

Juha Sainio

Järvenpään voimalaitoksen jäähdytysjärjestelmien jäähdytystehon kasvattaminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Insinööriytyö

13.2.2020

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Juha Sainio Järvenpään voimalaitoksen jäähdytysjärjestelmien jäähdytys- tehon kasvattaminen 25 sivua 13.2.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Konetekniikka
Pääaine	Valmistus- ja tuotantotekniikka
Ohjaajat	Voimalaitoskemian asiantuntija Jere Espo Lehtori Heikki Paavilainen
<p>Tämä insinöörityö toteutettiin Maintpartner Oy:n pyynnöstä kehitysehdotuksena Fortum Power and Heat Oy:lle. Työn tarkoitus oli tutkia vesisumutuksen vaikutusta Järvenpään voimalaitoksen jäähdytysjärjestelmiin. Taustalla oli halu saada pidettyä voimalaitosta pidempään päällä tai vaihtoehtoisesti käyttää kovemalla teholla lämpiminä kesäkuukausina, jolloin sähkön hinnat ovat korkeita. Työ on teoreettinen, eikä sisällä toteutusvaihetta.</p> <p>Työssä tutkittiin Järvenpään voimalaitoksen kumpaakin jäähdytysjärjestelmää ja niiden jäähdytyskohteita. Tärkeimmäksi jäähdytyskohteeksi vesisumutuksen kannalta osoittautui kaukolämmön apujäähdytysjärjestelmän lämmönvaihdin, joka jäähdyttää kaukolämpöverkon vettä. Työssä tutkittiin myös vesisumutusta ja sen vaikutusta jäähdytysjärjestelmien nestejäähdyttimissä käytettävään ilmaan.</p> <p>Työssä ei laskettu vesisumutuksen vaikutusta jäähdytysnesteen lämpötilaan, koska se on erittäin haastavaa ilman nestejäähdyttimiä valmistavien yritysten omia ohjelmistoja. Taloudellisia hyötyjä laskiessa päädyttiin käyttämään arviota vesisumutuksen hyödystä. Vesisumutuksen hyödyn arviolla saatiin laskettua investoinnin takaisinmaksuaika sekä muita investoinnin kannalta tärkeitä arvoja. Investoinnin herkkyyttä muutoksille tarkasteltiin herkkyysanalyysillä, jonka perusteella voitiin päätellä, että vesisumutus investointina on herkkä muutoksille.</p>	
Avainsanat	Vesisumutus, jäähdyttimet, jäähdytysjärjestelmä

Author Title Number of Pages Date	Juha Sainio Increasing the Cooling Capacity of Järvenpää Power Plants Cooling Systems 25 pages 13 February 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Specialisation option	Manufacturing and Production Engineering
Instructors	Jere Espo, Power Plant Chemistry Specialist Heikki Paavilainen, Senior Lecturer
<p>This thesis was commissioned by Maintpartner as a development proposal for Fortum Power and Heat. The study was motivated by the desire to keep the power plant running longer or alternatively, to operate at higher power during the warm summer months, when the price for electricity is high. The purpose of this study was to investigate the effect of water spraying on the cooling systems of the Järvenpää power plant. The thesis is a theoretical study and does not examine the implementation phase.</p> <p>Both cooling systems of the Järvenpää power plant and their cooling targets were studied. The most important cooling object for water spraying proved to be the heat exchanger of the district heating auxiliary cooling system, which cools the water of the district heating network. Water spraying and its effect on the air used in the liquid coolers of the cooling systems were also investigated.</p> <p>The effect of water spraying on the coolant temperature was not, however, calculated in the thesis, as it is very challenging to carry out these calculations without software produced by liquid cooler manufacturers. When calculating the economic benefits of water spraying, it was decided to use an estimate of the benefits of water spraying. Furthermore, the estimate of the benefits of water spraying was used to calculate the payback period of the investment and other important values for the investment. In addition, the sensitivity of the investment to the changes was examined by a sensitivity analysis. In conclusion, it was discovered that water spraying as an investment is sensitive to change.</p>	
Keywords	Water spray, coolers, cooling systems

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Tausta	1
1.2	Tavoite ja rajaus	1
1.3	Toteutus ja eteneminen	2
1.4	Maintpartner Oy	3
1.5	Fortum Oyj	3
2	Järvenpään voimalaitos	4
2.1	Polttoaineet ja päästöt	4
2.2	Jäähdytysjärjestelmät	5
2.2.1	Nestejäähdyttimet	5
2.2.2	Kaukolämmön apujäähdytysjärjestelmä	6
2.2.3	Suljettu jäähdytysjärjestelmä	7
3	Vesisumutuksen lisääminen nestejäähdyttiin	10
3.1	Toimintaperiaate ja rajoitteet	10
3.2	Vesisumutuksen teoreettisen hyödyn selvittäminen	11
3.3	Vuosittainen käyttöaika vesisumutukselle	14
3.3.1	Suljettu jäähdytysjärjestelmä	14
3.3.2	Kaukolämmön apujäähdytysjärjestelmä	15
4	Investointilaskennat	16
4.1	Polttoainekustannukset	16
4.2	Vesisumutuksen kustannukset	17
4.3	Investoinnin takaisinmaksuaika	17
4.4	Herkkyysanalyysi	19
4.4.1	Huonoin tulos	20
4.4.2	Paras tulos	21
5	Yhteenveto	22
	Lähteet	23

1 Johdanto

1.1 Tausta

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli tutkia Järvenpään voimalaitoksen jäähdytysjärjestelmiä ja niihin asennettavan vesisumutuksen tuottamaa mahdollista hyötyä. Työssä selvitettiin, onko jäähdytykseen mahdollista saada lisää tehoa vesisumutuksen avulla. Järvenpään voimalaitosta ajetaan lämpiminä kesäkuukausina minimikuormalla johtuen kaukolämmön tarpeen vähentymisestä lämpimillä ilmoilla. Paranneltu jäähdytysteho voisi mahdollisesti pitkittää ajoaikaa minimikuormalla, koska tämänhetkisellä jäähdytysjärjestelmällä lämpötilat nousevat kesäisin melko korkeiksi ja ovat näin ollen lähellä rajoittaa laitoksen käyttöä.

Johtavana ideana työssä oli tutkia vesisumutusta. Vesisumutus itsessään on suhteellisen pieni investointi verrattuna sen tuomiin mahdollisiin hyötyihin ja säästöihin. Rajoitteena vesisumutuksella on sen tuoma hyöty vain kuumina päivinä, jolloin ilman suhteellinen kosteus on mahdollisimman alhainen. Sateisina päivinä, jolloin ilmankosteus on valmiiksi korkea, vesisumutuksesta ei ole juurikaan hyötyä.

1.2 Tavoite ja rajaus

Työssä pyritään tutkimaan vesisumutuksen aikaansaamia mahdollisia hyötyjä Fortum Power and Heat Oy:lle. Tavoitteena on saada laskettua investoinnin kannattavuus ja taloudellinen hyöty, jonka perusteella investoinnin toteuttamista pohditaan. Tavoitteena on myös perehtyä vesisumutuksen teoriaan.

Paranneltu jäähdytysteho voisi tuoda Fortum Power and Heat Oy:lle taloudellisia säästöjä, jos lisätyn jäähdytystehon avulla saataisiin pidettyä laitos käynnissä myöhempään kesäisin ja käyttö voitaisiin aloittaa aikaisemmin syksyisin. Korkeiden lämpötilojen takia laitos on lähellä rajaa, jonka jälkeen laitos jouduttaisiin ottamaan pois käytöstä lämpiminä kesäkuukausina, ettei se ylikuumene. Laitoksen alasajo aiheuttaa sen, että se joudutaan käynnistämään uudelleen tietyn ajan jälkeen. Käynnistys tulee yritykselle kalliiksi johtuen käynnistyksessä käytettävien polttoaineiden hinnoista.

Insinööri työ tehtiin kehitysehdotuksena Fortum Power and Heat Oy:n Järvenpään voimalaitokselle sen käynnissä- ja kunnossapidosta vastaavan Maintpartner Oy:n toimesta. Tämä työ on rajattu koskemaan vain Fortum Power and Heat Oy:n Järvenpään voimalaitosta ja sen jäähdytysjärjestelmiä. Vesisumutuksen mahdollinen käyttöönotto on jätetty tämän työn ulkopuolelle.

1.3 Toteutus ja eteneminen

Työssä on käytetty kvantitatiivista eli määrällistä tutkimusta. Kvantitatiivisen tutkimuksen tarkoitus on käyttää laskennallisia ja tilastoja hyväksikäyttäviä menetelmiä lopputuloksen saamiseksi. Työssä käytettiin esimerkiksi Järvenpään voimalaitoksella mitattua dataa jäähdytysjärjestelmien lämpötiloista ja muista arvoista. Järjestelmädatan lisäksi työssä on käytetty laskennallisia ja havainnollistavia menetelmiä niin investointilaskennan kuin vesisumutuksen vaikutusta ilman lämpötilaan selvittäessä.

Työ koostuu kirjallisuuskatsauksesta ja käytännön tutkimusosuudesta. Työn alussa esitellään Maintpartner Oy ja Fortum Oyj. Tämän jälkeen tutustutaan Järvenpään voimalaitokseen ja sen jäähdytysjärjestelmiin. Jäähdytysjärjestelmien läpikäynnin jälkeen tutkitaan vesisumutuksen teoreettista hyötyä ja potentiaalista käyttöaikaa. Työn lopussa tehdään investointilaskennat ja tutkitaan investoinnin takaisinmaksuaikaa sekä herkkyyttä muutoksille. Työn lopuksi esitetään yhteenveto ja pohdinnat investoinnin kannattavuudesta.

1.4 Maintpartner Oy

Maintpartner on perustettu vuonna 2006. Ennen vuotta 2006 Maintpartner oli osa Fortum Services -yksikköä. Maintpartner toimii pääosin energia-, kemian- ja metalliteollisuudessa, mutta yritys palvelee myös elintarviketeollisuudessa ja julkisella sektorilla. Maintpartner työllistää Suomessa noin 1 100 henkilöä ja Ruotsissa, Virossa ja Puolassa noin 700 henkilöä. Yrityksen liikevaihto oli Suomessa vuonna 2017 noin 121 miljoonaa euroa ja kansainvälisesti 167 miljoonaa euroa. [5.]

Yrityksen tavoitteena on parantaa teollisuuden tuottavuutta tarjoamalla asiantuntijuutta sekä työkaluja voimalaitosten käyttöön ja yleiseen kunnossapitoon. Maintpartnerin toiminta perustuu asiakaslähtöisyyteen, luotettavuuteen sekä muutoksen toteuttamiseen. [6.]

Maintpartner Oy:n toiminnot on ostanut Caverion Oyj. Caverionin ostamia liiketoimintoja on alettu integroimaan Caverionin omaan toimintamalliin 30.11.2019 alkaen, ja integraation on määrä toteutua vuoden 2020 aikana. [23.]

1.5 Fortum Oyj

Fortum Oyj on Pohjoismaihin, Puolaan, Intiaan, Venäjälle ja Baltian maihin keskittynyt suomalainen energiayhtiö, jonka liiketoimintaan kuuluu sähkön- ja lämmöntuotanto sekä myynti. Fortum Oyj sai alkunsa vuonna 1998, kun Imatran Voima Oy ja Neste Oy yhdistyivät. Vuonna 2017 Fortumin liikevaihto oli 4 520 miljoonaa euroa ja liikevoitto 1 156 miljoonaa euroa. Tilikauden tulos vuonna 2017 oli 882 miljoonaa euroa. Vuonna 2016 Fortum työllisti 8 108 henkilöä. Suomen valtio on Fortum Oyj:n enimmäisomistaja noin 50,8 % omistusosuudella. [22.]

Fortum on yksi vähäpäästöisimmistä suurista sähköyhtiöistä Euroopassa. Vuonna 2016 Fortumin koko sähköntuotannon hiilidioksidipäästöt olivat 176 g/kWh ja hiilidioksidipäästöttömän energian osuus sähköntuotannosta oli 62 prosenttia. Energiantuotannosta 30 % tuotettiin uusiutuvilla hiilidioksidipäästöttömällä energianlähteillä. [22.]

2 Järvenpään voimalaitos

2.1 Polttoaineet ja päästöt

Järvenpään voimalaitos (kuva 1) on vuonna 2013 rakennettu suurimmaksi osaksi biopolttoaineita käyttävä CHP-laitos (*Combined Heat and Power*), joka tuottaa sähköä ja kaukolämpöä Järvenpäässä. Biovoimalaitoksen rakentamisen taustalla oli halu vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttämistä ja siirtyä enemmän biopolttoaineisiin. Järvenpään voimalaitos rakennettiin korvaamaan jo valmiiksi lämpöä tuottavat Järvenpään ja Tuusulan lämpölaitokset. Järvenpään voimalaitoksen omistaa Fortum Power and Heat Oy ja sen kunnossa- sekä käynnissäpidosta vastaa Maintpartner Oy. [1.]



Kuva 1. Järvenpään voimalaitos [2].

Järvenpään voimalaitoksella käytetään erilaisia biopolttoaineita, kuten metsähaketta, metsäteollisuuden puutähteitä, hevosen kuivikelantaa, turvetta sekä korkealaatuisia kierätyspolttoaineita. Voimalaitoksella on 23 MW:n sähköntuotantokapasiteetti sekä 45 MW:n kaukolämpöteho. Taulukossa 1 esitellään Järvenpään voimalaitoksen päästöt vuonna 2017. [1.]

Taulukko 1. Järvenpään voimalaitoksen päästöt vuonna 2017 [1].

CO ₂	25 000 t
SO ₂	3,7 t
NO _x	131 t
Hiukkaset	1,1 t

Järvenpään voimalaitoksella on otettu käyttöön Pohjoismaiden suurin akku. Fortumin tarkoituksena on saada joustavuutta sähköntuotantoon hyödyntämällä akkuvarastointia, sillä tavoitteena on tulevaisuudessa hyödyntää enemmän uusiutuvia energianlähteitä, kuten tuuli- ja aurinkoenergiaa. Nämä uusiutuvat energianlähteet ovat kuitenkin olosuhteista riippuvaisia, joten mahdolliset katkokset kyseisten energianlähteiden tuotannossa voidaan korvata akkuvarastoinnilla. Akun nimellisteho on kaksi megawattia (MW) ja energiakapasiteetti on yksi 1 MWh. [4.]

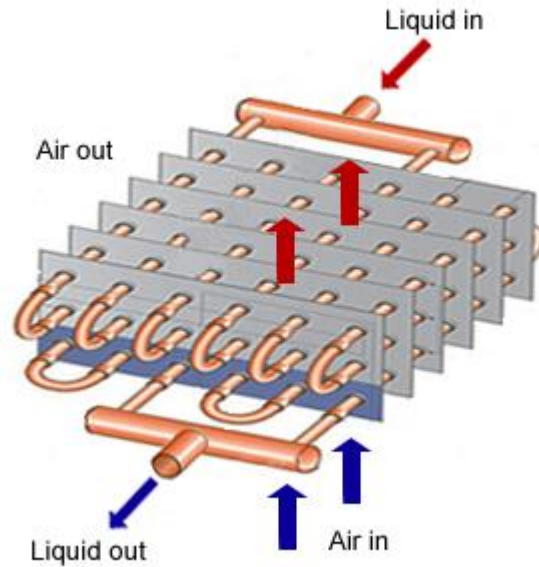
2.2 Jäähdytysjärjestelmät

Järvenpään voimalaitoksen jäähdytys koostuu kahdesta eri järjestelmästä, apujäähdytysjärjestelmästä ja suljetusta jäähdytysjärjestelmästä. Molemmat jäähdytysjärjestelmät toimivat vesiglykolipiirillä, jossa vesiglykoliseos kuljettaa prosessilaitteissa syntyneen lämpöenergian jäähdytysnesteen mukana ilmajäähdyttimille voimalaitoksen katolle, missä ulkoilma jäähdyttää seoksen. [9;10.]

Kummassakin järjestelmässä pidetään yllä jäähdytysnesteen jatkuvaa virtausta ja virtaus jokaiselle toimilaitteelle säädetään manuaalisesti käsikäyttöisillä venttiileillä. Jäähdytysjärjestelmien vesiglykoliseos koostuu 40 % etyleeniglykolista ja 60 % suolattomasta vedestä. Järjestelmien paineita ylläpidetään paisuntasäiliöillä. Normaalityössä mahdollisten vuotojen sattuessa korvataan hukattu jäähdytysneste suolattomalla vedellä. [9;10.]

2.2.1 Nestejäähdyttimet

Järvenpään voimalaitoksella on käytössä Alfa Laval Oy:n valmistamia jäähdyttimiä. Niissä jäähdytysneste virtaa lohkon läpi, jossa se jäähtyy ulkoilman termodynaamisesta vaikutuksesta. Nestejäähdyttimen läpi virtaa ilmaa sisään lohkon alakautta ja ulos lohkon yläkautta. Nestejäähdyttimen toiminta on havainnollistettu kuvassa 2. [7.]



Kuva 2. Ilmajäähdyttimien toiminta [8].

Apujäähdytysjärjestelmällä on viisi nestejäähdytintä (20PGE30AC001, 20PGE30AC002, 20PGE30AC003, 20PGE30AC004 ja 20PGE30AC005), jotka jäähdyttävät jäähdytysnesteeseen $70\text{ °C} \rightarrow 40\text{ °C}$ ulkoilman lämpötilan ollessa 26 °C . Nestejäähdyttimet sijaitsevat turbiinihuoneen katolla tasolla +72.000. [10.]

Suljetussa jäähdytysjärjestelmässä on neljä jäähdytintä (20PGA20AC001, 20PGA20AC002, 20PGA20AC003 ja 20PGA20AC004), jotka jäähdyttävät jäähdytysnesteeseen $41\text{ °C} \rightarrow 31\text{ °C}$ ulkoilman lämpötilan ollessa 26 °C . Nestejäähdyttimet sijaitsevat turbiinihuoneen katolla tasolla +68.700. [9.]

2.2.2 Kaukolämmön apujäähdytysjärjestelmä

Kaukolämmön apujäähdytysjärjestelmän tarkoitus on huolehtia, että kaukolämpöveden menolämpötila pysyy asetusarvossaan silloin, kun voimalaitoksen kaukolämmöntuotanto on suurempi kuin kaukolämpöverkon ottama teho. Apujäähdytysjärjestelmää käytetään myös voimalaitoksen käynnistyksessä. Normaalitilassa yksi pumppu kierrättää jäähdytysnестettä kaukolämmön apujäähdyttimen läpi. Järjestelmä on suunniteltu käsittelemään 15 MW suuruista lämpökuormaa kaukolämpöverkosta suurimman ulkoilman lämpötilan mukaan. Järjestelmältä vaadittava jäähdytysteho on esitelty taulukossa 2. [10.]

Taulukko 2. Apujäähdytysjärjestelmältä tarvittava nesteen virtausmäärä ja jäähdytysteho [10].

	kg/s	kW
Kaukolämmön apujäähdytyksen lämmönvaihdin	143	15000
Mitoitusmarginaali	0	0
Yhteensä	143	15000

Kaukolämmön apujäähdytysjärjestelmä koostuu seuraavista laitteista:

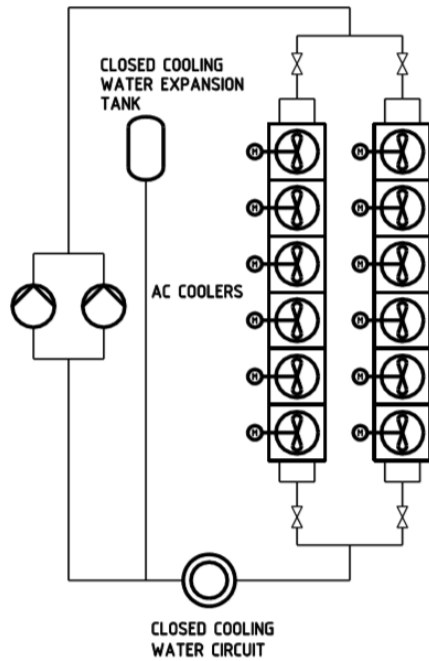
- KL-apujäähdytysjärjestelmän paisuntasäiliö (2 m³)
- KL-jäähdytysveden välisäiliö (0,35 m³)
- KL-apujäähdytysjärjestelmän jäähdytysvesipumput (2 x 100 %)
- KL-apujäähdytysjärjestelmän lämmityspumppu (1 x 100 %)
- KL-apujäähdytysjärjestelmän nestejäähdyttimet (15 MW)
- KL-apujäähdytin (15 MW).

Vesiglykoliseoksen lämpötilaa säädetään kaukolämmön apujäähdytyksen nestejäähdyttimien taajuusmuuttajilla. Vesiglykoliseoksen virtausmäärä on jokaiselle ilmajäähdyttimelle vakio, ja sitä ylläpidetään linjakohtaisilla käsiasäätöventtiileillä.

Järjestelmässä on myös ylimääräinen pumppu ulkoilman kylmiä lämpötiloja varten. Pumppu kierrättää lämmintä vettä lämmönvaihtimelle lämpötilan ollessa alle -10 °C. Kaukolämmön lämmönvaihtimen alin toiminnallinen lämpötila on -10 °C. [10.]

2.2.3 Suljettu jäähdytysjärjestelmä

Suljetun jäähdytysjärjestelmän (kuva 3) tarkoitus on jäähdyttää toimilaitteita voimalaitoksella. Normaalityltilassa yksi pumppu kierrättää jäähdytysnestettä järjestelmässä nestejäähdyttimille, jotka jäähdyttävät järjestelmässä kiertävän jäähdytysnesteen. [9.]



Kuva 3. Järvenpään suljetun jäähdytysjärjestelmän jäähdytysprosessi [11].

Suljettu jäähdytysvesijärjestelmä koostuu seuraavista laitteista:

- suljetun jäähdytysvesijärjestelmän pumput (2 x 100 %)
- nestejäähdyttimet (4 MW)
- paisuntasäiliö (1 m³).

Suljettuun jäähdytysvesijärjestelmään on myös kytketty seuraavat laitteet ja järjestelmät:

- turbiinin generaattorin jäähdyttimet (4 x 50 %)
- turbiinin voiteluöljyn jäähdyttimet (2 x 100 %)
- vakuumiyksikön jäähdyttimet (2 x 100 %)
- turbiinin säätö-öljyjärjestelmä (1 x 100 %)
- kattilan jäähdytysvesikierto.

Suljettu jäähdytysjärjestelmä on suunniteltu käsittelemään erisuuruisia lämpökuormia. Järjestelmän suunnittelussa on otettu huomioon suurin lämpökuorma ja suurin ympäristön lämpötila. Taulukossa 3 on lueteltu suljetulta jäähdytysjärjestelmältä tarvittavat nesteen virtausmäärät ja jäähdytystehot. [9.]

Taulukko 3. Suljetulta jäähdytysjärjestelmältä tarvittavat nesteen virtausmäärät ja jäähdytysteho [9].

	kg/s	kW
Turbiinin generaattorin jäähdyttimet	30	540
Turbiinin öljyn jäähdyttimet	36	640
Imuysikön jäähdyttimet	1,7	30
Säätö-öljyn jäähdyttimet	0,75	13
Kattilalaitos	23,6	1200
Mitoitusmarginaali	22	1577
Yhteensä	114	4000

Ulkoilman lämpötilan ollessa 26 °C suurin sallittu lämpötila jäähdytysnesteelle on 31 °C, kun sen lämpötila on asetettu 20 °C:seen. Järjestelmässä olevien jäähdytettävien laitteiden lämpötilaero on 7 – 10. [9.]

3 Vesisumutuksen lisääminen nestejäähdyttimiin

3.1 Toimintaperiaate ja rajoitteet

Nestejäähdyttimien jäähdytystehoa saadaan kasvatettua kustannustehokkaasti asentamalla niihin vesisumutus [3]. Järjestelmä toimii niin, että vettä sumutetaan nestejäähdyttimeen, jossa kostea ilma kondensoituu jäähdytysnestettä kuljettavien putkien pintaan. Lämpö siirtyy jäähdytysnesteestä kondensoituun veteen, josta se siirtyy edelleen ilman mukana pois jäähdytyslaitteesta.

Vesisumutus on toteutettu Kivenlahden ja Tapiolan lämpölaitoksille nestejäähdyttimiin. Kuvasta 4 voidaan huomata vesisumutuksen putket nestejäähdyttimien alla Kivenlahden lämpölaitoksella. Vesisumutuksen osalta ei ole saatavilla tietoja kyseisiltä laitoksilta, koska sumutuksen vaikutusta ei ole seurattu. Vesisumutuksen mahdollisuutta on myös tutkittu Suomenojan voimalaitoksella kaasuturbiinille, mutta nestejäähdyttimien sijaan sitä käytettäisiin turbiinin imuilman jäähdyttämistä varten.

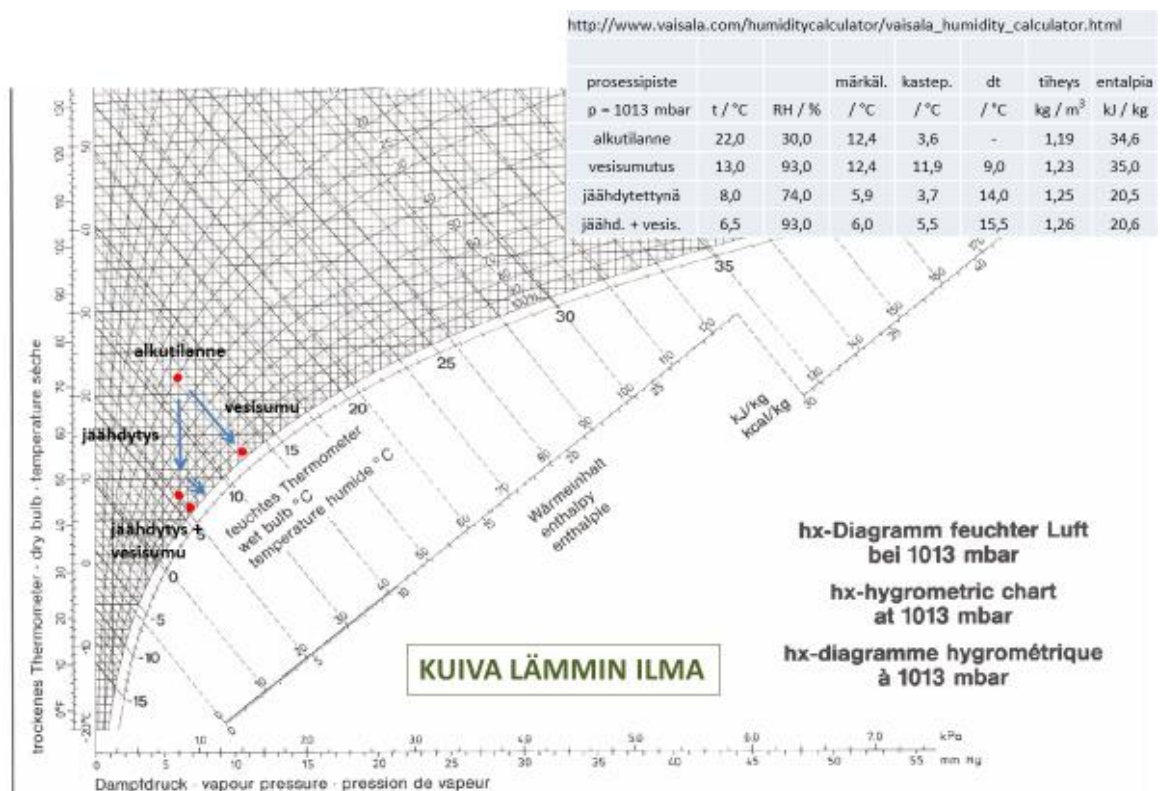


Kuva 4. Vesisumutuksen putkia Kivenlahden lämpölaitoksella [24].

Vesisumutuksella on myös rajoitteensa. Sumutuksesta saatava hyöty on saavutettavissa parhaiten kesäkuukausina. Jos ulkoilman lämpötilat ovat alhaiset ja ilman suhteellinen kosteus on suuri, vesisumutuksen hyödyt pienenevät. Vesisumutuksessa saattaa myös esiintyä suuresta ilmakestästä aiheutuvaa korroosiota.

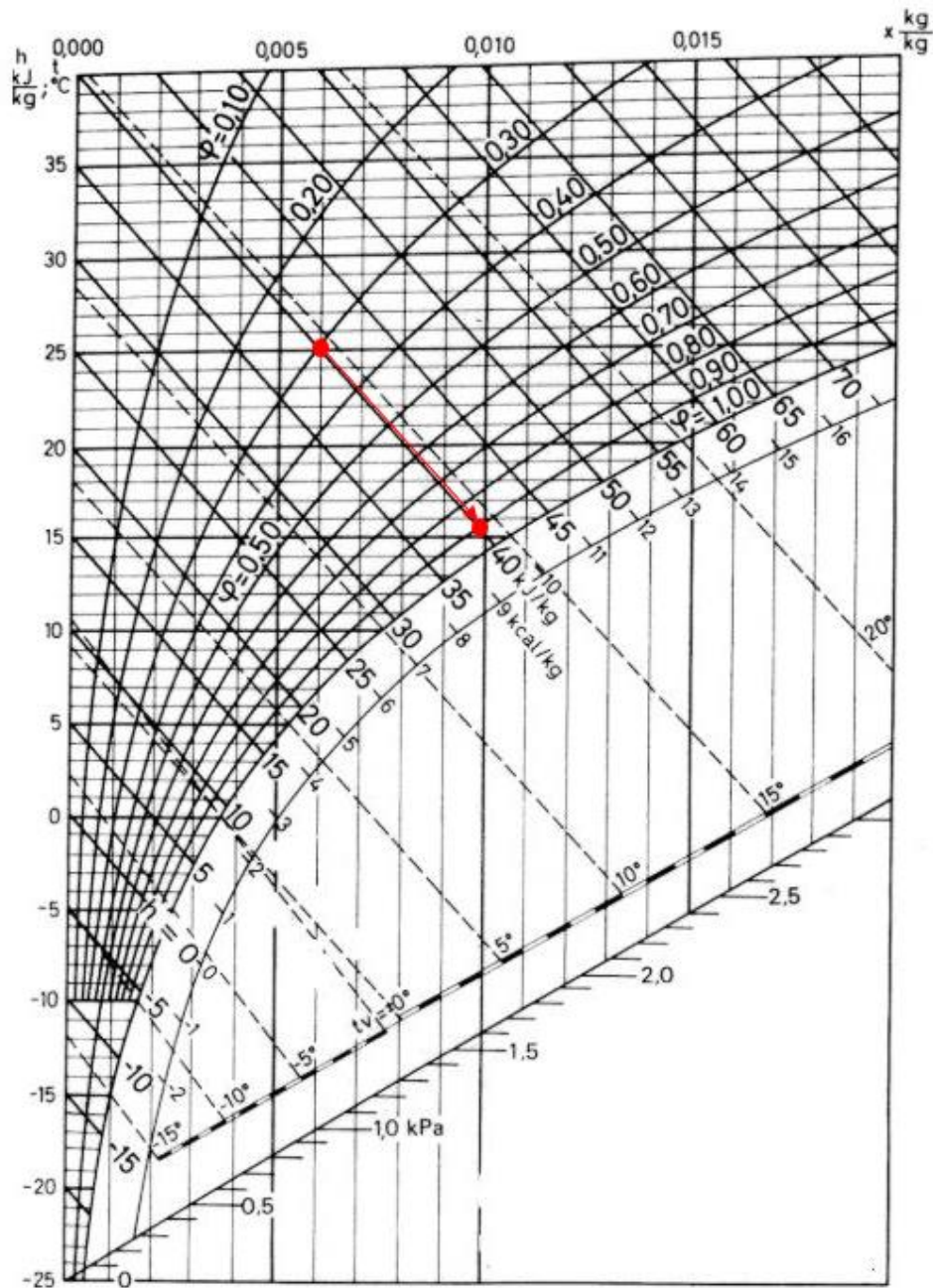
3.2 Vesisumutuksen teoreettisen hyödyn selvittäminen

Vesisumutuksen teoreettista hyötyä voidaan tutkia käyttämällä Mollierin diagrammia. Mollierin diagrammi kuvaa kokonaislämpöä entropiaa vastaan, eli se kuvastaa termodynaamisen järjestelmän entalpiaa. Entalpia on energiaa ilmaiseva suure termodynamiikassa [13.] ja entropia on fysikaalinen suure, joka mittaa energian hajaantumista. [12.] Kuvasta 5 voidaan havaita vesisumutuksen vaikutusta teoriassa Suomenojan voimalaitoksella sijaitsevan turbiinin imuilman lämpötilaan.



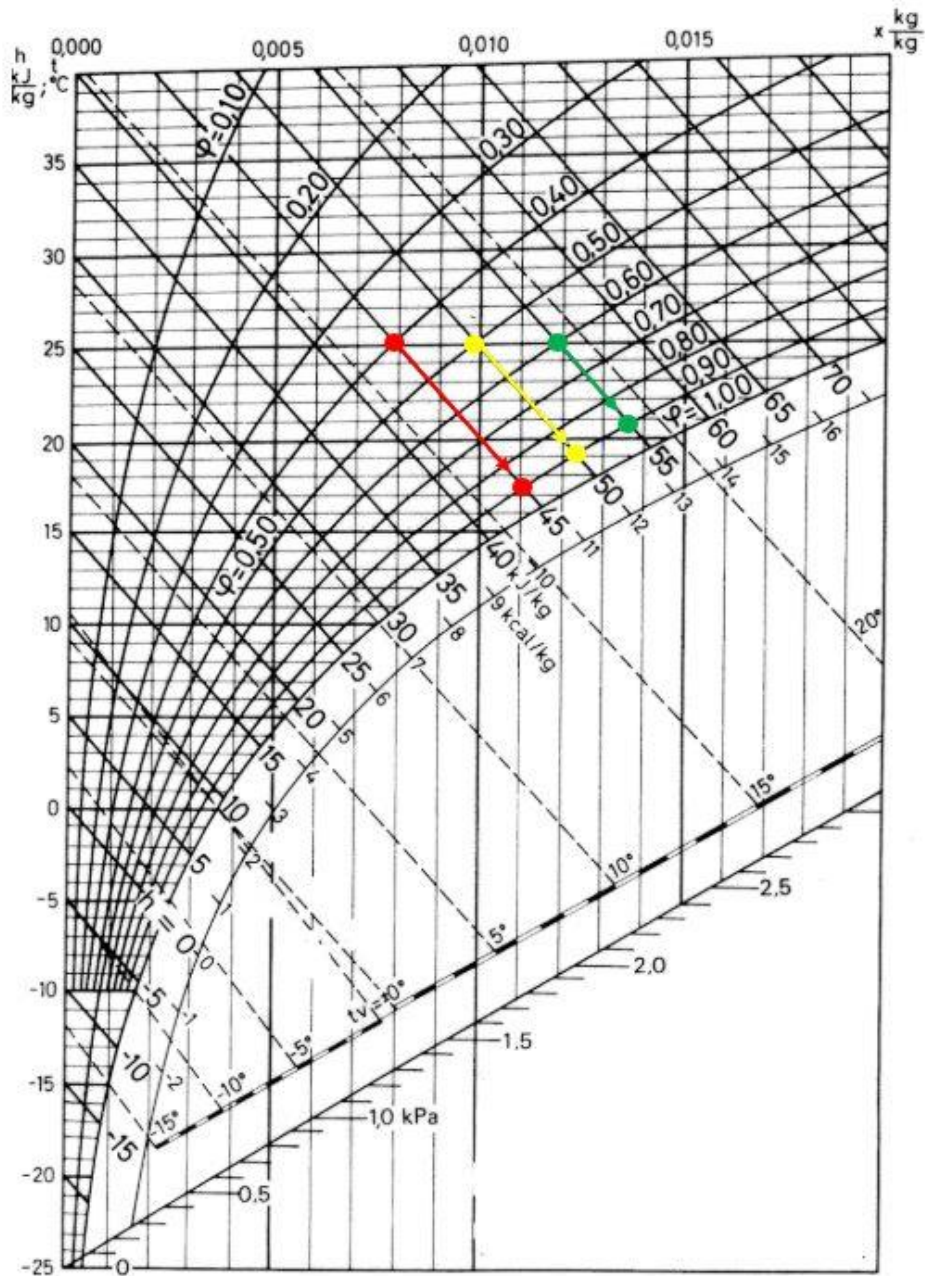
Kuva 5. So6 imuilman jäähdytys ja kostutus [14].

Mollierin diagrammista voidaan päätellä vesisumutuksen aiheuttama lämpötilan lasku seuraamalla entalpialinjaa alkutilanteesta lopputilanteeseen. Insinööriyön ohjaajan Jere Espon kanssa sovittiin, että alkutilannetta voidaan pitää 25 °C:ssa, jossa suhteellinen kosteus on 30 %. Vesisumutuksen aikaansaaman suhteellisen kosteuden on arvioitu olevan 90 %, mikä on samalla lopputilanne. Seuraamalla entalpialinjaa voidaan huomata, että vesisumutuksen aikaansaama suhteellisen kosteuden kasvu laskee lämpötilan noin 15,5 °C:seen. Muutos diagrammissa on havainnollistettu kuvassa 6.



Kuva 6. Lämpötilan muutos suhteellisen kosteuden kasvaessa [16].

Teoreettisen hyödyn laskemisessa on otettava huomioon, että vesisumutuksen hyöty perustuu siihen, että sumutettavan kohteen suhteellinen kosteus on ennen toimenpiteen aloittamista mahdollisimman pieni. Ympäristön suhteellisen kosteuden kasvu vähentää vesisumutuksen hyötyä. Suhteellisen kosteuden kasvun vaikutusta lämpötilamuutokseen on havainnollistettu kuvassa 7.



Kuva 7. Suhteellisen kosteuden kasvun vaikutus lämpötilamuutokseen [muk. 16].

Kuvassa alkutilanteen lämpötila on jokaiselle värille 25 °C, mutta suhteellinen kosteus on eri. Punaisen värin alkutilanteessa suhteellinen kosteus on 40 %, keltaisen 50 % ja vihreän 60 %. Lopputilanteen lämpötilat ovat vastaavasti punaisella noin 17,5 °C, keltaisella 19 °C ja vihreällä noin 20,5 °C. Kuvasta voidaan siis päätellä, että kymmenen prosentin muutos suhteellisessa kosteudessa vaikuttaa noin 1,5 °C:n verran lämpötilaan.

Vesisumutuksen tuomaa lisäystä jäähdytystehoon on vaikea laskea ilman jäähdyttimiä valmistavien yritysten ohjelmistoja, joten Jere Espon kanssa sovittiin, että kustannuslaskennoissa käytetään tehonlisäyksenä 1 MW. Kyseinen luku ei perustu mihinkään arvioon, mutta se on kuitenkin suhteellisen pieni määrä tehoa verrattuna Järvenpään voimalaitoksen sähköntuotannon kapasiteettiin.

Vesisumutuksen hyötyä arvioidessa on huomioitava sen todellinen hyöty, joka on maksimissaan 50 – 70 % teoreettisesta arvosta [19].

3.3 Vuosittainen käyttöaika vesisumutukselle

Vuosittainen käyttöaika koostuu lähtökohtaisesti kesäkuukausista, jolloin on optimaaliset sääolosuhteet vesisumutukselle. Käyttöajan määrittelemisessä työssä käytetään apuna Järvenpään voimalaitoksella mitattua dataa jäähdytysjärjestelmien lämpötiloista. Käyttöajan määrittelemisessä käytetään vuosien 2016 – 2018 dataa.

Huomioitavaa on, että tilastot eivät ilmaise säätä ja sen vaikutusta jäähdytysnesteen lämpötilaan millään tavalla, joten ei voida varmuudella tietää, mitkä ajankohdat potentiaalisesta käyttöajasta ovat oikeasti epäsuotuisia vesisumutukselle. Huomioitavaa on myös se, että vuoden 2018 kesä oli poikkeuksellisen kuuma [15], kun taas varsinkin heinäkuu vuonna 2017 oli poikkeuksellisen kylmä [17].

3.3.1 Suljettu jäähdytysjärjestelmä

Suljetun jäähdytysjärjestelmän jäähdytysnesteen optimaalinen lämpötila on 20 °C ja suurin sallittu lämpötila on 31 °C. Näiden tietojen pohjalta sovittiin insinööriyön ohjaajan kanssa, että mitatuista lämpötiloista suodatetaan pois kaikki alle 25 °C jäävät mittauskohdat. Suodatusehtoina käytettiin myös sitä, että järjestelmän nestejäähdyttimet olivat toiminnassa, jolloin saatiin luotettavampaa tietoa niistä ajankohdista, jolloin pelkästään

nestejäähdyttimien tuoma jäähdytysteho ei ole riittänyt pitämään jäähdytysnestettä optimaalisessa lämpötilassa.

Suljetun jäähdytyspiirin osalta kyseisiä päiviä, jolloin jäähdytysneste on ylittänyt 25 °C:n rajan edes tunniksi, oli mittausdatan mukaan 22 vuonna 2018. Päivät sijoittuvat aikavälille toukokuu – syyskuu ja suurin osa päivistä on elokuussa. Vuonna 2017 edellä mainittu 25 °C:n raja ylittyi vain kaksi kertaa, yhtenä päivänä toukokuussa ja yhtenä päivänä elokuussa. Vuoden 2016 osalta 25 °C:n rajan ylittäneitä päiviä oli 15, joista suurin osa sijoitui kesäkuulle aikavälillä toukokuu – elokuu.

Keskiarvo edellä mainituista kolmen vuoden aikaisista päivistä, jolloin jäähdytysnesteen lämpötila on ylittänyt 25 °C:n rajan, on 13 päivää ja mediaani on 15 päivää. Käyttöaika päivien tarkkuudella on kuitenkin epätarkka, koska se ei ota huomioon sitä, että 25 °C:n asteen raja on saatettu ylittää vain kerran lyhyeksi ajaksi koko päivän aikana.

Käyttöaika tunneissa vuonna 2016 on 98 tuntia, vuonna 2017 vain 15 tuntia ja vuonna 2018 jopa 208 tuntia. Käyttöaika saattaa vaihdella vuosittain paljonkin, ja sitä on vaikea ennustaa. Vaikka käyttöaika vaihtelee vuositasolla huomattavasti, työssä on hyödynnetty kolmen viime vuoden mittausarvoja, joiden perusteella saadaan käyttöajan keskiarvoksi noin 106 tuntia ja mediaaniksi 98 tuntia.

Suljetun jäähdytysjärjestelmän kannalta vesisumutus auttaa siinä, että toimilaitteet eivät kuumene liikaa. Varsinkin turbiinin generaattorin osalta olisi toivottavaa, että jäähdytysnesteen lämpötilaa saataisiin alennettua. Vesisumutuksen asentaminen suljettuun jäähdytysjärjestelmään on siis käytännössä voimalaitoksen käytön helpottamista varten.

3.3.2 Kaukolämmön apujäähdytysjärjestelmä

Kaukolämmön apujäähdytysjärjestelmälle ei ole järjestelmäkuvauksen perusteella annettu tiettyä lämpötila-arvoa, jossa jäähdytysnesteen pitäisi olla. Sen sijaan kaukolämpöveden menolämpötilan tulisi pysyä asetusarvossaan. Työn ohjaajan kanssa sovittiin, että potentiaalisia hetkiä vesisumutukselle olisivat ne ajat, kun kaukolämpövesi ylittää 46 °C:n rajan apujäähdytysjärjestelmän lämmönvaihtimen jälkeen. Ehtoina oli myös se, että nestejäähdyttimet ja laitos ovat toiminnassa.

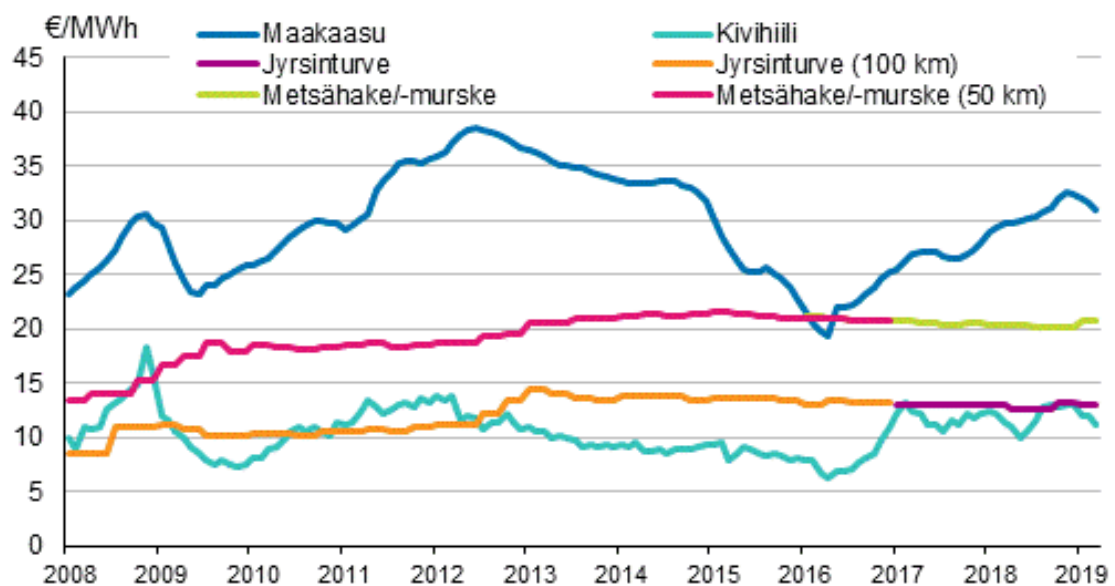
Kaukolämmön apujäähdytysjärjestelmän osalta potentiaalista käyttöaikaa vesisumutukselle oli enemmän kuin suljetulla jäähdytysjärjestelmällä. Vuonna 2016 oli yhteensä 947 tuntia, jolloin kaukolämpövesi ylitti 46 °C:n rajan. Vuodelta 2017 saatiin 383 tuntia käyttöaikaa ja vuodelta 2018 saatiin 180 tuntia. Kyseiset päivät sijoittuvat aikavälille toukokuu – syyskuu. Kolmen vuoden ajalta saaduille tuntimäärille mediaani on 383 tuntia ja keskiarvo on 503 tuntia.

4 Investointilaskennat

Vesisumutuksen asentaminen Järvenpään voimalaitoksen jäähdytysjärjestelmiin maksaa arviolta 20 000 €. Arvio perustuu työn ohjaajan Espon kokemukseen kyseisistä laitteista. Hinta koostuu laitteista sekä asennuksesta. Investointilaskennoissa käytettävät hinnat perustuvat joko julkisiin lähteisiin, kuten polttoainekustannuksien ja sähkön hinnan kohdalla, tai arvioon, kuten suolattoman veden hinta.

4.1 Polttoainekustannukset

Järvenpään voimalaitoksessa käytettävien polttoaineiden kustannuksia on esitelty kuvassa 8.



Kuva 8. Biopolttoaineiden polttoainekustannukset [18].

Investoinnin laskemisessa käytetään polttoaineen hintana metsähakkeen ja -murskeen hintaa, joka on noin 20 €/MWh. Se on Järvenpään voimalaitoksella käytettävistä polttoaineista kallein polttoaine, jos maakaasua ei huomioida. Maakaasua käytetään vain tarpeen vaatiessa, kuten käynnistyksessä, joten se ei ole ensisijainen polttoaine sähkön- eikä lämmöntuotannossa.

4.2 Vesisumutuksen kustannukset

Vesisumutuksen kustannukset koostuvat siinä käytettävän veden valmistuksesta ja pumppauksesta. Insinööriyön ohjaajan hinta-arvio veden valmistukseen ja pumppaukseen on 3 – 4 €/m³. Ohjaajan kanssa arvioitiin, että vesisumutuksen kustannukset olisivat vuositasolla noin 10 000 €, jos vuosittainen käyttöaika vesisumutukselle on 383 tuntia. Vuosittainen käyttöaika on saatu aikaisemmin työssä lasketuista optimaalisten käyttöaikojen mediaanista.

4.3 Investoinnin takaisinmaksuaika

Jotta voidaan laskea investoinnin rahallinen hyöty, pitää ensin selvittää paljonko sähkön- tuotanto tuottaa Fortumille voittoa. Koska virallisia lukuja ei ole saatavilla, sähkön- tuotannon voitto on laskettu sähkön spot-hintojen ja polttoaineen hinnan perusteella. Sähkön spot-hinnat on lueteltu kuukausittain kuvassa 9.

KUUKAUSI	2019	2018	2017	2016	2015
Tammikuu	6.92	4.60	4.13	4.69	4.19
Helmikuu	5.80	5.38	4.35	3.24	4.11
Maaliskuu	4.96	5.65	3.80	3.36	3.65
Huhtikuu	5.14	4.99	3.89	3.38	3.73
Toukokuu	4.94	4.79	3.80	3.48	3.21
Kesäkuu	3.81	5.85	3.80	4.39	2.67
Heinäkuu	5.69	6.70	4.24	3.84	3.42
Elokuu	6.05	6.88	4.50	3.89	3.86
Syyskuu		6.32	4.62	4.03	3.94
Lokakuu		5.75	4.14	4.65	4.15
Marraskuu		6.21	4.18	5.09	3.94
Joulukuu		6.49	3.96	4.22	3.29

Kuva 9. Sähkön spot-hinnat. Luvut ovat muodossa snt/kWh [20].

Sähkön spot-hinta on vuorokauden jokaiselle tunnille muodostuva hinta Pohjoismaisessa Nord pool -sähköpörssissä [20]. Sähköntuotannosta saatu voitto lasketaan vähentämällä sähkön spot-hinnasta polttoainekustannus. Spot-hintana käytetään vuoden 2018 mediaania, joka on 5,8 snt/kWh eli 58 €/MWh. Sähköntuotannosta saatu voitto on siis:

$$58 \text{ €/MWh} - 20 \text{ €/MWh} = 38 \text{ €/MWh}$$

Laskettaessa vesisumutuksen tuomaa hyötyä käytetään sähköntuotannon voiton lisäksi arvoina käytön tuntimäärää sekä arvioitua tehonlisäystä. Vesisumutuksen käytön tuntimääriä on eritelty aikaisemmin ja laskuissa käytetään tuntimäärien mediaania.

Tehonlisäystä on vaikea arvioida. Tehonlisäyksen arviointia voi vaikeuttaa se, että vesisumutus voi säästää kustannuksissa tai tuoda lisää tuloja sähkönmyynnistä. Vesisumutus voi joko auttaa laitoksen pitämistä kovemalla teholla kuin aikaisemmin on ollut mahdollista tai se voi tuoda säästöjä maakaasun käytöstä polttoaineena, joka on kalliimpaa kuin esimerkiksi metsähake ja -murske. Työssä käytetään siis aikaisemmin mainittua 1 MW tehonlisäyksen arviota laskujen helpottamiseksi. Vesisumutuksen tuoma rahallinen hyöty saadaan laskettua kertomalla käyttöaika, tehonlisäys ja sähkön myynnistä saatava voitto seuraavasti:

$$38 \text{ €/MWh} \times 383 \text{ h} \times 1 \text{ MW} = 14\,554 \text{ €}$$

Kyseisestä summasta joudutaan vähentämään vesisumutuksen kustannukset, eli 10 000 €. Näin ollen saadaan tulokseksi:

$$14\,554 \text{ €} - 10\,000 \text{ €} = 4\,554 \text{ €}$$

Kyseisellä arvolla saadaan Fortumin oman kustannuslaskurin avulla 20 vuoden laskenta-ajalla takaisinmaksuajaksi 5 vuotta, nettonykyarvoksi (NPV) 34 000 €, efektiiviseksi koroksi (IRR) 20,7 % ja tuottoindeksi (RI) on 2,7. Fortumin kustannuslaskurin tulokset on esitelty taulukossa 4.

Taulukko 4. Fortumin kustannuslaskurin tulokset [25].

Takaisinmaksuaika	5 vuotta
Nettonykyarvo (NPV)	34 000 €
Efektiivinen korko (IRR)	20,7 %
Tuottoindeksi (RI)	2,7

4.4 Herkkyysanalyysi

Työn ohjaajan toiveesta investoinnille tehtiin herkkyysanalyysi, joka arvioi investoinnin tuloksen epävarmuutta. Arviona käytettiin parhaan ja huonoimman tapauksen analyysiä, jotta voidaan arvioida edellä mainitun tuloksen epävarmuutta. Parhaan ja huonoimman tuloksen analyysi tarkoittaa sitä, että kaikkia lähtöoletuksia muutetaan kerralla. Tässä työssä se tarkoittaa sitä, että sähkön spot-hintaa ja vesisumutuksen käyttöaikaa muutettiin vastamaan huonointa ja parasta mahdollista tulosta. [21.]

4.4.1 Huonoin tulos

Huonointa tulosta laskettaessa voidaan huomata kuvan 9 perusteella, että sähkön pienin hinta on ollut 38 €/MWh kesäkuussa vuonna 2017 ja pienin käyttöaika on 180 tuntia vuonna 2018. Näin ollen huonoin tulos pienimmällä tuotolla saadaan seuraavasti:

$$1 \text{ MW} \times (38 \text{ €/MWh} - 20 \text{ €/MWh}) \times 180 \text{ h} = 3\,240 \text{ €}$$

Laskettaessa huonoimmalle tulokselle vesisumutuksen kustannuksia, joudutaan suhteuttamaan vesisumutuksen kustannukset tuntimäärän mukaan. Huonoimman tuloksen käyttöaika saadaan suhteutettua seuraavasti:

$$180 \text{ h} / 383 \text{ h} = 0,469$$

Huonoimman tuloksen käyttöaika on 46,9 % vesisumutuksen käyttöajan mediaanista. Vesisumutuksen kustannukset huonoimmalle tulokselle saadaan siis laskettua seuraavasti:

$$0,469 \times 10\,000 \text{ €} = 4\,690 \text{ €}$$

Vähentämällä vesisumutuksen hyödystä sen kustannukset saadaan seuraava tulos:

$$3\,240 \text{ €} - 4\,690 \text{ €} = -1\,450 \text{ €}$$

Huonoimmalla tuloksella saadaan Fortumin kustannuslaskurilla taulukon 5 mukaiset tulokset.

Taulukko 5. Fortumin kustannuslaskurin tulokset huonoimmassa tilanteessa [25].

Takaisinmaksuaika	26 vuotta
Nettonykyarvo (NPV)	-34 000 €
Efektiivinen korko (IRR)	-
Tuottoindeksi (RI)	-0,7

Huonoimmalla tuloksella investointi ei siis ole kannattava, koska se tulisi maksamaan enemmän kuin se tuottaa.

4.4.2 Paras tulos

Parasta tulosta laskettaessa voidaan taas kuvan 9 perusteella huomata, että sähkön suurin hinta on ollut 68,8 €/MWh elokuussa 2018 ja suurin käyttöaika on 947 tuntia vuonna 2016. Näillä arvoilla saadaan paras tulos:

$$1 \text{ MW} \times (68,8 \text{ €/MWh} - 20 \text{ €/MWh}) \times 947 \text{ h} = 46\,213,6 \text{ €}$$

Laskettaessa vesisumutuksen kustannuksia parhaalle tulokselle, suhteutetaan taas parhaimman tuloksen käyttöaika seuraavasti:

$$947 \text{ h} \times 383 \text{ h} = 2,472$$

Parhaimman tuloksen kustannukset saadaan siis seuraavasti:

$$10\,000 \text{ €} \times 2,472 = 24\,720 \text{ €}$$

Näin ollen parhaimman tuloksen hyöty on:

$$46\,213,6 \text{ €} - 24\,720 \text{ €} = 21\,493,6 \text{ €}$$

Parhaalla tuloksella saadaan Fortumin kustannuslaskurista taulukon 6 mukaiset tulokset.

Taulukko 6. Fortumin kustannuslaskurin tulokset parhaimmassa tilanteessa [25].

Takaisinmaksuaika	2 vuotta
Nettonykyarvo (NPV)	224 000 €
Efektiivinen korko (IRR)	90,5 %
Tuottoindeksi (RI)	12,2

Analyysin perusteella voidaan huomata, että investoinnin kannattavuus vesisumutukseen on herkkä muutoksille.

5 Yhteenveto

Työssä tutkittiin vesisumutuksen lisäystä Järvenpään voimalaitoksen jäähdytysjärjestelmiin. Tavoitteena oli selvittää, kuinka paljon vesisumutus lisää jäähdytystehoa, jonka avulla voimalaitosta voitaisiin pitää toiminnassa kauemmin minimiteholla tai vaihtoehtoisesti käyttää isommalla teholla kuin aikaisemmin olisi ollut mahdollista tarvittavan jäähdytystehon puuttumisen takia. Syy, miksi laitosta haluttaisiin pitää kauemmin toiminnassa tai käyttää kovemmalla teholla, on taloudellinen.

Ongelmaksi insinööriyötä tehdessä muodostui jäähdytystehon kasvun laskeminen. Vesisumutuksen vaikutus jäähdytysnesteen lämpötilaan ei ole helposti laskettavissa, ellei käytössä ole jäähdytyslaitteiden valmistajien omia ohjelmistoja. Näin ollen sumutuksen vaikutusta jäähdytysnesteen lämpötilaan ei laskettu, vaan sen tuoma hyöty arvioitiin.

Vesisumutuksen hyödyn arviolla saatiin laskettua investoinnin takaisinmaksuaika ja nettonykyarvo. Vesisumutus on investointilaskujen perusteella optimaalisessa tilassa erittäin kannattava hankinta. Investointilaskelmien päätteeksi tehdyllä herkkyyksianalyysillä voitiin huomata, että vesisumutus on todella herkkä sähkön hinnassa ja sääolosuhteissa tapahtuville muutoksille. Tämä näkökulma tulisi myös ottaa huomioon investointihankinnan päätöksenteossa.

Investointilaskelmia tehtäessä ei huomioitu jäähdytysjärjestelmiin vaikuttavia sääilmiöitä, kuten sadetta. Syy, miksi esimerkiksi sateisia päiviä ei ole huomioitu työssä on se, että sateisien päivien osuudesta kesäkuukausista ei ole laskettua määrää saatavilla.

Vesisumutus ei välttämättä tuo tarvittavaa lisätehoa jäähdytykseen ollessaan niin riippuvainen ulkoilman sääolosuhteista. Siitä syystä tulisi Järvenpään voimalaitokselle vesisumutusta suunniteltaessa asentaa myös ilmankosteusmittari ilmajäähdyttimien läheisyyteen. Näin saataisiin mitattua vesisumutukselle oleellisia tietoja, kuten ilmankosteutta ja lämpötilaa.

Lähteet

- 1 Järvenpään CHP-laitos. 2019. Verkkoaineisto. Fortum Power and Heat Oy. <<https://www.fortum.fi/tietoa-meista/yhtiomme/energiantuotantomme/voimalaitoksemme/jarvenpaan-chp-laitos>>. Luettu 19.2.2019.
- 2 Järvenpään CHP-laitos. Ilmakuva Järvenpään voimalaitoksesta. Fortum Power and Heat Oy. <https://www.fortum.fi/sites/g/files/rkxjap156/files/styles/grid_large/public/image-entity/kba_8341_jpg.jpg?h=a32b3037>. Luettu 19.2.2019.
- 3 Paranna kylmäkoneesi jäähdytystehoa vesisumutuksella. 2017. Verkkoaineisto. Hansa Engineering Oy. <<http://hansa-engineering.se/fi/blog/paranna-kylmakoneesi-jaahdytystehoa-vesisumutuksella>>. Luettu 26.2.2019.
- 4 Fortum otti käyttöön pohjoismaiden suurimman akun. 2017. Verkkoaineisto. Energiatalous. <<https://www.energiatalous.fi/?p=1180>>. Luettu 28.2.2019.
- 5 Teollisuuden käytön ja kunnossapidon ammattilainen. 2018. Verkkoaineisto. Maintpartner Oy. <<https://www.maintpartner.com/index.php/fi/maintpartner-suomi>>. Luettu 5.3.2019.
- 6 Missio, visio, eettiset periaatteet. 2018. Verkkoaineisto. Maintpartner Oy. <<https://www.maintpartner.com/index.php/fi/maintpartner-suomi/missio-ja-visio>>. Luettu 5.3.2019.
- 7 Fincoil FBL. 2018. Verkkoaineisto. Alfa Laval Oy. <<https://www.alfalaval.com/products/heat-transfer/finned-coil-air-heat-exchangers/finned-coil-liquid-coolers/fincoil-fbl/>>. Luettu 7.3.2019.
- 8 Fincoil FBL. Kuva. <https://www.alfalaval.com/globalassets/images/products/heat-transfer/finned-coil-air-heat-exchangers/hiw_liquid_cooler_coil_335.png>. Luettu 7.3.2019.
- 9 Closed cooling water system. 2012. Manuaali. Pöyry Finland Oy. Yrityksen sisäinen dokumentti. Luettu 19.2.2019.

- 10 DH aux cooling water system. 2012. Manuaali. Pöyry Finland Oy. Yrityksen sisäinen dokumentti. Luettu 19.2.2019.
- 11 Suljettu jäähdytysjärjestelmä. 2012. Prosessikuva. Pöyry Finland Oy. Yrityksen sisäinen dokumentti. Luettu 19.2.2019.
- 12 Entropy is not "disorder". 2005. Verkkoaineisto. Entropysite. <http://entropy-site.oxy.edu/entropy_isnot_disorder.html>. Luettu 3.12.2019.
- 13 Entalpia. 2019. Verkkoaineisto. <<https://fi.wikipedia.org/wiki/Entalpia>>. Luettu 18.3.2019.
- 14 So6 imuilman jäähdytys ja kostutus. 2013. PowerPoint-esitys. Maintpartner Oy. Yrityksen sisäinen dokumentti. Luettu 20.3.2019.
- 15 Ilmatieteen laitos: Touko-elokuu oli mittaushistorian lämpimin. 2018. Verkkoaineisto. Yleisradio. <<https://yle.fi/uutiset/3-10383828>>. Luettu 15.7.2019.
- 16 Mollier diagram. 2003. Verkkoaineisto. Engineering Toolbox. <https://www.engineeringtoolbox.com/psychrometric-chart-mollier-d_27.html>. Luettu 15.7.2019.
- 17 Ilmatieteen laitos: Heinäkuu näin kylmä kerran 10 vuodessa – alin lämpötila 1,6 astetta pakkasta. 2017. Verkkoaineisto. Yleisradio. <<https://yle.fi/uutiset/3-9751100>>. Luettu 15.7.2019.
- 18 Voimalaitospolttoaineiden hinnat sähköntuotannossa. 2019. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. <https://www.stat.fi/til/ehi/2019/01/ehi_2019_01_2019-06-12_kuv_004_fi.html>. Luettu 16.7.2019.
- 19 Kuoppala, Juha-Matti. 2019. General Product Manager, Fincoil LU-VE Oy, Vantaa. Sähköpostikeskustelu. 5.11.2019.

- 20 Sähkön spot-hinta. 2019. Verkkoaineisto. Nordic Green Energy. <<https://www.nordicgreen.fi/asiakaspalvelu/energiatietoa/spot-hinta/>>. Luettu 2.10.2019.
- 21 Herkkyysanalyysi. 2019. Verkkoaineisto. <<https://fi.wikipedia.org/wiki/Herkkyysanalyysi>>. Luettu 25.11.2019.
- 22 Fortum Oyj. 2019. Verkkoaineisto. <<https://fi.wikipedia.org/wiki/Fortum>>. Luettu 28.11.2019.
- 23 Caverion saattaa päätökseen Maintpartnerin Suomen, Viron ja Puolan toimintojen ostot. 2019. Verkkoaineisto. Caverion Oyj. <<https://www.caverion.fi/tietoa-caverionista/media/tiedotteet/2019/11/29/caverion-saattaa-paatokseen-maintpartnerin-suomen-viron-ja-puolan-toimintojen-ostot>>. Luettu 17.12.2019.
- 24 Sainio, Juha. 2019. Kuva vesisumutuksen putkista Kivenlahden lämpölaitoksella.
- 25 Kustannuslaskuri. Excel-taulukko. Fortum Oyj.

