

**SAVONIA**

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# SÄHKÖNTUOTANNON OPTIMOINTI LÄMMITYSJÄRJESTELMÄN MUU- TOKSELLA

TEKIJÄ Joni Ojala

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä(t) Joni Ojala	
Työn nimi Sähköntuotannon optimointi lämmitysjärjestelmän muutoksella	
Päiväys 22.4.2022	Sivumäärä/Liitteet 37
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Metsä Fibre Vilppulan saha	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön pääaiheena oli selvittää, kuinka paljon lämmitysjärjestelmän kytkentämuutoksella pystytään laskennallisesti nostamaan Vilppulan sahan voimalaitoksen sähköntuotantoa ja minkälaisia muutoksia se vaatii. Opinnäytetyön päätavoitteena oli saada suuntaa antavat tulokset kytkentämuutoksen vaikutuksesta sähköntuotantoon, arvio investoinnin hinnasta ja takaisinmaksuajasta.</p> <p>Lämmitysjärjestelmän kytkentämuutoksen tarkoituksena oli saada viileämpää vettä kuumavesilämmönsiirtimelle. Viileämpänä palaava vesi vaikuttaa lämmönsiirtimeen tehontarpeeseen ja sen seurauksena generaattorin tehoon ja sähköntuotantoon. Kytkentämuutoksessa kiinteistöjen vanhat putkilämmönsiirtimet korvattiin lisäksi uusilla levylämmönsiirtimillä.</p> <p>Työn laskennallisessa osuudessa laskettiin generaattorin teho ennen- ja jälkeen kytkentämuutoksen, minkä avulla määritettiin laskennallinen sähköntuotannon määrä suhteutettuna vuoden 2021 kuukausikohtaiseen keskiarvolliseen lämmitystarpeeseen. Lämmitystarve määritettiin ulkolämpötilan funktiona.</p> <p>Työn tuloksista käy ilmi, että lämmitysjärjestelmän kytkentämuutoksen laskennallinen vaikutus generaattorin tehoon sekä sähköntuotantoon on taloudellisessa mielessä merkittävä, jolloin investoinnin takaisinmaksuaika on lyhyt. Vuoden 2021 lämmitystarpeeseen suhteutettuna kytkentämuutoksen laskennalliseksi rahalliseksi arvoksi muodostui 48384,27 € sähkön ostohinnan ollessa 80 € / MWh. Näin ollen 70000 € investoinnin takaisinmaksuajaksi muodostui 1,45 vuotta.</p>	
<p>Avainsanat</p> <p>Sähköntuotanto, optimointi, lämmönsiirrin</p>	

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Energy Engineering	
Author(s) Joni Ojala	
Title of Thesis Optimization of Electricity Generation with Changes in Heating System	
Date 22 April 2022	Pages/Appendices 37
Client Organisation /Partners Metsä Fibre Villpula Sawmill	
<p>Abstract</p> <p>The main subject of the thesis was to find out how much changing the heating system could increase the production of electricity at the powerplant of Metsä Fibre Vilppula Sawmill and what kind of changes are required. The main goal of the thesis was to obtain indicative results on the impact of the change on electricity production, an estimate of the price of the investment and the payback period.</p> <p>The target of the change in heating system was to obtain cooler water for the hot water heat exchanger. Cooler water returning to the hot water heat exchanger means higher power demand from the heat exchanger, and therefore higher power demand from the steam turbine and generator. As a part of changing the heating system, old tube heat exchangers were replaced with new plate heat exchangers.</p> <p>In the computational part of the work generator power was calculated before and after changing the heating system. The calculated generator power after the change was then used to determinate the amount of electricity produced in relation to the average monthly heating demand in 2021. The average heating demand was determined as a function of outdoor temperature.</p> <p>The results of the thesis show that changing the heating system affects positively on the generator power and therefore the production of electricity. As a result, it makes the payback period somewhat short. Proportioned to the heating demand in 2021, the calculated monetary value of the connection change was € 48,384.27, with the purchase price of electricity being 80 € / MWh. Thus, the payback period for the € 70,000 investment was 1.45 years.</p>	
<p>Keywords</p> <p>Production of electricity, optimization, heat exchanger</p>	

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	6
2	TYÖN TOIMEKSIANTAJA .....	7
3	VILPPULAN SAHA .....	8
3.1	Voimalaitos.....	8
4	LÄMPÖ JA LÄMMÖN SIIRTYMINEN.....	9
4.1.1	Konduktio .....	9
4.1.2	Konvektio.....	11
4.1.3	Säteily .....	13
5	LÄMMÖNSIIRRIN.....	15
5.1	Myötävirtalämmönsiirrin .....	15
5.2	Vastavirtalämmönsiirrin .....	15
5.3	Ristivirtalämmönsiirrin .....	16
5.4	Putkilämmönsiirrin .....	16
5.4.1	U-putkilämmönsiirrin.....	17
5.5	Levylämmönsiirrin .....	17
5.5.1	Tiivisteelliset levylämmönsiirtimet .....	18
5.5.2	Juotetut levylämmönsiirtimet.....	18
5.5.3	Hitsatut levylämmönsiirtimet .....	18
6	NYKYINEN LÄMMITYSJÄRJESTELMÄN KYTKENTÄ.....	20
7	LÄMMITYSJÄRJESTELMÄN KYTKENTÄMUUTOS .....	21
7.1	Laitteistohankinnat ja arvioidut kustannukset.....	22
8	KYTKENTÄMUUTOKSEN VAIKUTUS SÄHKÖNTUOTANTOON .....	24
8.1	Sähköntuotto 100 % lämmönsiirrinteholla .....	26
8.2	Sähköntuotto 75 % lämmönsiirrinteholla .....	27
8.3	Sähköntuotto 50 % lämmönsiirrinteholla .....	27
8.4	Sähköntuotto 25 % lämmönsiirrinteholla .....	28
9	LÄMMITYSJÄRJESTELMÄN KYTKENTÄMUUTOKSEN TAKAISINMAKSUAJAN LASKENTA .....	29
10	YHTEENVETO.....	31
	LÄHTEET .....	32
	LIITE 1: VOIMALAITOSKYTKENNÄN PI-KAAVIO .....	34
	LIITE 2: TURBIINIVÄLMISTAJAN DOKUMENTAATIO .....	35

LIITE 3: 2021 PÄIVÄKOHTAISET KESKIVÄRTÖLLISET ULKOLÄMPÖTILAT JA LASKENNALLISET LÄMMÖNSIIRRINTEHOT % .....	36
LIITE 4: LÄMMITYSJÄRJESTELMÄN KYTKENTÄMUUTOKSEN TAKAISINMAKSUAJAN LASKENTA ...	37

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön pääaiheena oli selvittää, kuinka paljon lämmitysjärjestelmän kytkentämuutoksella pystytään laskennallisesti nostamaan voimalaitoksen sähköntuotantoa ja minkälaisia muutoksia se vaatii. Oman sähköntuotannon optimoinnin merkitys korostuu vallankin sähkönhintojen noustessa, minkä vuoksi ostosähkön määrä halutaan pitää mahdollisimman pienenä. Nykyisessä lämmitysjärjestelmän kytkennässä kiinteistöjen lämmitykseen käytetään puun kuivatukseen eli kuivaamolle menevää vettä, joka on noin 120 °C. Kytkentämuutoksen selvityksessä käytettiin kuivaamolta palavaa vettä, joka on noin 90 °C. Tällä kytkentämuutoksella höyryturbiinin vastapainelämmönsiirtimelle saadaan viileämpää vettä, joka vaikuttaa sen tehontarpeeseen ja näin ollen sähköntuotantoon generaattorin tehon noustessa. Sähköntuotantoon vaikuttavassa laskennassa kytkentämuutoksen lisäksi korvattiin neljä vanhaa Högforsin valmistamaa puktilämmönsiirintä uusilla levylämmönsiirtimillä ja työn tulokset rajattiin koskemaan ainoastaan näitä lämmönsiirtimiä.

Työ toteutettiin Metsä Fibre Vilppulan sahalle ja työn tavoitteeksi asetettiin saada suuntaa antavat tulokset kytkentämuutoksen vaikutuksesta sähköntuotantoon, arvio investoinnin hinnasta ja takaisinmaksuajasta. Tavoitteiden saavuttamiseksi työssä vertailtiin vanhan kytkentämuutoksen aikaista sähköntuotantoa vuodelta 2021, laskennalliseen sähköntuotantoon kytkentämuutoksen jälkeen. Suhteuttamalla laskennallisen sähköntuotannon tulokset vuoden 2021 lämmöntarpeeseen, pystyttiin laskemaan lämmitysjärjestelmän kytkentämuutoksen vaikutus sähköntuotantoon. Vertailuvuotena käytettiin vuotta 2021, joka edustaa sähköntuotannon nykytilannetta parhaiten.

Työssä keskityttiin kytkentämuutokseen ja siihen liittyvään laskennalliseen osuuteen, mutta käsiteltiin myös pääpiirteittäin teoriaa lämmön siirtymisestä ja lämmönsiirtimistä.

## 2 TYÖN TOIMEKSIANTAJA

Työn toimeksiantajana toimii Metsä Fibre Vilppulan saha. Metsä Fibre kuuluu suomalaiseen metsäteollisuuskonserni Metsä Groupiin.

Metsä Fibre on johtava puupohjaisten biotuotteiden, kuten sellun, sahatavaran, biokemikaalien ja bioenergian, tuottaja. Metsä Fibrellä on neljä sellutehdasta ja kuusi sahaa. Sellutehtaat sijaitsevat Joutsenossa, Kemissä, Raumalla ja Äänekoskella. Sahoista viisi sijaitsee Suomessa: Kyrössä, Lappeenrannassa, Merikarvialla, Rengossa ja Vilppulassa. Näiden lisäksi yhtiöön kuuluu Metsä Svirin saha Venäjällä.

Metsä Group muodostuu Metsäliitto Osuuskunnasta, siihen kuuluvista Metsä Forestista ja Metsä Woodista sekä osuuskunnan tytäryhtiöistä Metsä Tissuesta, Metsä Boardista ja Metsä Fibrestä. Metsäliitto Osuuskunta on Metsä Groupin emoyritys, ja osuuskunnan jäsenenä on lähes 100 000 metsänomistajaa. (Metsä Group 2022)

### 3 VILPPULAN SAHA

Vilppulan saha rakennettiin vuonna 1980 Pohjan Saha Oy:n toimesta korvaamaan Ruovedellä edellisenä vuotena tulipalossa tuhoutuneen Jäminkipohjan sahan. Valmistuessaan Vilppulan saha ylitti 335 000 m<sup>3</sup> vuosituotannollaan maailman suurimpien sahalaiteiden joukkoon. Vilppulan sahan elinkaareen sopii monia yrityskauppoja ja eri toimijoiden yhteensulaumia. Vuonna 1983 sahan omistus siirtyi G.A. Serlachiukselle. Vain neljä vuotta myöhemmin sahan katolle ilmestyi Metsä-Serlan tunnuksiset. Silloin Metsäliitto ja Serlachius sulautuivat Metsä-Serla Oy:ksi. Yhtenäinen Metsä identiteettiä tuotantolaitoksille luotiin vuonna 2012, jolloin puutuoteteollisuudesta tuli Metsä Wood. Viimeisin merkki-paalu tapahtui vuonna 2016, jolloin Metsä Groupin suomalaiset sahat liitettiin osaksi Metsä Fibreä. (Ammattilehti 2019.)

Vuoden 2013 lopulla Vilppulan sahalla otettiin käyttöön uusi sahansyöttö, sahalinja ja tuorekäsittelylinjat, joiden avulla saatiin tukkien mittaustekniikat ja käsittelyprosessin tarkkuus ennennäkemättömän korkealle tasolle. (Ammattilehti 2019.)

Vilppulan saha käyttää raaka-aineena havupuutukkaa, jota laitos käyttää noin 1 000 000 m<sup>3</sup> vuodessa, mikä tarkoittaa noin 40 puutavarayhdistelmän verran puuta vuoden jokaisena päivänä. (Ammattilehti 2019.) Vuosituotanto on noin 500 000 m<sup>3</sup>.

#### 3.1 Voimalaitos

Lämpövoimalaitoksella tuotetaan sähköä ja lämpöä sahan, pellettitehtaan ja kaukolämpöverkoston tarpeisiin. Sahan kuumavesipiirin lämmönlähteenä toimivat BP5-voimakattila, BE9-vesiputkikattila, POR 12 MW<sub>th</sub> öljykattila ja POR 4,7 MW<sub>th</sub> öljykattila. BP5-kattilan polttoainetehto on 16,5 MW ja lämpöteho 13,6 MW<sub>th</sub>. BE9-kattilan polttoainetehto on vastaavasti 10,8 MW ja lämpöteho 9 MW<sub>th</sub>. (Wärtsilä 2004.)

Vastapainehöyryturbiinina toimii Japanilaisen Shinkon valmistama sähköteholtaan 2,96 MW<sub>e</sub> turbo-generaattori, jonka tuorehöyryn arvot ovat 50 bar(a) ja 450 °C. Höyryturbiinin vastapainehöyryn arvot ovat 2,0 bar(a) ja 152 °C. (Wärtsilä 2004.)

Sahan ja kunnan yhteinen lämpökuorma on noin 130 GWh/a ja sähköntuotanto noin 20 GWh/a.

## 4 LÄMPÖ JA LÄMMÖN SIIRTYMINEN

Lämpö on aineen rakenneosasten liikettä. Atomit, molekyylit ja ionit ovat aineen rakenneosia ja niiden liikettä kutsutaan lämpöliikkeeksi. Mitä enemmän lämpöliikettä aineessa on, sitä lämpimämpi kappale on. (Jokinen julkaisuaika tuntematon.)

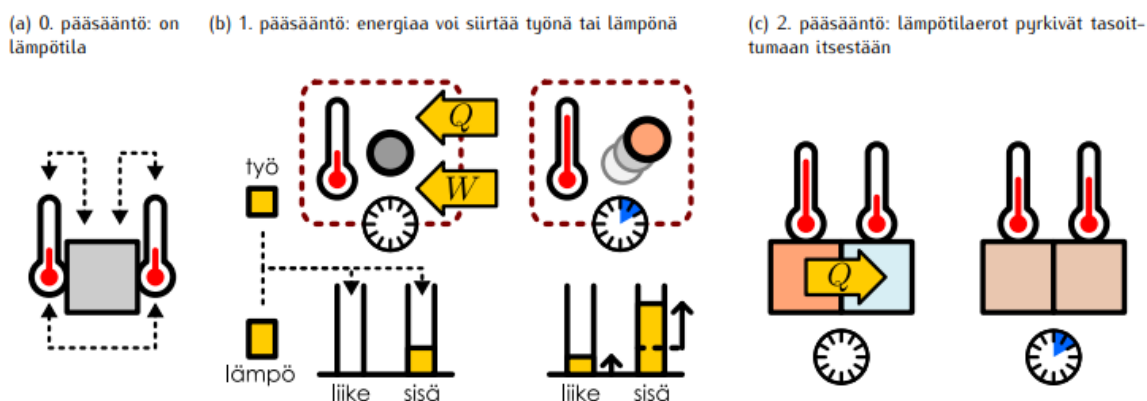
Lämpöliike voi olla suoraviivaista liikettä, pyörimistä tai esimerkiksi molekyyliden värähtelyä. Lämpöliike tapahtuu aina satunnaisesti suuntiin eikä siten ole täydellisesti ennustettavissa. Lämpöliikkeeseen liittyvää energiaa kutsutaan lämpöenergiaksi tai sisäenergiaksi, mitä enemmän lämpöenergiaa, sitä enemmän lämpöliikettä. Kun aineen lämpötilaa nostetaan, sen lämpöenergia kasvaa ja lämpöliike lisääntyy. (Salminen 2021.) Absoluuttinen nollapiste on vastaavasti aineen lämpötilan alaraja, missä atomien lämpöliike lakkaa.

Fysiikassa termillä lämpö tarkoitetaan nimenomaan prosessissa siirtyvää energiaa. Lämpönä siirtyvää energiaa merkitään tavallisesti symbolilla  $Q$ . (Hynninen 2021, 280.)

Lämpö voi siirtyä kolmella eri mekanismilla, jotka ovat konduktiolla eli johtumalla, konvektiolla eli kuljettumalla tai säteilyä (Lampinen, Kotiaho 2015, 1).

### 4.1.1 Konduktio

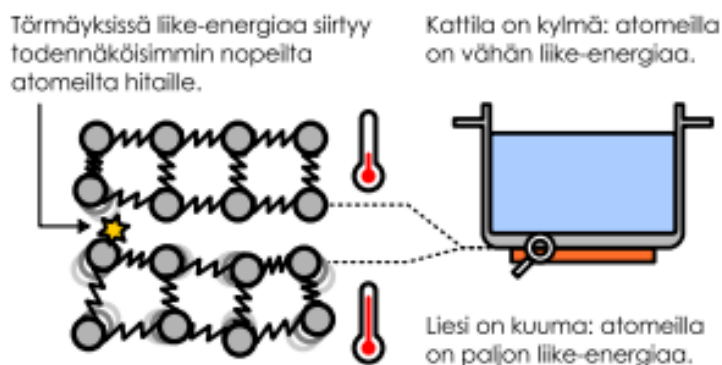
Lämmön olemukseen kuuluu, että lämpötilaerot pyrkivät tasaantumaan. Energia virtaa lämpönä aina itsestään korkeammassa lämpötilassa olevasta kappaleesta matalammassa lämpötilassa olevaan kappaleeseen eli kuumasta kylmään. Tilannetta missä kappaleet ovat saman lämpöisiä kutsutaan termodynaamiseksi tasapainoksi. Tämä tasapainotila on termodynamiikan nollannen pääsäännön seuraus. Se, että lämpö virtaa itsestään aina kuumasta kylmään eli, että systeemit pyrkivät tasapainoon on puolestaan termodynamiikan toinen pääsääntö. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen, Pakkanen 1999, 189; Hynninen 2021, 280.) Kuvassa 1. on esitettyä termodynamiikan pääsäännöt.



KUVA 1. Termodynamiikan pääsäännöt (Hynninen 2021, 280).

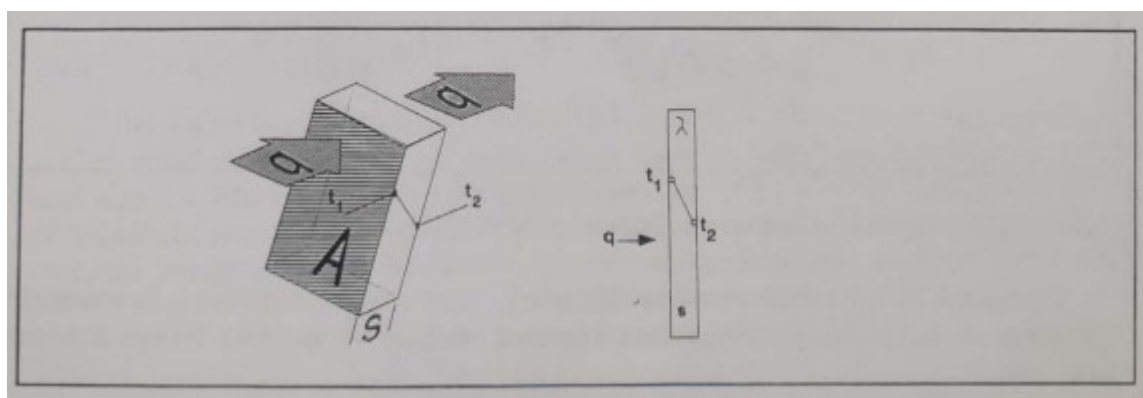
Otetaan esimerkkinä lämmön siirtyminen kuumalta liedeltä kylmään kattilaan. Hynnisen (2021, 280) mukaan lämmön siirtyminen mikroskooppisesti toimii niin, että kuumien lieden atomit värähtelevät huomattavasti rajummin kuin kylmän kattilan atomit. Lieden ja kattilan rajapinnalla nämä atomit

kohtaavat toisensa, ja törmätessään ne vaihtavat energiaa keskenään. Periaatteessa atomien välisessä törmäyksessä energiaa voi siirtyä kumpaan tahansa suuntaan riippuen siitä, miten atomit satuvat toisensa kohtaamaan. Todennäköisyys sille, että nopeasti liikkuvat lieden atomit tönäisevät kattilan atomit nopeampaan liikkeeseen hidastuen samalla itse, siirtäen energiaa nimenomaan liedestä kattilaan, on kuitenkin hyvin paljon todennäköisempää (KUVA 2.). Ja koska törmäileviä atomeja on niin paljon, makroskooppisessa mittakaavassa energiaa havaitaan siirtyvän vain yhteen suuntaan, liedestä kattilaan.



KUVA 2. Lämmön siirtyminen atomitason vuorovaikutuksissa (Hynninen 2021, 280.)

Lämpöenergian siirtymistä kuumemmasta kylmempään aineeseen kutsutaan konduktioksi eli lämmön johtumiseksi (Huhtinen ym. 1999, 189). Kuva 3. esittää lämmönjohtavuuden määrittymisen graafisesti.



KUVA 3. Levyn lämmönjohtavuuden määrittäminen (Huhtinen ym. 1999, 189).

Johtumalla siirtynyt lämpövirta saadaan kaavasta 1. (Huhtinen ym. 1999, 191)

$$q = \frac{\lambda \cdot A}{s} (t_1 - t_2) \quad (1)$$

Missä:

$q$  = johtumalla siirtynyt lämpövirta (J)

$\lambda$  = lämmönjohtavuus [ $\text{W/m}^\circ\text{C}$ ]

$A$  = levyn pinta-ala [ $\text{m}^2$ ]

$s$  = seinämän paksuus

$t_1$  ja  $t_2$  = pintalämpötilat [ $^\circ\text{C}$ ]

Lämpövirta on suoraan verrannollinen lämmönsiirtymispinta-alaan ja lämpötilaeroon, sekä materiaalin lämmönjohtavuuteen ja kääntäen verrannollinen levyn paksuuteen (Huhtinen ym. 1999 , 191).

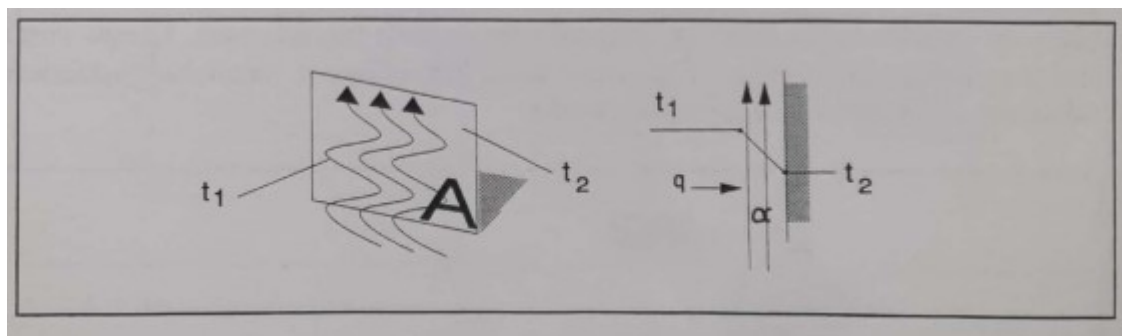
Eri aineiden lämmönjohtavuus vaihtelee. Metallit johtavat lämpöä hyvin ja kaasut huonosti. Eristysaineiden eristyskyky perustuu umpinaisessa tilassa olevan ilman pieneen lämmönjohtavuuteen. (Huhtinen ym. 1999 , 191.) Taulukko 1. luettelee muutamien lämmönsiirtomateriaalien lämmönjohtavuuksia.

Taulukko 1. Lämmönsiirrinmateriaalien lämmönjohtavuuksia [ $\text{W/mK}$ ] (Huhtinen, ym. 1999 , 190).

Materiaali	Lämmönjohtavuus $\text{W/mK}$
Kupari	370
Alumiini	210
Teräs	45
Ruostumaton teräs	20
Kattilakivi	0,08–2,3
Eristeet	0,03–0,1

#### 4.1.2 Konvektio

Konvektioksi kutsutaan - - [lämpöenergian siirtymistä] nestemäisestä tai kaasumaisesta aineesta kiinteään pintaan ja päinvastoin (kuva 4.). Konvektiota on kahta lajia, vapaata ja pakotettua. Pakotetussa konvektiossa lämmönsiirtoa parantava virtaus synnytetään jonkin laitteen avulla, esimerkiksi pumpulla tai puhaltimella. Vapaaksi konvektioksi kutsutaan lämmönsiirtoa, joka syntyy seisovan nesteen tai kaasun ja kiinteän aineen välillä. Tällöinkin nesteeseen tai kaasuun syntyy lämpöä siirtävä virtaus lämpötilaerojen aiheuttamien tiheyserojen vaikutuksesta eikä lämmönsiirto tapahdu johtamalla. (Huhtinen ym. 1999 , 191.)



KUVA 4. Konvektiivinen lämpövirta virtaavasta aineesta levyyn (Huhtinen ym. 1999 , 190).

Konvektiolla virtaavasta kaasusta siirtynyt lämpövirta levyyn saadaan kaavasta 2. (Huhtinen ym. 1999 , 190).

$$q = \alpha_k * A(t_1 - t_2) \quad (2)$$

Missä:

$q$  = siirtynyt lämpövirta [J]

$\alpha_k$  = konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ]

$A$  = seinämän pinta-ala [ $\text{m}^2$ ]

$t_1$  = virtaavan aineen lämpötila [ $^\circ\text{C}$ ]

$t_2$  = seinämän lämpötila [ $^\circ\text{C}$ ]

Lämmönsiirtymiskerron  $\alpha_k$  riippuu suuresti virtaavan aineen laadusta, virtausnopeudesta, pinnankarheudesta, paineesta ja vastaavista tekijöistä (Huhtinen ym. 1999 , 191). Tyypillisiä konvektiivisen lämmönsiirron lämmönsiirtokertoimia on taulukossa 2.

Taulukko 2. Konvektiivisen lämmönsiirron lämmönsiirtokertoimia [W/mK] (Huhtinen ym. 1999 , 191).

Väliaine	Lämmönsiirtokerroin (W/m <sup>2</sup> K)
Paikallaan seisova vesi	100–500
Virtaava vesi	500–10 000
Kiehuva vesi	1000–60 000
Lauhtuva vesi (kalvo)	6000–17 000
Paikallaan seisova ilma	3–15
Virtaava ilma	10–100

Virtaavan aineen lämpötilan muuttuminen samaksi kuin pinnan lämpötila ja sen nopeuden muutos nollaan tapahtuu rajakerroksessa, jonka paksuus riippuu pakotetussa konvektiossa pääsääntöisesti rajakerroksen ulkopuolisesta virtausnopeudesta. Koska lämpö siirtyy lähes kokonaan johtumalla rajakerroksen läpi, konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin on lämmönjohtavuus jaettuna rajakerroksen paksuudella. Huomataan, että nesteillä on suuri lämmönsiirtokerroin, koska niiden lämmönjohtavuus on suuri. Jos pelkkä höyry lauhtuu lämpöpintaan, ei rajakerrosta synny. Ainoa lämpövastus muodostuu lauhtuneesta nestekerroksesta ja lämmönsiirtymiskerroin on hyvin suuri. Mikäli nesteeseen on kerääntynyt höyrystä ilmaa tai muuta lauhtumatonta kaasua, heikkenee lämmönsiirtymiskerroin suuresti. (Huhtinen ym. 1999 , 190-191)

#### 4.1.3 Säteily

Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on yli absoluuttisen nollapisteen (-273,15 °C), lähettävät lämpötilansa perusteella energiaa sähkömagneettisena säteilynä. Kiinteät ja nestemäiset aineet säteilevät laajalla spektrialueella, kun taas kaasujen spektrien aallonpituusalueet ovat kapeita. Kun kappaleen lämpötila on sama kuin ympäristön, ympäristö säteilee yhtä paljon lämpöä kuin kappale ympäristöön. Tällöin lämpöä ei siirry, mutta lämpötilaeron suureudessa myös lämmön siirtyminen kylmempään kappaleeseen suurenee. Kappaleesta säteilevä lämpövirta saadaan kaavasta 3. (Huhtinen ym. 1999 , 191).

$$q = CA \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 \quad (3)$$

Missä:

$q$  = kappaleesta säteilevä lämpövirta (J)

$C$  = säteilyluku [W/m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>]

$A$  = pinta-ala [m<sup>2</sup>]

$T_1$  = kappaleen lämpötila kelvineinä [K]

Kappaleen säteilyluku riippuu mm. kappaleen pinnan laadusta ja kemiallisista ominaisuuksista. Säteilyluvun arvo voi korkeintaan olla  $5,67 \text{ [W/m}^2 \text{ K}^4\text{]}$ .--. Koska ympäristö säteilee lämpöä kappaleeseen, sen kompensoiminen on otettava huomioon, kun lasketaan siirtyvää lämpövirtaa.

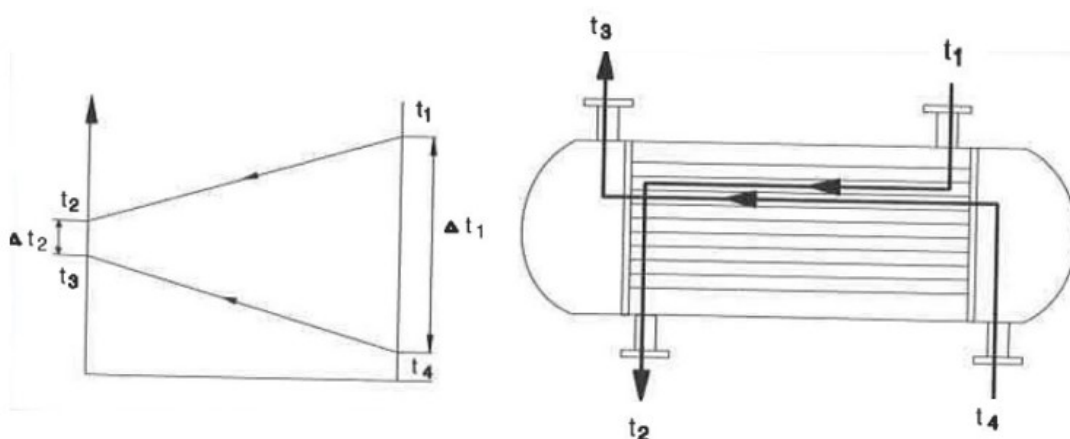
## 5 LÄMMÖNSIIRRIN

Lämmönsiirrin on sisäistä lämpöenergiaa kahden tai useamman erilämpöisen fluidin välillä siirtävä laite. Useimmissa lämmönsiirtimissä fluidit erotetaan toisista lämmönsiirtopinnoilla ja ideaalitilanteessa fluidit eivät sekoitu keskenään. Lämmönsiirtimiä käytetään mm. prosessiteollisuudessa, energiatuotannossa ja polttoaineteollisuudessa. Jokapäiväisessä elämässä törmäämme lämmönsiirtimiin esimerkiksi autoissa, missä ”syyläri” jäähdyttää moottorissa kiertävää nestettä niin, että nesteen lämpötila pysyy vakiona estäen moottorin ylikuumenemisen. (Thulukkanam 2013, 1.)

Lämmönsiirtimet jaetaan joko virtaussuunnan tai rakennetyypin mukaan. Virtaussuunnat ovat: myötä, vasta ja ristivirta. (Lämmönsiirtimet 2021.) Tässä työssä keskitymme rakennetyypeistä putki- ja levylämmönsiirtimiin, koska ne ovat käytössä olevat siirrintyypit Vilppulan sahalla.

### 5.1 Myötävirtalämmönsiirrin

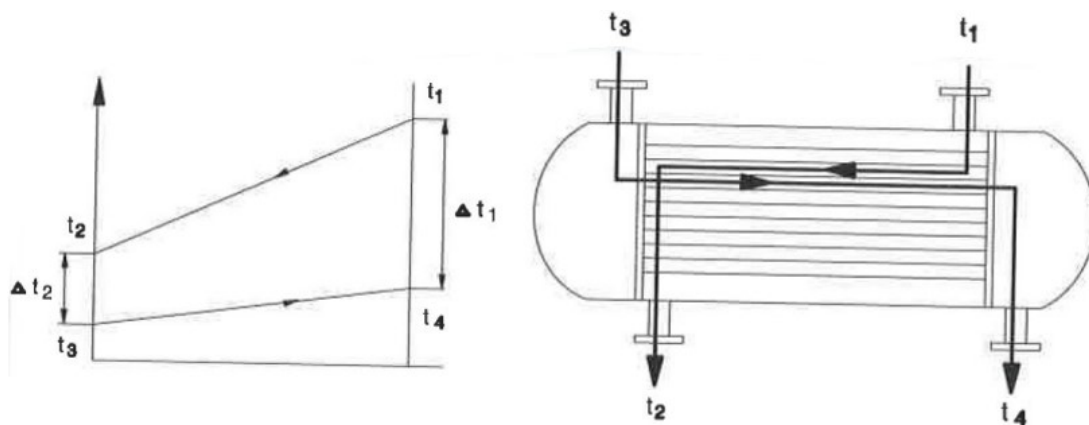
Myötävirtalämmönsiirtimessä kuuma- ja kylmä fluidi liikkuvat samaan suuntaan, jolloin alussa suuri lämpötilaero pienenee nopeasti lähestyen nollaa. Myötävirtalämmönsiirtimessä lämmitettävän aineen ( $t_3$ ) lämpötila ei voi nousta korkeammaksi kuin mitä lämmittävän aineen ( $t_2$ ) poistumislämpötila on. (Lämmönsiirtimet 2021.) Kuvassa 5. nähdään myötävirtalämmönsiirtimen lämpötilaerojen kehittyminen.



KUVA 5. Myötävirtalämmönsiirtimen lämpötilaerot (Lämmönsiirtimet 2021)

### 5.2 Vastavirtalämmönsiirrin

Vastavirtakytkennässä kuuma- ja kylmä fluidi liikkuvat eri suuntaan minkä ansiosta lämmitettävän aineen ( $t_4$ ) lämpötila voi lämmetä enemmän kuin mitä lämmittävän aineen ( $t_2$ ) ulostulolämpötila on (Lämmönsiirtimet 2021). Tämä on mahdollista, koska poistuva kylmä virta on kontaktissa kaikkein kuumimman sisään tulevan kuuman virran kanssa, ja poistuva kuuma virta on kaikkein kylmimmän kylmän virran kanssa (Virtaustekniikka ja lämmönsiirto 2019) . Kuvassa 6. nähdään vastavirtalämmönsiirtimen lämpötilaerojen kehittyminen.



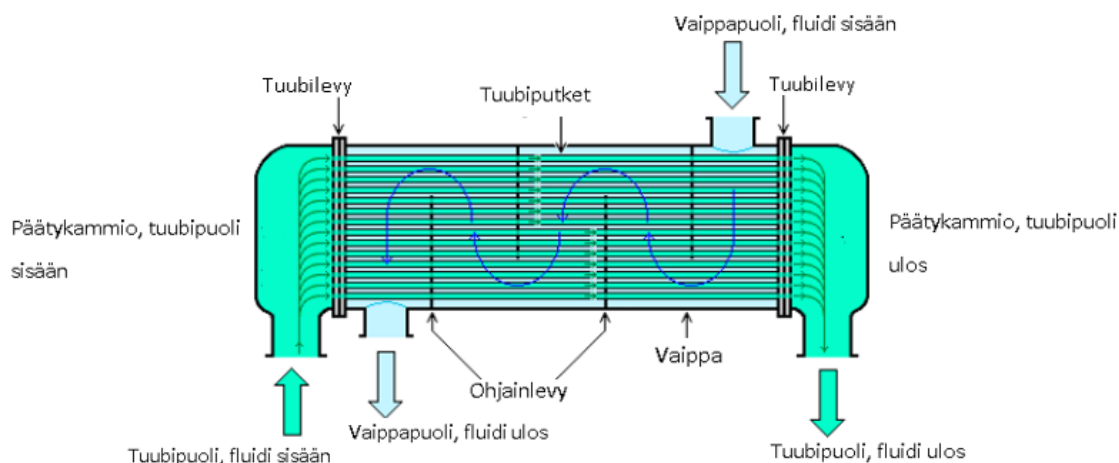
KUVA 6. Vastavirtalämmönsiirtimen lämpötilaerot (Lämmönsiirtimet 2021)

### 5.3 Ristivirtalämmönsiirrin

Ristivirtakytkennässä kuuman ja kylmän fluidin virtaukset muodostavat 90 ° kulman toisiinsa nähden. Tämän tyyppin lämmönsiirtimen lämmönsiirto-ominaisuudet ovat myötävirta- ja vastavirtalämmönsiirtimen välimaastossa.

### 5.4 Putkilämmönsiirrin

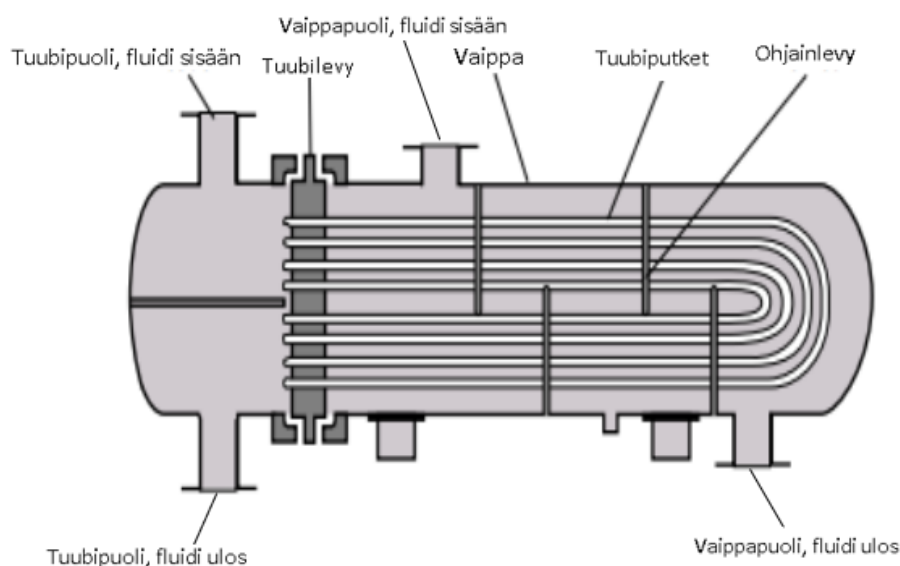
Putkilämmönsiirtimen soveltuvuus korkean paineen ja lämpötilan sovelluksissa tekee siitä yhden käytetyimmistä lämmönsiirrintyypeistä prosessiteollisuudessa (Thulukkanam 2013, 8). Putkilämmönsiirrin koostuu yleensä sylinterin muotoisesta vaipasta ja putkista eli tuubeista, jolloin sen rakenne on yksinkertainen ja vankka, eikä näin ollen vaadi erityisiä huoltotoimenpiteitä. Putkilämmönsiirtimessä fluidit kulkevat niin putki- kuin vaippapuolella. Päätykammiot ja tuubiputket muodostavat yhdessä putkipuolen ja putkien ympärillä oleva sylinterivaippa vaippapuolen. Tuubiputket kiinnitetään joko hitsaamalla tai mankeloimalla putkilevyihin. Fluidit saatetaan lämmönsiirtimeen ja sieltä pois päätykammioiden ja vaipassa sijaitsevien yhteiden kautta. Tuubien tukemiseksi ja vaippapuolen fluidin kierron edistämiseksi vaippapuolella käytetään niin sanottuja ohjainlevyjä. (Vahasilta julkaisuaika tuntematon.) Kuva 7. esittää yksivaiheisen suoraputkilämmönsiirtimen rakenteen.



KUVA 7. Yksivaiheisen suoraputkilämmönsiirtimen rakenne (mukaillen Padleckas, 2006)

#### 5.4.1 U-putkilämmönsiirrin

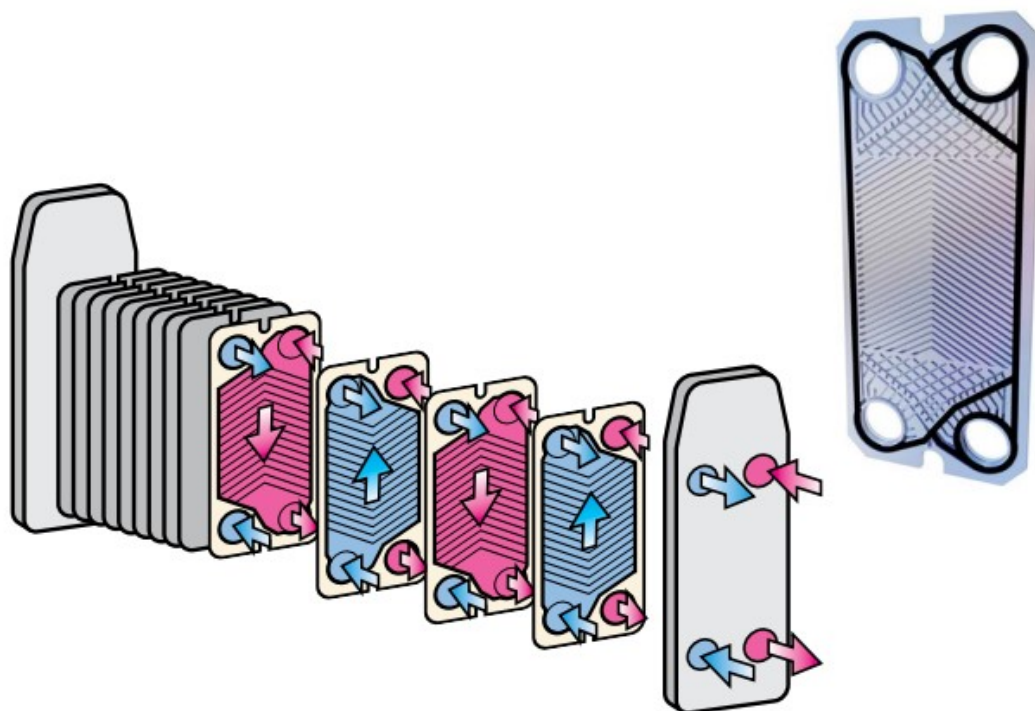
U-putkilämmönsiirtimen rakenne eroaa suoraputkilämmönsiirtimestä siten, että tuubiputkien sisässä kulkeva fluidi ohjataan aina sisään ja ulos samasta päädyistä. Tämän mahdollistaa päätykammiossa oleva eristävä väliseinä ja tuubiputket, jotka tekevät mutkan vaippaosassa ja palaavat takaisin päätykammioon, mistä nimitys u-putkilämmönsiirrin. (Koivuharju, 2016.) Kuva 8. esittää u-putkilämmönsiirtimen rakenteen.



KUVA 8. U-putkilämmönsiirtimen rakenne (mukaillen Koivuharju. 2016, 33)

#### 5.5 Levylämmönsiirrin

Levylämmönvaihdin koostuu pakasta ohuita metallisia levyjä, jotka ovat poimutettuja optimaalisen lämmönsiirron saavuttamiseksi. Poimutuksella lämmönvaihtopinta-alaa saadaan yli 10 % enemmän verrattuna sileään levyyn. Muotoiltujen levyjen tukipisteet pitävät levyt erillään, muodostaen kanavia, joita pitkin neste levylämmönsiirtimessä virtaa. Neste saapuu kanavaan ja poistuu sieltä levyjen kulmissa olevien aukkojen kautta. Yksittäisen levyn toisella puolella virtaa kylmä ja toisella kuuma neste. Levyt ovat varustettu reunoja ympäröivillä tiivisteillä, jotka estävät sisäisen sekoittumisen ja ulosvuodon. Levypakka kiristetään kokoon niitä tukevaan kehikkoon päätylevyn avulla. (Oph 2022.) Kuvassa 9. on tiivisteellisen levylämmönsiirtimen perusrakenne.



KUVA 9. Tiivisteellisen levylämmönsiirtimen perusrakenne (Oph 2022)

#### 5.5.1 Tiivisteelliset levylämmönsiirtimet

Tiivisteelliset levylämmönsiirtimet soveltuvat pääasiassa nestemäisille väliaineille ja matalapaineiselle höyrylle. Tyypillisen tiivisteellisen levylämmönsiirtimen käyttöpaine on 0-25 bar(g), maksimi lämpötila tavanomaisilla tiivisteillä 160 °C ja erikoistiivisteillä 200 °C ja virtausmäärät 0-1000 kg/s. Rakenteensa ansiosta tiivisteellisten levylämmönsiirtimen lämmönsiirtopinta-alaa on mahdollista kasvattaa tai pienentää ja samasta syystä myös niiden tarkastaminen ja mekaaninen puhdistaminen on mahdollista. (Thulukkanam 2013, 5.)

#### 5.5.2 Juotetut levylämmönsiirtimet

Juotetun levylämmönsiirtimen rakenne perustuu etu- ja takakannen väliin sijoitettuun levypakettiin mikä ei sisällä tiivisteitä, vaan ruostumattomat levyt juotetaan yhteen kuparilla. Tämä rakenne poistaa painavien päätylevyjen tarpeen, joka mahdollistaa juotetun levylämmönsiirtimen verrattain pienen koon ja painon. Lisäksi rakenteen etuna on korkeampi paineen- ja lämmönkesto verrattuna tiivisteelliseen levylämmönsiirtimeen, maksimi käyttöpaineen ollessa 30 bar(g) ja lämmönkesto jopa 400 °C. (Wang, Sundén & Manglik, 2007, 18.)

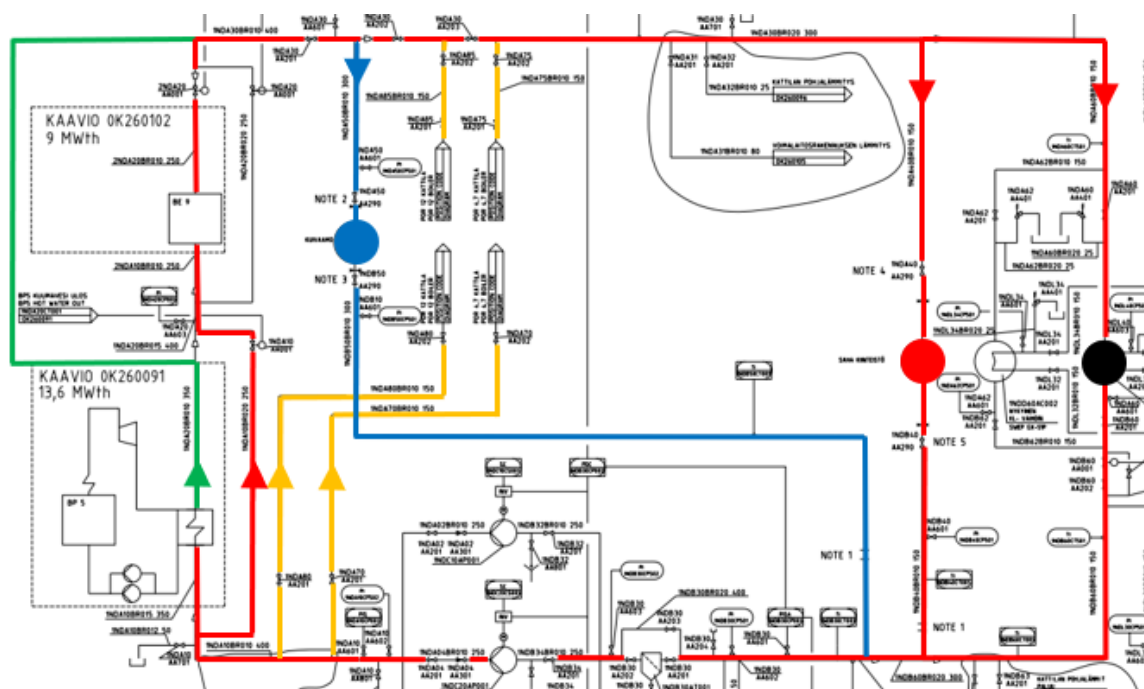
#### 5.5.3 Hitsatut levylämmönsiirtimet

Hitsatussa levylämmönsiirtimessä ulkoreunoistaan hitsatut levyt kiristetään tavanomaisen levylämmönsiirtimen päätylevyjen väliin. Tällä tavoin hitsatut levyt mahdollistavat levypaketin kutistumisen- ja laajentumisen pituussuunnassa, kun lämpötila ja paine vaihtelee, jolloin levypaketin väsymiskestävyys paranee. Hitsatut levylämmönsiirtimet soveltuvatkin tämän ansiosta prosesseihin, joissa paine-

ja lämpötila vaihtelee nopeasti ja lämmönsiirtimeltä vaaditaan kovaa kestävyyttä. Paineen- ja lämmönkesto on verrattavissa juotettuihin levylämmönsiirtimiin.

## 6 NYKYINEN LÄMMITYSJÄRJESTELMÄN KYTKENTÄ

Nykyinen sahankiinteistöjen lämmitysjärjestelmäkytkentä on toteutettu siten, että lämmitykseen käytetään puun kuivatukseen menevää vettä, joka on noin 120 °C. Edellä mainittu lämpötila selittyy puun kuivatuksen tarpeista. Kuvassa 10. on esitetty nykyinen voimalaitoskytkentä eri värein voimalaitoksen toimittajan tekemän PI-kuvan päälle. Lämpöä saadaan jaettua punaisella, vihreällä ja oranssilla merkittyjen putkilinjojen kautta. Punaisella ja vihreällä merkityt putkilinjat ovat lämmönjaon tavanomainen reitti ja silloin tarvittava lämpö tuotetaan kuorikattiloilla. Vihreällä merkitty putkilinja on vuonna 2016 tehty putkistomuutos missä kuorikattiloiden kytkentä on muutettu sarjakytkennästä rinnankytkentään. Oranssilla merkityt linjat ovat huippukuorma- ja häiriötilanteissa toimivien POR-öljykattiloiden putkilinjat. Sininen pallo kuvaa kulutuskohteena kuivaamoa, punainen pallo sahan kiinteistöä ja musta pallo kaukolämpöä. Voimalaitoskytkennän PI-kaavio on nähtävissä kokonaisuudessa liitteessä 1.

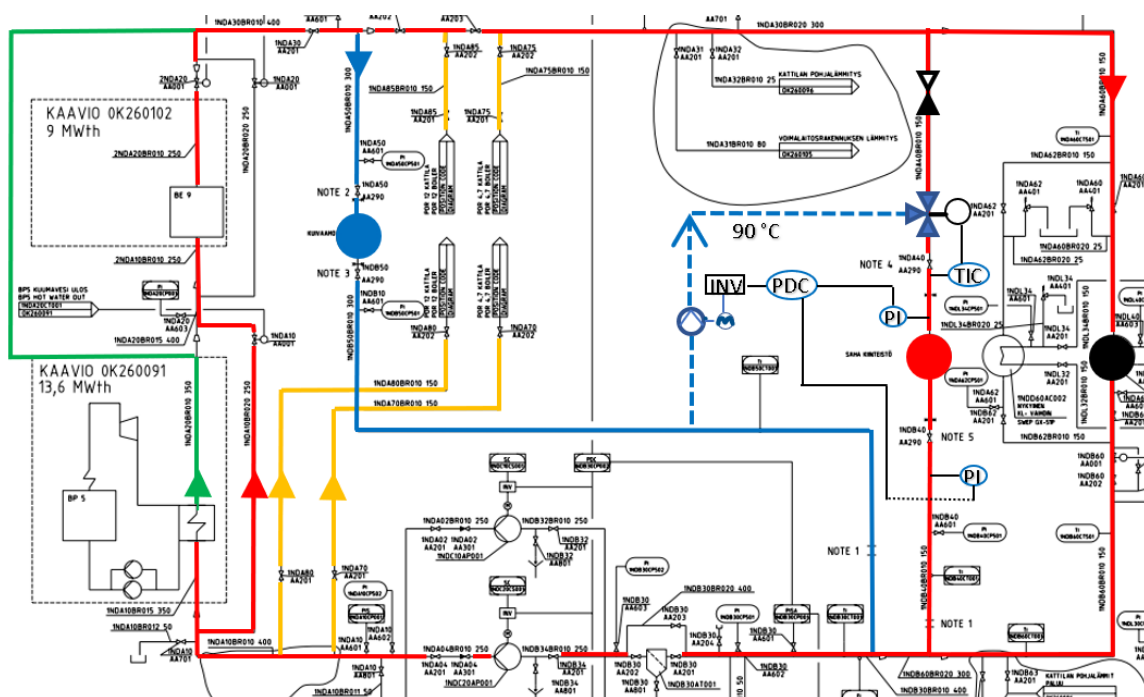


KUVA 10. Voimalaitoskytkentä ja nykyinen sahan kiinteistöjen lämmityskytkentä (Wärtsilä 2004; Ojala 2022)

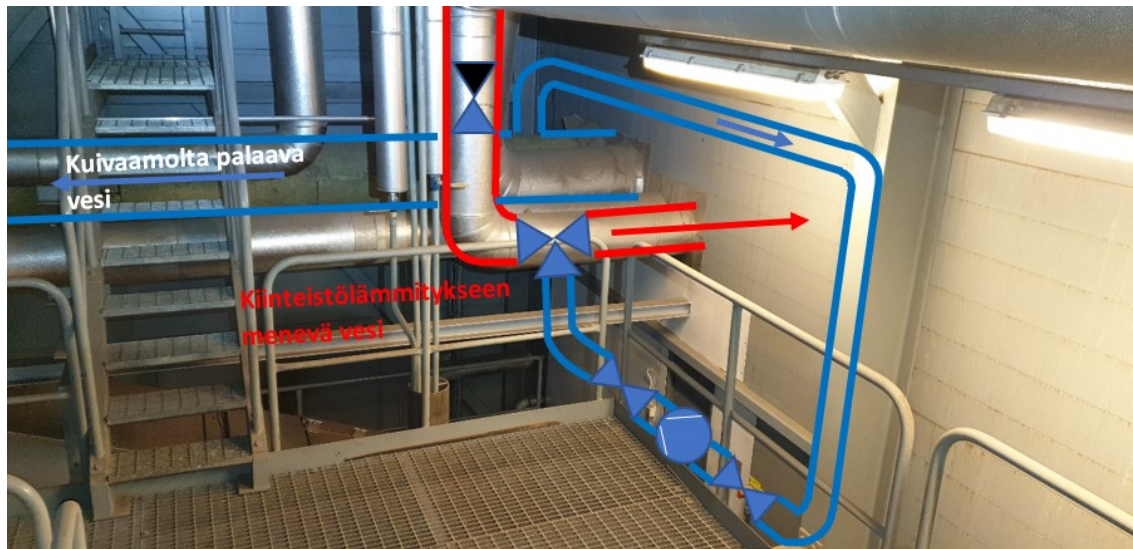
## 7 LÄMMITYSJÄRJESTELMÄN KYTKENTÄMUUTOS

Lämmitysjärjestelmän kytkentämuutoksessa käytetään puun kuivatuksen paluupuolen vettä, joka on noin  $90\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  riippuen vuodenajasta. Tällä kytkentämuutoksella höyryturbiinin vastapaineläm-mönsiirtimelle saadaan viileämpää vettä, joka vaikuttaa sen tehontarpeeseen ja näin ollen sähkön-tuotantoon.

Sahan kiinteistöjen lämmönvaihtimien toisiopuolen korkein tarvittava lämpötila lämmityskaudella on noin  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ensiöpuolen veden tulolämpötilaksi riittäisi näin ollen noin  $90\text{--}95\text{ }^{\circ}\text{C}$  vesi. Kuvassa 11. on hahmoteltuna sinisellä katkoviivalla lämmitysjärjestelmän kytkentämuutos voimalaitoksen toimittajan tekemän PI-kuvan päälle ja siihen tarvittavat osat. Kuvassa 12. on hahmoteltuna kytkentämuutokseen tarvittavat putkistomuutokset, laitteet ja niiden kuvitteellinen sijoitus kentällä.



**KUVA \_.** Voimalaitoskytkentä ja muutos sahan kiinteistöjen lämmityskytkentään (Wärtsilä, 2004; Ojala 2022)



Kuva 12. Putkistomuutokset ja laitesijoitukset (Ojala 2022)

### 7.1 Laitteistohankinnat ja arvioidut kustannukset

Lämmitysjärjestelmän kytkentämuutos vaatii laitteistohankintoja, putkistomuutoksia ja muutoksia sähköautomaation. Taulukossa 3. on listattuna kaikki työhön tarvittavat laitteistohankinnat- ja työt ja niistä arvioidut kustannukset. Taulukossa 3. esitetyt hinnat ovat saatu lämmönsiirrinvalmistajalta, pumppuvalmistajalta ja eri maahantuojien sivustoilta.

TAULUKKO 3. Lämmitysjärjestelmän kytkentämuutoksen arvioidut kustannukset (Ojala 2022)

Laitteisto	kpl	á hinta €
Levylämmönvaihdin 0,15 MW	1	6950
Levylämmönvaihdin 0,3 MW	2	7450
Levylämmönvaihdin 1,1 MW	1	14900
Taajuusmuuttajaohjattu kiertovesipumppu	1	10000
Kolmitieventtiili DN150	1	4950
Palloventtiili DN150	4	450
Takaiskuventtiili DN150	1	500
Paine-eromittaus yokogawa	1	1000
Lämpötilalähetin yokogawa	1	500
Lämpötila-anturi ja hitsattava suojatasku	1	300
Työosuus	kpl	á hinta €
Putkistomuutokset ja asennukset	1	15000
Sähköautomaatiotyö	1	8000
	yhteensä:	70000

## 8 KYTKENTÄMUUTOKSEN VAIKUTUS SÄHKÖNTUOTANTOON

Laskennallinen kuumavesijärjestelmän kytkentämuutoksen vaikutus sähköntuotantoon suoritettiin vertaamalla aluksi lämmönsiirtimien ensiöpuolelta palaavien vesien loppulämpötilaa samalla lämmönsiirrinteholla ennen muutosta (putkilämmönvaihtimet + 115 °C ensiöpuolen tulovesi) ja muutoksen jälkeen (uudet levylämmönsiirtimet + 90 °C ensiöpuolen tulovesi). Laskennassa käytetyt uusien lämmönsiirtimien arvot saatiin lämmönsiirrinvalmistajalta, ja laskennassa huomioitiin ainoastaan korvattavien putkilämmönvaihtimien vaikutus sähköntuotantoon. Seuraavassa vaiheessa laskettiin palaavien vesien loppulämpötilojen ja massavirtojen avulla kuumavesivaihtimesta tarvittava teho, ja viimeisessä vaiheessa laskettiin mikä generaattorin teho on kyseisellä kuumavesivaihtimen teholla. Laskenta päädyttiin suorittamaan 100 %, 75 %, 50 % ja 25 % lämmönsiirrintehoilla. 100 % teho vastaa -20 °C ulkolämpötilaa, 75 % teho -13,33 °C ulkolämpötilaa, 50 % teho -6,66 °C ulkolämpötilaa ja 25 % teho 0 °C ulkolämpötilaa. Koska ulkolämpötilan suhde lämmönsiirrintehoon ja generaattorin tehon suhde höyryn kulutukseen olivat lineaariset, interpoloitiin osatehojen tulokset Excelin lineaarisen ennustefunktion avulla.

Ensiöpuolelta palaavien vesien yhteenlaskettu loppulämpötila laskettiin kaavan 4. avulla.

$$T = \frac{(m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2)}{(m_1 c_1 + m_2 c_2)} \quad (4)$$

Missä:

T = nesteen loppulämpötila °C

m1 = nesteen 1. massa kg

c1 = nesteen 1. ominaislämpökapasiteetti kJ/kg°C

T1 = nesteen 1. lämpötila °C

m2 = nesteen 2. massa kg

c2 = nesteen 2. ominaislämpökapasiteetti kJ/kg°C

T2 = nesteen 2. lämpötila °C

Osatehoilla yksilökohtaisen lämmönsiirtimen ensiöpuolelta palaavan veden loppulämpötilan laskenta suoritettiin lukitsemalla ensiöpuolen tulolämpötila suunnittelulämpötilaan ja vähentämällä ensiöpuolen massavirtaa lineaarisesti lämmönsiirrintehon kanssa, jolloin palaavan veden lämpötila pystyttiin iteroimaan lämmönsiirtimistä tarvittava tehon mukaan. Iterointi suoritettiin Excelin tavoite haulla.

Koska sähköntuotantoon vaikuttavat kaikki kuumavesiverkon lämmönkuluttajat oli nekin huomioitava laskennassa. Lämmönkuluttajat ovat kuivaamo/pellettitehdas, sahan kiinteistöt ja kaukolämpö. Laskennan jokaisessa tehopisteessä käytettiin taulukossa 4. olevia vakioarvoja kuivaamon/pellettitehtaan ja kaukolämmön kanssa, jolloin tuloksista saatiin vertailukelpoiset.

Taulukko 4. Laskennassa käytetyt lämmönkuluttajien vakioarvot (Ojala 2022)

Lämmönkuluttaja	Laskennallinen teho [MW]	Meno lämpötila [°C]	Paluu lämpötila [°C]	Virtaus kg/s
Kuivaamo/pellettit ehdas	5,0	115	90	47,73
Kaukolämpö	4,0	115	75	23,87

Kun kaikkien lämmönkuluttajien kokonaismassavirrat ja palaavien vesien loppulämpötilat tiedettiin, laskettiin kuumavesivaihtimesta tarvittava teho kaavan 5. avulla.

$$P = mc(T1 - T2) \quad (5)$$

missä:

P = kuumavesivaihtimen teho kW

m = veden massavirta kg/s

c = veden ominaislämpökapasiteetti 4,19 kJ/kg°C

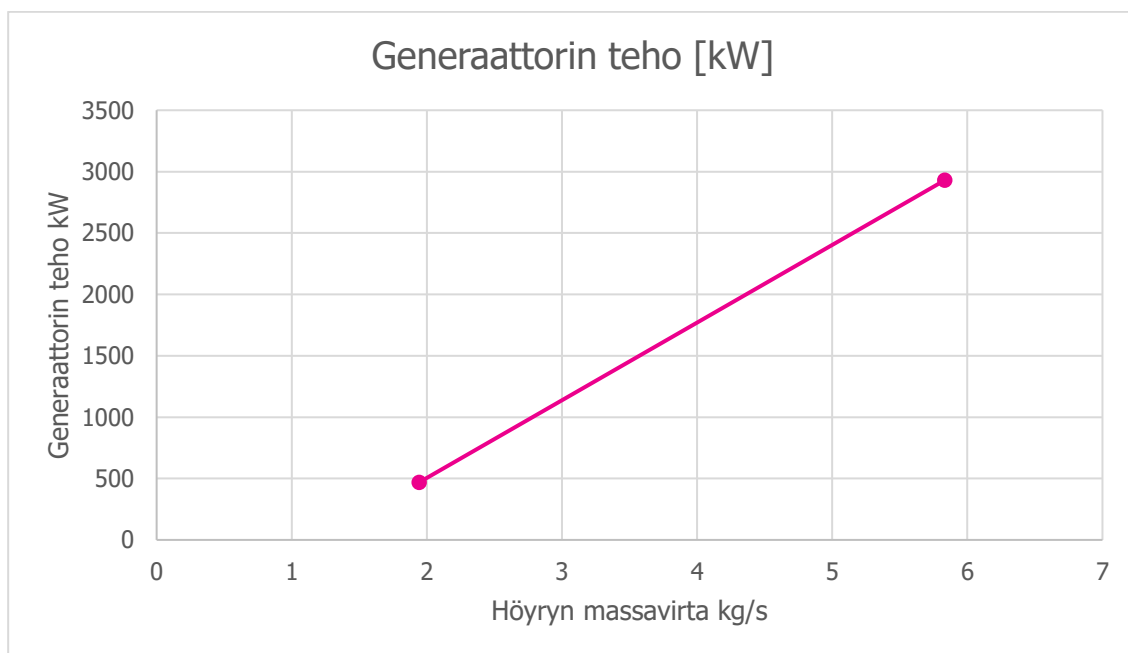
T1 = kuumavesivaihtimelta lähtevän veden entalpia lämpötila °C

T2 = kuumavesivaihtimelle palaavan veden entalpia lämpötila °C

Seuraavassa vaiheessa määritettiin höyryturbiinivalmistajan dokumentaatiotietojen (liite 2.) ja tarvittavan kuumavesivaihtimen tehon avulla mikä generaattorin teho on tiedetyllä kuumavesivaihtimen teholla. Taulukossa 5. on laskentaesimerkki generaattorin interpoloidusta tehosta ja kuvassa 13. kuvaaja generaattorin tehosta höyryn massavirran funktiona.

Taulukko 5. Generaattorin interpoloitu teho (Ojala 2022)

Höyryn massavirta [kg/s]	Vastapainehöyryn entalpia $H_1$	Entalpia $H_2$	Kuumavesivaihtimen teho [kW ]
4,34	2772	504,7	9850,40
Tiedetty höyryn massavirta [kg/s]	Tiedetty generaattorin teho [kW]	Haluttu höyryn massavirta [kg/s]	Interpoloitu generaattorin teho [kW]
1,94444	470	4,34	1988,24
5,83333	2930		



KUVA 13. Generaattorin teho höyryn massavirran funktiona (Ojala 2022)

### 8.1 Sähköntuotto 100 % lämmönsiirrinteholla

Laskennan ensimmäisessä tehopisteessä lämmönsiirtimet olivat 100 % teholla. Taulukossa 6. on esitettyä Högfors putkilämmönvaihdinten tyyppikilpien arvot. Tyyppikilven arvoilla lämmönsiirrin on nimellistehollaan eli 100 %:n teholla.

Taulukko 6. Högfors putkilämmönvaihdivien tyypikilpien arvot (Ojala 2022)

Käyttöalue	Valmistaja	Valmistusvuosi	Teho [MW]	Ensiö lämpötila sisään [°C]	Ensiö lämpötila ulos [°C]	Ensiö virtaus kg/s
Ruokala	Högfors:	1980	0,15	115	55	0,6
Toimisto	Högfors:	1980	0,3	115	55	1,2
Sosiaalililat	Högfors:	1980	0,3	115	55	1,2
Tasaamo	Högfors:	1980	1,1	115	65	5,26

100 % teholla putkilämmönvaihtimilta palaavien vesien laskennalliseksi loppulämpötilaksi saatiin kaavan 4. avulla 61,37 °C, kuumavesijärjestelmän laskennalliseksi kokonaisvirtaukseksi 79,86 kg/s, loppulämpötilaksi 82,56 °C ja kokonaistehontarpeeksi 10,86 MW, kun laskennassa käytettiin taulukon 3. vakioarvoja ja 115 °C ensiöpuolen tulolämpötilaa. Kuumavesijärjestelmän kokonaistehontarve laskettiin kaavan 5. avulla.

Höyryturbiinitoimittajan dokumentaatiosta saatujen tietojen avulla määritettiin, että saadaksemme 10,86 MW teho kuumavesivaihtimesta, pitää turbiinille saada tulistettua höyryä 4,61 kg/s, jonka prosessiarvot ovat 450 °C ja paine 50 bar(a). Iteroiduksi ja interpoloiduksi generaattorin tehoksi saatiin 2268,94 kW ja laskennalliseksi sähköntuotannoksi 24 tunnin aikana  $2268,94 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h} = 54454,57 \text{ kWh}$  eli 54,45 MWh.

Uusilla levylämmönsiirtimillä, 100 % lämmönsiirrinteholla, 90 °C ensiöpuolen tulolämpötilalla ja taulukon 3. vakioarvoilla saatiin generaattorin tehoksi iteroimalla ja interpoloimalla 2702,64 kW ja laskennalliseksi sähköntuotannoksi 24 tunnin aikana  $2702,64 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h} = 64863,35 \text{ kWh}$  eli 64,86 MWh.

Laskennalliseksi generaattorin tehon erotukseksi 100 % lämmönsiirrinteholla saatiin 433,70 kW.

## 8.2 Sähköntuotto 75 % lämmönsiirrinteholla

75 % lämmönsiirrinteholla, vanhoilla putkilämmönsiirtimillä, 115 °C ensiöpuolen tulolämpötilalla ja taulukon 3. vakioarvoilla generaattorin tehoksi saatiin iteroimalla ja interpoloimalla 2139,35 kW ja laskennalliseksi sähköntuotannoksi 24 tunnin aikana  $2139,35 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h} = 51344,31 \text{ kWh}$  eli 51,34 MWh.

Uusilla levylämmönsiirtimillä, 75 % lämmönsiirrinteholla, 90 °C ensiöpuolen tulolämpötilalla ja taulukon 3. vakioarvoilla saatiin generaattorin tehoksi iteroimalla ja interpoloimalla 2462,56 kW ja laskennalliseksi sähköntuotannoksi 24 tunnin aikana  $2462,56 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h} = 59101,43 \text{ kWh}$  eli 59,10 MWh.

Laskennalliseksi generaattorin tehon erotukseksi 75 % lämmönsiirrinteholla saatiin 323,21 kW.

## 8.3 Sähköntuotto 50 % lämmönsiirrinteholla

50 % lämmönsiirrinteholla, vanhoilla putkilämmönsiirtimillä, 115 °C ensiöpuolen tulolämpötilalla ja taulukon 3. vakioarvoilla saatiin generaattorin tehoksi iteroimalla ja interpoloimalla 2009,89 kW ja

laskennalliseksi sähköntuotannoksi 24 tunnin aikana  $2009,89 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h} = 48237,39 \text{ kW}$  eli 48,24 MWh.

Uusilla levylämmönsiirtimillä, 50 % lämmönsiirrinteholla, 90 °C ensiöpuolen tulolämpötilalla ja taulukon 3. vakioarvoilla saatiin generaattorin tehoksi iteroimalla ja interpoloimalla 2225,42 kW ja laskennalliseksi sähköntuotannoksi 24 tunnin aikana  $2225,42 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h} = 53409,97 \text{ kW}$  eli 53,41 MWh.

Laskennalliseksi generaattorin tehon erotukseksi 50 % lämmönsiirrinteholla saatiin 215,52 kW.

#### 8.4 Sähköntuotto 25 % lämmönsiirrinteholla

25 % lämmönsiirrinteholla, vanhoilla putkilämmönsiirtimillä, 115 °C ensiöpuolen tulolämpötilalla ja taulukon 3. vakioarvoilla saatiin generaattorin tehoksi iteroimalla ja interpoloimalla 1880,48 kW ja laskennalliseksi sähköntuotannoksi 24 tunnin aikana  $1880,48 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h} = 45131,13 \text{ kW}$  eli 45,13 MWh.

Uusilla levylämmönsiirtimillä, 25 % lämmönsiirrinteholla, 90 °C ensiöpuolen tulolämpötilalla ja taulukon 3. vakioarvoilla saatiin generaattorin tehoksi iteroimalla ja interpoloimalla 1988,24 kW ja laskennalliseksi sähköntuotannoksi 24 tunnin aikana  $1988,24 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h} = 47717,82 \text{ kW}$  eli 47,72 MWh.

Laskennalliseksi generaattorin tehon erotukseksi 25 % lämmönsiirrinteholla saatiin 107,76 kW.

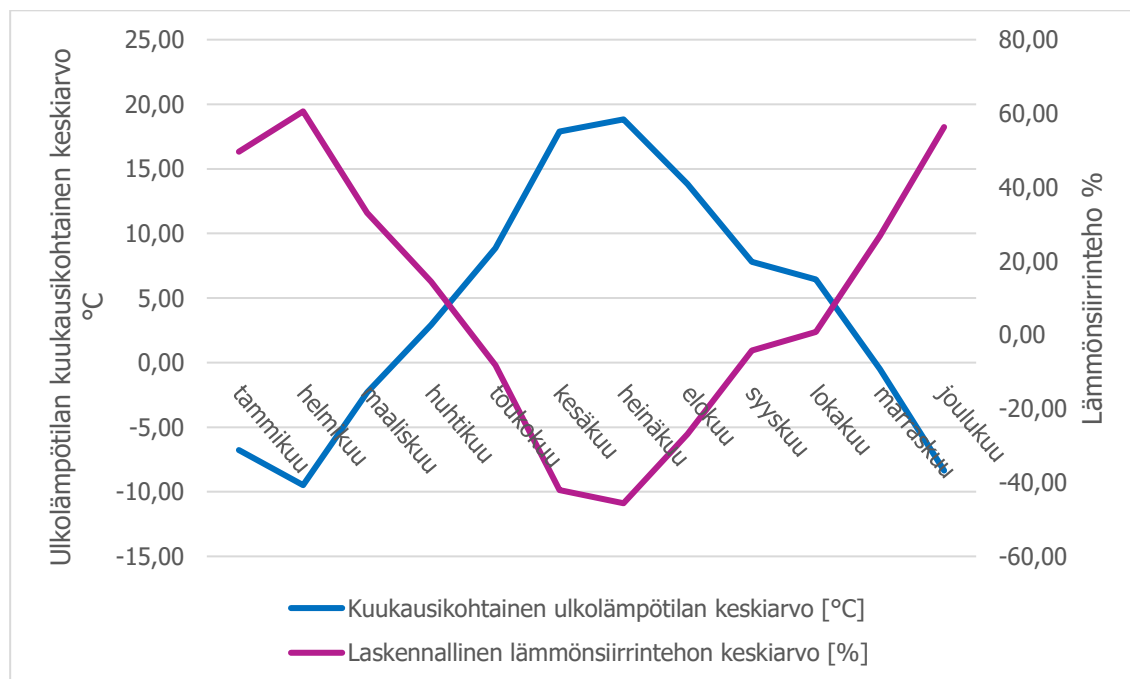
## 9 LÄMMITYSJÄRJESTELMÄN KYTKENTÄMUUTOKSEN TAKAISINMAKSUAJAN LASKENTA

Takaisinmaksuajan laskenta suoritettiin vaiheittain. Ensimmäisessä vaiheessa laskettiin kaavan 6. avulla vuoden 2021 kuukausikohtainen generaattorin huipunkäyttöaika.

$$\text{huipunkäyttöaika} = \frac{\text{Tuot. (kWh)}}{\text{Nimellisteho (kW)}} \quad (6)$$

Generaattorin nimellisteho on 2930 kW, mutta käytännön kokemus on osoittanut, että generaattorista saa noin 8 % nimellistehoa isomman tehon eli noin 3160 kW. 2021 generaattorin huipunkäyttöaika laskettiin tämän vuoksi 3160 kW:n teholla. Huipunkäyttöajan avulla määritettiin seuraavaksi sähköntuotannon vapaa kapasiteetti kuukausittain. Vapaa kapasiteetti laskettiin huipunkäyttöajan ja kuukauden tuntien erotuksen, ja generaattorin nimellistehon tulona.

Laskennan toisessa vaiheessa selvitettiin vuoden 2021 päiväkohtainen ulkolämpötilan keskiarvo. Tämä tieto saatiin Elenia aina palvelun kautta. Ulkolämpötilan keskiarvon avulla laskettiin päiväkohtainen- ja kuukausikohtainen laskennallinen lämmönsiirrintehon keskiarvo (kuva 14). 2021 päiväkohtaiset ulkolämpötilojen keskiarvot ja lämmönsiirrintehot esitetään liitteessä 3.



KUVA 14. 2021 kuukausikohtainen ulkolämpötilan keskiarvo ja laskennallinen lämmönsiirrinteho (Ojala 2022)

Kolmannessa vaiheessa määritettiin laskennallisen kuukausikohtaisen lämmönsiirrintehon avulla generaattorista saatava teho kytkentämuutoksen jälkeen. Generaattorin tehon avulla laskettiin lopuksi

päiväkohtainen- ja kuukausikohtainen sähköntuotannon määrä, ja tätä tietoa verrattiin aiemmin laskettuun kuukausikohtaiseen sähköntuotannon vapaaseen kapasiteettiin. Sähköntuotannon vapaan kapasiteetin ollessa suurempi kuin kytkentämuutoksen vaikutus sähköntuotantoon, tarkoitti laskennassa täyden rahallisen hyödyn saamista. Esimerkkinä 2021 tammikuu. Laskennallisen kuukausikohtaisen lämmönsiirrintehon avulla (49,60 %) määritettiin, että generaattorin teho oli laskennallisesti 215,14 kW isommalla teholla kytkentämuutoksen jälkeen verrattuna ennen kytkentämuutosta. Tämän tiedon avulla laskennalliseksi lisääntyneeksi sähköntuotannoksi 24 tunnin aikana saatiin  $215,14 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h} = 5163,27 \text{ kWh}$  eli 5,16 MWh ja kuukaudessa  $5,16 \text{ MWh} \cdot 31 \text{ päivää} = 160,06 \text{ MWh}$ . Tammikuun sähköntuotannon vapaan kapasiteetin ollessa suurempi kuin 160,06 MWh mahdollisti lisääntyneen sähköntuotannon tuottamisen generaattorilla tammikuun aikana.

Vuoden 2021 kaikki kuukaudet laskettiin vastaavalla tavalla, jolloin kytkentämuutoksen myötä lisääntyneen sähköntuotannon rahalliseksi arvoksi vuoden aikana saatiin 48384,27 € sähkön ostohinnan ollessa 80 € / MWh. Näin ollen investoinnin takaisinmaksuajaksi muodostui 1,45 vuotta. Takaisinmaksuajan laskennan taulukko esitetään liitteessä 4.

## 10 YHTEENVETO

Opinnäytetyön pääaiheena oli selvittää kuinka paljon lämmitysjärjestelmän kytkentämuutoksella pystyisi laskennallisesti nostamaan voimalaitoksen sähköntuotantoa. Kytkentämuutoksessa lämmönlähteenä käytettiin kuivaamolta ja pellettitehtaalta palaavaa 90 °C vettä, kattiloilta lähtevän 120 °C veden sijaan. Tällä kytkentämuutoksella höyryturbiinin vastapainelämmönsiirtimelle saadaan viileämpää vettä, joka vaikuttaa sen tehontarpeeseen ja näin ollen sähköntuotantoon generaattorin tehon noustessa.

Selvityksessä tuli ilmi, että lämmitysjärjestelmän kytkentämuutoksella on laskennallisesti merkittävä vaikutus sähköntuotantoon lämmitystarpeen ollessa esimerkiksi vuoden 2021 tasolla. Keskiarvoiseksi lämmönsiirrintehoksi saatiin edellä mainitulla lämmityskaudella 45,28 %, jolloin generaattorin laskennallinen teho on 196 kW isompi verrattuna vanhaan lämmitysjärjestelmän kytkentään. Vuoden aikana sähköä tuotetaan laskennallisesti tuolloin 604,80 MWh enemmän, jonka rahallinen arvo on 48384,27 € sähkön ostohinnan ollessa 80 € / MWh. 70000 € investoinnin takaisinmaksuajaksi muodostui näin ollen 1,45 vuotta.

Opinnäytetyö onnistui tavoitteiden mukaisesti ja tuloksena saatiin suuntaa antavat laskennalliset tulokset sähköntuotannon tasosta kytkentämuutoksen jälkeen, investoinnin hinnasta ja takaisinmaksuajasta.

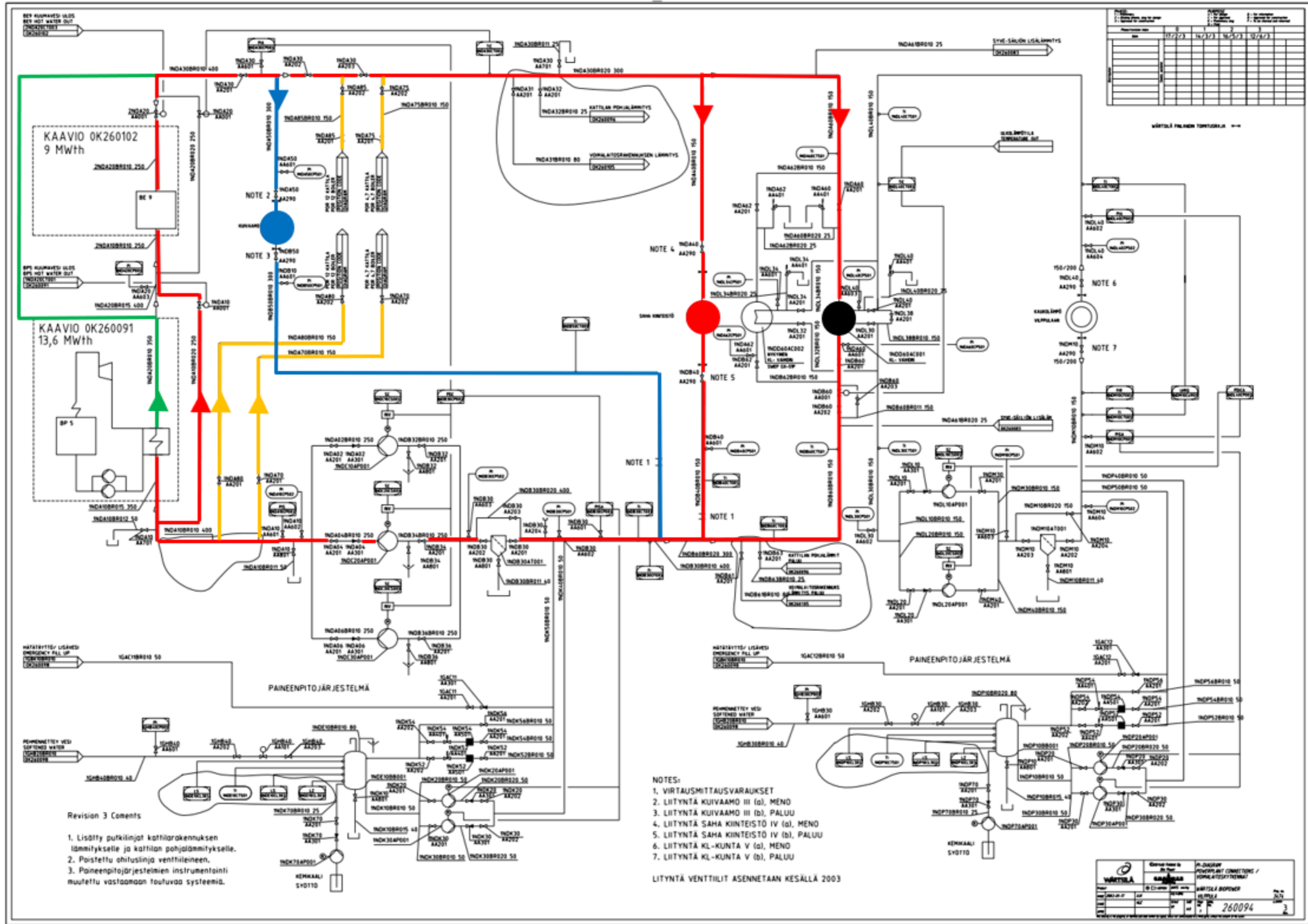
## LÄHTEET

- Ammattilehti 2019. Verkkojulkaisu. <https://www.ammattilehti.fi/uutiset.html?153819>. Viitattu 12.03.2022.
- Huhtinen, Kettunen, Nurminen, Pakkanen 1999. Höyrykattilatekniikka. 2-4 painos. Helsinki: Oy Edita Ab
- Hynninen, Teemu. 2021. Fysiikan perusteet. Opetusmateriaali. Lämpötila ja lämpöenergia. <https://github.com/thynnine/perusfyssa/blob/master/perusfysiikka.pdf>. Turun yliopisto. Viitattu 18.3.2022
- Jokinen, Isto. 2016. Lämpöoppi. Verkkodokumentti. <https://docplayer.fi/6869586-Lampooppi-mita-lampo-on-lampotila-asteikot-lampotilan-ala-ja-ylarajat-copyright-isto-jokinen.html>. Viitattu 16.3.2022.
- Koivuharju, Juho. 2016. Levy- ja putkilämmönsiirtimet laivakäytössä. Opinnäytetyö. Merenkulun insinööri. Kyamk. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2016060211588>. Viitattu 26.3.2022
- Lampinen, Kotiaho. 2015. Johdatusta lämmönsiirto-oppiin. Pdf-tiedosto. Julkaistu 2015. [https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1386307/mod\\_resource/content/1/LAMMONSIIRTO4.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1386307/mod_resource/content/1/LAMMONSIIRTO4.pdf). Viitattu 21.3.2022
- Lämmönsiirtimet 2021. Teollisuuden energiatekniikka (verkkokurssi). Savonia yleinen. Moodle-oppi-  
misympäristö. Savonia-ammattikorkeakoulu. <https://moodle.savonia.fi/course/view.php?id=13014#section-1>. Viitattu 25.3.2022
- Metsä Group 2022. Yhtiö. <https://www.metsagroup.com/fi/yhtio/Pages/default.aspx>. Viitattu 12.03.2022.
- Metsä Fibre 2022. Yhtiö. <https://www.metsafibre.com/fi/yhtio/Pages/default.aspx>. Viitattu 12.03.2022.
- Oph 2022. Levylämmönvaihtimen toiminta. Pdf-tiedosto. Julkaistu 2022. <https://www.oph.fi/sites/default/files/documents/levylammonvaihtimen-toiminta.pdf>. Viitattu 29.3.2022
- Padleckas, H. 2006. Straight-tube heat exchanger (one pass tube side). Valokuva. Wikimedia. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cd/Straight-tube\\_heat\\_exchanger\\_1-pass.PNG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cd/Straight-tube_heat_exchanger_1-pass.PNG). Viitattu 26.3.2022
- Salminen, Tapio. 2021. Fysiikan avoimet materiaalit. Opetusmateriaali. Lämpöliike ja lämpötila. <https://fysiikka.omaantahtiin.com/etusivu/fysiikka-2/energia-ty%C3%B6-ja-l%C3%A4mp%C3%B6>. Eiran aikuislukio. Viitattu 17.3.2022
- Thulukkanam, Kuppan. 2013. Heat exchangers, introduction, classification, and selection. Teoksessa Heat exchanger design handbook. Verkkokirja. <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.savonia.fi/lib/savoniafi/detail.action?docID=1190576>. Viitattu 19.3.2022
- Virtaustekniikka ja lämmönsiirto. 2019. Pdf-tiedosto. Julkaistu 2019. [https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/867361/mod\\_folder/content/0/Virtaustekniikka%20ja%20l%C3%A4mp%C3%B6nsiirto%20pruju%202019.pdf?forcedownload=1](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/867361/mod_folder/content/0/Virtaustekniikka%20ja%20l%C3%A4mp%C3%B6nsiirto%20pruju%202019.pdf?forcedownload=1). Viitattu 25.3.2022
- Vahasilta julkaisuaika tuntematon. Putkilämmönvaihtimet- ja siirtimet. Esite. <https://vahasilta.fi/putkilammonvaihtimet/>. Viitattu 26.3.2022

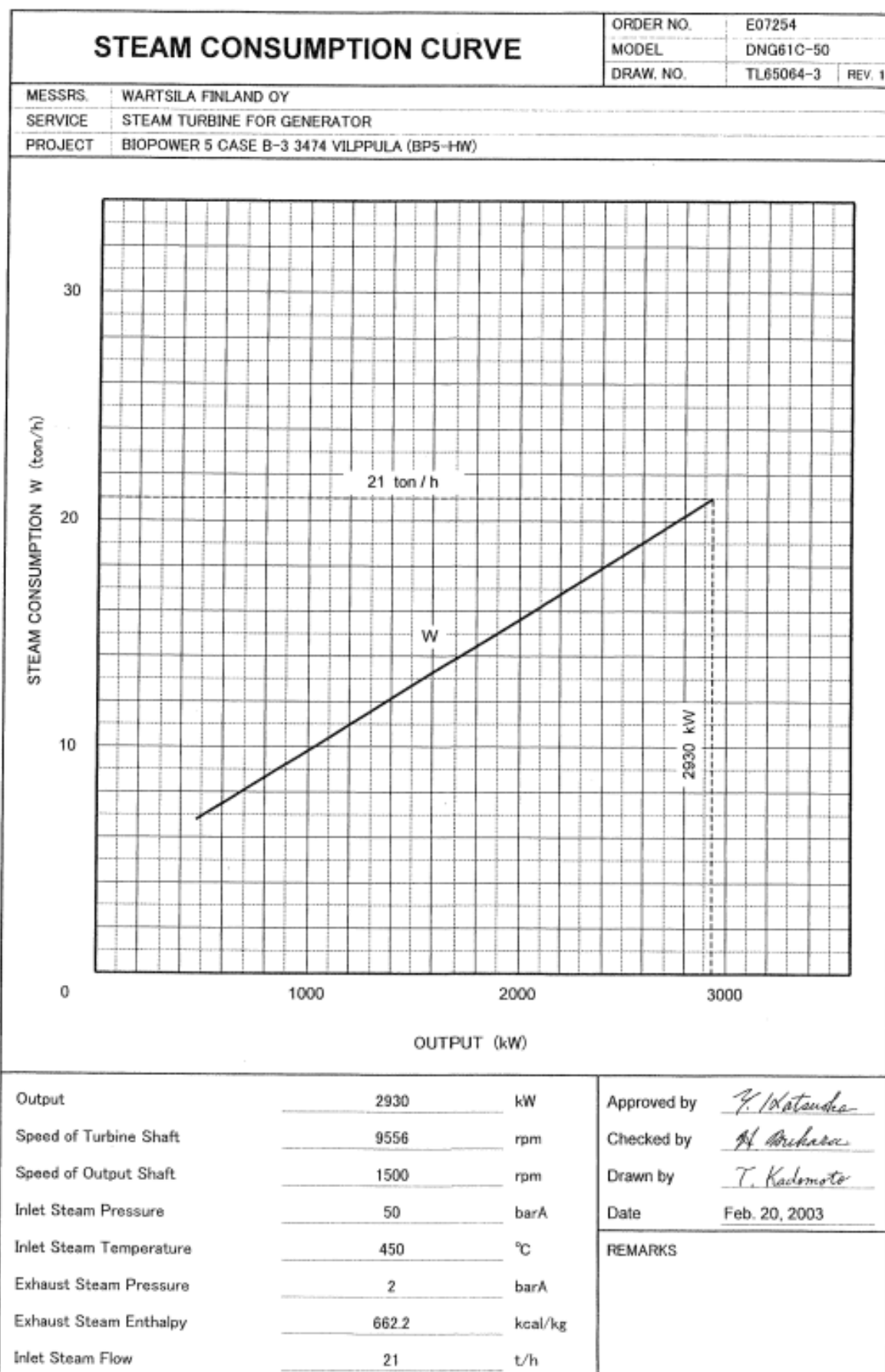
Wang, Sunden, Manglik. 2007. Design, Applications, and Performance. Teoksessa Plate heat exchangers. Verkkokirja.  
<https://books.google.fi/books?id=P3gTR8YHLHgC&lpq=PP1&hl=fi&pg=PP6#v=onepage&q&f=true>.  
Viitattu 29.3.2022

Wärtsilä Finland Oy 2004. Tekninen dokumentaatio. Aiotapa ja turvallisuusohjeet. Pdf-tiedosto. Julkaistu 2004. Viitattu 17.3.2022

## LIITE 1: VOIMALAITOSKYTKENNÄN PI-KAAVIO



## LIITE 2: TURBIINIVÄLMISTÄJÄN DOKUMENTAATIO



LIITE 3: 2021 PÄIVÄKOHTAISET KESKIVOLLISET ULKOLÄMPÖTILAT JA LASKENNALLISET LÄMMÖNSIIRINTEHOT %

TAMMIKUU			HELMIKUU		MAALISKUU		HUHTIKUU		TOUKOKUU		KESÄKUU	
	Ulkolämpötilan keskiarvo [°C]	Laskennallinen lämmönsiirrinteho %	Ulkolämpötilan keskiarvo [°C]	Laskennallinen lämmönsiirrinteho %	Ulkolämpötilan keskiarvo [°C]	Laskennallinen lämmönsiirrinteho %	Ulkolämpötilan keskiarvo [°C]	Laskennallinen lämmönsiirrinteho %	Ulkolämpötilan keskiarvo [°C]	Laskennallinen lämmönsiirrinteho %	Ulkolämpötilan keskiarvo [°C]	Laskennallinen lämmönsiirrinteho %
1	-0,30	26,13	-12,00	70,00	3,80	10,75	2,60	15,25	1,30	20,13	12,90	-23,38
2	-2,40	34,00	-14,50	79,38	2,00	17,50	2,30	16,38	2,10	17,13	15,80	-34,25
3	-4,50	41,88	-13,50	75,63		25,00	2,00	17,50	4,00	10,00	16,60	-37,25
4	-6,00	47,50	-15,40	82,75	-4,80	43,00	4,10	9,63	5,00	6,25	17,50	-40,63
5	-8,80	58,00	-16,90	88,38	-9,40	60,25	1,50	19,38	2,60	15,25	18,00	-42,50
6	-8,20	55,75	-12,30	71,13	-4,90	43,38	0,20	24,25	1,60	19,00	19,50	-48,13
7	-5,20	44,50	-7,30	52,38	-6,50	49,38	0,70	22,38	2,90	14,13	18,00	-42,50
8	-6,40	49,00	-10,30	63,63	-10,10	62,88	-0,20	25,75	4,10	9,63	15,60	-33,50
9	-11,20	67,00	-13,00	73,75	-11,30	67,38		25,00	4,70	7,38	16,80	-38,00
10	-9,40	60,25	-13,50	75,63	-18,00	92,50	1,60	19,00	8,50	-6,88	17,40	-40,25
11	-2,60	34,75	-15,70	83,88	-9,70	61,38	3,20	13,00	16,80	-38,00	18,70	-45,13
12	-5,90	47,13	-12,00	70,00	-4,00	40,00	6,70	-0,13	17,10	-39,13	15,50	-33,13
13	-11,50	68,13	-5,80	46,75	-1,20	29,50	4,50	8,13	18,30	-43,63	13,60	-26,00
14	-21,30	104,88	-8,90	58,38	0,70	22,38	1,40	19,75	13,30	-24,88	15,00	-31,25
15	-20,80	103,00	-8,70	57,63		25,00	2,70	14,88	13,20	-24,50	13,40	-25,25
16	-12,80	73,00	-10,10	62,88	-0,60	27,25	4,60	7,75	14,00	-27,50	13,10	-24,13
17	-6,50	49,38	-21,10	104,13	-2,30	33,63	6,40	1,00	13,40	-25,25	17,70	-41,38
18	-6,70	50,13	-18,10	92,88	-5,70	46,38	6,20	1,75	12,90	-23,38	20,40	-51,50
19	-2,10	32,88	-7,40	52,75	-8,60	57,25	6,60	0,25	10,40	-14,00	19,90	-49,63
20	-4,10	40,38	-6,40	49,00	-2,30	33,63	5,50	4,38	11,40	-17,75	23,90	-64,63
21	-7,40	52,75	-5,40	45,25	-0,40	26,50	5,70	3,63	5,50	4,38	24,40	-66,50
22	-4,60	42,25	-10,50	64,38	-3,90	39,63	5,50	4,38	7,40	-2,75	24,40	-66,50
23	1,10	20,88	-11,80	69,25	2,40	16,00	2,10	17,13	9,40	-10,25	20,60	-52,25
24	0,30	23,88	-4,50	41,88	3,60	11,50	1,40	19,75	6,40	1,00	16,90	-38,38
25		25,00	2,60	15,25	2,30	16,38	1,00	21,25	8,80	-8,00	19,00	-46,25
26	-0,60	27,25	2,10	17,13	3,00	13,75	1,70	18,63	8,50	-6,88	18,70	-45,13
27	-2,90	35,88	0,80	22,00	3,20	13,00	1,20	20,50	9,40	-10,25	19,50	-48,13
28	-6,20	48,25	4,00	10,00	3,80	10,75	0,90	21,63	10,60	-14,75	18,50	-44,38
29	-8,00	55,00			2,80	14,50	0,80	22,00	8,90	-8,38	18,90	-45,88
30	-8,80	58,00			5,10	5,88	1,40	19,75	11,10	-16,63	16,40	-36,50
31	-9,60	61,00			4,20	9,25			11,10	-16,63		
KA:	-6,78	49,60	-9,49	60,57	-2,30	33,08	2,91	14,46	8,86	-8,23	17,89	-42,08
HEINÄKUU			ELOKUU		SYYSKUU		LOKAKUU		MARRASKUU		JOULUKUU	
päivämäärä	Ulkolämpötilan keskiarvo [°C]	Laskennallinen lämmönsiirrinteho %	Ulkolämpötilan keskiarvo [°C]	Laskennallinen lämmönsiirrinteho %	Ulkolämpötilan keskiarvo [°C]	Laskennallinen lämmönsiirrinteho %	Ulkolämpötilan keskiarvo [°C]	Laskennallinen lämmönsiirrinteho %	Ulkolämpötilan keskiarvo [°C]	Laskennallinen lämmönsiirrinteho %	Ulkolämpötilan keskiarvo [°C]	Laskennallinen lämmönsiirrinteho %
1	17,40	-40,25	15,40	-32,75	9,40	-10,25	7,90	-4,63	7,80	-4,25	-9,10	59,13
2	18,40	-44,00	16,60	-37,25	7,80	-4,25	8,20	-5,75	5,60	4,00	-8,50	56,88
3	20,60	-52,25	12,40	-21,50	7,10	-1,63	9,10	-9,13	5,40	4,75	-10,90	65,88
4	20,90	-53,38	13,40	-25,25	6,20	1,75	10,70	-15,13	6,40	1,00	-13,20	74,50
5	21,30	-54,88	13,90	-27,13	7,60	-3,50	9,70	-11,38	4,10	9,63	-20,20	100,75
6	22,10	-57,88	14,90	-30,88	7,70	-3,88	9,70	-11,38	2,70	14,88	-14,90	80,88
7	22,40	-59,00	15,70	-33,88	11,30	-17,38	10,40	-14,00	0,50	23,13	-17,80	91,75
8	19,30	-47,38	16,50	-36,88	14,30	-28,63	10,70	-15,13	-2,30	33,63	-21,40	105,25
9	20,00	-50,00	16,50	-36,88	11,20	-17,00	11,30	-17,38	-1,90	32,13	-15,00	81,25
10	20,40	-51,50	15,30	-32,38	10,40	-14,00	10,40	-14,00	6,00	2,50	-7,30	52,38
11	21,60	-56,00	14,90	-30,88	11,80	-19,25	9,10	-9,13	3,80	10,75	-4,80	43,00
12	20,10	-50,38	16,00	-35,00	13,00	-23,75	5,90	2,88	2,80	14,50	-1,90	32,13
13	21,70	-56,38	17,20	-39,50	10,00	-12,50	3,80	10,75	-0,80	28,00	-1,10	29,13
14	22,40	-59,00	15,40	-32,75	6,60	0,25	3,40	12,25	-2,10	32,88	0,70	22,38
15	23,70	-63,88	13,00	-23,75	6,10	2,13	6,90	-0,88	-0,90	28,38	0,70	22,38
16	19,10	-46,63	14,60	-29,75	5,70	3,63	3,40	12,25	4,00	10,00	0,60	22,75
17	18,40	-44,00	16,00	-35,00	6,00	2,50	3,00	13,75	4,10	9,63	-0,50	26,88
18	17,10	-39,13	13,40	-25,25	6,80	-0,50	2,40	16,00	2,60	15,25	1,20	20,50
19	14,50	-29,38	13,60	-26,00	5,80	3,25	-0,50	26,88	0,80	22,00	-2,00	32,50
20	14,40	-29,00	12,70	-22,63	4,90	6,63	4,70	7,38	0,80	22,00	-11,90	69,63
21	13,10	-24,13	12,50	-21,88	4,50	8,13	8,40	-6,50	-1,80	31,75	-15,80	84,25
22	15,00	-31,25	11,70	-18,88	3,50	11,88	3,40	12,25	-5,00	43,75	-11,10	66,63
23	14,40	-29,00	8,90	-8,38	5,90	2,88	-0,80	28,00	-2,80	35,50	-4,80	43,00
24	15,20	-32,00	8,90	-8,38	7,40	-2,75	-1,50	30,63		25,00	-13,40	75,25
25	19,60	-48,50	10,40	-14,00	8,10	-5,38	6,50	0,63	-0,50	26,88	-11,90	69,63
26	21,30	-54,88	11,90	-19,63	8,10	-5,38	6,90	-0,88	-6,60	49,75	-15,30	82,38
27	21,90	-57,13	12,60	-22,25	6,50	0,63	5,70	3,63	-13,30	74,88	-11,70	68,88
28	19,20	-47,00	14,40	-29,00	5,30	5,13	6,80	-0,50	-10,50	64,38	-7,10	51,63
29	16,40	-36,50	14,30	-28,63	7,30	-2,38	9,30	-9,88	-12,00	70,00	-4,80	43,00
30	15,50	-33,13	12,50	-21,88	7,80	-4,25	7,50	-3,13	-11,60	68,50	-3,40	37,75
31	16,30	-36,13	12,90	-23,38			7,40	-2,75			-2,30	33,63
KA:	18,83	-45,61	13,82	-26,82	7,80	-4,26	6,45	0,83	-0,51	26,84	-8,35	56,32

## LIITE 4: LÄMMITYSJÄRJESTELMÄN KYTKENTÄMUUTOKSEN TAKAISINMAKSUAJAN LASKENTA

[illegible]