissa rakennuksen ulkopuolelle, vaikka sen voisi hyödyntää. Olettaen, että luistelijoiden mukana pois kulkeutuvan lumen määrä on liki olematon, lunta täytyisi aurata pois kentältä

liki sama määrä kuin mitä sinne ajetaan vettä, että jääkerroksen paksuus ei kasvaisi jatkuvasti. IIHF:n Ice Rink Guiden mukaan yhteen kertaan, kun jäänhoitokone ajaa kentän läpi, kuluu noin 0,4 – 0,8 m³ vettä, joten voisi ajatella, että kentältä auratun lumen tilavuus on tuolta väliltä. Granlund Tampere Oy:n kylmätekniikan osastonjohtaja Timo Heikkilän antaman lausunnon mukaan eräässä jäähallikohteessa, jossa on kaksi jäärataa, lunta aurataan noin 500 – 800 kg yhdellä kerralla. Tämä määrä täsmää IIHF:n ohjeen kanssa. Saman hallin jäätä hoidetaan sen aukioloaikoina noin tunnin välein, eli päivittäinen jätejään määrä on melko suuri.

Suurin jätejään lähde on auraslumi. Auraslunta on talven aikana maahan satanut lumi, jota aurataan kuluväyliltä ja kiinteistöjen pihoilta. Keskimäärin Tampereen kaupungin lumenkaatopaikoille (kuva 1) tuodaan 20 000 kuormallista aurattua lunta ja yksi kuorma sisältää noin 12-13 m³ lunta. Yhteensä tämä tekee siis 240 000 – 260 000 m³ jätelunta. Tämä määrä tietysti vaihtelee kovasti, riippuen kuinka luminen talvi on kyseessä. (Lahtinen 2020)



KUVA 1. Hakametsän lumenvastaanottoaika (Tampereen kaupunki)

2.2.1 Hävittämisen nykytilanne

Luonnollisesti jää sulaa itsestään, kun sitä säilytetään huoneenlämmössä. Tämä ei ole kuitenkaan tehokas keino, sillä jään massasta riippuen siinä voi kestää pitkiäkin aikoja. Suuren määrän säilyttäminen vie tilaa varsinaiselta toiminnalta ja voi aiheuttaa lisäkustannuksia.

Jään sulatusta toteutetaan jo jonkin verran paikoissa, joissa jätejäästä syntyy. Eräs tapa tämän toteuttamiseen on pienet astiat, johon jää kaadetaan, ja sulatetaan sähkövastuksilla. Tällainen tekniikka lisää ostoenergian määrää, johon ei nykypäivän energiatehokkuusvaatimuksilla pyritä. Toinen käytössä oleva tapa on säiliö, jossa on lämmintä vettä. Jää kaadetaan säiliöön veden sekaan. Järjestelmään kuuluu avoin lämmityspiiri, jossa lämmintä vettä ruiskutetaan jää- tai lumimassan päälle. Sulanut viileämpi vesi kulkeutuu paluuputkeen, josta osa poistetaan ja osa kulkeutuu lämmönsiirtimille takaisin lämmitettäväksi.

2.3 Faasimuutos

Faaseja, eli aineen olomuotoja on neljä. Näistä yleisimmät ovat kiinteä, neste ja höyry. Neljäs, harvinaisempi olomuoto, on plasma. Kun aine muuttaa olomuotoaan, tapahtuu faasimuutos (Taulukko 1).

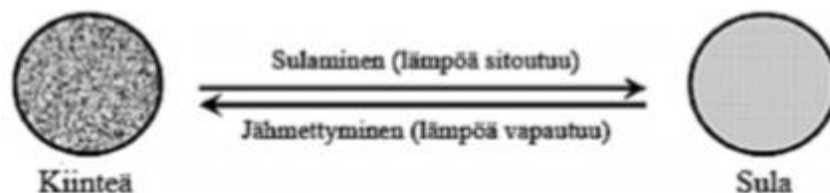
TAULUKKO 1. Faasimuutokset

sulaminen	kiinteä	→	neste
jähmettyminen	neste	→	kiinteä
höyrystyminen	neste	→	höyry
lauhtuminen	höyry	→	neste
sublimoituminen	kiinteä	→	höyry
härmistyminen	höyry	→	kiinteä

(Aittomäki & Aalto 2012, 4)

Lähes kaikilla aineilla tapahtuu olomuodon muutos määrätyissä lämpötiloissa. Olomuodon muuttuessa aine joko luovuttaa tai sitoo energiaa. Esimerkiksi jää

sitoo ympäristöstään energiaa sulaessaan ja vastaavasti vesi luovuttaa sitä jäätyessään (kuva 2). Sama ilmiö voidaan havaita nesteen muuttuessa kaasuksi ja kaasun tiivistyessä nesteeksi. Tapahtumassa aineen sisäinen rakenne muuttuu, eli tapahtuu faasimuutos. (Motiva 2019)



KUVA 2. Faasimuutos kiinteään ja sulan tilan välillä (Pönkä 2012, 3)

2.3.1 Sulaminen

Kun kiinteä aine muuttuu nestemäiseksi, puhutaan sulamisesta. Kun kiinteä aine lämpenee kohti sen sulamispistettä, sen vapaiden elektronien lämpöliike kasvaa niin suureksi, että sen sisäinen hiilirakenne hajoaa. Tällöin aine sulaa. Atomien välinen vetovoima kuitenkin estää liiallisen erkaantumisen, joten aine muuttuu nestemäiseksi. Systemin sisäinen lämpötila pysyy samana sulamisen ajan, koska kaikki energia kuluu hiilirakenteen rikkomiseen. Sulaminen siis vaatii energiaa, jota se imee itseensä ympäröivästä aineesta tai tilasta. (Kaappola & Hirvelä & Jokela & Kianta 2014, 239)

2.3.2 Jähmettyminen

Jähmettymisellä tarkoitetaan nestemäisen aineen muuttumista kiinteäksi. Nestemäisen aineen lämpötilan pudotessa, sen elektronien liikemäärä pienenee. Tämä johtaa siihen, että atomien välimatkat pienenevät ja vetovoima kasvaa. Vetovoiman ollessa tarpeeksi suuri, atomirakenteen sidokset voimistuvat ja tämän vaikutuksesta nestemäisen aineen löyhä hilarakenne muodostuu säännölliseksi ja saa aineen jähmettymään.

Jähmettymisestä vapautuva lämpömäärä on samansuuruinen sulamisen vaativan lämpömäärän kanssa, koska ne ovat toistensa käänteiset prosessit. (Kaappola & Hirvelä & Jokela & Kianta 2014, 242)

3 FYSIIKKA TAUSTALLA

3.1 Lämpömäärä

Lämpö on energiaa, joka esiintyy lämpöliikkeenä tai lämpösäteilynä (de Vocht, 2015). Tätä siirrettyä energiaa kutsutaan lämpömääräksi eli lämpöenergiaksi Q . Aineen lämpötila nousee, kun siihen lisätään lämpöenergiaa, ja vastaavasti lämpötila putoaa, kun siitä poistetaan lämpöenergiaa. Lämpöenergian siirtymiseen vaikuttaa kappaleiden välinen lämpötilaero, jonka seurauksena lämpöenergia virtaa lämpimämmästä kappaleesta kylmempään. Lämpömäärän yksikkö on joule (J). (Puranen 2016; Inkinen & Tuohi 2009. 379)

3.1.1 Latentti- ja tuntuva lämpö

Lämpöä voi olla kahdenlaista, tuntuva lämpöä tai latenttilämpöä. Tuntuvalla lämmöllä tarkoitetaan lämpötilan nousua tai laskua ja tähän liittyvää energian siirtymistä. Tuntuvan lämmön muutoksessa ei tapahdu faasimuutosta. Latentilla lämmöllä tarkoitetaan olomuodon muutokseen sitoutunutta lämpöä. Esimerkkinä voidaan käyttää ilman jäähtymistä, jossa esiintyy molemmat. Lämpötilan las-
kiessa vaikuttaa tuntuva lämpö, eli energiaa poistuu ilmasta lämpötilan muutok-
sen myötä. Ilman saavuttaessa tietyn lämpötilan, se ei pysty enää pitämään sii-
hen sitoutunutta kosteutta ja se muuttuu nesteeksi. Latentissa lämmönsiirrossa
aineen lämpötila ei kuitenkaan muutu, vaan kaikki energia kuluu olomuodon muu-
tokseen. (Mäkinen 2017)

3.1.2 Sulattamisen lämpömäärä

Energiaa tuodaan tai poistetaan aineesta muuttamatta sen lämpötilaa. Tätä läm-
pömäärää Q voidaan sanoa latenttilämmöksi L . Kun latenttilämpö jaetaan aineen
massalla m , saadaan ominaislatenttilämpö l :

$$l = \frac{L}{m} \quad (1)$$

Ominaislatenttilämmön yksikkö on J/kg.

Eri aineille on määritetty ominaislatenttilämmöt sulamisessa l_s , jotka on esitetty taulukossa 2. Taulukkoarvojen avulla voidaan laskea kappaleen, jonka massa on m , sulattamiseen tarvittava lämpömäärä Q .

$$Q_s = m \cdot l_s \quad (2)$$

(Inkinen & Tuohi 2009)

TAULUKKO 2. Aineiden ominaislatenttilämpöjä normaalipaineessa (Inkinen & Tuohi 2009, 386)

Aine	Sulamispiste (°C)	l_s (kJ/kg)	Kiehumispiste (°C)	l_h (MJ/kg)
alumiini	660	398	2450	11,4
elohopea	-39	11,8	357	0,272
etanoli	-114	104	78	0,854
happi	-218,79	13,8	-182,97	0,0213
helium	-269,65	5,23	-268,93	0,0209
hopea	961	88	2193	2,33
kupari	1083	134	1187	5,06
kulta	1063	64	2660	1,58
lyijy	327	24,5	1750	0,87
rikki	119	38,1	444,6	326
typpi	-209,97	25,5	-195,81	0,0201
vesi	0	334	100	2,26

3.1.3 Jään sulatus

Jos jäätä säilytetään lämpimämmässä ympäristössä, se sulaa luonnollisesti ympäristöstä johtuvan lämmönsiirron seurauksena. Jotta prosessi olisi tehokkaampi ja siitä saataisiin jotain hyötyä, sulamista kannattaa tehostaa koneellisesti. Termodynamiikan ensimmäisen säännön mukaan energiaa ei synny eikä häviä,

vaan se muuttaa muotoaan (Chemistry LibreTexts 2019). Energiaa tuodaan jään sulattamista varten virtaavan nesteen mukana, joka sulatus- ja lämmönsiirtovasta riippuen siirtyy jäähän. Jää muuttaa olomuotoansa ja sen energiasisältö kasvaa ja vastaavasti sulattamiseen tarkoitetun nesteen energiasisältö pienenee.

0 °C jään sulattaminen 0 °C vedeksi vaatii taulukon 1 mukaan 334 kJ/kg lämpömäärän. Esimerkiksi 10 kilogramman kokoinen jääkuutio, jonka lämpötila on 0 °C, sulattamiseen vaadittu lämpömäärä 3340 kJ. Tämän lisäksi, kun oletetaan että jään lämpötila on alle 0 °C ennen sulatuksen alkamista, täytyy myös sen lämmittämiseen käyttää energiaa. (Kaappola & Hirvelä & Jokela & Kianta 2014, 239)

3.2 Lämmönsiirto

Aina kun kappaleiden välillä on lämpötilaeroa, siirtyy niiden välillä lämpöä. Lämmön siirtymiseen on kolme eri muotoa: konvektio, johtuminen ja säteily. Konvektio tapahtuu fluidissa, eli liikkuvassa nesteessä tai kaasussa, johtuminen kiinteässä aineessa atomien värähtelynä ja säteily on sähkömagneettista aaltoliikettä.

Lämmönsiirrossa puhutaan lämpövirrasta, joka on lämpöenergia suhteessa aikaan. Toinen käytettävä termi on lämpöteho, jonka tunnus on \dot{Q} ja yksikkö W. (Puranen 2016)

3.2.1 Konvektio

Konvektio on prosessi, jossa lämpöenergiaa siirretään virtaavan aineen mukana. Konvektio tapahtuu aineen tiheyserojen seurauksena. Lämmitessään aineen tiheys pienenee ja nousee ylöspäin ja kylmä aine valuu sitä myötä alaspäin. Tätä kutsutaan luonnolliseksi konvektioksi. Konvektio on pakotettua, jos sen virtausta tehostetaan ulkoisella paine-eron tuotolla, käyttämällä esimerkiksi pumppua tai puhallinta.

Esimerkkinä konvektiosta voidaan käyttää vesikattilaa, jota kuumennetaan. Kattilan sisään syntyy konvektiovirtoja, kun lämmentyneen veden tiheys pienenee ja se nousee pinnalle pakottaen pinnalla olleen viileämmän veden pohjalle. Isomassa mittakaavassa voidaan ajatella jäähtyvää järveä, kun lämmin vesi nousee pinnalle, jonka ulkoilma jäähdyttää. (Inkinen & Tuohi 2009, 407–408)

Jos virtaavan aineen ja pinnan välillä on lämpötilaeroa, lämpö siirtyy pintaan tai siitä pois. Pintaan muodostuu rajakerros, jonka muotoon ja paksuuteen vaikuttavat virtausnopeus, virtauksen luonne (laminaarinen tai turbulентtinen), pinnan geometria sekä aineen ominaisuudet.

Lämmön siirtymisen tehokkuutta pinnan rajakerroksessa kuvataan konvektion lämmönsiirtokertoimella α_k :

$$q = \alpha_k \cdot \Delta T \quad (3)$$

Jossa q on lämpövirran tiheys W/m^2 ja ΔT on lämpötilaero Kelvineinä K. (Aittomäki & Aalto 2012, 37)

3.2.2 Johtuminen

Kun puhutaan lämmön johtumisesta, tarkoitetaan sillä lämmön siirtymistä jonkin aineen sisällä. Johtumisessa lämpötilan nousu saa väliaineen molekyylit värähtelemään kovempaa. Värähtely aiheuttaa molekyyliden törmäilyä, josta syntyy ketjureaktio. Tätä myötä lämpöenergia liikkuu väliaineen läpi. Kyseessä on siis molekyylien sisäenergian siirtyminen. Lämmön johtumisen määrä riippuu lämpötilaerosta, väliaineen lämmönjohtavuudesta ja välimatkasta. Mitä suurempi lämpötilaero, sitä enemmän lämpöä siirtyy, kun taas välimatkan kasvaminen heikentää siirtymää. Johtumisen lämpöteholle on kaava

$$\Phi = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d} \quad (4)$$

jossa λ on lämmönjohtavuus, joka on eri aineille määritetty likimääräinen arvo, jonka suuruus kertoo kuinka hyvin kyseinen aine johtaa lämpöä. Lämmönjohtavuuden yksikkö on $W/m \cdot K$. Yhtälössä esiintyvä A on kappaleen pinta-ala m^2 , ΔT lämpötila ero K ja d välimatka, jonka lämpö siirtyy m . (Inkinen & Tuohi 2009, 409–410)

3.2.3 Säteily

Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, jossa energia siirtyy valon nopeudella ja on riippuvainen säteilyn aallonpituudesta. Toisin kuin konvektio ja johtuminen, säteily ei tarvitse toista ainetta, eli sitä tapahtuu myös tyhjiössä. Jos pinnan lämpötila on yli absoluuttisen nollapisteen, se lähettää eli emittoi säteilyä. Kappale, jonka lämpötila on suurempi kuin ympäröivän tilan tai aineen, säteilee lämpöä kylmempää kohti. (Kaappola & Hirvelä & Jokela & Kianta 2014, 254)

Absoluuttinen nollapiste on lämpötilan alhaisin piste, jossa aine ei sisällä enää yhtään lämpöenergiaa. Kansainvälisesti on sovittu, että absoluuttinen nollapiste on $0 K$ Kelvinin asteikolla, joka on SI-järjestelmän mukainen lämpötila-asteikko. $0 K$ on $-273,15 \text{ } ^\circ C$. (ScienceDaily)

Säteilyn lämpövirran tiheys q_s , yksiköltään W/m^2 , voidaan laskea kaavalla

$$q_s = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (5)$$

jossa σ on Stefan-Bolzmännin vakio $5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2 K^4)$, ε säteilevän pinnan emissiivisyys, T_1 ja T_2 säteilevän ja vastaanottavan pinnan lämpötiloja K . Tästä saadaan johdettua lämpösäteilyn teho ϕ kertomalla lämpövuon tiheys q_s kappaleen pinta-alalla A .

$$\phi = q_s \cdot A \quad (6)$$

4 SUUNNITTELUPERUSTEET

Tässä luvussa käsitellään jätejään sulatukseen liittyviä käytännön asioita kuten mitoitusta ja siinä huomioon otettavia asioita ja järjestelmässä tarvittavia laitteita. Lisäksi pohditaan mihin tilanteisiin jätejään sulatusta voidaan yhdistää ja millaisia hyödyntämismahdollisuuksia sillä on. Pohditaan myös voisiko sulamisvettä hyödyntää johonkin ja kuinka sitä pitäisi tilanteen mukaan suodattaa.

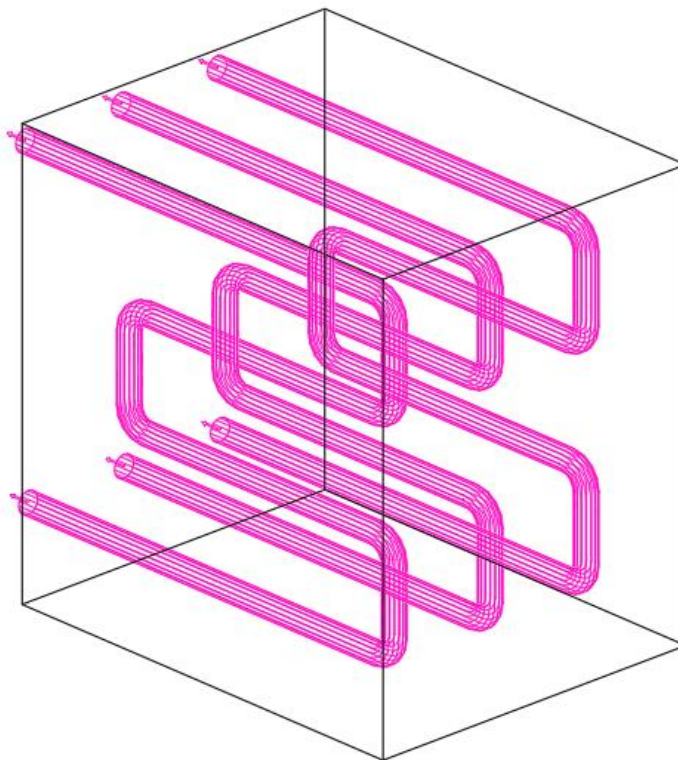
4.1 Suunnittelussa huomioitavat asiat

Jo olemassa olevissa kohteissa, toimivissa ja toimimattomissa, joissa jätejäätä sulatetaan, on todettu, että oleellinen osa jään tehokkaassa sulattamisessa on jokin mekaaninen liike. Mekaanisen liikkeen liike-energia tehostaa sulamisprosessia. Mekaaninen liike myös ehkäisee holvaantumislmiötä, jossa päälle kertyy kiinteä jääkerros ja alla sulanutta vettä. Tällaisia mekaanisen liikkeen toteutustapoja on esimerkiksi lämpimän veden suihkuttaminen jäämassan päälle tai siipipyörä altaan pohjalla, joka liikuttaa vesimassaa. (Heikkilä 2020)

Sulamiseen myös vaikuttaa jään ominaisuudet kuten sen lämpötila ja olomuoto. Olomuodolla tässä yhteydessä tarkoitetaan, onko kyseessä jääpaloja vai lunta. Lumen tiheys on jääpaloja pienempi, joten se sulaa myös helpommin. Luonnollisesti myös jätejään lämpötila vaikuttaa tarvittavaan lämpötehoon. Esimerkiksi jäähallien jään lämpötila on $-3 - -5$ °C riippuen onko kyseessä harjoitus- vai peilihalli (IIHF Ice Rink Guide. 2016). Oletettavasti jätejäätä lämpiää hieman siirron yhteydessä mutta mitoituksessa kannattaa käyttää alkulämpötilaa.

Sulamiseen vaikuttava asia on myös jäämassan koko. Suuremman yksittäisen kappaleen sulattaminen on työläämpää kuin monen pienemmän osan. Siksi järjestelmää suunniteltaessa voisi ottaa huomioon sulatusputkipiirien asettelun. Suljetussa järjestelmässä putkikierukat voisi esimerkiksi asetella niin että ne jakaisivat jäämassaa pienempiin osiin. Säiliön yläreunassa olisi jakotukki, josta useampi putkilenkki johdetaan jäämassan sekaan. Putket tekisivät muutaman

käännöksen ja poistuisivat säiliön alareunasta (kuva 3). Putkien pituuteen vaikuttaa kuinka suuri säiliö on. Putken halkaisija riippuu tarvittavasta virtauksesta, jonka taas määrittää tarvittava sulatusteho.



KUVA 3. Esimerkki putkipiirin asettelusta säiliön sisällä

Veden lämpötilaan vaikuttaa järjestelmän käyttötarkoitus ja järjestelmän toimintatapa, eli onko kyseessä avoin vai suljettu piiri. Jos järjestelmä on esimerkiksi avoin ja sitä käytetään jäähdytysenergian tuottoon, pidetään lämpötila matalana, jotta jää ei sulaa liian nopeasti. Tällaisessa tilanteessa jäätä on tarkoitus sulattaa sitä tahtia mitä jäähdytysenergiaa tarvitaan. Esimerkkinä voidaan käyttää Sundsvallin sairaalaa, jossa sulamisen jälkeinen lämpötila vedellä on $+2\text{ °C}$ ja lämmönsiirtimellä se lämpiää noin $+8\text{ °C}$:een. Lisäksi ulkoisen lämpöenergian tuonti piiriin pienentää järjestelmän kannattavuutta, kun ostoenergian määrä kasvaa. Jos tarkoituksena on vain hävittää jätejää, voidaan lämpötilaa nostaa korkeammaksi, jotta jää sulaa nopeammin. Eräässä kohteessa todettiin tehokkaaksi menoveden lämpötilaksi 50 °C (Heikkilä 2020).

Suunnittelussa kannattaa ottaa myös huomioon sulatuksesta syntyvä kosteuskuorma. Jos sulatusallas on sisätiloissa esimerkiksi jäähalleissa, ei ilmaan haluta päästää ylimääräistä kosteutta. Sulatusaltaan yhteyteen olisi hyvä rakentaa huuva, jolla ylimääräinen kosteus saadaan poistettua. (Heikkilä 2020)

4.2 Järjestelmän vaatimat laitteet

Jäänsulatusjärjestelmän peruskivenä toimii säiliö, jossa jää sulatetaan. Säiliön kokoon vaikuttaa jätejään kertyminen ja sulamiseen kuluva aika. Tavoitteena olisi, että jäätä ei jouduttaisi säilyttämään vaan se voitaisiin ajaa suoraan sulatusastiaan. Tämän ”säiliön” ei tietenkään tarvitse olla varsinainen säiliö, vaan se voi olla myös monttu rakennuksen sisä- tai ulkopuolella. Kuvassa 4 esimerkki Tampereen Hervannan jäähallissa olevasta sulatusmontusta, joka sijaitsee kentän vieressä hallin sisällä.

Tilanteessa, jossa jätejäätä aiotaan hyödyntää jäähdytyksessä, tällaiset montut tulisi vesi- ja lämpöeristää, jotta välttyttäisiin luonnolliselta sulamiselta, joka johtaa veden haihtumiseen ja maaperään imeytymiseen. Kaikki hyödyntämättä jäävä jää on hukattua energiaa ja näin ollen tämä heikentää järjestelmän kannattavuutta.



KUVA 4. Hervannan jäähallin jätejään sulatusmonttu (Heikkilä 2020)

Jos suunniteltavasta järjestelmästä tehdään avoin systeemi, tarvitaan sumutus-suuttimet ja uppopumppu. Suuttimilla lämmin vesi suihkutetaan jäämassan päälle ja sulanut vesi valuu pohjalle, josta se pumpataan paluuputkeen. Pumpun jälkeen tarvitaan suodattimia, riippuen siitä millaista jäätä on sulatettu. Mahdollisia suodattimia voisi olla karkeasuodattimet, nukkasuodattimet ja öljyn- ja hiekanerottimet. Järjestelmän käyttötarkoituksesta riippuen se tarvitsee erinäisiä lämmönsiirtimiä. Jos jätejäätä hyödynnetään kylmäjärjestelmän lauhduttamiseen niin sitä varten tarvitaan oma lämmönsiirtimensä ja jos sulatukseen tarvitaan lisälämpöä esimerkiksi kaukolämmöstä, tarvitaan sille oma lämmönsiirtimensä. Avoin järjestelmä vaatii myös poistoyhteen, josta sulamisesta syntynyt ylimääräinen vesi poistetaan verkostosta. Tämä vesi joko viemäroidään tai otetaan uusiokäyttöön, jos sille on tarvetta.

Suljetussa järjestelmässä suurimpana erona on lämmön tuonti jäämassan sekaan. Säiliön sisään upotetaan putkikierukat, joissa lämmin vesi virtaa ja sulattaa jäätä. Putkikierukoiden määrä riippuu tarvittavasta sulatustehosta. Myös suljetussa piirissä sulanut vesi täytyy poistaa ja tässä tilanteessa poistoyhde voitaisiin

sijoittaa säiliön pohjaan ja varustaa se tarvittaessa suodattimilla mahdollista jatkokäyttöä varten.

4.3 Jätejään hyödyntämismahdollisuudet

Pyrkimys energia- ja resurssitehokkuuteen johtaa siihen, että kaikki talteen otettavissa oleva energia pyritään hyödyntämään. Sen sijaan että jätejää kuljetettaisiin pois, se voidaan sulattaa paikan päällä hyödyntämällä esimerkiksi kiinteistön lauhdelämpöä ja näin vähentää lauhduttimien puhallinenergian kulutusta tai se voidaan hyödyntää jäähdytyksessä energiatehokkuuden parantamiseksi.

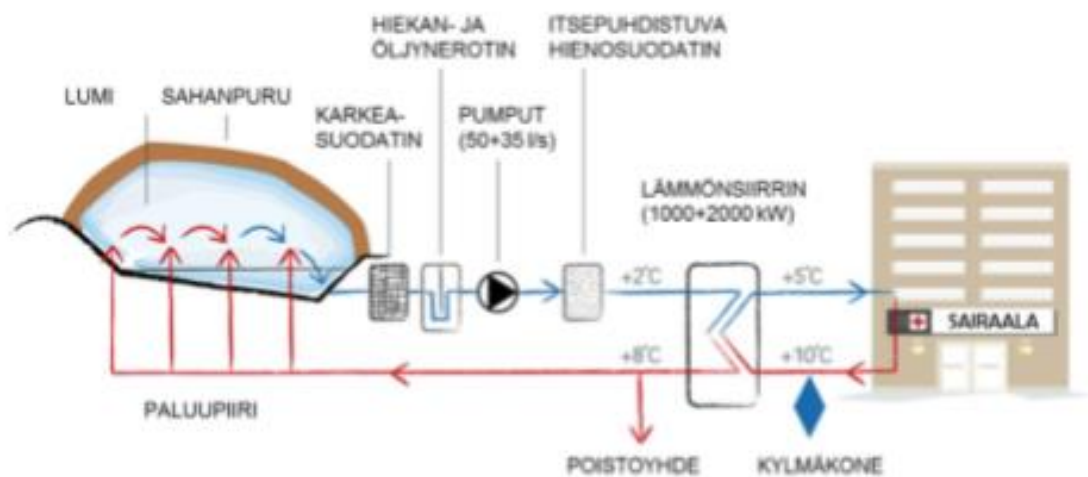
Faasimuutoksessa sitoutuva ja vapautuva energia on moninkertaista tavalliseen energian säilömiseen verrattuna. Jäätä sulattamatta saadaan siis sidottua energiaa tavanomaista enemmän, kun energia käytetään ensin jään lämmittämiseen ja sen jälkeen vielä sen sulattamiseen. Jäätä voi käyttää myös energian pitkäaikaiseen varastointiin. kuten aikaisemmin mainittu, veden faasimuutoksella pystytään sitomaan ja luovuttamaan energiaa tehokkaasti. Veden olomuotoa muutetaan sen mukaan, tarvitaanko energiaa vai pitääkö sitä säilöä. Tätä varten on kehitetty oma järjestelmänsä, jota kutsutaan PCMES:iksi.

VTT raportin mukaan lumivaraston teoreettinen energiatiheys on noin 50 – 60 kWh / lumi-m³, mutta Sundsvallin sairaalan tietojen perusteella tästä on pystytty hyödyntämään vain noin puolet. Asko Joensuun tekemässä insinööriyössä, joka käsittelee lumen hyödyntämistä rakennuksen jäähdyttämisessä, todetaan että nyrkkisääntönä voidaan pitää 100 kWh/lumi-m³. Nämä arvot poikkeavat toisistaan melko paljon, mikä voidaan ehkä selittää eroavilla lähtöarvoilla. Lumesta saatavaan jäähdytysenergiaan vaikuttaa lumen tiheys ja lämpötila ero. Vaikka teoreettista energiasisältöä ei saataisikaan kokonaan hyödynnettyä, voidaan tätä silti ajatella lähes ilmaisenergiana.

4.3.1 Vapaajäähdyttäminen

Vapaajäähdytyksellä tarkoitetaan luonnollisten matalien lämpötilojen hyödyntämistä jäähdytystarkoitukseen. Tällaisia ovat esimerkiksi kylmä ulkoilma, maaperä, vesistö tai tämän työn aiheen mukaisesti jää. Hyödyntämällä vapaajäähdytystä voidaan saavuttaa merkittäviä energiasäästöjä, kun kylmäenergian lähde on ilmainen. (Jäähdytysjärjestelmien energialaskentaopas 2011)

Jään ja lumen hyödyntäminen jäähdytyksessä ei ole uusi idea, vaan sitä on käytetty elintarvikkeiden jäähdyttämiseen pitkän aikaa. Ajatus on tuotu nykypäivään ja sitä on kehitetty ja sovellettu rakennusten jäähdyttämiseen. Esimerkkinä voidaan käyttää Sundsvallin sairaalaa, jossa kesällä hyödynnetään lumijäähdytystä.

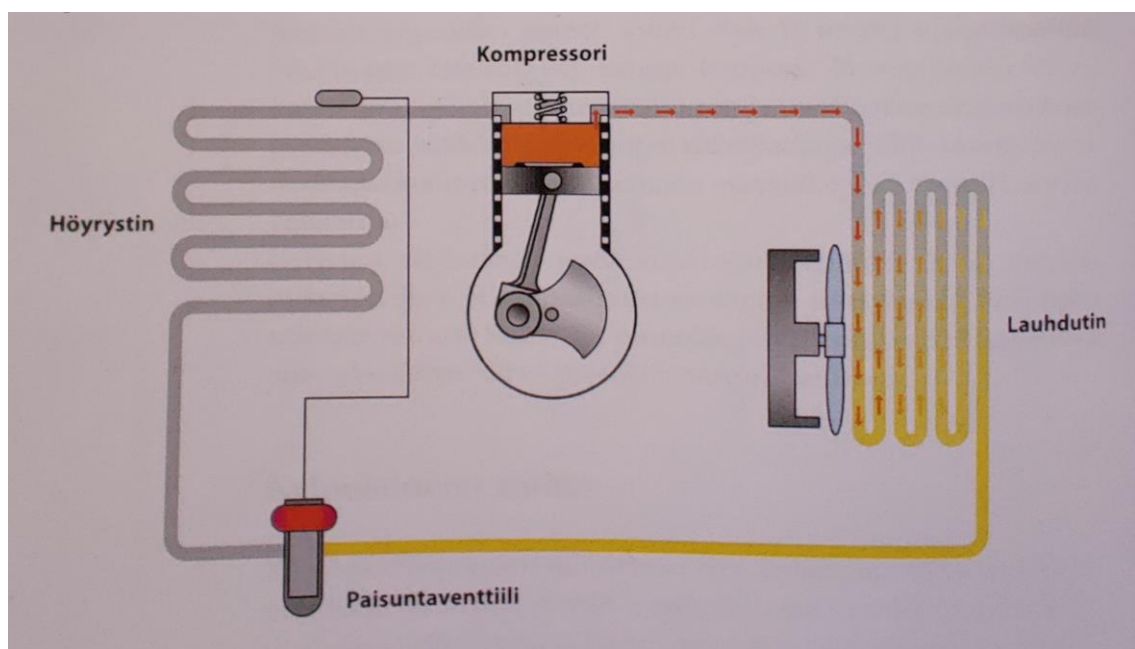


KUVA 5. Sundsvallin sairaalan lumivarastoon perustuva jäähdytysratkaisu (VTT 2016)

KUVA 5 esimerkissä varastoitu lumi toimii vapaajäähdyttimenä, josta kylmäenergia siirretään sulaneen lumen välityksellä lämmönsiirtimelle, josta se kulkeutuu rakennuksen jäähdytysjärjestelmään. Lumesta suodatetaan epäpuhtaudet pois karkeasuodattimella ja öljynerottimella ennen pumppua. Lämmönsiirtimessä lämmentynyt paluuvesi osittain poistetaan järjestelmästä ja osa kulkeutuu takaisin lumivarastoon, jossa se sulattaa uutta lunta järjestelmään.

4.3.2 Koneellinen jäähdyttäminen

Koneellisessa jäähdytyksessä kylmäenergia tuotetaan koneen avulla. Koneellinen jäähdytys perustuu höyryprosessiin ja kylmäainekiertoon, jossa jäähdytettävän tilan lämpö tuodaan höyrystimeen ja kylmäaine höyrystyy. Kompressor imee höyrystyneen kylmäaineen ja puristaa sen korkeampaan paineeseen ja sen kylmäaineen lämpötila nousee. Kompressorin jälkeen kylmäaine siirtyy lauhduttimelle, jossa korkean paineen ja lämpötilan omaava kylmäaine luovuttaa lämpöä ympäristöön ja lauhtuu eli tiivistyy takaisin nesteeksi. Seuraavaksi kylmäaine siirtyy paisuntalaitteelle, jossa sen paine putoaa (kuva 6). (Kaappola 2014)



KUVA 6. Kylmäkoneiston pääkomponentit (Kaappola 2014, 50)

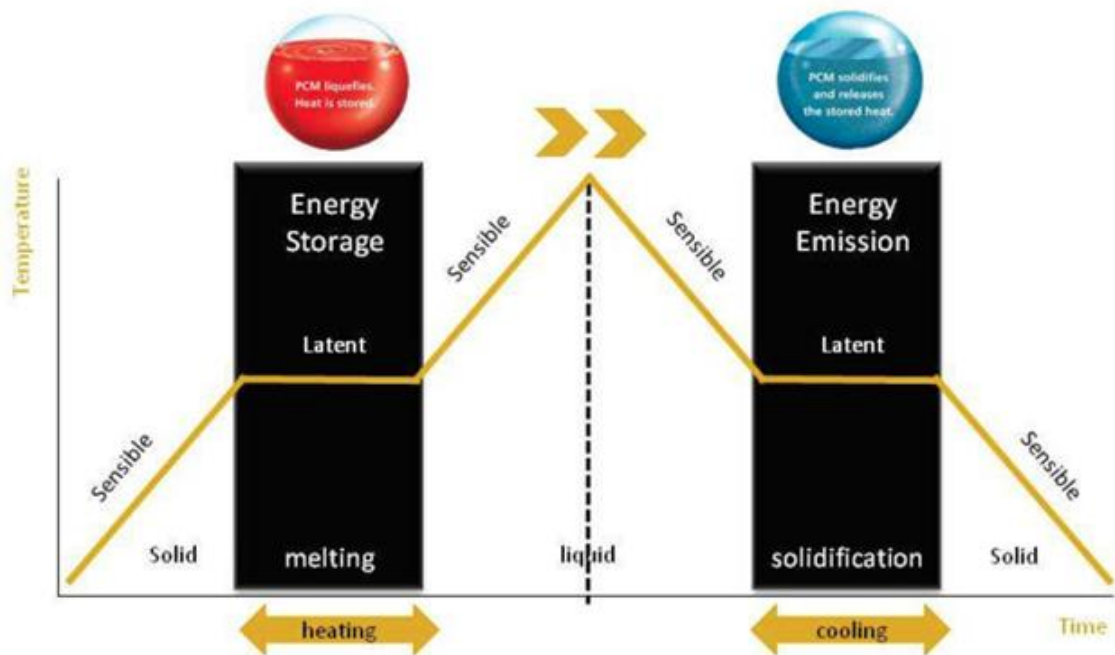
Jätejäätä voidaan hyödyntää koneellisessa jäähdytyksessä. Käyttämällä jäähdytysjärjestelmän lauhde-energiaa saadaan jää sulatettua energiatehokkaasti. Samalla tämä kasvattaa kylmäjärjestelmän lauhtumaa, mikä parantaa jäähdytyksen kylmäkerrointa. Mahdollisesti pystytään myös vähentämään tai pienentämään lauhdutinpuhaltimia, minkä avulla saadaan vähennettyä puhaltimiin kuluvaa sähköenergiaa.

4.3.3 PCMES – Phase Changing Material Energy Storage

PCMES eli olomuodonmuutos materiaalien energiasäilytyksessä hyödynnetään faasimuutosta. Menetelmän tehokkuus perustuu faasimuutoksessa sitoutuvan ja vapautuvan energian moninkertaisuuteen verrattuna tavanomaiseen lämpöenergian varastointiin ja purkuun. Vesi (jää) on yksi lämpöenergian varastointiin soveltuvista materiaaleista, erilaisten parafiinien ja suolojen ohella.

Faasimuunnosmateriaali sitoo sulaessaan energiaa latenttilämpönsä mukaisesti ja vastaavasti lämpötilan laskiessa ja kiinteäksi muuttuessaan se luovuttaa lämpöenergiaa. Ilmiö on hyödynnettävissä toisinpäin jäähdytykseen (kuva 7). PCMES järjestelmillä voidaan saavuttaa hyvä energiakapasiteetti suhteessa tilavuuteen. Muita hyviä puolia menetelmässä on vähäinen lämpöhukka sekä latenttilämmön purettavuus vakiolämmössä eli käytetyn faasimuunnosmateriaalin sulamispisteessä

Markkinoille on tuotettu myös kotitalouskäyttöön soveltuvia tuotteita, jotka ovat nopeita asentaa sekä sopivat sisustukseen ja ovat kalustukseen sovitettavissa. Isommat järjestelmät suunnitellaan tapauskohtaisesti (RT-103137 2020)



KUVA 7. Kaavio, joka osoittaa olomuodonmuutosmateriaalin toiminnan (Cunningham. 2015)

4.4 Sulatetun veden hyödyntäminen ja sen epäpuhtaudet

Jotta resurssitehokkuus ja tätä myöten energiatehokkuus pääsee uudelle tasolle, myös sulatusprosessista sivutuotteena syntyvälle vedelle voi löytyä käyttökohteita. Veden laadusta riippuen sitä voidaan käyttää esimerkiksi WC huuhteluun, kasteluun, ei niin herkkien pintojen puhdistamiseen ja sammutusvedeksi. Sammutusvedeksi hyödyntäminen on tosin teoreettista, sillä roskista suodettuna sitä voitaisiin käyttää kohteissa, joissa on käytössä sprinklerisäiliö. Käytännön toteutus pysähtyy siihen, että säiliön on oltava koko ajan täynnä eli sulatuslunta ei voitaisi sinne ajaa. Jos kohteessa olisi avoin allas sprinkleriä varten niin haihtuva vesi voitaisiin korvata sulamisvedellä mutta tällaisia tapauksia on hyvin vähän (Jortikka 2019).

Jään lähteestä riippuen, se saattaa sisältää joitakin epäpuhtauksia. Näillä epäpuhtauksilla voi myös olla vaikutusta lämmönsiirtoon ja sitä myötä jään sulamiseen. Sen lisäksi epäpuhtaudet voivat käyttökohteesta riippuen luoda haasteita sulaneen jään jatkokäytölle tai hävittämiselle. Tilanteen mukaan olisi siis hyvä saada suodatettua/eroteltua epäpuhtaudet pois.

4.4.1 Jäähallit

Jäähallien jäätä pitää hoitaa säännöllisin välein, että sen laatu pysyy hyvänä. Yhteen jäänhoitokertaan kuluu noin 0,4 - 0,8 m^3 vettä riippuen kentän koosta ja tarpeesta (IIHF Ice Rink Guide 2016). Vesilaitoksen vesi yleensä sisältää jonkin verran epäpuhtauksia, kuten kalsiumia ja rautaa, jotka nousevat pintaan veden muuttuessa kiinteäksi. Nämä heikentävät jäänlaatua, joten vaihtoehtoinen veden lähde on tarpeen (Jääkiekkoliitto 2018, 3).

Jäänhoitovetenä voidaan käyttää kentältä auratun lumen sulatuksesta kertyvää vettä. Kun kentälle levitetty vesi on kerran suodatettu hanaveden epäpuhtauksista, ei tarvittaisi enää niiden suodatuksesta välittää. Jäältä aurattu lumi kuitenkin sisältää käytöstä syntyneitä epäpuhtauksia, kuten nukkaa ja muita roskia. Näiden suodattaminen voitaisiin hoitaa sulatuksen yhteydessä asentamalla jään-

sulatusaltaaseen suodattimet. Lumensulatusjärjestelmän olisi myös hyvä olla suljettu piiri, ettei sulatusjärjestelmästä pääse epäpuhtauksia sulaneen veden joukkoon. Sulamisvettä hyödyntämällä jään hoidoissa on jäähallilla mahdollisuus säättää käyttövesikuluissa, kun tiedetään kuinka paljon vettä kuluu jään ylläpitoon.

4.4.2 Aorauslumi

Kaupunkiympäristössä aorauslumi kerätään kasoiksi odottamaan siirtoa lumenkaatopaikoille. Aorauslumi sisältää kuitenkin suuria määriä epäpuhtauksia, jotka ovat peräisin esimerkiksi autoista ja roskista. NCC:n tekemän tutkimuksen perusteella on todettu, että 1 m³ voi sisältää jopa 11 kg epäpuhtauksia, josta noin 70 % on kiviaineksia. Loput ovat sekajätettä, raskasmetalleja sekä öljyä (NCC). Useissa rannikkokaupungeissa aorauslumi kipataan sellaisenaan mereen, millä on suuri vaikutus merien saastumiseen. Sulatuksen yhteydessä yllä mainittujen epäpuhtauksien suodattaminen on erittäin tärkeää, oli loppusijoituspaikka mikä hyvänsä.

5 YHTEENVETO

5.1 Järjestelmän mahdollisuudet suurissa kokonaisuuksissa

Kaupunkien sisällä kertyy suuria määriä jätejäätä, suurilta osin auraslunta, joten voisiko sitä hyödyntää suuremmissa mittakaavassa? Esimerkiksi jos johonkin tietylle alueelle rakennetaan useampi kiinteistö, joka tarvitsee jäähdytysenergiaa, voisiko niille rakentaa yhteisen jätejäavaraston, jota kiinteistöt voisivat hyödyntää jäähdytyskaudella? Tällä hetkellä Suomessa ei ole jäähdytysjärjestelmää, joka täysin hyödyntäisi jätejäätä. Osaksi jäähdytysprosessia se on otettu hyödyntämällä sitä lauhduttimena.

Jätejäätä käyttämällä pystyttäisiin hoitamaan suuriakin jäähdytystarpeita. Esimerkiksi työssä aikaisemmin mainitussa Sundsvallin sairaalassa on jo vuonna 2010 pystytty kattamaan lumella koko jäähdytyskauden jäähdytysenergiantarve.

5.2 Kannattavuus ja ympäristö

Kannattavuudesta voidaan todeta jätejään olevan edullinen ja tehokas lisä rakennusten jäähdyttämiseen. Jätejään suuren saatavuuden ja kylmäenergiasisällön vuoksi sillä pystyttäisiin hoitamaan suurienkin kokonaisuuksien jäähdytystarve. Tällaisten projektien syntyä jarruttaa tällä hetkellä suuret investointikustannukset, jotka lumen varastointi vaatii. Vastavoimaksi näille suurille investointikustannuksille voi ajatella vihreän energian ja paremman imagon yritykselle. Jätejään ollessa liki ilmaista ja melko puhdas energianlähde se kannattaa ottaa huomioon yrityksen tai yksityishenkilön tehdessä kannattavuusselvitystä. tällä on mahdollisuus pienentää hiilijalanjälkeä ja näin parantaa imagoa.

Suomessa rakennuttamisen puolelta kyllä löytyy mielenkiintoa vaihtoehtoihin ja puhtaampiin energialähteisiin, mutta raha on yleensä se asia mikä viime kädessä ratkaisee. Kannattavuuslaskennassa otetaan huomioon mahdollinen imagon ar-

vonnousu, mutta hankkeelle kuitenkin pyritään aina saamaan tehokas takaisinmaksuaika. Organisaatiokohtaiset tavoitteet vaihtelevat, mutta yleensä tällaisissa järjestelmissä se yritetään saada alle kymmeneen vuoteen (Kuoppamäki 2020).

Pienten järjestelmien, joiden tarkoitus on vain sulattaa jätejä, investointikustannukset pysyvät matalampana johtuen siitä, että jäätä ei pyritä säilömään. Kannattavuus riippuu siitä, hyödynnetäänkö sulatusprosessia mihinkään. Tällaisissa pienissä järjestelmissä kannattaisi pyrkiä hyödyntämään rakennuksen hukkalämpöä, jotta ostoenergian määrä ei kasvaisi. Kuten aiemmin jo mainittu, esimerkiksi kylmäjärjestelmän lauhdelämpö sopii tähän tarkoitukseen.

5.3 Pohdinta

Työn tavoitteena oli selventää jätejäätä käsitteenä, luoda suunnitteluohjeistuksen sulattamiselle ja pohtia hyödyntämismahdollisuuksia. Alkuperäiseen tavoitteeseen kuului myös saada kasattua mitoituserusteet työn toimeksiantajan käyttöön, mutta tämä jäi tästä työstä pois aikataulutuksesta johtuvista syistä. Aiheen tutkiminen ja mitoituserusteiden laatiminen jatkuu yrityksen sisällä yhteistyössä muiden suunnittelijoiden kanssa.

Työssä päästiin tavoitteeseen, kun saatiin luotua ohjeistus, mitä täytyy ottaa huomioon suunnittelua aloitettaessa. Saatiin myös selvennettyä mitä jätejä on ja millaisia määriä sitä suunnilleen syntyy. Hyödyntämismahdollisuuksia on myös tuotu esille eriteltynä tarpeen mukaan.

Oma ymmärrys aiheesta ja vaihtoehtoisista energianlähteistä laajeni tätä työtä tehdessä. Aiheena jätejään hyödyntäminen on mielestäni mielenkiintoinen ja kehityskelpoinen, jota voitaisiin tulevaisuudessa hyödyntää. Energiamääräysten kiristyessä uusien energialähteiden toimintaan saaminen on tärkeää. Jatkotutkimuksena voisi toteuttaa käytännönläheisen tutkimuksen itse sulamisprosessista ja eri sulatustavoilla pyrkiä optimoimaan sulatusjärjestelmä.

Haastavan aiheesta teki tiedon kerääminen. Teoriaa sulamisesta ja sulattamisesta oli vaikea löytää. Tämä toisaalta lisäsi mielenkiintoa aihetta kohtaan, kun joutui perehtymään aiheeseen enemmän.

LÄHTEET

Airaksinen, M. & Laitinen, A. & Rämä, M. 2016. Jäähdytyksen teknologiset ratkaisut asiakasraportti. VTT Oy.

Aittomäki, A. & Aalto, E. 2012. Kylmätekniikka. Helsinki: Suomen kylmäyhdistys.

Chemistry LibreTexts. 2019. 1st Law of Thermodynamics. Luettu 9.4.2020. [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Thermodynamics/The_Four_Laws_of_Thermodynamics/First_Law_of_Thermodynamics](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Thermodynamics/The_Four_Laws_of_Thermodynamics/First_Law_of_Thermodynamics)

Cunningham, B. 2015. Improving Phase Change Energy Storage: A Natural Approach. COMSOL. Luettu 23.3.2020. <https://www.comsol.com/blogs/improving-phase-change-energy-storage-a-natural-approach/>

de Vocht, M. 2015. Mitä lämpö oikeastaan on? Luma-keskus Suomi. Luettu 9.4.2020. <https://www.luma.fi/kysymykset/2015/01/05/mita-lampo-oikeastaan-on/>

Fetter, J. 2019. 4-H Learning network. What is water? Artikkel. Luettu 10.3.2020. <https://4hlnet.extension.org/what-is-water/>

Heikkilä, A. 2020. Kylmätekniikan osastonjohtaja. Asiantuntijahaastattelu. Granlund Tampere Oy

IIHF Ice Rink Guide. 2016. Opas. International Ice Hockey Federation. <https://www.iihf.com/en/static/5890/iihf-ice-rink-guide>

Inkinen, P. & Tuohi, J. 2009. Momentti 1. Insinöörifysiikka. Helsinki: Otava.

Joensuu, A. 2015. Lumen ja sadeveden hyödyntäminen rakennuksen jäähdyttämiseen. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Insinöörityö.

Jortikka, J. 2020. Suunnittelupäällikkö. Asiantuntijahaastattelu. Granlund Tampere Oy

Jäähallien jään laatu. 2018. Jääkiekkoliiton olosuhde- ja ympäristövaliokunnan tutkimusraportti. Helsinki.

Jäähdytysjärjestelmien energialaskentaopas 2011. Ympäristöministeriö. Taustamateriaali. Helsinki

Kaappola, E. & Hirvelä, A. & Jokela, M. & Kianta, J. 2014. Kylmätekniikan perusteet. Helsinki: Opetushallitus.

Kuoppamäki, A. 2020. Yksikön johtaja. A-insinöörit Rakennuttaminen Oy. Puhelinkeskustelu 23.4.2020.

Lahtinen, R. Kunnossapitopalveluiden yksikön päällikkö 2020. Tampereen kaupunki. Puhelinkeskustelu 27.3.2020.

Motiva. 2019. Lämmön varastointi talon rakenteisiin. Luettu 6.2.2020.
https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampo-jarjestelman_kaytto/aurinkolammon_varastointi/lammon_varastointi_talon_rakenteisiin

Mäkinen, A. 2017. Lämmönsiirron ja virtausopin talotekniset perusteet. Luentomateriaali. Tampereen ammattikorkeakoulu.

NCC. NCC SnowClean – lumen puhdistus ja sulatus. Luettu 24.02.2020.
<https://www.ncc.fi/tarjontamme/infrastruktuuri/lumen-puhdistus-ja-sulatus/>

Puranen, J. 2016. Lämpö- ja virtausoppi. Talotekniikan koulutusohjelma. Opetusmateriaali. Tampereen ammattikorkeakoulu.

Pönkä, A. 2012. Faasimuutosmateriaalien käyttö energian varastoinnissa. TTY. Diplomityö.

RT-103137. 2020. Lämpöenergian kausivarastointi. Luettu 17.3.2020. Helsinki: Rakennustieto Oy. Vaatii käyttöoikeuden.

ScienceDaily. Terms, Absolute zero. Artikkel. Luettu 10.3.2020.
https://www.sciencedaily.com/terms/absolute_zero.htm

Tampereen kaupunki. Maan ja lumen vastaanotto. Kuva otettu 27.3.2020.
<https://www.tampere.fi/liikenne-ja-kadut/katujen-rakentaminen-ja-kunnossapito/katujen-kunnossapito/talvikunnossapito/maan-ja-lumen-vastaanotto.html>