

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
School of Energy Systems  
Energiatekniikan koulutusohjelma  
BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

**MERIVESIVOIMALA CASE VUOSAARI**  
**SEA WATER ENERGY PLANT CASE VUOSAARI**

Työn tarkastaja: Professori Esa Vakkilainen  
Työn ohjaaja: Tutkimusassistentti Kari Luostarinen  
Imatralla 3.5.2021  
Lauri Mölsä

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto  
School of Energy Systems  
Energiatekniikka

Lauri Mölsä

**Merivesivoimala case Vuosaari**

Kandidaatintyö 2021

Tarkastaja: Professori Esa Vakkilainen

Ohjaaja: Tutkimusassistentti Kari Luostarinen

32 sivua, 11 kuvaa ja 2 taulukkoa

Hakusanat: Vuosaari, merivesivoimala, korkealämpötilalämpöpumppu, kaukolämpö  
Keywords: seawater source heat pump, high temperature heat pump, district heating

Tämä kandidaatintyö on kirjallisuustutkielma merivesivoimalan käytöstä kaukolämmöntuotannossa keskittyen Helsingin Vuosaaren suunnitteilla olevan merivesivoimalan tapaukseen. Merivesivoimalalla voidaan tuottaa kaukolämpöä ja -kylmää lämpöpumppujen avulla hyödyntäen meriin varastoitunutta uusiutuvaa lämpöenergiaa. Meriveden lämpötila vaihtelee vuodenajan, veden kerrostuneisuuden ja merivirtausten mukaan. Sopivan vedenottopaikan löytäminen on merivesivoimalan hyötysuhteen ja investointikustannusten optimointia. Helsingin edustalla Itämerellä vedenottoa varten täytyisi rakentaa merenpohjaan 20 km pitkä tunneli, joka muodostaisi merivesivoimalan suurimman investointikustannuksen, arviolta 400–800 miljoonaa euroa, mutta mahdollistaisi tarvittavan 2–3-asteisen meriveden saannin ympärivuotisesti. Tukholman edustalla Itämeressä on Helsinkiä suotuisimmat olosuhteet merivesivoimalalle. Fortumin Värtan Ropstenin merivesivoimala onkin tuottanut kaukolämpöä Tukholmaan jo vuodesta 1987.

Vuosaaren merivesivoimalan lämpökerroin (COP) tulisi olemaan arviolta 2,5 ja se tuottaisi kaukolämpöä usean sadan megawatin lämpöteholla. Vuosaaren merivesivoimalalla pystyttäisiin korvaamaan Helsingin Ruoholahdessa sijaitseva Salmisaaren kivihiihivoimalan kaukolämmöntuotanto. Merivesivoimala vähentäisi Helsingin kaukolämmöntuotannon hiilidioksidipäästöjä noin 27 % eli 365 000 hiilidioksidiekvivalenttitonnia (t CO<sub>2</sub>-ekv) vuodessa ja olisi siten iso askel Helenin tavoitteessa hiilineutraalista energiantuotannosta vuoteen 2035 mennessä.

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## SISÄLLYSLUETTELO

## SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO .....	5
2	KAUKOLÄMPÖ .....	7
2.1	Toimintaperiaate.....	7
2.2	Kaukolämmön yleisimmät lämmönlähteet Suomessa.....	9
3	LÄMPÖPUMPUT .....	12
4	KORKEALÄMPÖTILALÄMPÖPUMPUT.....	15
5	MERI LÄMMÖNLÄHTEENÄ .....	17
5.1	Meriveden ominaislämpökapasiteetti .....	17
5.2	Meriveden lämpötila ja kerrostuneisuus.....	19
6	TUKHOLMAN MERIVESIVOIMALA .....	20
7	VUOSAAREN MERIVESIVOIMALA .....	21
7.1	Vaatimukset.....	21
7.2	Merivesiputkisto .....	22
7.3	Tunnelin rakentaminen .....	23
7.4	Sähkönkulutus .....	25
7.5	Lämpökerroin .....	26
7.6	Osakuormat.....	26
7.7	Investointikustannus ja ominaisinvestointi.....	26
7.8	Tuotannon tasoitus eli priimausvoima.....	28
7.9	Rajoitteet ja hankaluudet .....	28
7.9.1	Meriveden suola.....	28
7.9.2	Vaikutus mereneläviin .....	29
7.10	Päästöjen vähennys verrattuna nykyiseen kaukolämmön tuotantoon.....	29
8	YHTEENVETO .....	31
	LÄHTEET .....	33

## SYMBOLILUETTELO

### Roomalaiset

$c_p$	ominaislämpökapasiteetti	J/(kg·K)
$Q$	lämpöenergia	J
$q$	lämpövirta	J/s
$q_m$	massavirta	kg/s
$S$	entropia	J/K
$T$	lämpötila	°C, K
$W$	työ	J

### Alaindeksit

1	lähtötila
2	lopputila
carnot	ideaalisen Carnot´n kiertoprosessin mukainen
L	lauhtuminen
H	höyrystyminen
sisään	systemiin sisään
ulos	systemistä ulos

### Lyhenteet

CFC	Chlorinated hydrocarbons
CHP	Combined Heat and Power
COP	Coefficient Of Performance
GWP	Global Warming Potential
HFC	Hydrofluorocarbons
HTHP	High Temperature Heat Pump
HP	Heat Pump
ODP	Ozone Depletion Potential
ORC	Organic Rankine Cycle
TBM	Tunnel Boring Machine
UPVC	Plastisoimaton polyvinyylikloridi

## 1 JOHDANTO

Tämä energiatekniikan kandidaatintyö on kirjallisuustutkielma merivesivoimalan käytöstä kaukolämmöntuotannossa keskittyen Helsingin Vuosaaren suunnitteilla olevan merivesivoimalan tapaukseen. Merivesivoimala on lämpöpumppulaitos, joka tuottaa kaukolämpöä ja -kylmää hyödyntäen meriveden lämpöä.

Tämän työn tavoitteena on tutustua merivesivoimaloihin sekä koota tietoja Vuosaaren suunnitteilla olevasta merivesivoimalasta ja selvittää Vuosaaren merivesivoimalan mahdollisen toteutuksen hyötyjä ja haasteita. Vuosaaren suunnitteilla olevasta merivesivoimalasta on julkaistu suunnitelmia mm. Helen Oy:n Uutta voimaa -blogissa sekä Petteri Juutin kirjoittamassa Yle Uutisten verkkouutisessa.

Helen Oy:n yksikönpäällikkö Janne Rauhamäki (2019) kertoo Uutta voimaa -blogissa ja Yle Uutisten verkkouutisessa (Juuti 2020), että Helen suunnittelee Vuosaaren Suomen ensimmäistä merivesivoimalaa. Merivesivoimala hyödyntäisi lämpöpumppujen avulla meriveden lämpöä Helsingin kaukolämmön ja -kylmän tuotannossa. Meriveden lämmön talteenotto on osa Helenin tavoitetta Helsingin hiilineutraalista energiantuotannosta vuoteen 2035 mennessä (Helen 2021a).

Helsingin kaukolämmönkulutus vaihtelee 200–2500 megawattiin (Helen 2020). Vuonna 2019 Helsingin kaukolämmöstä tuotettiin fossiilisilla polttoaineilla 86 % (Helsingin Seudun Ympäristöpalvelut 2020). Vuosaaren merivesivoimalalla pystyttäisiin korvaamaan Helsingin kaukolämmön tuotannon fossiilisten polttoaineiden osuutta uusiutuvalla energialla.

Meret ovat lähes ehtymätön uusiutuvan energian lähde ja niitä onkin alettu käyttää kaukolämmöntuotannossa. Tukholmassa on ollut toiminnassa oleva merivesivoimala kaukolämmön ja -kylmän tuotannossa jo 1980-luvulta asti (Friothersm 2018). Merivesivoimala on jättimäinen investointi, joten sen lämmöntuotannon tulee olla suuri ollakseen kannattava hanke. Vuosaaren merivesivoimala tuottaisi kaukolämpöä Helsinkiin usean sadan megawatin teholla, millä saataisiin korvattua Helsingin Ruoholahdessa sijaitseva Salmisaaren kivihiilivoimala. Täydellä teholla ajettava Salmisaaren kivihiilivoimala tuottaa 300 megawatin

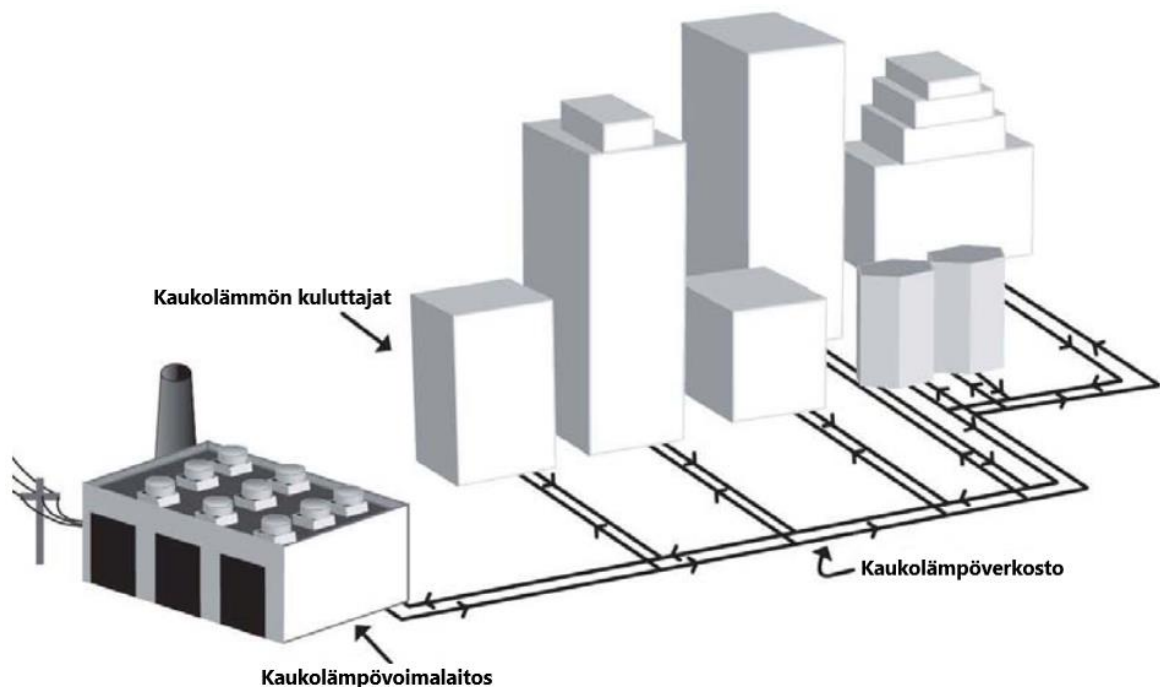
lämpötehon ja 160 megawatin sähkötehon polttamalla kivihiiltä tuhat kiloa joka minuutti. Korvaamalla kivihiilen polton Itämeren uusiutuvalla lämpöenergialla, vähenisi Helsingin kaukolämmöntuotannon hiilidioksidipäästöt merkittävästi. (Juuti 2020.)

## 2 KAUKOLÄMPÖ

### 2.1 Toimintaperiaate

Kaukolämpö on lämmitysjärjestelmä, jossa lämpöä tuotetaan keskitetysti voimalaitoksissa ja lämpökeskuksissa. Lämpö siirretään kuluttajille kaukolämpöverkoston avulla, joka perustuu kuuman veden tai vesihöyryn kiertämiseen jakeluverkkoputkistossa. Yleisimmässä kaukolämpöjärjestelmässä, eli ns. matalalämpötilajärjestelmässä, kaukolämpöverkoston kiertävän veden lämpötila vaihtelee kesän 65 °C:sta kovien pakkasten 120 °C:een. Paras hyötysuhde saadaan, kun kaukolämpövesi jäähtyy loppukäyttäjällä mahdollisimman alhaiseen lämpötilaan, parhaimmillaan 22 °C:een. Kaukolämmöllä voidaan lämmittää mm. kiinteistöjä, käyttövettä sekä teollisuuden prosesseja. Kaukolämmön kuluttajia voivat olla esimerkiksi asuin- ja liikekiinteistöt, julkiset laitokset ja teollisuuslaitokset. (Phetteplace 2013, kappaleet 1.1 ja 2.9.)

Kuvassa 1 on esitetty kaukolämpöjärjestelmän peruskomponentit eli kaukolämpövoimalaitos, kaukolämpöverkosto ja kaukolämmön kuluttajat.



**Kuva 1.** Kaukolämpöjärjestelmän peruskomponentit. (Phetteplace 2013, kappale 1.3, tekstit käännetty.)

Yleisin ja hyötysuhteeltaan paras kaukolämmön tuotantotapa on CHP-laitos (Combined Heat and Power) eli sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitos. CHP-laitoksista yleisimmät ovat vastapainevoimalaitos ja väliottovoimalaitos. Vastapainevoimalaitoksessa turbiinista poistuva korkeassa paineessa oleva vesihöyry johdetaan joko suoraan kaukolämpöprosessiin tai lämmönsiirtimen avulla siirretään lämpö kaukolämpöveteen. Väliottolauhdutusvoimalaitoksessa turbiinista otetaan yhdellä tai useammalla väliotolla höyryä kaukolämpöä varten, jolloin turbiinin jälkeinen höyry paisuu lauhduttimen paineeseen. Lauhduttimessa höyry lauhduu ja loppu lämpö poistuu ympäristöön. (Phetteplace 2013, kappale 2.19.)

Kaukolämpöä tuotetaan myös erillisissä lämpökeskuksissa. Kaukolämmön erillistuotannossa päästään noin 80 % hyötysuhteeseen, kun sähkön ja lämmön yhteistuotannossa voidaan päästä jopa 90 %:n hyötysuhteeseen (Breeze 2019, s. 121). Yhteistuotannon hyöty on suurin sähköntuotannossa, koska erillistuotantona sähköä saadaan tuotettua höyryturbiinilla keskimäärin 36 %:n hyötysuhteella ja moderneimmillakin laitoksilla vain lähes 45 %:n hyötysuhteella (Breeze 2019, s. 121-133). Kaukolämpöverkostossa on myös oltava vara- ja huippukuormalaitoksia. Varalaitoksien kapasiteetin tulee vastata peruskuorman kapasiteettiä. Kaukolämmön tarve vaihtelee vuodenaikojen ja sääolojen mukaan. Kesäisin lämmitystarve on noin 10 % talven lämmitystarpeesta (Phetteplace 2013, kappale 3.51). Huippukuormalaitoksilla tasoitetaan peruskuorman ylittävä kaukolämmön tarve.

Lämpöä voidaan tuottaa voimalaitoksissa polttamalla polttoaineita lämmityskattiloissa ja siirtämällä palamisen yhteydessä syntynyt lämpö kaukolämpöveteen. Kaukolämmön tuotannossa yleisesti käytettyjä fossiilisia polttoaineita ovat mm. kivihiili, maakaasu, öljy. Muita poltettavia energianlähteitä ovat mm. turve, erilaiset puupolttoaineet, kuten pelletit ja metsähake, biokaasu ja muut biopolttoaineet, kuten olki ja ruokohelpi. Fossiilisten polttoaineiden ja turpeen poltossa syntyvien hiilidioksidipäästöjen takia niiden käyttöä kaukolämmön tuotannossa ollaan vähentämässä ja niitä korvataan uusiutuvilla energianlähteillä. Toinen yleinen kaukolämmön tuotantotapa on lämpöpumppujen käyttö. Lämpöpumppujen avulla voidaan myös hyödyntää mm. teollisuuden ja jätevesien hukkalämmöt. Lämpöpumpuilla voidaan ottaa lämpöä myös suurista lämpövarastoista, kuten meristä ja maaperästä. (Phetteplace 2013, kappale 1.2.)



Kaukolämpöverkostoa voidaan käyttää myös viilennykseen, jolloin kaukolämpöverkosto toimii päinvastoin kuin lämmityksessä eli lämpöä siirretään viilennettävästä kohteesta kaukolämpöverkoston avulla lämpönieluun, esimerkiksi mereen (Phetteplace 2013, kappale 2.43).

## 2.2 Kaukolämmön yleisimmät lämmönlähteet Suomessa

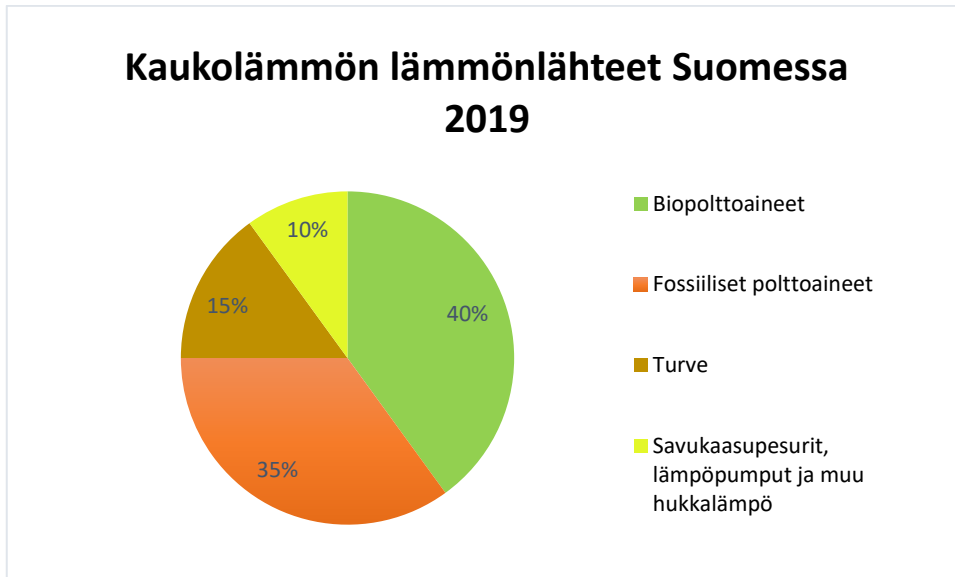
Suomessa kaukolämpö on yleisin lämmitystapa kaupungeissa ja kuntakeskuksissa. Jopa 90 % suurten kaupunkien rakennuksista lämpiää kaukolämmöllä. Vuotuisesta kaukolämmöstä 80 % ja huippukuormasta 50 % tuotetaan CHP-laitoksissa eli sähkön ja lämmön yhteistuotannolla höyryvoimalaitoksissa. Näissä CHP-laitoksissa tuotetaan 25 % koko Suomen sähköntuotannosta. (Breeze 2019, s. 123.)

Suomen kaukolämmöntuotanto vuonna 2019 oli yhteensä 38 142 gigawattituntia. Kaukolämmöstä tuotettiin biopolttoaineilla eli uusiutuvilla polttoaineilla 40 %, fossiilisilla polttoaineilla 35 %, turpeella 15 % ja savukaasupesureilla ja muulla hukkalämmöllä mukaan lukien lämpöpumpujen sähkön 10 %. Käytettyjen energialähteiden määrät on esitetty taulukossa 1. Yhteistuotannosta on huomioitu polttoaineen kaukolämmöntuotantoon käytetty osuus. (Tilastokeskus 2020.)

**Taulukko 1.** Kaukolämmöntuotannon energialähteet Suomessa 2019 perustuen Suomen virallisen tilaston (2019) tilastoihin.

Energialähteet	Käytetty (GWh)
Kivihiili	6900
Maakaasu	4092
Öljy	776
Muut fossiiliset	1427
Turve	5672
Biopolttoaineet	15272
Lämpöpumput, vety ja teollisuuden hukkalämpö	4003
Yhteensä	38142

Kuvassa 2 on havainnollistettu lämmönlähteiden keskinäistä osuutta koko Suomen kaukolämmöntuotannossa vuonna 2019.



**Kuva 2.** Kaukolämmön tuotannossa käytettyjen lämmönlähteiden keskinäiset osuudet Suomessa vuonna 2019 perustuen Tilastokeskuksen (2020) tilastoihin.

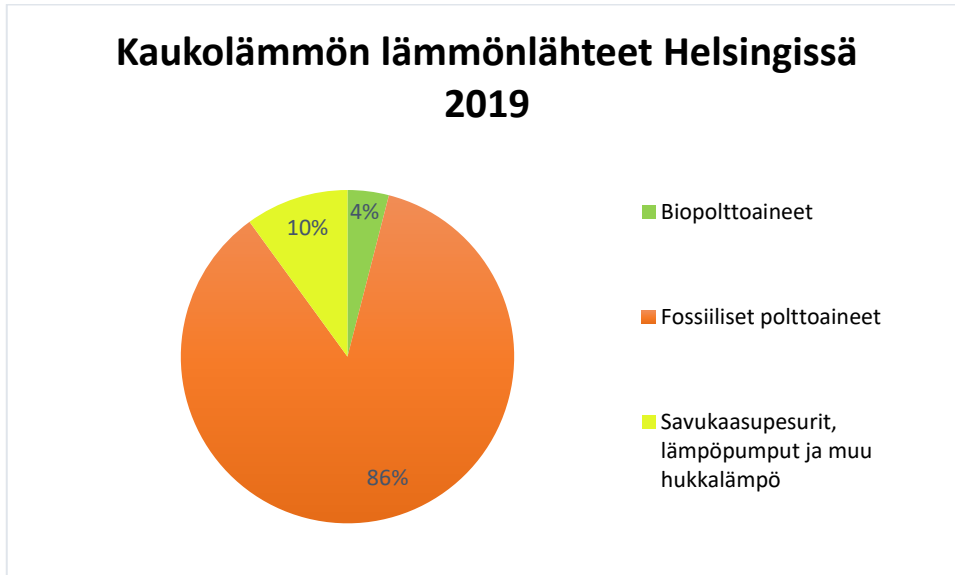
Helsingissä fossiilisten polttoaineiden osuus kaukolämmön tuotannossa on huomattavasti suurempi verrattuna koko Suomen keskiarvoon. Vuonna 2019 Helsingin kaukolämmöntuotanto oli 5 514 gigawattituntia. Kaukolämmöstä tuotettiin kivihiilellä 57 %, maakaasulla 28 %, lämpöpumpuilla 10 %, biopolttoaineilla 4 % ja öljyllä 2 %. Käytettyjen energialähteiden määrät on esitetty taulukossa 2. Yhteistuotannosta on huomioitu polttoaineen kaukolämmöntuotantoon käytetty osuus. (Helsingin Seudun Ympäristöpalvelut 2020.)

**Taulukko 2.** Helsingin kaukolämmöntuotannon energialähteet 2019 perustuen Helsingin Seudun Ympäristöpalvelujen (2020) tilastoihin.

Energialähde	Käytetty (GWh)
Kivihiili	3147
Maakaasu	1528
Öljy	85
Turve	0
Biopolttoaineet	196
Jäte	0
Lämpöpumput	559
Yhteensä	5514

Fossiilisten polttoaineiden osuus oli yhteensä 86 % kaikista Helsingin kaukolämmöntuotantoon käytetyistä lämmönlähteistä. Kuvassa 3 on havainnollistettu Helsingin

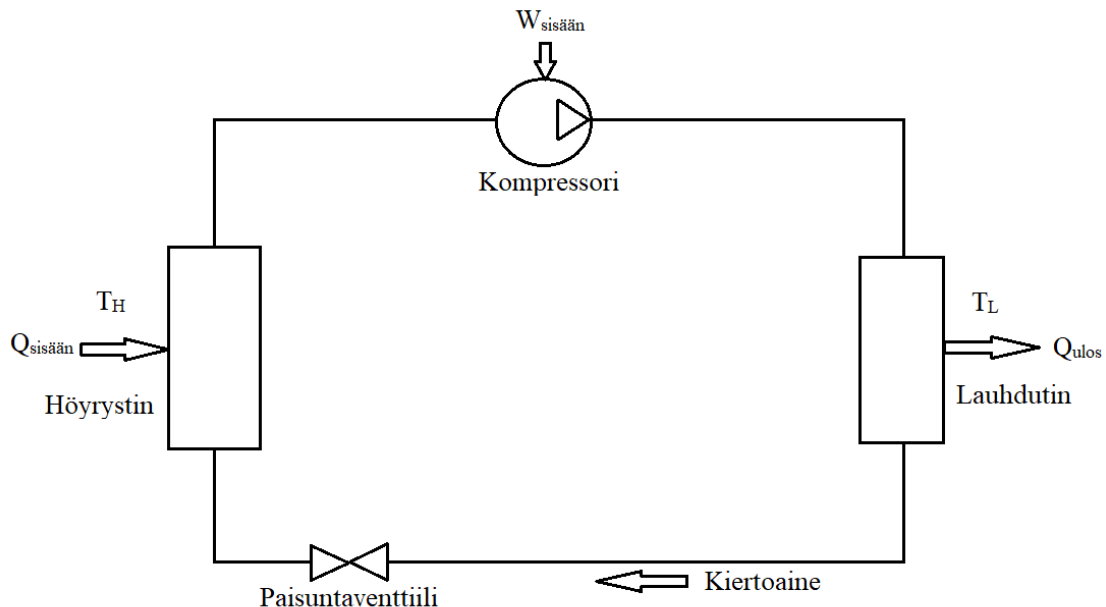
kaukolämmöntuotannon lämmönlähteiden keskinäistä osuutta vuonna 2019. (Helsingin Seudun Ympäristöpalvelut 2020.)



**Kuva 3.** Helsingin kaukolämmön tuotannossa käytettyjen lämmönlähteiden keskinäiset osuudet vuonna 2019 perustuen Helsingin Seudun Ympäristöpalvelujen (2020) tilastoihin.

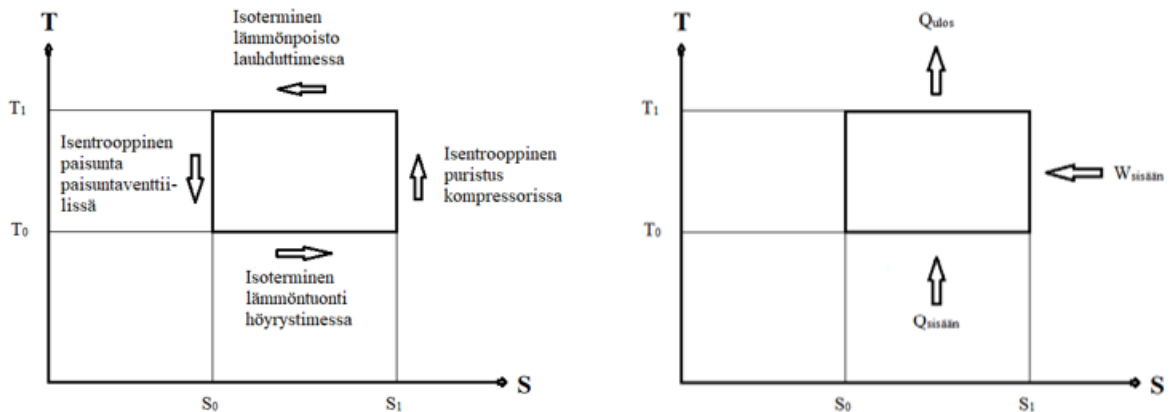
### 3 LÄMPÖPUMPUT

Termodynamiikan 2. lain mukaan lämpö ei pysty siirtymään itsestään matalammasta lämpötilasta korkeampaan lämpötilaan. Lämpöpumppu (engl. Heat Pump - HP) on laite, joka työtä tekemällä siirtää lämpöä kahden lämpövaraston välillä. Yleisin käytetty lämpöpumpputekniikka on nestemäisen kiertoaineen höyrystymiseen ja lauhtumiseen perustuva prosessi, jossa kiertoaineen painetta kasvattamalla saadaan kiertoaine höyrystymään höyrystimessä halutussa lämpötilassa, jolloin lämpöä sitoutuu höyrystimessä lämpövarastosta kiertoaineeseen. Kiertoaineen painetta pienennetään paisuntaventtiilin avulla, jolloin kiertoaine saadaan lauhtumaan lauhtuttimessa, eli kiertoaineen lämpö vapautuu lämpönieluun. Lämpöpumput voidaan jaotella avoimen tai suljetun järjestelmän mukaan sekä lämpöpumpun käyttöenergian mukaan. Käyttöenergiana lämpöenergiaa hyödyntävät ejektor- ja absorptiokoneisto ja mekaanista energiaa hyödyntää kompressorit. Kompressoriprosessilla päästään parempaan lämpökertoimeen kuin absorptiokoneistolla ja se onkin käytetyin lämpöpumppuprosessi. Yleisimpiä kompressoreita lämpöpumpuissa ovat ruuvi-, mäntä- ja turbokompressorit. Kompressorikoneistossa kiertoaine kiertää suljetussa putkistossa ja sen pääkomponentit ovat höyrystin, kompressorit, lauhtutin ja paisuntaventtiili. Kuvassa 4 on esitetty kompressoriprosessin toimintakaavio hyvin pelkistettynä. (Wikstén 1980.)



**Kuva 4.** Yleisimmän lämpöpumppuprosessin eli kompressoriprosessin pelkistetty toimintakaavio. (Mukailen Wikstén 1980.)

Lämpöpumpppuolosessia voidaan kuvata käänteisellä ideaalisella Carnot-prosessilla, joka koostuu isentrooppisesta paisunnasta paisuntaventtiilissä, isotermisestä lämmöntuonnista höyrystimessä, isentrooppisesta puristuksesta kompressorissa ja isotermisestä lämmönpoistosta lauhduttimessa. Kuvassa 5 on esitetty käänteinen ideaalinen Carnot-prosessi T,S-piirroksena. (Wikstén 1980.)



**Kuva 5.** Käänteinen ideaalinen Carnot-prosessi, jossa on vaaka-akselina entropia  $S$  ja pystyakselina lämpötila  $T$ . (Mukaiillen Wikstén 1980.)

Lämpöpumpun hyvyttä mitataan yleensä tehokertoimella eli lämpökertoimella (COP), joka kertoo lämpöpumpulla tuotetun lämmön suhteen lämpöpumpun käyttämään energiaan.

$$COP = \frac{Q_{ulos}}{Q_{ulos} - Q_{sisään}} = \frac{Q_{ulos}}{W_{sisään}} \quad (1)$$

missä  $Q_{sisään}$  on systeemiin tuotu lämpöenergia [J],  $Q_{ulos}$  on systeemistä ulos saatu lämpöenergia [J] ja  $W_{sisään}$  on lämpöpumpun tekemä työ [J]. (Wikstén 1980.)

Ideaalisen Carnot'n kiertoprosessin mukainen lämpöpumpun teoreettinen maksimaalinen COP-lämpökerroin kahden lämpövaraston välillä on

$$COP_{carnot} = \frac{T_L}{T_L - T_H} \quad (2)$$

missä  $T_L$  on lauhdumislämpötila [K] ja  $T_H$  on höyrystymislämpötila [K]. (Wikstén 1980.)

Kiertäinetta kutsutaan lämpöpumpuissa yleisesti kylmäaineeksi. Kylmäaine valitaan sen termodynaamisten ominaisuuksien, ympäristövaikutusten, turvallisuuden, tehokkuuden, saatavuuden ja hinnan mukaan. Yleisimmin käytettyjä kylmäaineita lämpöpumpuissa ovat fluorihiiivedyt (HFC) kuten trifluorietaani HFC-143a eli R143a. Kioton pöytäkirjan eli Kioton ilmastopimuksen mukaan fluorihiiivedyt luokitellaan kasvihuonekaasuiksi, joten niiden käyttöä on alettu rajoittamaan lämpöpumppujen kylmäaineina. Korvaavia kylmäaineita tutkitaan paljon ja vaihtoehtoina on pidetty mm. vetyfluoriolefiinejä (HFO), kuten R1234yf ja R1234ze joilla voidaan korvata R143a, sekä ns. luonnollisia kylmäaineita. (Arpagaus et al. 2018, s. 999.)

## 4 KORKEALÄMPÖTILALÄMPÖPUMPUT

Korkealämpötilalämpöpumppujen (engl. High Temperature Heat Pump - HTHP) ja tavallisten lämpöpumppujen jako ei ole täysin selvä, mutta yhtenä rajana on käytetty käytetyn lämpönielun 100 °C:n lämpötilaa (Arpagaus et al. 2018, s. 986). Lämpöpumppujen korkeinta lämpötilaa rajoittavat kylmäaineiden termodynaamiset ominaisuudet. On useita kylmäaineita, joilla pystytään helposti tuottamaan 80–100 °C:sta lämpöä perinteisillä lämpöpumpuilla, mutta sitä korkeampi lämpötila tuottaa termodynaamisia rajoituksia kylmäaineille sekä teknisiä vaatimuksia kompressorille korkeamman painesuhteen takia. Kylmäaineen kriittisen lämpötilan tai paineen ylittyessä ei neste- ja kaasufaaseja pysty erottamaan. Ylikriittisissä lämpötiloissa prosessin häviöt kasvavat mikä johtaa pienempään lämpökertoimeen. Korkealämpötilalämpöpumpun kylmäaineelta vaaditaan korkeampi kriittinen lämpötila, kuin tavallisesti lämpöpumpuissa käytetyiltä kylmäaineilta. Korkealämpötilalämpöpumpulla pystytään tuottamaan kylmäaineesta riippuen jopa 150-asteista lämpöä (Arpagaus et al. 2018, s. 986). (Aittomäki & Aalto 2012.)

Kylmäaineiden käytettävyyttä rajoittavat myös tiukentuneet ympäristösäädökset. Kylmäaineita pisteytetään kahdella eri mittarilla, otsonihaitallisuudella ODP (Ozone Depletion Potential) sekä kasvihuonehaitallisuudella GWP (Global Warming Potential). Ennen tiukentuneita ympäristösäädöksiä korkealämpötilalämpöpumppujen kylmäaineena käytettiin yleisesti CFC-yhdisteitä eli kloorihiilivetyjä. CFC-yhdisteiden tultua kielletyiksi niiden korkean ODP luvun takia ne korvattiin HFC-yhdisteillä eli fluorihiilivedyillä. Nykyään myös HFC-yhdisteistä on pyritty pääsemään eroon niiden korkean GWP luvun ja niiden herkän syttyvyyden takia. (Arpagaus et al. 2018, s. 999.)

Tiukentuneet kylmäaineiden ympäristösäädökset ovat johtaneet tutkimuksiin ns. luonnollisten kylmäaineiden käytöstä korkealämpötilalämpöpumpuissa. Arpagaus et al. (2018, s. 1002) mainitsevat Energy -lehden julkaisussaan High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials korkealämpötilalämpöpumppuihin soveltuviksi luonnollisiksi kiertoaineiksi R718 eli veden, R744 eli hiilidioksidin, R717 eli ammoniakkin ja hiilivedyt R600 eli n-butaanin ja R601 eli pentaanin. Kaikilla näistä luonnollisista kylmäaineista on hyvät ja huonot puolensa, joten kylmäaineen valinnassa tulee ottaa huomioon sekä ympäristö, turvallisuus että käyttökohde.

Ammoniakin käyttöä kylmäaineena rajoittaa sekä sen myrkyllisyys että lämpönielun noin 90 °C:n maksimi lämpötila. Erikoisteräksestä valmistettu ammoniakkikompressori pystyy kuitenkin toimimaan 110 °C ja 76 barin paineessa. Hiilidioksidi on ympäristöystävällinen kylmäaine, sen ODP arvo on nolla ja GPW 1, hiilidioksidin talteenotolla tuotettuna sen GWP on myös nolla, mutta haasteita sen käytölle korkealämpötilalämpöpumpuissa asettaa sen matala kriittinen lämpötila (31 °C). Hiilidioksidia voidaan käyttää sen kriittistä lämpötilaa korkeammissa lämpötiloissa transkriittisessä prosessissa, jossa lämpönielun maksimi lämpötila on 90–120 °C. Hiilivedyt n-butaani ja pentaani ovat erittäin palavia ja räjähdysherkkiä, joten niiden käyttö on rajoitettu vain hyvin pieniin lämpöpumppeihin. (Arpagaus et al. 2018, s. 1002.)

Vesi on yksi potentiaalisimmista korkealämpötilalämpöpumppujen kylmäaineista. Vedellä on korkea kriittinen lämpötila (373,9 °C) ja paine (220,6 bar). Veden ODP ja GWP ovat nol-lat, eli se on ympäristöystävällistä. Vesi on myös myrkytöntä sekä palamatonta. Koska veden kiehumispiste on 100 °C niin suurimman osaa lämpöpumpun kiertosyklistä tulisi tapahtua alipaineessa. Vesihöyryn alhaisesta tiheydestä johtuen veden massavirran sekä käytetyn painesuhteen tulisi olla erittäin korkeat. (Arpagaus et al. 2018, s. 1002.)



## 5 MERI LÄMMÖNLÄHTEENÄ

Suurin osa maapallon pinta-alasta muodostuu meristä, joten meret keräävät valtavasti auringon lämpösäteilyä. Maapallon merien yhteen laskettu tilavuus on yli miljardi kuutiokilometriä, mikä tekee meristä käytännössä loputtoman lämpövaraston. Merivesivoimalat perustuvat merien varastoiman lämmön hyödyntämiseen lämpöpumppujen avulla.

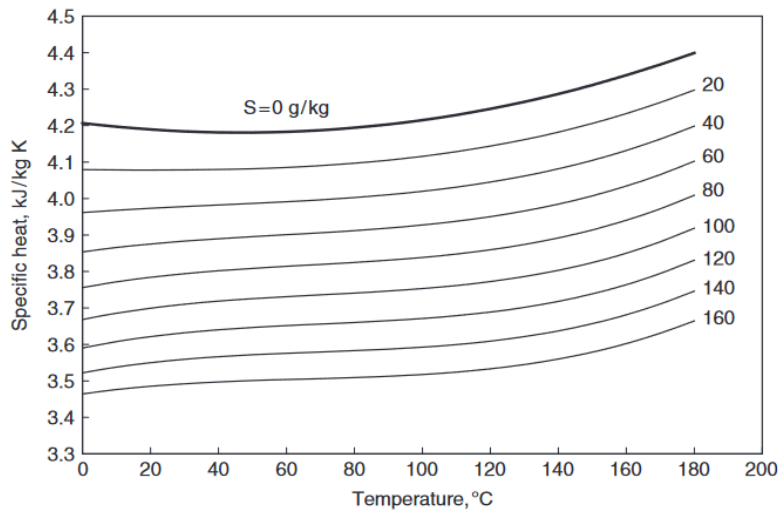
### 5.1 Meriveden ominaislämpökapasiteetti

Merivesivoimalan lämpöpumpun höyrystimessä merivedestä kylmäaineeseen siirtyvä lämpövirta  $q$  [J/s] on kokoonpuristumattoman virtauksen tapauksessa

$$q = q_m c_p (T_{ulos} - T_{sisään}) \quad (3)$$

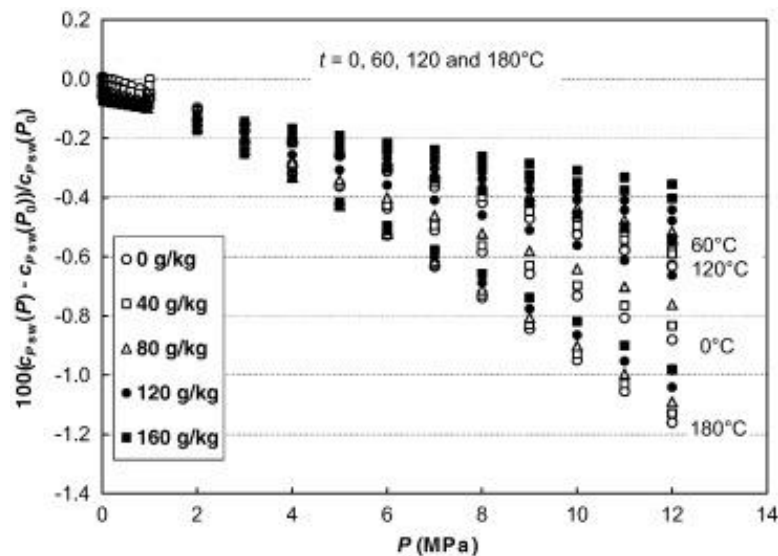
missä  $q_m$  on meriveden massavirta [kg/s],  $c_p$  on veden ominaislämpökapasiteetti [J/(kg·K)],  $T_{ulos}$  on meriveden ulosmenolämpötila [K] ja  $T_{sisään}$  on meriveden sisääntulolämpötila [K]. (Lavine et al. 2017, s. 17.)

Shargawy et al. mukaan (2010, s. 354) meriveden ominaislämpökapasiteetti  $c_p$  vaihtelee lämpötilan, paineen ja suolapitoisuuden mukaan. Kuvassa 6 on esitetty lämpötilan ja suolapitoisuuden vaikutus meriveden ominaislämpökapasiteettiin. Kuvasta 6 nähdään, että puhtaan veden ominaislämpökapasiteetti 0 °C lämpötilassa on noin 4,2 kJ/(kg·K), kun esimerkiksi Itämeren keskimääräisellä suolapitoisuudella 7 g/kg meriveden ominaislämpökapasiteetti 0 °C lämpötilassa on noin 4,0 kJ/(kg·K). (Shargawy et al. 2010, s. 361.)



**Kuva 6.** Lämpötilan ja suolapitoisuuden vaikutus meriveden ominaislämpökapasiteettiin. (Sharqawy et al. 2010, s. 361.)

Nayar et al. mukaan (2016, kappale 7) paineen kasvaessa meriveden ominaislämpökapasiteetti pienenee. Kuvassa 7 on esitetty paineen vaikutus meriveden ominaislämpökapasiteettiin  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $120^{\circ}\text{C}$  ja  $180^{\circ}\text{C}$  lämpötiloissa ja 0 g, 40 g, 80 g, 120 g ja 160 g suolapitoisuuksilla. Vuosaaren merivesivoimalan vedenotto tapahtuisi noin 80 metrin syvyydestä, jolloin meriveden paine olisi noin 0,8 MPa normaalia ilmanpainetta suurempi. Kuvasta 7 nähdään, että 0,8 MPa:n ylipaineen vaikutus meriveden ominaislämpökapasiteettiin on hyvin vähäinen, noin -0,02 %. (Nayar et al. 2016, kappale 7.)



**Kuva 7.** Meriveden paineen vaikutus lämpökapasiteettiin, mitattuna eri lämpötiloilla ja suolapitoisuuksilla. (Nayar et al. 2016, kappale 7.)

## 5.2 Meriveden lämpötila ja kerrostuneisuus

Veden tiheys vaihtelee lämpötilan, paineen ja suolapitoisuuden mukaan. Mitä tiheämpää eli raskaampaa vesi on, sitä syvemmälle vesi painuu. Kevyin vesi on pinnalla ja raskain vesi on pohjalla. Makean veden tapauksessa suurimman tiheyden lämpötila on 4 °C, eli makea vesi on raskainta 4 °C lämpötilassa. Merien suurimman tiheyden lämpötila vaihtelee myös suolaisuuden mukaan. Suolaisuuden lisääntyessä suurimman tiheyden lämpötila pienenee. Suomen ympäristön Itämeren syvänteiden suolapitoisuus on 7,5–9 välillä, jolloin syvänteiden meriveden lämpötila on 2–3 °C. (Bruun n.d.)

## 6 TUKHOLMAN MERIVESIVOIMALA

Tukholman edustalla on suotuisat olosuhteet merivesivoimalan kannalta. Ruotsin suuret järvet laskevat vettä Tukholman kautta Itämereen. Järvien makea vesi sekoittuu meriveteen nostaen Itämeren syvänteistä lämmintä merivettä pintaan Tukholman edustalle, jolloin merivesi Tukholman edustalla ei pääse kylmenemään liikaa edes talvisin (Rauhämäki, 2019). Ympärivuotisessa käytössä oleva Fortumin Värtan Ropstenin merivesivoimala saa kyseisen luonnonkierron ansiosta riittävän lämmintä merivettä suoraan rannikolta Tukholman edustalta. Kesäisin Värtan Ropstenin merivesivoimala käyttää lämmintä pintavettä ja talvisin merivesi otetaan 15 metrin syvyydestä, jossa meriveden lämpötila on jatkuvasti 3-asteista (Friothers 2018).

Värtan Ropstenin merivesivoimala otettiin käyttöön jo vuonna 1987 ja se on maailman suurin kaukolämpöä merivedestä lämpöpumpuilla tuottava laitos. Kuusi kappaletta 30 megawatin Friothersin Unitop 50FY lämpöpumppua (Kuva 8) tuottavat 80-asteista kaukolämpöä yhteensä 180 megawatin lämpöteholla. Voimalaa voidaan ajaa portaattomasti 10–100 % kapasiteetilla riippuen kaukolämmön tarpeesta. Kesäisin voimalaitos tuottaa kaukokylmää, jolla viilennetään yli 400 yritystä mukaan lukien sairaaloita ja datakeskuksia. (Friothers 2018.)



**Kuva 8.** Friothersin Unitop 50FY lämpöpumppu Helenin Katri Valan voimalaitoksella. (Friothers 2021.)

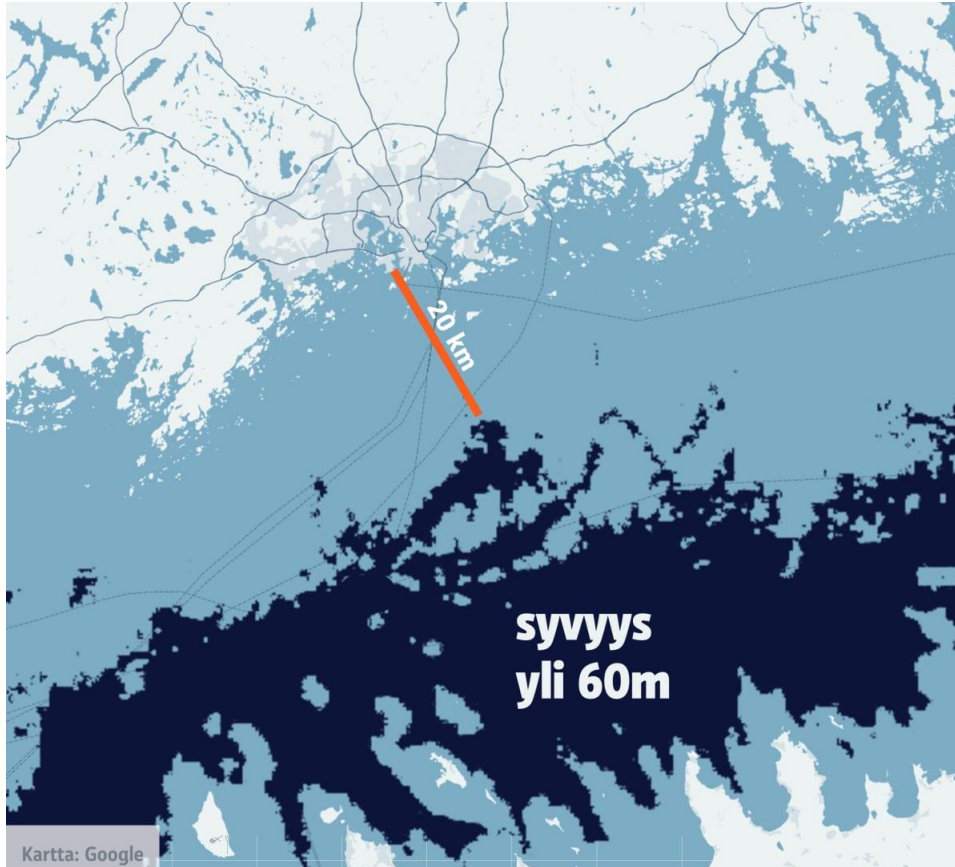
## 7 VUOSAAREN MERIVESIVOIMALA

### 7.1 Vaatimukset

Vuosaaren merivesivoimala tuottaisi kaukolämpöä Helsinkiin ympäri vuoden usean lämpöpumpun avulla hyödyntäen Itämereen varastoitunutta lämpöä. Talvisin kaukolämpöveden tulee olla jopa 120-asteista, joten tavallisten lämpöpumppujen jatkoksi olisi taloudellista ja ympäristöystävällistä laittaa korkealämpötilalämpöpumppu kaukolämpöveden priimausta varten. Kesäisin merivesivoimalaa käytettäisiin tuottamaan myös kaukokylmää. (Juuti 2020.)

Kaukolämmön tarve on suurin talvella, jolloin merivesi on kylmintä. Jotta kaukolämmön tuotanto olisi kannattavaa on meriveden lämpötilan oltava vähintään kaksi, mutta mielellään kolme celsiusastetta. Itämeressä merivesi on 2–3-asteista ympäri vuoden vasta 50–60 metrin syvyydessä. Helsingin edustalla Suomenlahdella laajoihin yli 60 metrin syvyyksiin päästään vasta 20 kilometrin päässä rannikolta. Meriveden saaminen voimalaitokseen vaatii pitkän tunnelin rakentamisen merenpohjaan voimalaitokselta syvänteelle, mistä vesi pumpataan tunnelia pitkin voimalaitokselle lämpöpumpuille. Pitkä etäisyys vaadittaviin syvänteisiin tarkoittaa suuria merivesiputkiston rakennuskustannuksia. Sopivan syvänteen löytäminen vaatii huolellista selvitystyötä. On tutkittava miten merivirrat, veden kerrostuneisuus ja veden ottaminen vaikuttavat olosuhteisiin. Olosuhteiden tulisi olla muuttumattomia, jotta kaukolämmön tuotanto olisi jatkuvasti kannattavaa. (Juuti 2020.)

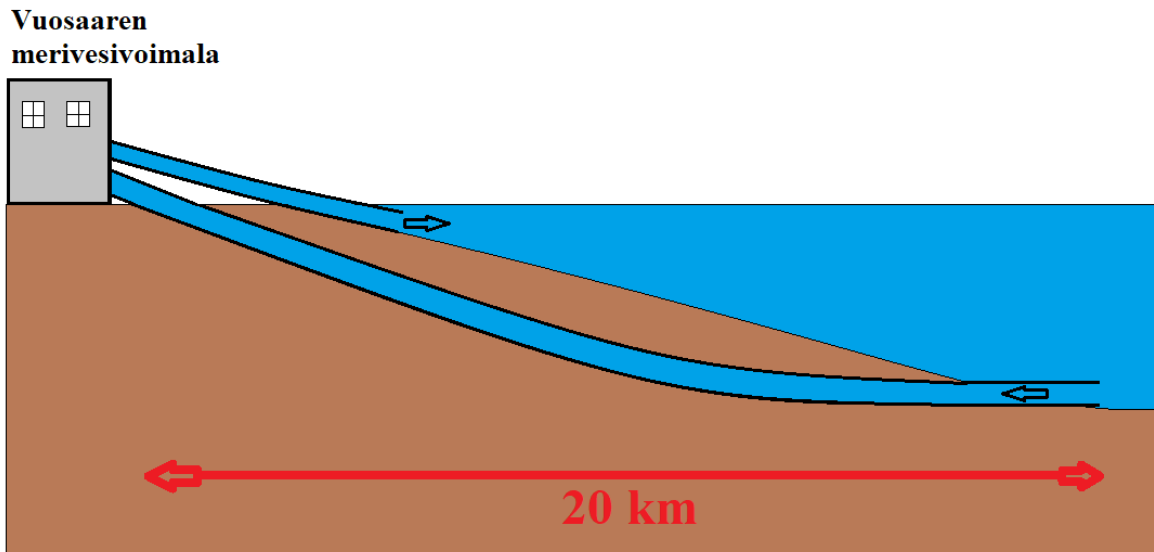
Kuvassa 9 on esitetty Itämeren Helsinkiä lähimmät yli 60 metrin syvänteet.



**Kuva 9.** Helsinkiä lähimpänä olevat yli 60 metrin syvänteet on merkitty tumman sinisellä värillä. Kuva: Petteri Juuti / Yle, syvyytiedot: Ilmatieteenlaitoksen Merentutkimusyksikkö. (Juuti 2020.)

## 7.2 Merivesiputkisto

Tarvittava meriveden määrä on niin suuri, että pitkältä matkalta vedenotto on toteutettava tunnelina, mutta syvällä meressä vedenotto voitaisiin mahdollisesti toteuttaa putkella meren pohjassa. Syvänteeltä merenpohjasta 2–3-asteinen merivesi virtaisi kävelyvauhtia voimalaitokselle, josta lämmöntalteenoton jälkeen se palautettaisiin takaisin mereen 0,5 asteisena. Meriveden palautusta varten ei tarvitse rakentaa tunnelia vaan voidaan rakentaa lyhyempi putki kulkemaan merenpohjaa pitkin, jolla merivesi palautetaan takaisin mereen sopivaan paikkaan rannikon lähelle. Kuvassa 10 on havainnollistettu Vuosaaren merivesivoimalan meriveden ottamiseen tarvittava tunneli sekä merivesiputket. (Juuti 2020.)



**Kuva 10.** Vuosaaren merivesivoimalan suunniteltu merivedenotto tapahtuisi Itämeren syvänteestä 20 km päässä Helsingin rannikolta tunnelin ja merivesiputkien avulla. (Mukaiillen Juuti 2020).

Tarvittava veden määrä riippuu sekä laitoksen kokoluokasta että meriveden lämpötilasta. Kaukolämmössä yleisesti käytetyn 90-asteisen veden sisältämän lämmön tuottaminen 3-asteisella merivedellä vaatii valtavan määrän merivettä. 100 megawatin lämpötehon tuottamiseen tarvitaan 20 000–25 000 kuutiota tunnissa 3-asteista merivettä eli 5,5–7 kuutiota sekunnissa. 100 megawatin laitoksen merivesiputken täytyisi silloin olla 2 metriä halkaisijaltaan, jolloin virtausnopeus olisi noin 2 metriä sekunnissa. Kylmempi merivesi kasvattaisi vedentarvetta. 2-asteisen meriveden tarve on 1,7-kertainen verrattuna 3-asteiseen meriveeseen. (Rauhamäki, 2019.)

### 7.3 Tunnelin rakentaminen

Tunnelien rakentamisessa on kaksi yleisesti käytettyä menetelmää. Perinteisesti tunneleita on louhittu poraus-räjätysmenetelmällä, mutta TBM-tunneliporakoneen (Tunnel Boring Machine) käyttö on yleistynyt etenkin pitkien tunnelien rakentamisessa. Kun tunnelin pituuden suhde tunnelin halkaisijaan on yli 800, on tunnelin rakentaminen turvallisempaa, ympäristöystävällisempää sekä kustannustehokkaampaa toteuttaa TBM-tunneliporakoneella, kuin perinteisellä poraus-räjätysmenetelmällä (Liu et al. 2016, kappale 1). Finest Bay Area Development Oy:lla on suunnitteilla rautatietunneli Suomen ja Viron välille. Noin 100 km pituinen rautatietunneli on suunniteltu toteutettavaksi Itämeren alitse Uudenmaan alueelta Tallinnan alueelle ja sen tekemiseen on kaavailtu TBM-menetelmää perinteisen poraus-

räjätysmenetelmän lisäksi (Pöyry Finland Oy 2019, s. 32-35). Vuosaaren merivesivoimalan tunnelista tulisi noin 20 km pitkä ja se sijoittuisi samalle Itämeren alueelle Helsingin edustalle, joten myös sen tekemisessä voisi myös olla kannattavaa hyödyntää TBM-tunneliporakoneita. Rauhamäki kertoo (Juuti 2020), että jos tunneli kaivettaisiin merenpohjaan perinteisin menetelmin, niin jo pelkästään porauskoneiden koon vuoksi tunnelista tulisi niin iso, että siellä mahtuisi ajamaan kuorma-autolla.

TBM-tekniikassa satoja tonneja painava tunneliporakone jyräsi tunnelia pyörivän tunneliprofiilin kokoisen leikkauspään avulla. Pyörivään leikkauspäähän on kiinnitetty kymmeniä kovametallisia jyräkiekkoja, mitkä pyöriessään murskaavat kalliota sepeliksi. Tunnelista tulee putkimainen ja sileäreunainen. Tunneli vahvistetaan joko ruisku- tai valubetonilla tai valmiilla elementeillä. Sepeli johdetaan ruuvikuljettimien ja kuljetinhihnan avulla kuorma-autoihin tai muihin kuljetusvälineihin millä sepeli saadaan poistettua tunnelista. TBM-tunneliporakoneella tunnelia saadaan rakennettua maaperästä ja tunnelin halkaisijasta riippuen arviolta 10–70 metriä päivässä, joten Vuosaaren merivesivoimalan 20 km pituisen tunnelin poraamiseen meni TBM-tunneliporakoneella noin 1–5 vuotta. (Pöyry Finland Oy 2019, s. 32-35.)

Tunnelin kustannuksiin vaikuttaa tunnelin pituus ja halkaisija sekä maaperän koostumus ja olosuhteet. High Speed Two – A Guide to Tunneling Costs oppaan mukaan (2015) EU-alueella TBM-tunneliporakoneella 6 metrin halkaisijalla rakennetun tunnelin kustannukset ovat olleet noin 20–40 miljoonaa euroa per kilometri, joten 20 kilometrin pituisen tunnelin kustannusarvio olisi noin 400–800 miljoonaa euroa. Vuosaaren merivesivoimalan tapauksessa tunneli rakennettaisiin meren alle, mikä tuo sekä suunnitteluun että toteutukseen lisää haasteita, joten kustannukset voisivat olla vieläkin suuremmat.

Kuvassa 9 on Chennain metron louhinnassa vuonna 2016 käytetty Robbins yhtiön TBM-tunnelipora, jonka halkaisija on 6,65 metriä (The Robbins Company 2017).





**Kuva 11.** Chennai metrotunnelin louhinnassa vuonna 2016 käytetty halkaisijaltaan 6,65 metrin Robbins TBM-tunnelipora. (The Robbins Company 2017.)

## 7.4 Sähkönkulutus

Vuosaaren merivesivoimalan sähkönkulutus muodostuisi pääosin lämpöpumppujen sähkönkulutuksesta niiden paineistaessa kiertoaineena olevan kylmäaineen sekä meriveden pumpaamisesta mereltä voimalaitokselle. Rauhamäen mukaan (Juuti 2020) Vuosaaren merivesivoimalan sähkönkulutuksen arvio on noin 40 % lämmöntuotannosta. Esimerkiksi 300 megawatin lämmöntuotannolla sähkönkulutus olisi 120 megawattia. Jos merivesivoimala pyörisi esimerkiksi 6500 tunnin vuosittaisella käyttöasteella, voimalan vuotuinen sähkönkulutus olisi 780 gigawattituntia. Lämmöntuotanto olisi näin ollen 1,95 terawattituntia vuodessa.

Vuosaaren merivesivoimalan käyttökustannuksia olisi mahdollista alentaa Vuosaaren voimalaitoksien yhteydessä olevan vuonna 1998 valmistuneen 1250 megawattitunnin lämpövaraston avulla (Helen 2021c). Helenillä on myös vuonna 1987 valmistunut 1000 megawattitunnin lämpövarasto Salmisaaren voimalaitoksen yhteydessä ja rakenteilla on myös uusi Mustikkamaan luolalämpövarasto, joka on valmistuessaan vuonna 2021 Suomen suurin lämpövarasto (Helen 2021d, Galkin-Aalto, 2019). Lämpövarastoilla pystytään optimoimaan lämmöntuotantoa sähkön markkinahinnan vaihtelujen mukaan tuottamalla ylimääräistä lämpöä alhaisen sähkön markkinahinnan aikana ja varastoimalla sitä lämpövarastoon.

Merivesivoimalan lämpöpumppuja voitaisiin ajaa alas korkean sähkön markkinahinnan aikana ja ottaa käyttöön lämpövaraston lämpöä. (Valor Partners Oy 2016, s. 23.)

Käynnistyessään lämpöpumput vaativat 7-kertaisen määrän sähköä normaaliin ajoon verrattuna, joten käytettävissä olevan sähköverkon tulee olla vahva. Pienillä paikkakunnilla sähköverkon kevyt mitoitus voisi olla esteenä suurille lämpöpumppulaitoksille, kuten merivesivoimalalle, mutta Helsingin kokoisen kaupungin sähköverkko on riittävän vahva merivesivoimalalle. (Valor Partners Oy 2016, s. 25.)

## **7.5 Lämpökerroin**

Rauhamäen arvion mukaan (Juuti 2020) Vuosaaren merivesivoimalan tuottamasta kaukolämmöstä noin 60 % saataisiin merivedestä ja noin 40 % lämpöpumpuille syötetystä sähköstä. Toisin sanoen, kun merivesivoimala kuluttaisi yhden megawattituntin sähköä, niin se tuottaisi 2,5 megawattituntia lämpöä. Eli merivesivoimalan lämpökerroin (COP) tulisi olemaan arviolta 2,5. Lämpökertoimen arvion tarkkuuden Rauhamäki toteaa olevan karkeasti 0,5 yksikköä. Vertailukohtana jätevesien hukkalämmöstä kaukolämpöä tuottavien lämpöpumppuvoimaloiden lämpökerroin on 3,5:n ja 5:n väliltä (Phetteplace 2013, kappale 2.39).

## **7.6 Osakuormat**

Vuosaaren merivesivoimalaa voitaisiin ajaa osakuormilla useamman käytössä olevan lämpöpumpun avulla Tukholman Värtan Ropstenin merivesivoimalan tavoin, jossa kaukolämpöä tuotetaan kuudella erillisellä 30 megawatin lämpöpumpulla ja kaukolämmöntuotantoa voidaan säätää portaattomasti 10–100 % kapasiteetilla riippuen kaukolämmön tarpeesta (Friothers 2018). Yksittäisiä lämpöpumppuja voitaisiin myös käynnistää ja sulkea kaukolämmön tarpeen mukaan. Lämpöpumppujen käynnistämisen vaatima aika on vain muutamia minuutteja, joten kaukolämmön tuotantomääriä pystyttäisiin säätämään hyvin nopealla aikataululla (Valor Partners 2016, s. 23).

## **7.7 Investointikustannus ja ominaisinvestointi**

Merivesivoimalan kokonaisuus muodostuu lämpöpumpuista sekä veden saamiseen tarvittavista tunnelista ja merivesiputkistosta. Tunneli ja merivesiputkisto on selkeästi suurempi investointi kuin lämpöpumput. Verrattuna esimerkiksi Helenin maanalaiseen Esplanadin

lämpöpumppulaitokseen, merivesivoimalan ominaisinvestointi (€/MW) olisi moninkertainen. Investointikustannuksiin vaikuttaa vedenoton sijainti. Laajoihin syvänteisiin on matkaa vähintään 20 kilometriä. Pitkän merenalaisen tunnelin ja merivesiputkiston rakentaminen on valtava investointikustannus, mutta mitä syvemmälle vedenotto rakennetaan, sitä lämpimämpää on läpi vuoden saatava merivesi. Mitä lämpimämpää merivettä saadaan, sen vähemmän sitä tarvitaan ja sen pienempiä laitteita tarvitaan. Pienemmät laitteet alentavat investointikustannuksia. Myös laitoksen hyötysuhde kasvaa mitä lämpimämpää merivesi on, pienentäen näin tarvittavan sähkön määrää. Riittävä meriveden lämpötila suhteessa etäisyyden tuomiin kustannuksiin vaatii optimointia. (Rauhamäki, 2019.)

Vuosaaren merivesivoimalan valtavan investointikustannuksen vastapainona on ilmainen Itämeren uusiutuvan energian lämmönlähde. Merivesivoimalan käyttökustannuksiksi muodostuisi lähinnä lämpöpumppujen sähkön kulutus sekä huoltokustannukset. Sähkön hinta ja verotus ovat avainasemassa käyttökustannuksien muodostumisessa. Korkeasta investointikustannuksesta ja pienistä käyttökustannuksista johtuen Vuosaaren merivesivoimalan kaukolämmöntuotanto tulisi mitoittaa tarpeeksi suureksi, jotta merivesivoimalan rakentaminen olisi kannattavaa. Vuosaaren merivesivoimalan mitoitus kaukolämmöntuotannon peruskuormalaitokseksi mahdollistaisi suuren vuotuisen käyttöasteen. Merivesivoimalaa voitaisiin käyttää kesäisin myös kaukokylmään eli rakennusten viilennykseen, joka kasvattaisi voimalan kannattavuutta. Oman arvonsa Vuosaaren merivesivoimalalle toisi myös sen päästöttömyys. Itämeren uusiutuvaa energiaa hyödyntävä Vuosaaren merivesivoimalalla voitaisiin korvata kivihiilen käyttöä kaukolämmöntuotannossa, joten se pienentäisi Helsingin ja samalla koko Suomen hiilidioksidipäästöjä merkittävästi. Ilmastonmuutosta torjuvana projektina Vuosaaren merivesivoimala voisi mahdollisesti saada Suomen valtion tai EU:n rahoitusta. (Valor Partners 2016, s. 28-31.)

Merivesivoimalat ovat hyvin kompakteja voimalaitoksia. Merivesivoimalan energianlähteenä on merivesi, joten toisin kuin esimerkiksi kivihiilivoimaloiden, merivesivoimalan ei tarvitse varastoida polttoainetta voimalan lähistölle. Merivesivoimalan tarvitseman maa-alueen kustannukset olisivat siis paljon pienemmät kuin esimerkiksi kivihiilivoimalan.

Merivesivoimala toisi tärkeää joustavuutta kaukolämpöjärjestelmään. Merivesivoimala koostuu useasta lämpöpumpusta, jotka ovat mahdollista käynnistää tai poistaa käytöstä nopeasti, koko laitos alle tunnissa ja yksittäiset lämpöpumput jopa minuuteissa, mahdollistaen kaukolämpöjärjestelmän muiden voimaloiden tasaisen ja tehokkaan käytön. (Valor Partners 2016, s. 23.)

## **7.8 Tuotannon tasoitus eli priimausvoima**

Vuosaaren merivesivoimala tuottaisi kaukolämpöä ympäri vuoden. Keväästä syksyyn kaukolämpöveden lämpötilaksi riittää 65–90 celsiusastetta, mutta talvisin kovien pakkasten aikaan kaukolämpövesi jäähtyy kaukolämpöverkostossa paljon normaalia enemmän, joten tuotetun kaukolämpöveden lämpötilan tulisi olla noin 110–120-asteista. Perinteisillä lämpöpumpuilla (HP) voidaan tuottaa 80–90-asteista kaukolämpöä, joten kovilla pakkasilla kaukolämpövettä täytyisi lämmittää vielä ylimääräiset 30 astetta eli tarvitaan niin sanottua priimausvoimaa. Kaukolämpöveden priimaaminen olisi kustannusten kannalta kannattavaa priimata itse merivesivoimalassa. Yleisesti kaukolämpövoimaloissa on erillinen lämpökattila kaukolämpöveden priimausta varten, mutta lämpökattilan käyttö pelkässä lämmityskäytössä ei ole kustannusten eikä päästöjen kannalta optimaalista. Vuosaaren merivesivoimala voisi käyttää korkealämpötilalämpöpumppua (HTHP) kaukolämmön priimaamisessa 120-asteiseksi. Samalla tavalla kuin lämpöpumppu, korkealämpötilalämpöpumppu toimii sähköllä, joten se ei toisi lisäpäästöjä kaukolämmöntuotantoon. (Valor Partners Oy 2016, s. 25.)

## **7.9 Rajoitteet ja hankaluudet**

### **7.9.1 Meriveden suola**

Valtamerien suolapitoisuus on keskimäärin 35 grammaa kilogrammassa merivettä. Itämeri on sekoitus valtamerien suolaista vettä sekä lukuisten jokien makeaa vettä. Itämeren suolapitoisuus on keskimäärin 7 grammaa kilogrammassa merivettä. Suolapitoisuus vaihtelee alueittain ja kasvaa nopeasti mentäessä syvemmälle 40–80 metrin syvyydessä. (Bruun n.d.)

Merivesivoimalan laitteisto on suunniteltava kestämaan meriveden suolan aiheuttama korrosio. Merivesivoimalan lämmönvaihtimissa voidaan käyttää alumiini-messinkiä, laivastomessinkiä, kupari-nikkeliä tai titaania. Merivesiputkina voidaan käyttää UPVC-putkia eli plastisoimattomasta polyvinylikloridista valmistettuja putkia. Merivesipumput voidaan

puolestaan tehdä esimerkiksi muovin ja ruostumattoman teräksen seoksesta. (Jia et al. 2017, kappale 1.)

### **7.9.2 Vaikutus mereneläviin**

Vuosaaren merivesivoimalan merivedenotto ja -poisto tulisi suunnitella niin, että siitä koituisi mahdollisimman vähän haittaa mereneläville ja ympäristölle. Vedenottoputkessa tulisi olla jonkinlainen suodatin mikä estäisi merenelävien, kasviston ja kaiken muun ylimääräisen päätyamisen merivesiputkeen ja sitä kautta merivesipumppuun ja lämmönvaihtimiin.

## **7.10 Päästöjen vähennys verrattuna nykyiseen kaukolämmön tuotantoon**

Vuonna 2019 Helsingin kaupungin kaukolämmöntuotannosta 57 % tuotettiin polttamalla kivihiltä. Helsingin kaukolämmöntuotannon kasvihuonekaasupäästöt olivat yhteensä 1 368 000 hiilidioksidiekvivalenttitonnia (t CO<sub>2</sub>-ekv) (Helsingin Seudun Ympäristöpalvelut 2020).

Helenin verkkoartikkelin 'Hiiletön Helsinki – näin sen teemme' mukaan (2021a) Helenin tavoite on saada koko energiantuotannostaan hiilineutraalia vuoteen 2035 mennessä. Keskeisintä tavoitteessa on kivihillen polton lopettaminen, jota Helen tavoittelee vuoteen 2029 mennessä. Helsingissä on kaksi kivihillivoimalaa, jotka ovat molemmat yhteistuotantolaitoksia. Hanasaaren voimalaitos tuottaa lämpöä 420 megawatin teholla ja sähköä 220 megawatin teholla (Helen 2021b). Hanasaaren voimalaitos siirtyy varakäyttöön lämmityskaudella 2022–2023 ja se suljetaan kokonaan vuoteen 2024 mennessä. Hanasaaren voimalaitos korvataan hukkalämpöä hyödyntävillä lämpöpumpuilla, lämpövarastoilla, Vuosaaren rakennettavalla biolämpölaitoksella sekä aurinko- ja tuulivoimalla. Toinen Helsingin kivihillivoimala on Salmisaaren voimalaitos, joka tuottaa lämpöä 300 megawatin teholla ja sähköä 160 megawatin teholla (Helen 2021b). Salmisaaren voimalaitos on tarkoitus sulkea vuoteen 2029 mennessä. Vuosaaren merivesivoimalalla olisi mahdollista korvata Salmisaaren voimalaitoksen kaukolämmöntuotannon kapasiteetti hiilineutraalilla tuotannolla. Vuosaaren merivesivoimalalla olisi mahdollista tuottaa täysin hiilineutraalia kaukolämpöä, jos merivesivoimalan lämpöpumppujen käyttämä sähkö olisi hiilineutraalisti tuotettua ja se olisi siten merkittävä palanen Helenin tavoitteessa hiilineutraalista energiantuotannosta.

Helenin vuoden 2020 kaukolämmöntuotannon hiilidioksidin ominaispäästö oli hyödynjakomenetelmällä laskettuna 187 g/kWh (Helen 2021e). Jos Vuosaaren merivesivoimala tuottaisi esimerkiksi 300 megawatin teholla päästötöntä kaukolämpöä 6500 tuntia vuodessa, niin sen kasvihuonekaasupäästöjen vähennys nykyiseen tuotantoon verrattuna olisi noin 365 000 hiilidioksidiekvivalenttitonnia (t CO<sub>2</sub>-ekv) vuodessa. Verrattuna vuoden 2019 tilastoihin Vuosaaren merivesivoimala vähentäisi Helsingin kaukolämmöntuotannon päästöjä noin 27 %.

## 8 YHTEENVETO

Tämän kirjallisuustutkielman tavoitteena oli tutustua merivesivoimalaan sekä koota tietoja Helen Oy:n Helsingin Vuosaaren suunnitteilla olevasta merivesivoimalasta ja selvittää Vuosaaren merivesivoimalan mahdollisen toteutuksen hyötyjä ja haasteita.

Helenillä on tavoite Helsingin hiilineutraalista energiantuotannosta vuoteen 2035 mennessä. Helen suunnittelee merivesivoimalaa Vuosaaren, joka hyödyntäisi lämpöpumppujen avulla meriveden lämpöä Helsingin kaukolämmön ja -kylmän tuotannossa. Vuosaaren merivesivoimala vähentäisi kivihiilen käytön tarvetta Helsingin kaukolämmöntuotannossa ja olisi siten toteutuessaan iso osa Helsingin hiilineutraalin energiantuotannon tavoitteen toteutumisessa.

Nykyhetkellä Vuosaaren merivesivoimalan tuottama kaukolämpö ei olisi kilpailukykyistä nykyisten voimalaitosten vertailussa, mutta fossiilisten polttoaineiden hintojen ja verotuksen kasvu sekä alhainen sähkön hinta mahdollistavat merivesivoimalan kustannustehokkaan kaukolämmöntuotannon tulevaisuudessa. Merivesivoimalan suurena hyötynä kaukolämmöntuotannossa voidaan pitää sen tuomaa joustavuutta kaukolämpöjärjestelmään. Lämpöpumput pystytään käynnistämään suhteellisen nopeasti, koko laitos alle tunnissa ja yksittäiset lämpöpumput jopa minuuteissa. Nopealla säädettävyydellä ja alhaisilla käynnistys- ja käyttökustannuksilla merivesivoimalalla pystyttäisiin parantamaan kaukolämpöjärjestelmän muiden voimaloiden kannattavuutta.

Vuosaaren merivesivoimalan kustannukset olisivat erittäin pääomavaltaisia johtuen suuresta investointikustannuksesta, jolla mahdollistettaisiin pääsy ilmaiseen ja lähes rajattomaan uusiutuvaan energianlähteeseen. Merivesivoimalan investointikustannukset olisivat mahdollisesti jopa miljardin euron luokkaa johtuen merivesivoimalan tarvitsemasta pitkästä tunnelista ja putkistosta Itämeren syvänteeseen 20 kilometrin päähän rannikolta. Syvänteestä saataisiin merivesivoimalan tarvitsemaa 2–3-asteista merivettä ympäri vuoden. Tunnelin rakentaminen olisi kannattavaa hyödyntää TBM-tunneliporakonetta, jolla pitkän merenalaisen tunnelin rakentaminen olisi turvallisempaa, ympäristöystävällisempää sekä kustannustehokkaampaa kuin perinteisellä poraus-räjäytysmenetelmällä. Pelkän tunnelin rakentamisen arvioitu kustannusarvio on noin 400–800 miljoonaan euroon.

Ilmaisesta lämmönlähteestä johtuen merivesivoimalan käyttökustannukset olisivat sähkön markkinahinnasta ja verotuksesta riippuen suhteellisen pienet. Lämpöpumppujen sähkökulutuksen kustannuksia pystyttäisiin pienentämään lämpövaraston avulla tuottamalla ylimääräistä lämpöä halvan sähkön markkinahinnan aikana ja varastoimalla sitä lämpövarastoon.

Jos Vuosaaren merivesivoimala mitoitettaisiin korvaamaan Helsingin Ruoholahdessa sijaitseva Salmisaaren kivihiihivoimalan kaukolämmöntuotanto, niin sen kaukolämpöteho olisi 300 megawattia. Noin 60 % energiasta merivesivoimala saisi Itämeren lämmöstä ja loput 40 % muodostuisi lämpöpumpuille syötetystä sähköstä. Jos käytetty sähkö olisi hiilineutraalia niin koko merivesivoimalan kaukolämmöntuotanto olisi hiilineutraalia. Vuosaaren merivesivoimala vähentäisi Helsingin kaukolämmöntuotannon kasvihuonekaasupäästöjä keskimäärin 27 % vuoden 2019 päästöihin verrattuna.



## LÄHTEET

Aittomäki, A. & Aalto, E. 2012. Kylmäteknikka. Helsinki, Suomen kylmähdistys, 4. painos.

Arpagaus, C., Bless, F., Uhlmann, M., Schiffmann, J. & Bertsch, S.S. 2018. High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. *Energy (Oxford)*, vol. 152, pp. 985-1010. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.166>

Breeze, P. 2019. *Power Generation Technologies*. San Diego, Elsevier Science & Technology. Saatavissa: [https://app-knovel-com.ezproxy.cc.lut.fi/web/toc.v/cid:kpPGTE001C/viewerType:toc//root\\_slug:viewerType%3Aatoc/url\\_slug:root\\_slug%3Apower-generation-technologies?oid=5eb05e38-4ccc-4c92-2911-eda9767fd8e4](https://app-knovel-com.ezproxy.cc.lut.fi/web/toc.v/cid:kpPGTE001C/viewerType:toc//root_slug:viewerType%3Aatoc/url_slug:root_slug%3Apower-generation-technologies?oid=5eb05e38-4ccc-4c92-2911-eda9767fd8e4)

Bruun, Jan-Erik n.d., 'Suolaisuus, lämpötila ja kerrostuneisuus'. Itämeri.fi. [verkkoaineisto]. [päivitetty 2021-04-27] [viitattu 2021-04-27]. Saatavissa: [https://itameri.fi/fi-FI/Luonto\\_ja\\_sen\\_muutos/Ainutlaatuinen\\_Itameri/Suolaisuus\\_lampotila\\_ja\\_kerrostuneisuus](https://itameri.fi/fi-FI/Luonto_ja_sen_muutos/Ainutlaatuinen_Itameri/Suolaisuus_lampotila_ja_kerrostuneisuus)

Friotherm 2018. Värtan Ropsten – The largest sea water heat pump facility worldwide, with 6 Unitop 50FY and 180 MW total capacity. [verkkoaineisto]. [päivitetty 2018-02-08] [viitattu 2021-02-16]. Saatavissa PDF-muodossa: [https://www.friotherm.com/wp-content/uploads/2017/11/vaertan\\_e008\\_uk.pdf](https://www.friotherm.com/wp-content/uploads/2017/11/vaertan_e008_uk.pdf)

Friotherm 2021. Unitop 50 Heat Pumps and Chillers. [verkkosivu]. [päivitetty 2021-02-18] [viitattu 2021-02-16]. Saatavissa: <https://www.friotherm.com/products/unitop/unitop-50/>

Galkin-Aalto, M. (2019). Mustikkamaan luolalämpövaraston rakentaminen vauhdissa. *Uutta voimaa -blogi*, 30.9.2019, [blogi]. [viitattu 2021-03-31], Saatavissa: <https://www.helen.fi/helen-oy/vastuullisuus/ajankohtaista/blogi/2019/mustikkamaa>  
Polku: helen.fi; Etusivu; Vastuullisuus; Blogi; 2019; Mustikkamaan luolalämpövaraston rakentaminen vauhdissa

Helen 2020. Avoin data. Kaukolämmön tuntiteho 2015–2020. [verkkoaineisto]. [päivitetty 2020-03-17] [viitattu 2021-04-23]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/helen-oy/vastuullisuus/ajankohtaista/avoindata>

Polku: helen.fi; Etusivu; Vastuullisuus; Avoin data

Helen 2021a. 'Hiiletön Helsinki, näin sen teemme'. [verkkosivu]. [päivitetty 2021-03-10] [viitattu 2021-03-10]. Saatavissa:

<https://www.helen.fi/helen-oy/vastuullisuus/ajankohtaista/hiilineutraaliksi-2035>

Polku: helen.fi; Etusivu; Vastuullisuus; Hiilineutraaliksi 2035

Helen 2021b. 'Voimalaitosten tuotantotehot'. [verkkosivu]. [päivitetty 2021-03-10] [viitattu 2021-03-10]. Saatavissa:

<https://www.helen.fi/helen-oy/energia/energiantuotanto/voimalaitokset/voimalaitosten-tuotantotehot>

Polku: helen.fi; Etusivu; Energia; Voimalaitokset; Voimalaitosten tuotantotehot

Helen 2021c. 'Vuosaaren voimalaitokset'. [verkkosivu]. [päivitetty 2021-03-31] [viitattu 2021-03-31]. Saatavissa:

<https://www.helen.fi/helen-oy/energia/energiantuotanto/voimalaitokset/vuosaari>

Polku: helen.fi; Etusivu; Energia; Voimalaitokset; Vuosaari

Helen 2021d. 'Salmisaaren voimalaitos'. [verkkosivu]. [päivitetty 2021-03-31] [viitattu 2021-03-31]. Saatavissa:

<https://www.helen.fi/helen-oy/energia/energiantuotanto/voimalaitokset/salmisaari>

Polku: helen.fi; Etusivu; Energia; Voimalaitokset; Salmisaari

Helen 2021e. 'Huoletonta lämpöä yrityksille'. [verkkoaineisto]. [päivitetty 2021-03-31] [viitattu 2021-03-31]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/yritykset/lampoa-yrityksille/kaukolampoa-yritykselle#alkupera>

Polku: helen.fi; Etusivu; Lämmitys; Lämpöä yrityksille; Huoletonta lämpöä yrityksille

Helsingin Seudun Ympäristöpalvelut 2020. Kaukolämpö pääkaupunkiseudulla. [verkkoaineisto]. [päivitetty 2020-05-15] [viitattu 2021-02-16]. Saatavissa EXCEL-muodossa: [https://avoidatastr.blob.core.windows.net/avoindata/Avoindata/3\\_Ilmanlaatu\\_ja\\_ilmast/Ilmasto/Kaukolammon\\_kulutus\\_paastot/Kaukolammon\\_paastot\\_kulutus\\_polttoaineet\\_PKS\\_1990\\_2000-2019.xlsx](https://avoidatastr.blob.core.windows.net/avoindata/Avoindata/3_Ilmanlaatu_ja_ilmast/Ilmasto/Kaukolammon_kulutus_paastot/Kaukolammon_paastot_kulutus_polttoaineet_PKS_1990_2000-2019.xlsx)

High Speed Two 2015. A Guide to Tunneling Costs. [verkkoaineisto]. [päivitetty 2015-06-11] [viitattu 2021-04-23]. Saatavissa PDF-muodossa: [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/434516/HS2\\_Guide\\_to\\_Tunnelling\\_Costs.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/434516/HS2_Guide_to_Tunnelling_Costs.pdf)

Juuti, P. 2020. 'Lämmittääkö hyinen Itämeri pian Helsinkiä? Energiayhtiö selvittää kivihiilen korvaamista merivedellä – animaatio näyttää, miten se onnistuisi'. Yle Uutiset. [verkkoaineisto]. [päivitetty 2020-12-02] [viitattu 2021-02-16]. Saatavissa: [https://yle.fi/uutiset/3-11573287?fbclid=IwAR3x4b2IY0xRTLE7L8-h3teL7pTABInodZvkPbsSwo3CpouV7Nad3Mhg\\_1s](https://yle.fi/uutiset/3-11573287?fbclid=IwAR3x4b2IY0xRTLE7L8-h3teL7pTABInodZvkPbsSwo3CpouV7Nad3Mhg_1s)

Jia, X., Duanmu, L. & Shu, H. 2017. Effect of seawater intake methods on the performance of seawater source heat pump systems in cold climate areas. *Energy and Buildings*, vol. 153, pp. 317-324. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.016>

Lavine, A. S. et al. 2017. *Incropera's principles of heat and mass transfer*. Wiley-Blackwell. Saatavissa: [https://lut.primo.exlibrisgroup.com/permalink/358FIN\\_LUT/vvk1gv/cdi\\_askewsholts\\_vlebooks\\_9781119412854](https://lut.primo.exlibrisgroup.com/permalink/358FIN_LUT/vvk1gv/cdi_askewsholts_vlebooks_9781119412854)

Liu, Q., Huang, X., Gong, Q., Du, L., Pan, Y. & Liu, J. 2016. Application and development of hard rock TBM and its prospect in China. *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 57, pp. 33-46. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.01.034>

Nayar, K. G. et al. 2016. Thermophysical properties of seawater: A review and new correlations that include pressure dependence. *Desalination*. [Online] vol. 390, pp. 1–24. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.02.024>

Phetteplace, G.E. 2013. District heating guide. ASHRAE, Atlanta, Ga. Saatavissa: [https://app-knovel-com.ezproxy.cc.lut.fi/web/toc.v/cid:kpDHG00003/viewer-Type:toc//root\\_slug:viewerType%3AAtoc/url\\_slug:root\\_slug%3Adistrict-heating-guide?oid=5eb05e38-4ccc-4c92-2911-eda9767fd8e4](https://app-knovel-com.ezproxy.cc.lut.fi/web/toc.v/cid:kpDHG00003/viewer-Type:toc//root_slug:viewerType%3AAtoc/url_slug:root_slug%3Adistrict-heating-guide?oid=5eb05e38-4ccc-4c92-2911-eda9767fd8e4)

Pöyry Finland Oy 2019. Finest Bay Area Development Oy. Finest Bay Area - Rautatietunneli Suomen ja Viron välillä. Valtioiden rajat ylittävien ympäristövaikutusten arviointiohjelma-asiakirja. [verkkoaineisto]. [päivitetty 2021-03-26] [viitattu 2021-03-26]. Saatavissa PDF-muodossa: <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B1BC048E8-E27B-417A-8117-CE7DC13D502B%7D/144918>

Rauhamäki, J. (2019). Merivesilämpöpumput kiinnostava mahdollisuus myös Helsingissä. Uutta voimaa -blogi, 14.3.2019, [blogi]. [viitattu 2021-02-16]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/helen-oy/vastuullisuus/ajankohtaista/blogi/2019/merivesilampopumput>  
Polku: helen.fi; Etusivu; Vastuullisuus; Blogi; 2019; Merivesilämpöpumput kiinnostava mahdollisuus myös Helsingissä

Sharqawy, Mostafa H., Lienhard V, John H., & Zubair, Syed M., 2010. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. *Desalination and Water Treatment*, vol. 16:1-3, pp. 354-380. Saatavissa: <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1079>

Suomen virallinen tilasto (SVT): Sähkön ja lämmön tuotanto 2019. Liitetaulukko 1. Sähkön ja lämmön tuotanto tuotantomuodoittain ja polttoaineittain 2019. Helsinki: Tilastokeskus. [verkkajulkaisu]. [päivitetty 2020-11-03] [viitattu: 27.4.2021].  
Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/salatuo/2019/salatuo\\_2019\\_2020-11-03\\_tau\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/salatuo/2019/salatuo_2019_2020-11-03_tau_001_fi.html)

The Robbins Company 2017. The Robbins Company Focused Forward. Robbins Product Brochure. [verkkoaineisto]. [päivitetty 2017-04-21] [viitattu 2021-03-11]. Saatavissa PDF-

muodossa: [https://www.robbinstbm.com/wp-content/uploads/2017/04/Robbins\\_BROCHURE\\_2016.pdf](https://www.robbinstbm.com/wp-content/uploads/2017/04/Robbins_BROCHURE_2016.pdf)

Tilastokeskus 2020. Uusiutuvilla polttoaineilla tuotettiin 2019 ensimmäistä kertaa enemmän kaukolämpöä kuin fossiilisilla polttoaineilla. [verkkoaineisto]. [päivitetty 2020-11-19] [viitattu 2021-02-16]. Saatavissa: [https://tilastokeskus.fi/til/salatuo/2019/salatuo\\_2019\\_2020-11-03\\_tie\\_001\\_fi.html](https://tilastokeskus.fi/til/salatuo/2019/salatuo_2019_2020-11-03_tie_001_fi.html)

Valor Partners Oy 2016. Suuret lämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä. [verkkoaineisto]. [päivitetty 2016-09-15] [viitattu 2021-03-29]. Saatavissa PDF-muodossa: [http://energia.fi/files/993/Suuret\\_lampopumput\\_kaukolampojarjestelmassa\\_Loppuraportti\\_290816\\_paivitetty.pdf](http://energia.fi/files/993/Suuret_lampopumput_kaukolampojarjestelmassa_Loppuraportti_290816_paivitetty.pdf)

Wikstén, R. 1980. Lämpöpumput. Suomen LVI-yhdistys, Helsinki.