

Opinnäytetyö (AMK)

Insinööri, Energia ja ympäristötekniikka

2018

Heini Lehtinen

PROSESSILÄMMÖN TALTEENOTTOJÄRJESTELMÄN ESISELVITYS JA MUUTOKSET

Heini Lehtinen

PROSESSILÄMMÖN TALTEENOTTOJÄRJESTELMÄN ESISELVITYS JA MUUTOKSET

Opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää kohdeyrityksen prosessilämmön talteenottojärjestelmän nykytila ja esittää siihen muutosehdotuksia. Kohdeyrityksen prosessin jäähdytystarve kasvaa suunnitellun tuotantokapasiteetin nousun myötä, jolloin nykyisen talteenottojärjestelmän kapasiteetti ei enää riitä tehokkaaseen jäähdytykseen. Opinnäytetyö tehtiin osana Pöyry Finland Oy:n asiakasprojektia.

Tavoitteena oli löytää kustannustehokkain tapa tehdä järjestelmään muutos, jonka myötä tuottoa saataisiin lisääntyneestä kaukolämmön myynnistä ja höyryn käytön vähenemisestä. Prosessilämmön talteenottojärjestelmään tehtiin kaksi muutosehdotusta, joista ensimmäinen korjaa kasvaneen jäähdytystarpeen ja toinen yksinkertaistaa koko järjestelmän ajettavuutta. Muutosehdotukset on esitetty tehtävän ehdotetussa järjestyksessä, mutta niistä voidaan tehdä myös vain toinen.

Nykytilanteesta ja muutosehdotuksista tehtiin erilliset simulaatiot Aspen Plus-ohjelmalla ja virtauskaaviot AutoCADilla. Simulaatioista saatuja tuloksia ja kohdeyrityksen vuoden 2017 kaukolämpöraporttia hyödyntämällä laskettiin lisääntyneestä lämmöntalteenottokapasiteetista syntyneet hyödyt.

1450 yksikön tuotantokapasiteetille tehty muutosehdotus 1 tuottaa vuodessa noin 280 000 euroa. Muutosehdotus 1:stä esitettiin myös optimoitu versio, jossa prosessia hieman muokkaamalla saatiin kaksinkertaistettua alkuperäinen tuotto. 1700 yksikön tuotantokapasiteetille tehty muutosehdotus 2 nostaa tuoton noin miljoonaan euroon vuodessa. Muutosehdotuksista laskettiin myös alustavat kustannusarviot. Tulokset ja virtauskaaviot auttavat yritystä tekemään lopulliset investointipäätökset ja antavat arvokasta tietoa oman hukkalämmön hyötykäyttö potentiaalista.

Hukkalämmöntalteenotto on teollisuudessa yksi tapa parantaa energiatehokkuutta. Sen hyödyntämispotentiaali vastaa Euroopassa jopa 1,4 kertaista rakennusten lämmitykseen kuluvaan vuotuista energiamäärää. Hukkalämmöllä voidaan korvata fossiilisilla polttoaineilla tuotettua energiaa, mikä on suoraan yhteydessä päästöihin. Hukkalämpö on käytännössä päästötöntä ja maksutonta sitä tuottavalle tehtaalle, koska lämpö karkaisi muuten ympäristöön.

ASIASANAT:

hukkalämpö, lämmöntalteenotto, teollisuus, kaukolämpö, energiatehokkuus.

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Engineer, Energy and environment technique

2018 | 44 pages, 41 pages in appendices

Heini Lehtinen

RESEARCH AND MODIFICATIONS OF PROCESS HEAT RECOVERY SYSTEM

The aim of this thesis was to study the present condition of process heat recovery system of the target company and to suggest modifications to it. The cooling demand of the process will rise after planned increase of production capacity. The current capacity of the heat recovery system is not sufficient enough for effective cooling. This thesis was one outcome of Pöyry Finland Oy's project.

The objective was to find the most cost-effective way to make the changes to the current system, in which the target company would receive returns on increased sales of district heating and savings on the decreased use of steam. Two modifications were suggested to the process heat recovery system. The first modification addresses the risen cooling demand and the second simplifies the whole system.

Simulations were made on Aspen Plus and flow diagrams on AutoCAD of the present condition of the system and of the modifications. The results of the simulations and district heating report 2017 of the target company were used in the calculations of benefits resulted by increased heat recovery capacity.

Modification 1 was made for 1450 unit production capacity. It is estimated to bring in about 280 000 euros in a year. With optimization of the main process, the profit can be doubled. Modification 2 was made for 1700 unit production capacity and will bring in about one million in a year. Cost estimates were also made of both of the modification. The gained results and flow diagrams will help the target company to make the final investment decision and also offer important information on the heat recovery potential of their system.

One way to improve energy efficiency in industry is through recovery of waste heat. In Europe the utilization potential of the recovery of waste heat is equivalent to 1,4 times the amount of energy used in the heating of buildings. Waste heat could replace energy produced with fossil fuels, which has a direct link to emissions. In practice waste heat is emission-free and cost-free for the factory producing it, as the heat would be released to the environment anyway.

KEYWORDS:

waste heat, heat recovery, industry, district heating, energy efficiency

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO	7
1 JOHDANTO	1
2 HUKKALÄMMÖN TALTEENOTTO	3
2.1 Hukkalämmön hyödyntäminen	4
2.2 Kaksisuuntainen kaukolämpö	5
3 LÄMMÖNSIIRTO	6
3.1 Teoria lyhyesti	6
3.1.1 Konvektio	6
3.1.2 Lämmönläpäisykerroin	7
3.2 Lämmönvaihtimet	7
4 KAUKOLÄMPÖ	9
4.1 Jakelujärjestelmä	10
4.2 Kaukokylmä	11
5 NYKYTILANNE	12
5.1 Järjestelmän rakenne	12
5.2 Virtauskaavio	15
5.2.1 Energiatase	16
5.3 Aspen Plus V10 virtausmalli	17
5.3.1 Simulaation pohjatiedot	17
5.3.2 Simulaatio	19
5.4 Nykytilanteen selvityksessä heränneet huomiot	20
6 MUUTOSEHDOTUKSET	21
6.1 Muutosehdotus 1	21
6.1.1 Energiatase	23
6.1.2 Vertailu nykytilanteeseen	24
6.1.3 Kustannusarvio	25
6.1.4 Optimointi	26
6.2 Muutosehdotus 2	27

6.2.1 Energiatase	29
6.2.2 Vertailu nykytilanteeseen	30
6.2.3 Kustannusarvio	32
6.3 Vertailu muutosehdotusten välillä	32
6.3.1 Kustannukset	32
6.3.2 Toimivuus	33
7 PÄÄTELMÄT	34
7.1 Tulosten virheanalysointi	35
LÄHTEET	37

LIITTEET

Liite 1. Kustannusarvio Muutosehdotus 1. (Salassa pidettävä, ei julkaistu)	
Liite 2. Kustannusarvio Muutosehdotus 2. (Salassa pidettävä, ei julkaistu)	
Liite 3. Nykytilanteen virtauskaavio. (Salassa pidettävä, ei julkaistu)	
Liite 4. Muutosehdotus 1:n virtauskaavio. (Salassa pidettävä, ei julkaistu)	
Liite 5. Muutosehdotus 2:n virtauskaavio. (Salassa pidettävä, ei julkaistu)	
Liite 6. Optimoidun muutosehdotus 1:n virtauskaavio (Salassa pidettävä, ei julkaistu)	
Liite 7. Tuotto ja säästölaskelma. (Salassa pidettävä, ei julkaistu)	
Liite 8. Kaukolämpöveden lämpötilakaavio. (Salassa pidettävä, ei julkaistu)	

KUVAT

Kuva 1 Hukkalämmön syntyminen ja hyödyntäminen (Heikkilä & Kiuru 2014, 10.)	3
Kuva 2 Prosessilämmön talteenottojärjestelmän kierrot	13
Kuva 3 Värien selitteet	14
Kuva 4 Esimerkki yhden lämmönvaihtimen kuvaamisesta Aspenissa	18
Kuva 5 Koko simulaatio Aspenissa	19
Kuva 6 Muutosehdotus 1 blokkikaavio	22
Kuva 7 Muutosehdotus 2 blokkikaavio	29

TAULUKOT

Taulukko 1 Energiamäärien jakautuminen kaupungin, tehtaan ja tytäryhtiön välillä tammikuussa 2017, Yksikkö MWh	16
--	----

Taulukko 2 Energian jakautuminen lämmönvaihtimien välillä maksimitilanteessa ja lämmönvaihtimien koko tammikuun lämpömäärä	16
Taulukko 3 Muutosehdotus 1 jälkeen energian jakautuminen lämmönvaihtimien välillä maksimitilanteessa ja lämmönvaihtimien arvioitu koko tammikuun lämpömäärä	23
Taulukko 4 Muutosehdotus 1:n lämpömäärät ja jakautuminen tytäryhtiön, kaupungin ja tehtaan kesken	23
Taulukko 5 Muutosehdotus 2:n lämpömäärät ja jakautuminen	30
Taulukko 6 Muutosehdotus 2:n lämmönsiirtimien maksimi tehot	30

KAAVIOT

Kaavio 1 Höyryn kulutus	15
Kaavio 2 Kaupunkiin tuotetun kaukolämmön muutos nykytilanteeseen verrattuna	24
Kaavio 3 Tytäryhtiön kaukolämmön tuotanto, verrattuna nykytilanteeseen	25
Kaavio 4 Optimoinnin vaikutus kaupungin kaukolämmön tuotantoon	27
Kaavio 5 Höyryn kulutuksen muutos verrattuna nykytilanteeseen	31
Kaavio 6 Kaupungin kaukolämmön tuotanto muutosehdotus 2 jälkeen	31

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO



Lyhenne	Lyhenteen selitys (Lähdeviite)
kW	Kilowatti
MW	Megawatti
MWh	Megawattitunti
TWh	Terawattitunti
m ³ /h	Kuutiota tunnissa
NPV	Net Present Value
IRR	Internal Rate of Return
LVxxx	Lämmönvaihtimen positio
Metso DNA	Automaatiojärjestelmä

1 JOHDANTO

Vaihtoehtoisten energiantuotantomenetelmien suosio on kasvussa ilmastonmuutoksen myötä. Teollisuudessakin on herätty siihen, että hukkalämpöä voidaan myydä sivutuotteena ja korvata sillä esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden käyttöä kaukolämmön tuotannossa. Yleisempää on kuitenkin edelleen käyttää hukkalämpöä hyödyksi omalla laitoksella. (Koskenranta 2018.) Teollisuudessa lämpöä karkaa ympäristöön jäähdytysvesien, savu- ja prosessikaasujen ja poistohöyryjen mukana jopa 37 % energiakulutuksesta. Hukkalämmön hyötykäytöllä voidaan laskea teollisuuden energiakustannuksia vuodessa 200 miljoonalla eurolla. (Kontu 2013.)

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää kohdeyrityksen prosessilämmön talteenottojärjestelmän nykytila ja esittää siihen muutosehdotuksia. Talteenottojärjestelmästä tehtiin virtauskaavio ja -malli Aspen Plus -ohjelmaa käyttäen. Opinnäytetyö tehtiin osana Pöyry Finland Oy:n asiakasyrityksen projektia. Salassapitovelvollisuuden vuoksi kohdeyrityksen tuotantoprosessista ei kerrota yksityiskohtaisesti.

Kohdeyrityksen tehtaalle tehtävien muutosten myötä päätuotteen prosessia on jäähdytettävä aikaisempaa enemmän. Tällöin myös talteen otettavan lämmön määrä kasvaa, eikä kaikkien nykyisten laitteiden kapasiteetti riitä muutokseen. Muutosehdotukset tehtiin näiden muutosten jälkeiseen aikaan.

Kohdeyritykselle prosessilämpö on sivutuote, jota syntyy, kun päätuotetta täytyy jäähdyttää sen lämpötilan noustua prosessin aikana. Talteen otettu lämpö on siis periaatteessa yritykselle ilmaista ja päästötöntä energiaa, joka menisi hukkaan, jos sitä ei hyödynnettäisi. Lämpöä käytetään omalla tehtaalla muun muassa lämmitykseen ja sen lisäksi osa lämmöstä siirretään kaupungin kaukolämpöverkkoon. Loput tarvittavasta lämpöenergiasta tuotetaan höyryllä, jonka tuottamisesta kohdeyritys maksaa. Jos tehdas saa syötettyä tarpeeksi energiaa kaupungin kaukolämpöverkkoon esimerkiksi pakkaspäivinä, kaupungin ei tarvitse käynnistää öljykattiloita lämmöntuotantoa varten.

Lähtötietona selvitykseen käytettiin vuonna 2007 tehtyä lohkokaaviota, jossa näkyi myös virtojen nopeuksia ja lämpötiloja, laitoksen PI-kaavioita, Metso DNA -ohjelmasta otettuja kuvia ja vuoden 2017 kaukolämpöraporttia. Laskentoja tehtiin myös yhdessä lämmönvaihtimien toimittajan kanssa, joka osasi kertoa tarkemmin myös yksittäisten vaihtimien ominaisuuksista, jotka etenkin parannusehdotuksia tehdessä olivat tärkeitä huomioida.

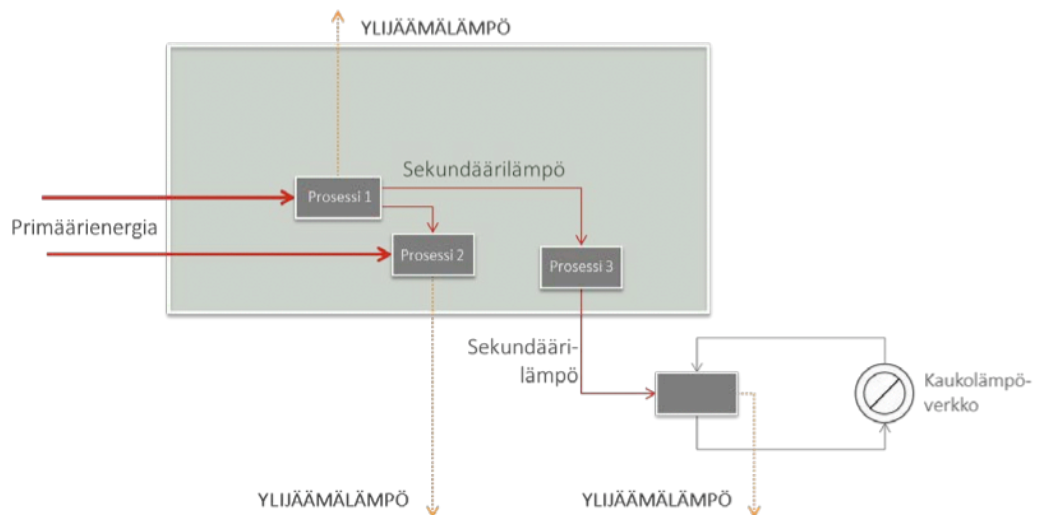
Järjestelmä on omalla tavallaan monimutkainen, koska tehtaan päätuote on vaarallinen kemikaali, jolloin prosessilämpöä ei voida sekoittumisriskin takia siirtää suoraan kaukolämpöveiteen vaan välissä on erillinen vesikierto. Prosessilämpöä myös otetaan talteen useammasta paikasta, jolloin myös niin kutsuttuja välikiertoja on useampia.

Opinnäytetyön tavoitteena on löytää kustannustehokkain vaihtoehto tuotannon muutosten jälkeiselle ajalle ja tuottaa sopivat dokumentit kohdeyritykselle prosessilämmön talteenottojärjestelmän nykytilasta ja muutosten jälkeisestä tilanteesta. Dokumentteihin kuuluvat AutoCAD-ohjelmalla tehty blokkikaavio ja virtauskaavio sekä Aspen Plus-ohjelmalla simuloitu virtausmalli. Muutosehdotuksille lasketaan alustava kustannusarvio, kun tiedetään lisälaitehankinnat.

Opinnäytetyössä käsitellään aluksi teoriaosuudessa hukkalämmön talteenottoa sekä lämmönsiirron ja kaukolämmön perusteet, josta siirrytään itse tutkimustyöhön. Tutkimusosuudessa esitellään selvitetty nykytilanne ja virtausmalli sekä muutosehdotukset ja tapa, jolla lopulliseen ehdotukseen päädyttiin. Muutosehdotuksia verrataan nykytilanteeseen, jolloin saadaan tietää myös muutosten taloudellinen kannattavuus. Liitteiksi tulevat nykytilanteen ja muutosehdotusten virtauskaaviot, joihin sisältyvät aine- ja energiataaseet, ja kustannusarviot.

2 HUKKALÄMMÖN TALTEENOTTO

Hukkalämmöksi tai ylijäämälämmöksi kutsutaan lämpöenergiavirtaa, joka poistuu tehtaalta prosessista tulevien sivuvirtojen mukana. Päätaivoitteena on muuttaa hukkalämmöstä mahdollisimman suuri osa sekundaarilämmöksi eli käyttää sitä hyödyksi muissa prosesseissa (Kuva 1). (Heikkilä & Kiuru 2014, 10.)



Kuva 1 Hukkalämmön syntyminen ja hyödyntäminen (Heikkilä & Kiuru 2014, 10.)

Teollisuuden prosesseissa ja datakeskusten jäähdytyksessä syntyvää hukkalämpöä olisi mahdollisuus hyödyntää esimerkiksi kaukolämmön tuotannossa. Euroopan laajuisesti hukkaan menee lämpöenergiaa noin 30 ydinvoimalan vuosituotannon verran, mikä tarkoittaa noin 230 000 gigawattituntia. Suomessa voitaisiin vähentää hiilidioksidipäästöjä noin 500 000 tonnia hukkalämpöä hyödyntämällä. (Leino 2017.)

Tuotannon hukkalämpöä olisi eniten saatavilla paljon energiaa kuluttavilla teollisuudenaloilla, kuten metalli-, elintarvike-, metsä- ja kemianteollisuudessa. Hukkalämpöä voidaan ottaa talteen esimerkiksi prosessi- ja savukaasuista, poistohöyryistä sekä jäähdytys- ja jätevesistä. (Motiva 2017a.) Niiden mukana karkaa vuosittain energiaa ympäristöön jopa 54 TWh. Teollisuuden energian käytöstä se vastaa noin 37 %. (Kontu 2013, 2.)

Taloudellisista näkökulmista katsottuna hukkalämmön hyötykäyttö on yrityksille järkevää. Sen on arvioitu vähentävän energiasta syntyviä kustannuksia noin 200 miljoonalla eurolla (Kontu 2013, 2). Hukkalämmön talteenottolaitteistot voivat kuitenkin olla iso investointi, jolloin ne kilpailevat muiden investointien kanssa samoista rahoista. Jos

hukkalämmön hyödyntämisen kannattavuus jää alemmas kuin jonkin toisen investoinnin, se saattaa jäädä tekemättä. (Heikkilä & Kiuru 2014, 57.)

Aina hukkalämmölle ei löydy sopivaa käyttökohdetta. Jos tehdas on kaukana asutuksesta tai muista teollisuuslaitoksista, ei lämpöenergiaa välttämättä ole järkevää siirtää pitkiä matkoja. Jossain tapauksissa lämpöenergiaa voidaan muuttaa sähköksi, mutta silloinkin täytyy ottaa huomioon sen kannattavuus. (Heikkilä & Kiuru 2014, 9.)

Hukkalämmön hyödyntäminen parantaa tehtaan energiatehokkuutta, jolloin siihen johtaviin investointeihin voi saada myös valtion tukea. Yritykset voivat liittyä energiatehokkuussopimukseen. Sopimusten tarkoitus on ohjata yrityksiä ja yhteisöjä panostamaan energiatehokkuuteen jatkuvasti. Valtiolta voi saada tukea tapauskohtaisen harkinnan perusteella. (Motiva 2017c.)

2.1 Hukkalämmön hyödyntäminen

Hukkalämmölle kannattaa ensimmäisenä etsiä käyttökohteita omasta prosessista. Lämpöä voidaan käyttää myös poltto- tai raaka-aineen kuivaamiseen. Jos tuotannollista hyödyntämistapaa ei löydy ja hukkalämpöä syntyy tasaisesti, sitä voi olla järkevää hyödyntää lämmitykseen. Lämpötila- ja energiatasoista riippuen voidaan lämmitellä omat kiinteistöt tai johtaa lämpöä lähialueen kaukolämpöverkkoon. Teollisuuden hukkalämmöstä kuitenkin vain puoli prosenttia hyödynnetään laitosten ulkopuolella (Kontu 2013, 3–4.)

Hukkalämmön talteenottojärjestelmien tekniikka on kehittynyt etenkin matalien lämpötilojen hyödyntämisessä. Teollisuudessa syntyy pääosin alle 55-asteisia hukkalämpövirtoja. Niille löytyy harvemmin suoraa käyttökohdetta. Lämpöpumpun avulla on mahdollista nostaa esimerkiksi jäähdytysveden lämpötilaa paremmin hyödynnettävälle tasolle. Lämpöpumppu tarvitsee kuitenkin tarpeeksi suuren ja lämpöä tasaisesti tuottavan kohteen. Se vähentää primäärienergian kulutusta, mutta lisää kohteen sähkönkulutusta. (Kontu 2013, 6.)

Vuonna 2016 tehdyn selvityksen mukaan lämpöpumpuilla olisi mahdollista tuottaa kaukolämpöä jopa 3–4 TWh vuodessa, mikä vastaa noin 9–13 %:n osuutta koko markkinasta. Sähkökäyttöisyys lisää lämmöntuoton joustavuutta ja lämpöpumput myös käynnistyvät nopeasti, kun käyttötarve ilmenee. Taajamissa lämpöpumppuinvestoinnit on kannattavaa toteuttaa osana koko kaukolämpöjärjestelmää, jolloin hyödyt saadaan optimoitua koko järjestelmän kannalta paremmin. Investointia, kannattavuutta ja vaikutuksia

olisi siis myös järkevin tarkastella koko kaukolämpöjärjestelmän tasolla. (Energiateollisuus ry 2016.)

Jos prosessissa syntyy jatkuvasti yli 100-asteista hukkalämpöä sitä voidaan hyödyntää ORC-laitoksessa, joka tuottaa sähköä. ORC-prosessissa kiertää veden sijaan orgaaninen aine, joka lauhtuu ja höyrystyy prosessin eri osissa. Yleensä ORC-laitokset käyttävät termoöljykattiloita, joiden teho vaihtelee 1 ja 50 MW:n välillä. Prosessin kokonaishyötysuhde voi olla jopa 98 %, mutta matalalämpöisissä prosesseissa sähköntuotannon hyötysuhde saattaa jäädä alle 10 %:iin käytetyn lämmön määrästä. (Kontu 2014, 10.)

2.2 Kaksisuuntainen kaukolämpö

Kaksisuuntaisella kaukolämmöllä tarkoitetaan, että asiakas voi sekä ostaa kaukolämpöä että myydä omaa hukkalämpöään tai lämmön tuotantoaan energiayhtiölle. Teollisuuskohteiden lisäksi tätä voisivat hyödyntää esimerkiksi aurinkokeräimillä vettä lämmittävät kiinteistöt. Sitran ja Energiateollisuuden tekemän tutkimuksen perusteella kysyntää kaksisuuntaiselle kaukolämmölle vaikuttaisi olevan. (Jantunen 2016.)

Fortum on päättänyt avata omat kaukolämpöverkkonsa myös asiakkaiden tuottamalle lämmölle. Sopimukset vaihtelevat kohteen lämmön tuotannon mukaan. Tarjolla olevan lämmön arvo määräytyy lämpötilan ja lämpömäärän suuruuden perusteella. Silläkin on merkitystä saadaanko lämpöä syötettyä kaukolämpöverkkoon tasaisesti vai satunnaisesti. Asiakkaat voidaan näistä asioista riippuen kytkeä kaukolämpöverkkoon meno- tai paluupuolelle. Menopuolelle kytketty lämpö saadaan paremmin käytettyä, mikä myös nostaa sen arvoa. (Energiateollisuus ry 2018.)

Kaksisuuntainen kaukolämpö voisi vähentää päästöjä ja parantaa energiatehokkuutta. Teknisiä esteitä sille ei ole. Sitran johtava asiantuntija arvioi, että helpoiten kaksisuuntainen kaukolämpö on toteutettavissa uudisrakennusalueilla. Tuottajaksi haluava kiinteistö joutuu yleensä tekemään investointeja omiin laitteisiinsa. (Jantunen 2016.) Kaukolämpö on yleisimpiä lämmitysmenetelmiä kaupungeissa ja siihen liittyneiden kiinteistöjen kohdalla muutostyöt on jo puoliksi tehty. Hukkalämpöä tarjoava kiinteistö hankkii laitteet lämmönsiirtoon ja vastaa liittymiskustannuksista. (Energiateollisuus ry 2018.)

3 LÄMMÖNSIIRTO

Opinnäytetyössä käsitellään pääasiassa lämpöenergian siirtymistä kahden virtaavan aineen välillä. Kiinteässä aineessa ja paikallaan pysyvissä nesteissä ja kaasuissa lämpö siirtyy johtumalla eli konduktiolla (Hokajärvi 1986, 8). Virtaavassa aineessa lämpö siirtyy konvektiolla eli kuljettumalla (Lampinen & Kotiaho 2014, 1). Teoriaosuudessa keskitytään vain konvektioon, koska se on aiheen kannalta olennainen.

3.1 Teoria lyhyesti

3.1.1 Konvektio

Konvektio tapahtuu virtaavan aineen eli fluidin ja sitä koskettavan pinnan välillä. Konvektiossa lämpöä kulkeutuu nesteen mukana eteenpäin ja samalla myös johtuu koskettavaan pintaan. Konvektiota tapahtuu vapaasti ja pakotetusti. Konvektiolle määritetään lämmönsiirtokerroin seuraavalla kaavalla:

$$q = \alpha(T_{pinta} - T_{fluid})$$

q = Lämmönsiirto fluidin ja pinnan välillä [W/m^2]

α = Lämmönsiirtokerroin [W/m^2K]

T_{fluid} = Fluidin lämpötila kaukana pinnasta

Teknisiä tapauksia varten lämmönsiirtokertoimelle on kehitetty muitakin laskentakaavoja. Tällöin oleellista on millainen fluidin virtaus on ja sitä varten lasketaan putkivirtaukselle lasketaan dimensiottomat luvut. Ne on nimetty Reynoldsin luvuksi, Nusseltin luvuksi ja Prandtin luvuksi. Konvektion kannalta oleellista on Reynoldsin luvun suuruus, koska se määrittelee, onko virtaus laminaarista vai turbulenttista. Laminaarista virtaus on pienillä nopeuksilla ja Reynoldsin luvun arvoilla, jolloin virtaviivat ovat suoria. Turbulenttista virtaus on, kun nopeus ja Reynoldsin luku ovat suuria. Turbulenttisessa virtauksessa virtaviivat ovat pyöriä ja epämääräisiä. Virtauksille on erilaiset korrelaatiokaavat, koska fluidi käyttäytyy täysin eri tavoin. (Lampinen & Kotiaho 2014, 7–9.)

3.1.2 Lämmönläpäisykerroin

Esimerkiksi lämmönvaihtimessa lämpö siirtyy ensin toisesta virtaavasta aineesta konvektiolla metallilevyn pintaan, johtumalla levyn läpi ja konvektiolla toisella puolella olevaan virtaavaan aineeseen. Virtaavien aineiden sekoittumisen estävä levy siis on lämmönsiirtovastus. Lämmönläpäisykerroin k [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$] lasketaan niin, että se ottaa huomioon kaikki lämmönsiirtovastukset. (Hokajärvi 1984, 72-73.)

$$\phi = kA(t_1 - t_2)$$

Φ = Lämpövirta [W]

A = Pinta-ala [m^2]

t_1 = Fluidin 1 lämpötila [K]

t_2 = Fluidin 2 lämpötila [K]

Lämpövirta siirtyy lämmönvaihtimessa virtauksesta toiseen, jolloin lämpötase voidaan laskea kaavalla (Hokajärvi 1984, 81):

$$\phi = \dot{m}_1 c_{p1} \Delta t_1 = \dot{m}_2 c_{p2} \Delta t_2$$

\dot{m} = Massavirta [kg/s]

c_p = Ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/(\text{kgK})$]

Δt = lämpötilanmuutos [K]

3.2 Lämmönvaihtimet

Yleisimpiä teollisuuden käytössä olevia lämmönvaihtintyyppisiä ovat putkilämmönvaihtimet, levylämmönvaihtimet sekä ripaputki- ja lamellilämmönvaihtimet. Näistä putkilämmönvaihtimet ovat yleisempiä kaasujen ja höyryjen lämmönsiirrossa ja levylämmönvaihtimet nesteiden välisessä lämmönsiirrossa. Lämmönvaihdinta valitessa on tärkeää, että rakenne ja materiaalit soveltuvat mahdollisimman hyvin virtaaville aineille. (Motiva 2016, 14.)

Perinteinen putkilämmönsiirrin koostuu vaipasta ja sen sisällä kulkevista putkista. Putkissa kulkee yleensä neste ja vaippapuolella höyry tai kaasu. Putkilämmönsiirrin valitaan yleensä silloin, kun lämmönsiirtoon osallistuvan aineen paine on ympäristön painetta korkeampi. Lämmönsiirtimen täytyy silloin olla paineastia. Jos paine ei eroa ympäristön paineesta, on tyypillistä käyttää ripaputki- ja lamellilämmönvaihtimia. Silloin vaipan sisällä kulkeviin putkiin kiinnitetään lamelleja tai ripoja, jotka kasvattavat vaippapuolen lämmönsiirtopinta-alaa. Likaisille virtauksille putkilämmönsiirtimet toimivat parhaiten silloin, kun likainen aine kulkee putkissa. (Motiva 2016, 14.)

Levylämmönvaihtimen sisällä on nimensä mukaisesti levyjä, jotka on aseteltu ja muotoiltu niin, että niiden väliin muodostuu virtauskanavia. Kuumen ja kylmän puolen nesteet virtaavat niissä yleensä toisiaan vastaan. Levyt ovat optimaalisen lämmönsiirtotehon onnistumiseksi erittäin ohuita. Levylämmönsiirtimillä onkin usein hyvä kokonaislämmönsiirtokerroin. (Motiva 2016, 14.)

4 KAUKOLÄMPÖ

Kaukolämmöllä tarkoitetaan lämmön keskitettyä tuotantoa ja julkista jakelua kiinteistöille. Lämpöä käytetään rakennusten ja käyttöveden lämmitykseen. Ominaista kaukolämmitykselle on sitä varten organisoitu liiketoiminta, toisin sanoen kiinteistöt maksavat käyttämästään lämmöstä. Kun esimerkiksi teollisuuslaitos käyttää hyväkseen itse tuottaansa lämpöä, sitä kutsutaan aluelämmitykseksi. Silloin toimintaan ei liity liiketoimintaa. (Koskelainen ym. 2006, 25.)

Kaukolämmitykselle tyypillisiin ominaisuuksiin kuuluu lämmön tuotanto keskitetyssä kohteessa, josta se jaetaan kaukolämpöverkon välityksellä yleensä vetenä tai höyrynä asiakkaskiinteistöille. Asiakkaita voivat olla asuintalot, teollisuus, liike- ja julkiset rakennukset. Kaukolämmitys kilpailee talokohtaisen lämmityksen ja vaihtoehtoisten lämmitysmuotojen, kuten maalämmön ja lämpöpumppujen kanssa. Hyötyinä kaukolämmitykselle voidaan mainita energiatehokkuus, käyttövarmuus, erilaiset tuotantomuodot ja helppokäyttöisyys. Toisaalta ongelmia ovat suuret investoinnit kaukolämpöverkon rakennukseen ja niiden pitkät takaisinmaksuajat. Harvaan asutulla alueella ei välttämättä ole edes mahdollisuutta liittyä kaukolämpöverkkoon. (Koskelainen ym. 2006, 25–26.) Kaukolämmön luotettavuus on lähes 100 prosenttia, asiakas on ilman lämmöntoimitusta noin 1-2 tuntia vuodessa (Gebwell 2017).

Kaukolämmön kulutus vaihtelee pitkin vuotta. Se seuraa ulkolämpötilan muutoksia eli kesällä lämmitystä tarvitaan lähinnä vain käyttöveden lämmitykseen. Hetkellinen tehontarve vaihtelee vuodenajoista johtuvaa kuukausikulutusta voimakkaammin. Kaukolämmön kulutus vaihtelee myös vuorokauden aikana, kun esimerkiksi aamuisin ja iltaisin käydään lämpimässä suihkussa. (Koskelainen ym. 2006, 41–42.)

Kaukolämpö on yleisin lämmitysmenetelmä Suomessa. Kaukolämmöllä tuotettiin vuonna 2011 Suomen lämmitystarpeesta 46 %. (Motiva 2017b.) Suomessa kaukolämpö otettiin käyttöön ensimmäisen kerran vuonna 1940 Helsingin olympiakylässä (Koskelainen ym. 2006, 34). Sen jälkeen kaukolämpö on laajentunut 166 kuntaan ja kaupunkiin. Monessa kunnassa kaukolämpö tuotetaan kotimaisilla polttoaineilla. (Energiateollisuus ry a.)

Suomessa asiakas maksaa kaukolämpöryitykselle lämmityspalvelusta. Kaukolämmön hinta vaihtelee paikkakunnittain, mutta pääasiassa hintatasoon vaikuttavat kaukojärjestelmän koko, taajaman tai kaupungin rakenne, investoinnit, laitosten ikä sekä saatavilla

olevat polttoaineet ja energianlähteet. Kaukolämmön käyttömaksu koostuu energiamaksusta ja tehomaksusta, joka on sidottu vesivirtaan tai tehoon. Kiinteistöissä olevilla laitteilla mitataan asiakkaan kuluttama lämpöenergia, jonka mukaan lopullinen lasku syntyy. Käyttömaksujen lisäksi asiakas maksaa liittyessään kaukolämpöön kertaluontoisen liittymismaksun. (Energiateollisuus ry b.)

4.1 Jakelujärjestelmä

Vesikaukolämpöjärjestelmässä lämpöä siirretään putkissa kulkevan veden mukana. Sama vesi kiertää putkistossa uudelleen ja uudelleen, koska luovutettuaan lämmön asiakkaalle, vesi palaa takaisin lämmityslaitokseen, jossa se lämmitetään uudelleen. Yleisin käytössä oleva järjestelmä on kaksiputkijärjestelmä, jossa meno- ja paluuvessille on omat putket. Kaukolämpövesi lämmitetään lämpölaitoksilla kattiloissa tai voimalaitoksella lämmönvaihtimissa. Menoveden lämpötilaa säädetään ulkolämpötilan mukaan. Kaukolämpölaitosten pumput saavat veden liikkeelle kohti asiakaskiinteistöjä. Tarvittaessa painetta korotetaan paineenkorotuspumpuilla, ettei vesi pääse höyrystymään, ja että paine riittää kattamaan kiinteistöjen laitteissa tapahtuvat painehäviöt. (Koskelainen ym. 2006, 43–44.)

Kaukolämpöä tuotetaan lämpökeskuksissa ja voimalaitoksissa, joissa tuotetaan myös sähköä (Koskelainen ym. 2006, 47). Yhteistuotannolla säästetään polttoainetta jopa kolmannes verrattuna sähkön ja lämmön tuotantoon erikseen. Polttoaineina käytetään muun muassa kivihiiltä, maakaasua, turvetta, öljyä, puuta sekä muita uusiutuvia polttoaineita, kuten biokaasua. Kaukolämmityksessä hyödynnetään myös teollisuuden hukkalämpöä. (Energiateollisuus ry 2007, 3.)

Kaukolämmityksen siirtoon tarkoitettuja putkia kutsutaan kaukolämpöjohdoiksi. Johtotyyppinä on useampia, mutta 1980-luvun jälkeen käytännössä kaikki rakennetut johdot ovat kiinnivaahdotettuja. Kiinnivaahdotetut johdot koostuvat polyuretaanieristeellä kiinteästi yhteen liitetystä virtausputkesta ja polyeteenisuojakuoresta. Yksiputkijohdossa meno- ja paluujohdot ovat toisistaan erilliset. Kaksiputkijohdossa on saman polyeteenisuojaputken sisällä sekä meno- että paluujohdot. Kaksiputkijohdolla on pienemmät lämpöhäviöt ja pienempi materiaaliarve, kuin vastaavalla yksiputkijohdolla. Yksiputkijohtoa saa kuitenkin paljon suuremmassa koossa, kuin kaksiputkijohtoa, jota valmistetaan yleensä kokoluokassa DN20-DN200. (Koskelainen ym. 2006, 137–139.)

Liittyessään kaukolämpöverkkoon asiakkaalle asennetaan lämmönjakokeskus, johon kuuluvia laitteita ovat lämmityksen ja käyttöveden lämmönsiirtimet, lämmön säätölaitteet, paisunta- ja varoventtiilit, pumput, lämpö- ja painemittarit sekä sulkuventtiilit. Lämmönjakokeskus sijoitetaan lämmönjakohuoneeseen, jonne tulee myös lämmön myyjän laitteet. Niitä ovat kaukolämmön meno- ja paluuputket, myyjän pääsulkuventtiilit, lianerotin ja erilaiset mittauksiin liittyvän anturit. (Energiateollisuus ry 2007, 6–7.)

4.2 Kaukokylmä

Kaukokylmä eli kaukojäähdytys toimii samalla periaatteella kuin kaukolämpö. Suurimpana erona on kylmä vesi lämpimän sijaan. Kaukokylmä johdetaan kiinteistöihin vastaavanlaisilla putkilla, kuin kaukolämmössäkin. Kylmä vesi kiertää huoneistoissa ja sitoo itseensä lämpöä, jolloin huoneilma viilenee. Lämmennyt vesi jälkeen jatkaa takaisin jäähdytyslaitokselle uudestaan jäähdytettäväksi. Jäähdytyslaitoksella talteen otettu lämpö hyödynnetään vastaavasti kaukolämpöverkkoon. (Pöyry Finland Oy 2015.)

Kaukokylmää tuotetaan neljällä eri tavalla, joita ovat suuret lämpöpumput, vapaajäähdytys, kompressorit ja absorptiokoneet. Suomessa noin 64 % kaukokylmästä tuotettiin lämpöpumpuilla vuonna 2016. Kaukokylmän myynti oli kasvanut yli 60 % vuosien 2011-2016 aikana. (Energiateollisuus ry 2017.)

5 NYKYTILANNE

Kohdeyrityksen lämmöntalteenottojärjestelmän nykytilanteen esiselvitys aloitettiin palaverilla toimeksiantajan ja kohdeyrityksen kanssa. PI-kaavioiden avulla muodostettiin tilanteesta kokonaiskuva, josta tehtiin blokkikaavio. Päähuomio on lämmönvaihtimien lisäksi pumpuissa. Nykytilanteessa kemikaalia tuotetaan nimellisteholla 1450 yksikköä päivässä.

5.1 Järjestelmän rakenne

Lämmöntalteenottojärjestelmä koostuu useammasta erilaisesta vesikierrosta. Tuotekiertoja pyritään jäähdyttämään niin sanotulla välikierrolla, joita on kaksi. Välikierroista siirtyy lämpöä kaupungin kaukolämpökiertoon ja sisäiseen eli tytäryhtiölle ja tehtaalle menevään kaukolämpökiertoon. Välikierrot ovat toisistaan täysin erilliset, eivätkä voi siirtää lämpöä keskenään. Tytäryhtiölle menevästä kaukolämpökierrosta siirretään osa lämmöstä tehtaan kaukolämpökiertoon.

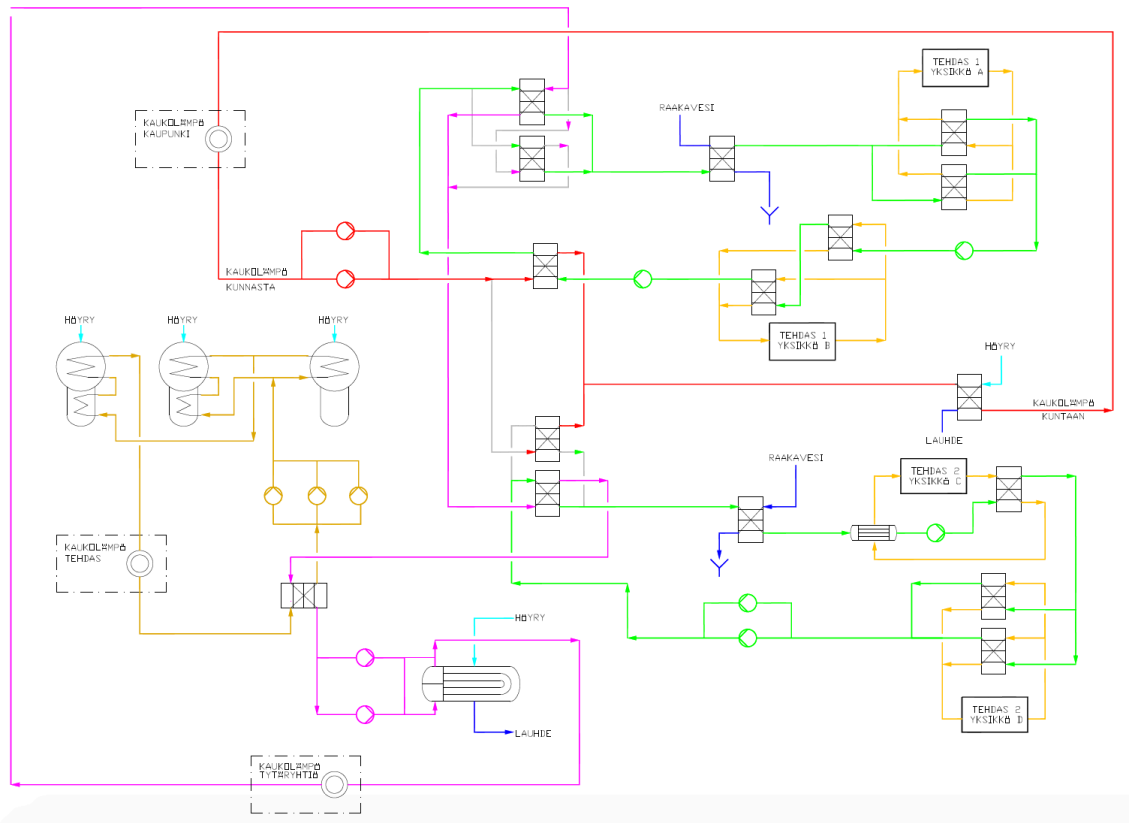
Esimerkiksi kesäisin lämmöntarve kuitenkin vähenee, eivätkä kaupunki tai tytäryhtiö ja tehdas tarvitse niin paljon lämpöä. Yleensä se tarkoittaa, että virtaus kaukolämpöputkistoissa laskee, eikä energiaa saada siirrettyä yhtä paljon pois välikierrosta kuin talvisin. Tuotekierto kuitenkin tarvitsee yhtä paljon jäähdytystä vuoden ympäri eli välikierron täytyy siirtää ylijäänyt lämpö johonkin muualle. Tätä varten jokaisessa välikierrossa on yksi avustava jäähdytyslämmönvaihdin, jossa ylimääräinen lämpö siirtyy kylmään jäähdytysveteen. Lämpöenergiaa menee siis hukkaan, joten talteenottojärjestelmän olisi hyvä toimia niin, että niin sanottua trimmausta joudutaan käyttämään mahdollisimman vähän.

Talteenottojärjestelmä koostuu siis yhteensä 22 lämmönvaihtimesta, jotka on esitetty kuvassa 2. Niistä 8 siirtää lämpöä yksikköoperaatioiden tuotekierrosta välikiertoon, kolme välikierrosta tytäryhtiön kaukolämpökiertoon ja kaksi välikierrosta kaupungin kaukolämpöverkkoon. Lisäksi yksi vaihdin siirtää lämpöä tytäryhtiön kierrosta tehtaan omaan kiertoon. Välikiertoja on kaksi, joten myös avustavia jäähdytyslämmönvaihtimia on kaksi. Loput lämmönvaihtimet ovat höyryvaihtimia ja niitä käytetään, jos prosessilämmöstä saatu energia ei riitä tarpeeseen nähden.

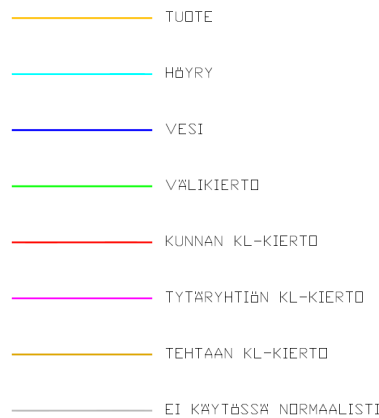
Päätuote kemikaalin valmistuksessa käytettäviä tehdasyksiköitä on kaksi, joista kussakin on kaksi kappaletta kemikaalin muodostuslämpöä tuottavaa yksikköoperaatiota.

Jokaista yksikköoperaatiota jäähdytetään kahdella lämmönsiirtimellä. Prosessilämpöä otetaan siis talteen kahdeksassa eri lämmönsiirtimessä. Opinnäytetyössä ei ole keskitytty kemikaalin valmistusprosessiin muuten, kuin ottamalla huomioon prosessille optimaaliset lämpötilat. Prosessilämpö on kuitenkin vain sivutuote ja päätarkoitus on jäähdyttää prosessia.

Kuvassa 1 on esitetty yksinkertainen blokkikaavio koko järjestelmästä. Kuvassa 2 on selvitykset eri väreille. Väri selitteiden lisäksi kaavioon lisättiin laitelista kaikista siinä esiintyvistä laitteista.



Kuva 2 Prosessilämmön talteenottojärjestelmän kierrot



Kuva 3 Värien selitteet

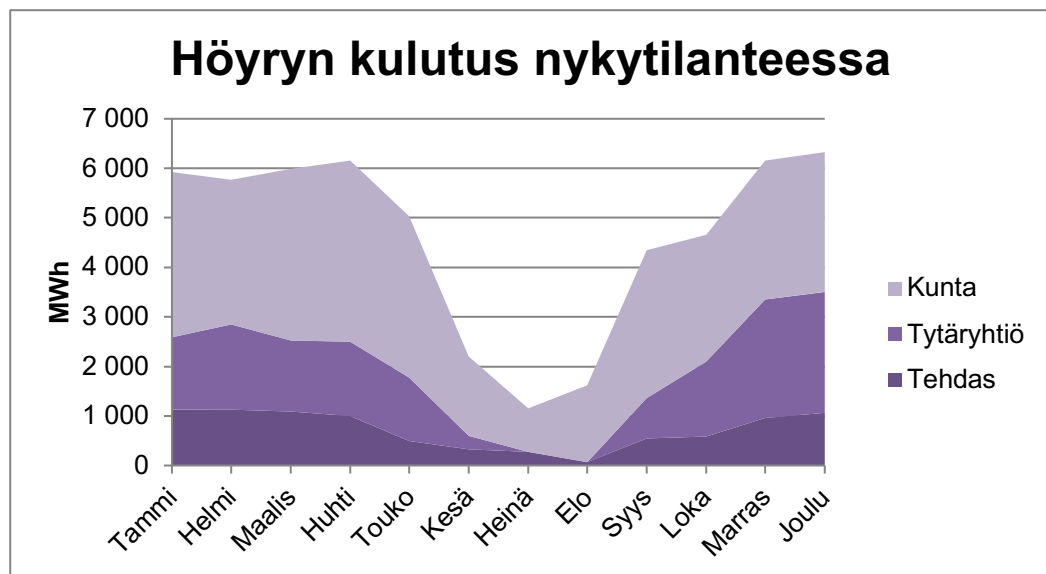
Kuten kuvasta 1 voidaan huomata välikierrot käyvät ensin yksikköoperaatio A:lla, jossa jäähdystarve on pienempi, kuin yksikköoperaatio B:llä, johon virta jatkaa seuraavaksi. Yksikköoperaatio A:n jälkeen lämmennyt välikierto jatkaa kaukolämmönvaihtimille. Tehdasyksikkö 1:n puolella ensimmäisenä on kaupungin kaukolämmönvaihdin ja sen jälkeen tytäryhtiön kaukolämmönvaihdin. Tehdasyksikkö 2 puolella välikierto siirtää suurimman osan lämmöstä tytäryhtiön kaukolämpökiertoon. Molemmilla tehtailla ennen ensimmäisiä yksikköoperaatioita on aiemmin mainitut avustavat jäähdytysvaihtimet, joilla varmistetaan tarpeeksi viileä välikierron lämpötila tuotevaihtimille.

Talteen otettu energia jakautuu kulutuskohteiden välillä pääasiassa niin, että puolet tehdasyksikkö 1:n tuottamasta lämmöstä siirtyy kaupungin kaukolämpöverkkoon ja puolet tytäryhtiön kaukolämpökiertoon. Kaikki tehdasyksikkö 1:n tuottamasta lämmöstä siirtyy tytäryhtiön kaukolämpökiertoon. Poikkeuksena ovat seisokkipäivät, jolloin vain toinen tehdasyksiköistä on käytössä. Jos tehdasyksikkö 1:llä on seisokki, osa tehdasyksikkö 2:n lämpöenergiasta siirtyy erillisen vaihtimen kautta kaupungin kiertoon. Jos tehdasyksikkö 2:lla on seisokki, tehostetaan tehdasyksikkö 1:n sisäiseen kiertoon siirtyvää energiamäärää ottamalla käyttöön toinen lämmönvaihdin, joka on kytketty rinnan päävaihtimen kanssa. Näihin vaihtimiin tulevat virrat on piirretty virtauskaavioissa harmaalla värillä.

Talvella myös kaupungin kaukolämpöverkossa vaaditaan tiettyjä lämpötiloja, jotka tulevat kaukolämpöveden menolämpötila -kaaviosta (liite 7). 95-asteisella vedellä pärjätään vielä -5 °C lämpötilaan asti, mutta ulkolämpötilan laskiessa, veden lämpötilan pitää nousta. Nykytilanteessa prosessilämmöllä vesi saadaan lämmitettyä maksimissaan 85–

86 °C. Höyryllä tarvitsee kylmimpinä pakkaspäivinä lämmittää vesi lämpötilaan 115 °C. Tytäryhtiölle menevän kaukolämpöveden pitäisi olla noin 85 °C, eikä siitä nostotarvetta juurikaan ole. Kaaviosta 1 nähdään, kuinka höyryn tarve vaihtelee vuodenaikojen mukaan.

Muutosehdotuksia varten otettiin ylös myös virtausnopeudet ja putkikoot. Painehäviöt kasvavat liian suuriksi, jos putki on siirrettävään vesimäärään nähden liian pieni. Tytäryhtiön kierrossa maksimi virtaama on 330 m³/h ja kaupungin kaukolämpöverkkoon 260 m³/h. Välikiertojen virtaukset olivat hieman päälle 300 m³/h.



Kaavio 1 Höyryn kulutus

Höyryn käyttö ei kuitenkaan aina ole huono asia. Tehdas tuottaa itse höyryä, ja jos sitä on ylimäärin, on sitä järkevää käyttää myös kaukolämmön tuotannossa.

5.2 Virtauskaavio

Virtauskaaviossa kuvataan jotain prosessia tai prosessilaitosta piirrosmerkkien ja niiden välillä kulkevien virtausviivojen avulla. Virtausviivat esittävät yleensä massan, energian tai energian kuljettajien virtoja, ja piirrosmerkit laitteita. Virtauskaaviossa esitettävää perusinformaatiota ovat muun muassa tulevien ja lähtevien virtojen suunta ja reitti, materiaalien nimitykset ja virtausmäärät tai massavirrat. (SFS-EN ISO 10628, 2015, 3.)

Blokkikaavio muokattiin AutoCADilla virtauskaavioksi pienillä muutoksilla. Suurin ja näkyvin niistä oli virtojen numerointi.

5.2.1 Energiatase

Nykytilanteen lopullisessa virtauskaaviossa on käytetty kohdeyrityksen vuoden 2017 tammikuun kaukolämpöraporttia, jossa näkyy käytetyn kaukolämmön kokonaismäärä ja mikä osuus siitä on tuotettu itse, ja mikä höyryllä. Raportissa oli myös eritelty 1 ja 2 tehdasyksiköiden tuottama lämpö sekä se, miten paljon kaukolämpöä kulutuskohteisiin meni. Saatiin muodostettua seuraavanlainen energiatase:

	TY1	TY2	Tytäryhtiö/tehdas	Höyry	Yhteensä
Tytäryhtiö	3162	8536	-1794	1466	11370
Kaupunki	3426	0	0	3329	6755
Tehdas	0	0	1794	1126	2920
Yhteensä	6588	8536	0	5921	21045

Taulukko 1 Energiämäärien jakautuminen kaupungin, tehtaan ja tytäryhtiön välillä tammikuussa 2017, Yksikkö MWh

	Lämpömäärä	
	MWh	Teho MW
KL-vaihtimet		
LV001	3162	4,4
LV002	3426	5,9
LV003	8536	10,8
LV004	1794	2,4
Höyryvaihtimet		
LV007	1466	3,5
LV008	3329	9,1
LV009	1126	1,5

Taulukko 2 Energian jakautuminen lämmönvaihtimien välillä maksimitilanteessa ja lämmönvaihtimien koko tammikuun lämpömäärä

Taulukosta 1 voidaan huomata, että kaupungin kaukolämpökiertoon menee talteen otettua lämpöä noin puolet tarvittavasta määrästä. Lämmöstä tuotetaan höyryllä loput. Maksimitilanteessa, kun kaupungin kaukolämpöverkkoon halutaan 15 MW teho, höyryvaihtimilla lämmitetään vettä noin 9 MW edestä ja omalla prosessilämmöllä noin 6MW. Tämä johtuu pääosin siitä, että prosessista tuleva vesi saadaan lämmitettyä vain 90 °C:een, jolloin kaupungin kaukolämpöveden lämpötila jää sitäkin alhaisemmaksi. Kylmänä

päivänä kaukolämpövesi pitää lämmittää 115 °C:een, jolloin höyryvaihtimessa kaukolämpövesi lämpiää noin 20 astetta.

Kaukolämmön tuotanto onkin keskitetty omiin tarpeisiin. Tehtaalla ja tytäryhtiöllä tarvittavasta lämpöenergiasta noin 80 % on tuotettu itse. Siellä ei myöskään ole tarvetta aivan yhtä korkealle lämpötilalle, kuin kaupungin verkossa. Höyryä kuitenkin kuluu yhteensä noin 5 MW. Maksimilämmönkulutus tytäryhtiöllä on 16 MW ja tehtaalla 4 MW.

Molemmissa välikierroissa olevat avustavat jäähdytyslämmönvaihtimet kuitenkin joutuvat jäähdyttämään kiertoa eli kaikkea lämpöä ei saada talteen. Taulukon 1 arvoilla laskettuna lämmönsiirtoteho molempien tehdasyksiköiden talteenottojärjestelmälle on yhteensä noin 20 MW. Päätuotteen kaikkien jäähdytysvaihtimien teho on kuitenkin yhteensä noin 32 MW. Viemäriin lämpöä menee trimmausvaihtimien kautta siis tehdasyksikkö 1:llä noin 8 MW ja tehdasyksikkö 2:n puolella 4 MW.

5.3 Aspen Plus V10 virtausmalli

Aspen Plus V10 on Aspenin prosessisimulaatio-ohjelmisto. Se on sisällöltään kattava etenkin kemian teollisuuden simulaatioille, valmiiden reaktiomallien ja aineominaisuuksien vuoksi. Ohjelma on 35 vuoden kehityksen tuote ja sen kehityksessä ovat auttaneet kemian alan parhaat yritykset palautteellaan. (Aspentech.com, Aspen plus, 2018)

Talteenottojärjestelmän simulaatio tehtiin keskittyen pääasiassa lämmönsiirtoon liittyviin ominaisuuksiin. Kemikaalin valmistusprosessista mallissa näkyy vain lämmönsiirtimille tulevat ja lähtevät virrat.

5.3.1 Simulaation pohjatiedot

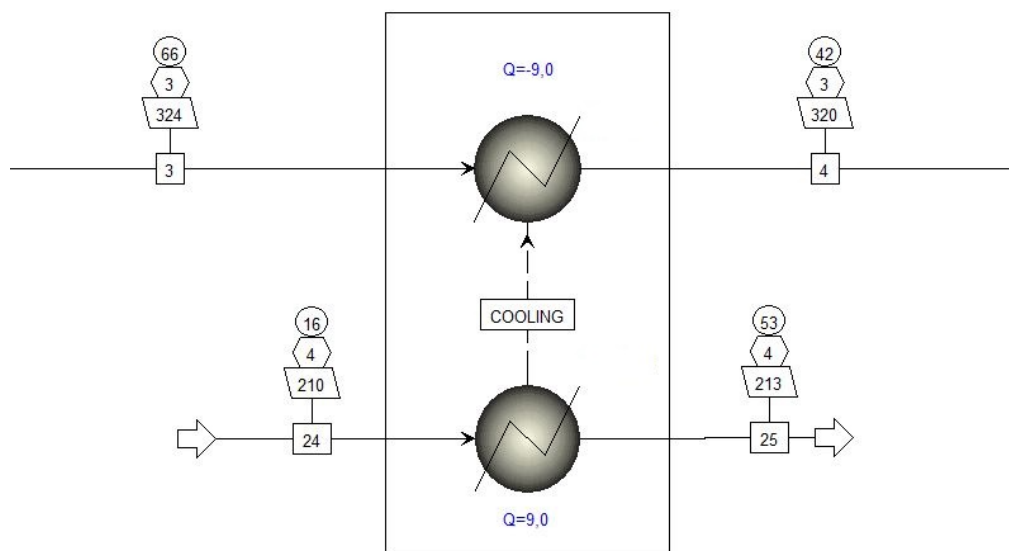
Ennen varsinaista simulointia, ohjelmaan määritellään pohjana toimivat laskentamenetelmät. Laskentamenetelmät löytyvät ohjelman omasta kirjastosta. Sen lisäksi määritellään myös simulaatiossa käytettävät virtaavat aineet.

Aspeniin siis tehtiin uudestaan jo aiemmin piirretty virtauskaavio, ohjelman omilla symboleilla. Ohjelmasta löytyy erilaisia blokkeja ja virtausviivoja. Virtausviivoja on kolme, joista yksi kuvaa materiaalivirtaa, toinen lämpövirtaa ja kolmas työvirtaa. Lämmönsiirtimiä kuvattiin Heater-blokilla, jonka laskentakaavat olivat saatavilla olevista

yksinkertaisimmat. Yhtä lämmönsiirintä kuvaamaan käytettiin kahta Heater-blokkia, koska yhteen blokkiin oli mahdollista liittää vain kaksi virtaa. Blokkien väliin piirrettiin lämpövirta. Heater-blokki tarvitsee kaksi määritelmää, joista toisena on kaikissa käytetty painetta ja toisena ulos tulevaa lämpötilaa, lämpötilaeroa tai tehoa. Painehäviöitä ei otettu huomioon, koska niitä ei jokaiselle vaihtimelle tiedetty, eikä paineen lasku vaikuta merkittävästi lämmönsiirtotehoon. Aluksi määritettiin kaikkiin vaihtimiin lämpötilaero, mutta simulaation edetessä sitä vaihdettiin aiemmin mainittujen välillä sopivuuden mukaan. Kun vaihtimeen tuli lämpövirta toisesta blokista, ei tarvinnut määritellä kuin paine.

Materiaalivirralle määritettiin nimi, lämpötila, paine, virtaus ja aine. Paineena käytettiin melkein kaikissa virroissa 4 bar. Lämpötilat ja virtaukset katsottiin vanhasta lohkoavioista. Lämpötilat muuttuivat jonkun verran, kun lopullinen energiatase tehtiin kaukolämpöraportin perusteella, mutta virtaukset pysyivät suunnilleen samoina. Kahden blokin välissä olevalle lämpövirralle ei tarvinnut antaa kuin nimi.

Kuvassa 4 on esitetty lämmönvaihdin LV010, joka on tehdasyksikkö 1:n välikierron avustava jäähdytyslämmönvaihdin. Virrat 3 ja 4 ovat siis välikiertoa ja 24 ja 25 sitä viilentävää jäähdytysvettä. Simulaatio laskee siirtyvän jäähdytysenergian määrän virran 24 ja toisen vaihdin-blokin määrittelyssä olevien arvojen perusteella.



Kuva 4 Esimerkki yhden lämmönvaihtimen kuvaamisesta Aspenissa

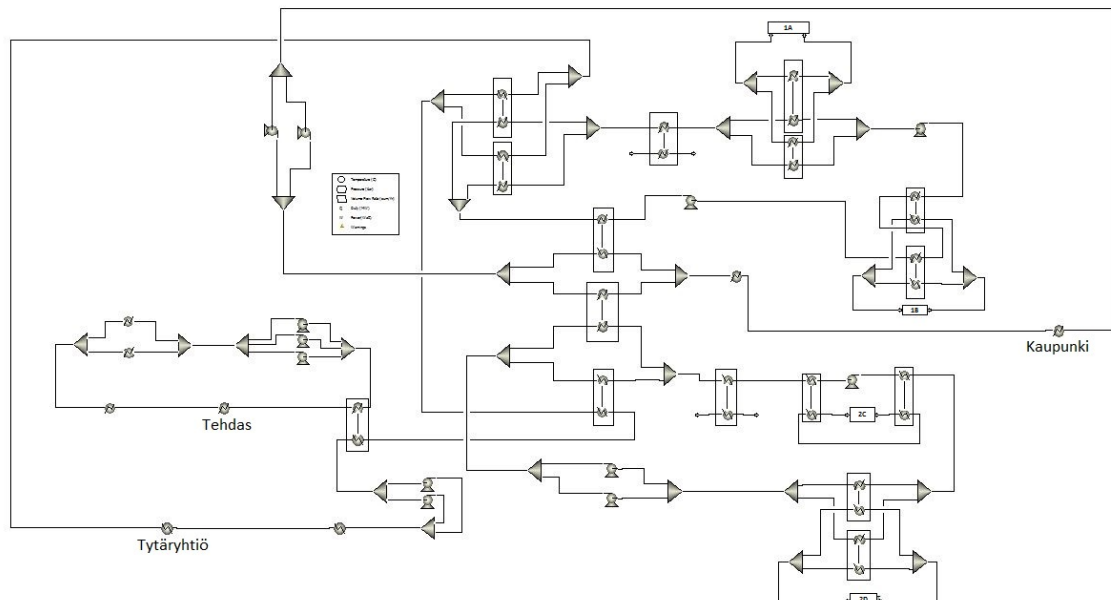
5.3.2 Simulaatio

Varsinainen malli simuloitiin jokainen lämmönsiirrin ja vesikierto kerrallaan. Ohjelma antaa virheilmoituksen herkästi, eikä silloin laske koko simulaatiota loppuun. Vesikierrat ovat suljettuja, jolloin simulaation onnistumiseksi lämpötilan, virtauksen ja virtaan sitoutuneen energian täytyy olla yhtä suuret alussa ja lopussa. Kierrot simuloitiin ensin avoimena, ja ennen sulkemista vähintään yhteen lämmönsiirtimeen määritettiin ulostulevan virran lämpötila. Lämmönsiirtimeen jälkeiseen virtaan määritettiin sama lämpötila, paine ja virtausnopeus. Näin muita arvoja oli helpompi muuttaa ja ohjelma osasi laskea kierron läpi ilman virheilmoituksia, kun sillä oli yksi piste, joka pysyi aina samana.

Lämmön käyttökohteita eli kaupunkia, tytäryhtiötä ja tehdasta kuvattiin myös lämmönsiirrin-blokeilla.

Muita järjestelmässä käytettyjä blokkeja olivat pumput ja virtojen jakamiseen ja yhdistämiseen tarkoitetut sekoitus- ja erotusblokit. Pumppuihin määriteltiin paljonko ne nostivat painetta ja erotusblokkeihin kuinka virrat jakautuivat.

Kun malli oli saatu valmiiksi, simulaatiosta ajettiin kaikista virroista yhteenvedo. Kuvassa 5 näkyy koko simulaatio piirrettyinä Aspen Plus:ssa.



Kuva 5 Koko simulaatio Aspenissa

5.4 Nykytilanteen selvityksessä heränneet huomiot

Nykytilanne haluttiin selvittää mahdollisimman pitkälle ennen muutosehdotusten pohtimista. Kaupungin kaukolämpövaihtimella siirretty lämpömäärä oli huomattavasti pienempi, kuin aikaisemmissa laskuissa ilmoitettu teho. Koska lämpöä tarvitsee ajaa avustavilla jäähdytysvaihtimella ulos niin paljon, järjestelmässä selkeästi olisi potentiaalia myydä lämpöä enemmänkin kaupungille.

Nykytilannetta tutkiessa haluttiin myös saada selville, kuinka korkea veden lämpötila on tarpeen eri paikoissa. Kaupungin kaukolämpöveden lämpötilat selvisivät erillisestä kaaviosta, mutta tytäryhtiön ja tehtaan tarve saatiin suoraa kohdeyritykseltä (Sähköposti 22.8.18). Tavoitelämpötilat vaikuttivat höyryn kulutukseen.

6 MUUTOSEHDOTUKSET

Tehtaalle suunniteltujen investointien myötä prosessilämmön talteenottopotentiaali kasvaa merkittävästi. Muutokset tehdään kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa tehdasyksikkö 1:n yksikköoperaatio B:n prosessin tuotetta täytyy jäähdyttää noin 20 MW, entisen 15 MW sijasta. Jäähdytystarpeen kasvu johtuu tuotteen virtausmäärän noususta ja aiempaa alemmasta yksikköoperaatioon paluulämpötilasta. Vaihtimille tulevan tuotteen lämpötila pysyy kuitenkin suunnilleen samana eli välikiertoa ei voida lämmitä aiempaa korkeampaan lämpötilaan.

Toisessa vaiheessa tuotteen tuotantokapasiteetti nousee 1700 yksikköön. Lämpöä saadaan otettua talteen noin 30 MW pelkästään yksikköoperaatio B:n uusilta lämmönvaihtimilta. Myös yksikköoperaatio A:n jäähdytystarve jonkin verran kasvaa. Tehdasyksikkö 2:lla tuotantokapasiteetti ja näin ollen myös jäähdytystarve laskee jonkin verran muutosten myötä.

Vaihtimien laitetoimittaja on antanut alustavat virtausarvot yksikköoperaatio B:n uusille lämmönvaihtimille. Näitä arvoja käytettiin muutosehdotusten pohjana. Koska lämpöä otetaan varsinkin myöhemmässä vaiheessa huomattavasti aiempaa enemmän talteen, välikierron virtaus nousee yli kaksinkertaiseksi aiemmasta. Vanhalla järjestelmällä jatkaaminen tarkoittaisi koko välikierron putkiston ja instrumenttien uusimista, kun muun muassa painehäviöt kasvaisivat liian suuriksi.

Muutosehdotuksia tehtiin kaksi, yksi kullekin muutosvaiheelle. Ensimmäinen muutosehdotus keskittyy ratkaisemaan tehdasyksikkö 1 puolella tapahtuvan lämmöntalteenotto kapasiteetin nousun ja toinen muutosehdotus muokkaa myös tehdasyksikkö 2 puolta, jolloin koko järjestelmää saadaan yksinkertaistettua.

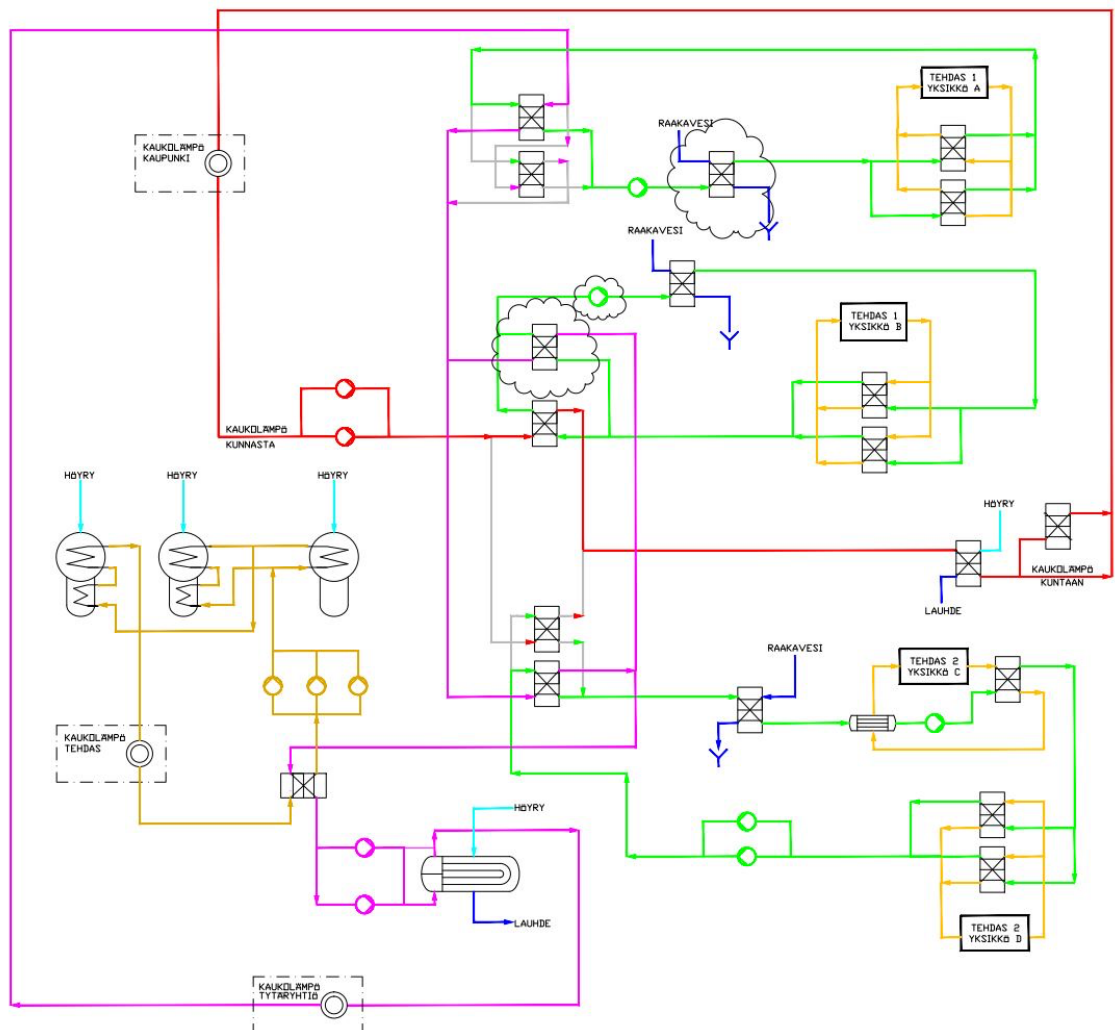
6.1 Muutosehdotus 1

Yksi tapa välttää koko välikierron putkiston uusiminen, on tehdä yksikköoperaatio A:lle ja B:lle omat välikierrat. Molemmissa välikiirroissa olisi siis kaksi tuotteen jäähdytysvaihdinta, avustava jäähdytysvaihdin ja kaukolämpövaihdin.

Yksikköoperaatio B:ltä tulee kuitenkin todella suuri määrä energiaa ja jos uudistusten jälkeen kaikki talteen otettu lämpö siirrettäisiin kaupungin kaukolämpökiertoon kasvaa

sen virtaus myös suureksi. Lämpöä ei myöskään saada tasaamaan tytäryhtiön kulutusta, jolloin höyryä joudutaan käyttämään saman verran kuin ennenkin. Tultiin johtopäätökseen, että lämpöä olisi järkevin siirtää yksikköoperaatio B:n kierrosta uudella vaihtimella tytäryhtiön kaukolämpökiertoon.

Uusi kaukolämmön vaihdin olisi yksikköoperaatio B:n välikierron puolelta rinnan kaupungin kaukolämmönvaihtimen kanssa ja tytäryhtiön kierron puolelta rinnan tehdasyksikkö 2:n tytäryhtiön kaukolämmönvaihtimen kanssa (Kuva 6). Muutosehdotus simuloitiin Aspenissa erikseen 1450 ja 1700 yksikön tuotantomäärille. Välikiertoon tulisi haarotuskohdan säätöventtiilit, joilla voitaisiin tarpeen mukaan kasvattaa virtausta uudelle tytäryhtiön vaihtimelle ja näin ollen siirtää myös lisää lämpöä tytäryhtiön kiertoon tarpeen mukaan. Vastaavasti myös tytäryhtiön kiertoon tulisi uuden vaihtimen ja tehdasyksikkö 2 vaihtimen haaraan säätöventtiilit.



Kuva 6 Muutosehdotus 1 blokkikaavio

Muutos on ajateltu tehtävän 1450 yksikön prosessimuutosten yhteydessä. Uudet vaihtimet, jotka on kuvassa 6 merkitty pilvellä ja uudet putket mitoitetaan 1700 yksikön tuotantomäärälle, jotta uusia laitteita ei tarvitse ostaa kahteen kertaan.

6.1.1 Energiatase

Aspen simuloinnin perusteella laskettiin energiatase 1450 yksikölle. Tase on suuntaa antava ja laskettu tammikuulle, kuten nykytilanteenkin vastaavissa taulukoissa.

	Lämpömäärä	
	MWh	Teho MW
KL-vaihtimet		
LV001	3450	4,6
LV002	4673	8,8
LV003	7242	8,9
LV004	1944	2,6
LV005	4510	7,3
Höyryvaihtimet		
LV007	628	1,5
LV008	3107	8,4
LV009	1026	1,4

Taulukko 3 Muutosehdotus 1 jälkeen energian jakautuminen lämmönvaihtimien välillä maksimitilanteessa ja lämmönvaihtimien arvioitu koko tammikuun lämpömäärä

	TY1	TY2	Tytäryhtiö/tehdas	Höyry	Yhteensä
Tytäryhtiö	7960	7242	-1840	628	13990
Kaupunki	4673	0	0	3073	7746
Tehdas	0	0	1840	1155	2995
Yhteensä	12633	7242	0	4856	24731

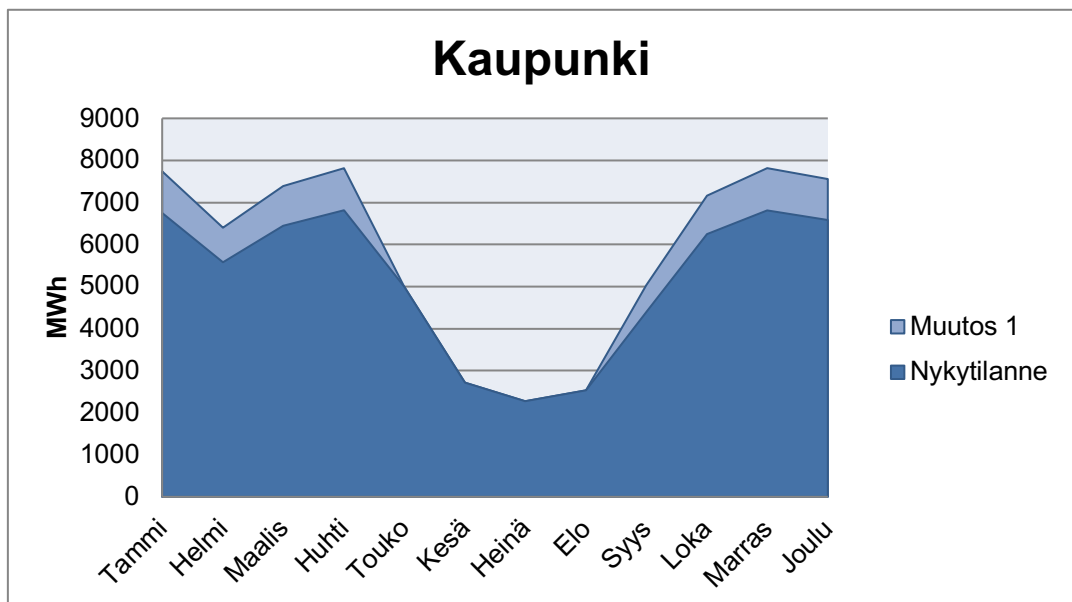
Taulukko 4 Muutosehdotus 1:n lämpömäärät ja jakautuminen tytäryhtiön, kaupungin ja tehtaan kesken

Taulukkoon 4 on lisätty uusi tytäryhtiön kaukolämmönvaihdin LV005, jolle ei vielä ole laitepositiota. Muutosehdotuksen jälkeen energiaa siirrettäisiin maksimitilanteessa kaupunkiin 17,2 MW, tytäryhtiölle 19,7 MW ja tehtaalle 4 MW.

6.1.2 Vertailu nykytilanteeseen

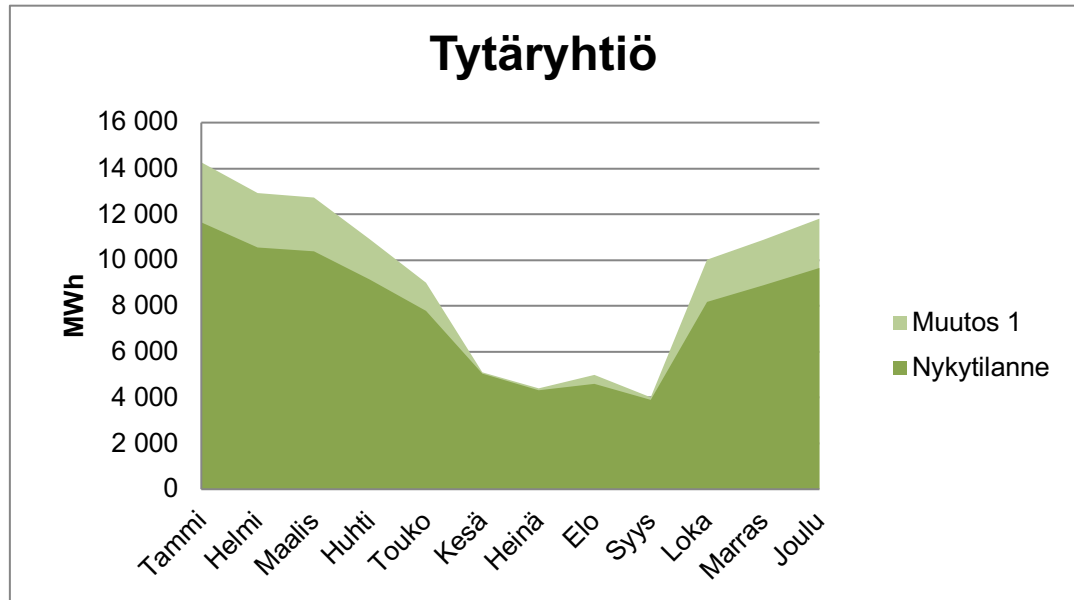
Jos verrataan taulukoita 1 ja 3, huomataan, että höyryn kulutus laskee muutosehdotuksessa jonkin verran. Muutosehdotuksen simulaatiossa höyryä kulutetaan tammikuussa 1065 MWh vähemmän, kuin nykytilanteessa. Pääosin tämä johtuu siitä, että tytäryhtiölle menevää vettä saadaan muutoksella lämmitettyä hieman enemmän. Kaupungin kiertoon vaikutus ei ole suuri, koska vettä ei saada prosessista lämmitettyä tarpeeksi ja se tarvitsee edelleen höyryä saavuttaakseen tarvittavan lämpötilan. Koko säästön arvioidaan olevan vuodessa noin 11 000 MWh.

Kaupungin kaukolämpökiertoon siirtyvä energiamäärä ei nouse vielä kovin merkittävästi. Määrällisesti vettä saadaan lämmitettyä aikaisempaa enemmän prosessilämmöllä, koska välikierrossa virtaa enemmän vettä. Kuitenkin, koska kaukolämpövesi lämmitetään itse lopulliseen ulkolämpötilasta riippuvaan lämpötilaan höyryllä, ei lämpöä saada myytyä enempää ilman kaukolämpöveden virtauksen nostoa. Kaukolämpöä saadaan tammikuussa siirrettyä kaupunkiin noin 1000 MWh nykytilannetta enemmän, mikä vuosisitasolla vastaa noin 7 000 MWh:a. Suomalainen omakotitalo kuluttaa keskimäärin 16 000 kWh lämpöenergiaa eli lisääntyneellä lämpömäärällä voitaisiin lämmittää noin 430 kotitaloutta (Energiatehokas koti 2018).



Kaavio 2 Kaupunkiin tuotetun kaukolämmön muutos nykytilanteeseen verrattuna

Muutoksen jälkeen tytäryhtiölle pystytään maksimitilanteessa tuottamaan jonkin verran enemmän energiaa kuin nykytilanteessa. Höyryn käytön laskettiin vähenevän noin kolmasosaan nykyisestä. Tytäryhtiölle lämpöä siirtyisi tammikuussa noin 3200 MWh enemmän, mikä vastaisi vuositasolla 19 000 MWh. Tytäryhtiölle siirretystä lämmöstä yritys ei kuitenkaan saa suoraa rahaa, mutta se parantaa tytäryhtiön prosessien hyötysuhdetta.



Kaavio 3 Tytäryhtiön kaukolämmön tuotanto, verrattuna nykytilanteeseen

Profiilit ovat suuntaa antavia ja tehty Aspen -simulaation perusteella. Kesäkuukausina kulutus on pienempää, jolloin sen arveltiin pysyvän samalla tasolla kuin aiemmin, mutta talvikuukausina varsinkin kaupungin kaukolämpökiertoon pystytään varmasti siirtämään kasvaneen nimellistehon verran lämpöä.

Höyryn hintana laskelmissa on käytetty 15 €/MWh ja myydyin kaukolämmön hintana 15,7 €/MWh. Kaupungin kaukolämpökiertoon siirretystä lämmöstä saadaan jatkossa tuottoa noin 114 000 € vuodessa enemmän. Höyryn käytön vähentymisestä syntynyt säästö on noin 175 000 € vuodessa. Kokonaistuotto järjestelmälle on siis noin 289 000 € vuodessa.

6.1.3 Kustannusarvio

Muutosehdotuksen alustava kokonaiskustannusarvio on esitelty liitteessä 1. Kustannusarvion ja vertailujen perusteella saatiin laskettua NPV ja IRR 20 vuodelle. Uusia pääkomponentteja olisivat tytäryhtiön lämmönvaihdin, säätöventtiilit, lisäjäähdytysvaihdin ja

vähintään yksi pumppu yksikköoperaatio B:n välikiertoon. Alkuinvestoinniksi arvioitiin noin 801 000 euroa.

NPV olisi sisäisellä alennusprosentilla 15 % noin 520 000 euroa. IRR samoilla arvoilla laskettuna 26 %.

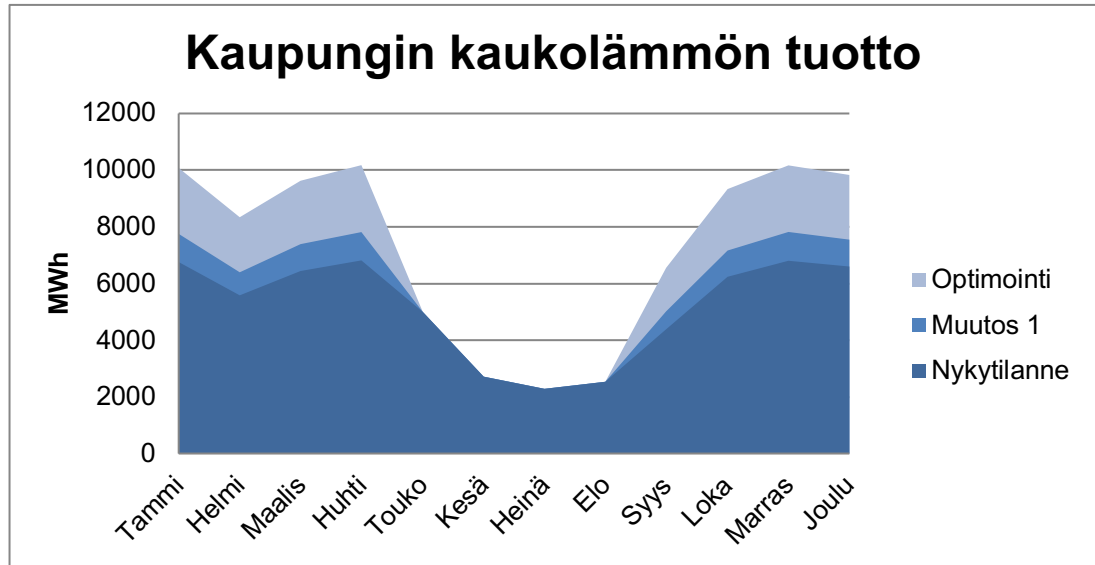
6.1.4 Optimointi

Ensimmäisestä muutosehdotuksesta tehtiin myös optimoitu versio, jossa haarukoitiin millaisia lämpötilan ja virtauksen nostoja pitäisi tehdä, että koko lämmöntalteenotto systeemi olisi kustannustehokkaampi.

Päätuotteen lämpötilaan ja virtausnopeuteen vaikuttamalla voitaisiin saada myös välikierron lämpötilaa nostettua. Kohdeyrityksen kanssa pohdittiin esimerkkivaihtoehtoja, joilla Aspenin simulaatio tehtiin. Välikierron lämpötilaa saatiin nostettua noin viidellä asteella.

Kaupungin kaukolämpövesi saatiin näin ollen lämmitettyä myös viisi astetta lämpimämmäksi. Energiaa saataisiin siirrettyä samalla virtauksella kaukolämpökiertoon noin 1,5 MW enemmän, joka laskisi höyryn kulutuksen arvosta 8,4 MW arvoon 6,9 MW. Virtausta nostamalla olisi mahdollista saada myytyä enemmän lämpöä kaupungille. Nostamalla kaukolämpöveden virtausta 50 m³/h:lla nousisi höyryn kulutus aikaisempaan. Kaupunkiin menisi tällöin lämpöenergiaa reilulla 20 MW teholla. Jos virtausta lisättäisiin vielä 30 m³/h, höyryä kuluisi megawatin verran enemmän, mutta kaupunkiin lämpöä virtaisi melkein 23 MW. Kesällä kaukolämpövedettä tarvitsee lämmittää 5 °C aikaisempaa vähemmän, mikä vaikuttaa myös höyryn kulutukseen.

Tytäryhtiön ja tehtaan sisäiseen kaukolämpökiertoon optimoinnilla ei kovasti vaikutusta olisi. Tytäryhtiön maksimienergiatarve on noin 20 MW ja sinne tulevan veden pitäisi olla 85 °C, jolloin virtaus on noin 350 m³/h. Tehtaalta kuitenkin siirretään sisäisestä kaukolämpökierrosta lämpöä ennen, kuin vesi jatkaa tytäryhtiölle, jolloin lämpöä pitäisi olla si-
toutunut veteen 2-3 MW enemmän, kuin mikä tytäryhtiön tarve on. 1450 tonnin tuotantokapasiteetin prosessista ei saada tarpeeksi korkeita lämpötiloja, että se olisi täysin mahdollista. Optimoinnilla saatiin kuitenkin säästettyä höyryn kulutusta tytäryhtiölläkin noin puoli megawattia.



Kaavio 4 Optimoinnin vaikutus kaupungin kaukolämmön tuotantoon

Kasvanut kaukolämmöntuotanto kaupungille kuitenkin nostaa tuottoja entisestään. Nykytilanteeseen verrattuna optimoinnilla saataisiin lämpöä myytyä noin 24 000 MWh vuodessa enemmän, mikä rahallisesti tarkoittaa noin 380 000 euroa. Höyryn kulutuksen lasku toisi vuosittain noin 200 000 euron säästön. Optimoinnilla saataisiin siis tuplattua muutosehdotus 1:en tuotto.

6.2 Muutosehdotus 2

Toinen muutosehdotus on ajateltu tehtävän 1700 yksikön tuotantokapasiteetti muutosten kanssa samaan aikaan. Vaikka tuotantokapasiteetin kasvaessa 1450 yksikköön ei olisi muutosta tehty, niitä olisi nyt pakko tehdä. Vanha talteenottojärjestelmä ei pysty jäähdyttämään tuotetta tarpeeksi tehokkaasti.

Tehdasyksikkö 1 puoli pysyy pääpiirteittäin samana, kuin ensimmäisessäkin muutosehdotuksessa. Yksikköoperaatio A:n välikierto kulkee edelleen kaukolämmönvaihtimen LV001 läpi samoilla virtausmäärillä. Myöskin yksikköoperaatio B:n välikierto on rakenteeltaan samanlainen, kuin muutosehdotus 1:ssä, mutta virtaukset, prosessin lämpötilat ja talteen otetun lämmön määrä paljon suuremmat. Tehdasyksikkö 2 puolella tuotanto laskee tehdasyksikkö 1:n tuotantokapasiteetin nousun myötä. Tässä muutosehdotuksessa tehdään tehdasyksikkö 2:lle sama, kuin edellisessä muutoksessa tehdasyksikkö 1:lle eli jaetaan nykyinen välikierto kahteen erilliseen kiertoon. Muutos yksinkertaistaa

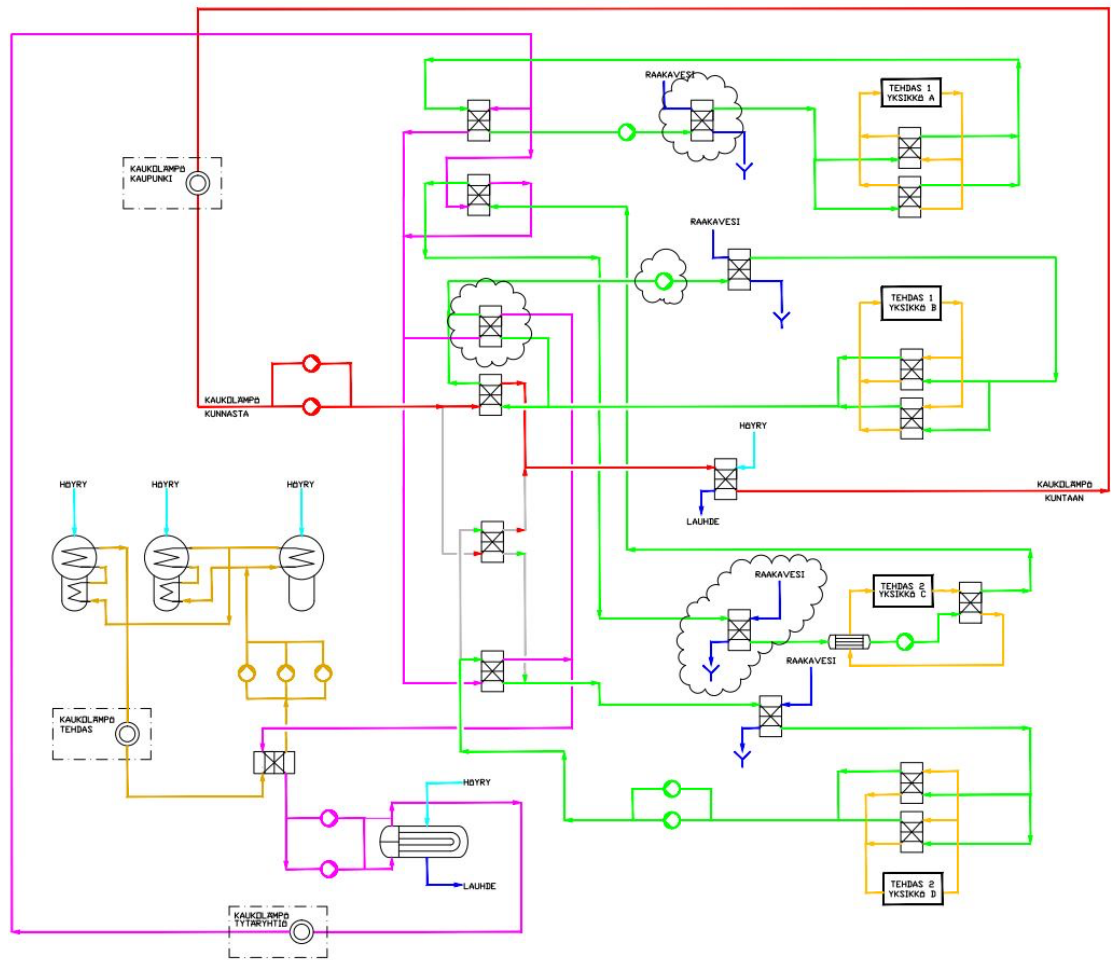
järjestelmää, kun jokainen välikierto käy vain yksillä jäähdytysvaihtimilla ja kaukolämmönvaihtimella.

Yksikköoperaatio A:lta ja C:lta saatavat lämpötilat ovat suunnilleen samoja ja energiamäärät ovat pieniä. Tehdasyksikkö 2:n yksikköoperaatio C:n uusi kierto viedään kaukolämmönvaihtimelle LV006, jota on aikaisemmin käytetty tehostamaan tehdasyksikkö 1 välikierrosta tytäryhtiön kiertoon siirrettyä lämpövirtaa. Lämmönvaihdin LV006 on kuitenkin noin 40 vuotta vanha, mikä voi johtaa uuden vaihtimen hankintaan. Tehdasyksikkö 2:n yksikköoperaatio D:lta talteen otettu lämpö siirretään edelleen tytäryhtiön kiertoon vaihtimen LV003 läpi, kuten aiemminkin. Nykyisen kierron avustava jäähdytyslämmönvaihdin pidetään yksikköoperaatio D:n kierrossa ja yksikköoperaatio C:n kiertoon hankitaan uusi noin 4 MW avustava jäähdytyslämmönvaihdin. Kun kierrot on eristetty toisistaan, niille riittää korkeampikin välikierron lämpötila jäähdytykseen.

Tytäryhtiön kaukolämpökierto kulkee samoista vaihtimista läpi kuin ennenkin, mutta virtaus nousee noin 20 m³/h. Lämpöä saadaan niin paljon talteen, että myös tehtaalle voidaan siirtää kaikki sen tarvitsema lämmitysenergia tytäryhtiön kierrosta. Höyryä ei tarvita enää yhtä paljon kuin aiemmin, koska prosessista saadaan korkeampi veden lämpötila.

Muutosehdotus 2:ssa kaupungin kaukolämpökierron virtausta nostetaan niin, että koko lämmöntarve saadaan talvella katettua. Virtausmäärä kasvaa noin 100 m³/h verrattuna nykytilanteeseen. Tämä voi tarkoittaa pumppujen tai kaukolämpöputkien koon kasvattamista.

Jos muutosehdotus 2 tehdään esitetyn mukaisesti muutosehdotus 1:n jälkeen, uusia hankittavia laitteita olisivat tehdasyksikkö 2:n yksikköoperaatio C:n välikierron trimmausvaihdin ja pumppu. Samaan välikiertoon tulee myös uudet putkilinjat yksikköoperaation jäähdytysvaihtimilta tytäryhtiön KL-vaihtimelle ja takaisin. Lisäksi tehdasyksikkö 1 yksikköoperaatio B:n välikiertoon on todennäköisesti tarpeen lisätä toinen avustava jäähdytyslämmönvaihdin olemassa olevan vaihtimen rinnalle. Välikiertoa tarvitsee pahimmassa tapauksessa jäähdyttää lähes 30MW teholla, kun kesällä kaukolämmitykselle ei ole tarvetta. Kuvassa 7 näkyvät kaikki erilliset kierrot.



Kuva 7 Muutosehdotus 2 blokkikaavio

Muutosehdotus 2 parantaa ja helpottaa lämmöntalteenotto järjestelmän ajettavuutta. Käytännössä jokaisella välikierrolla on jäähdytysvaihdin, jonka avulla lämpö otetaan prosessista talteen, kaukolämmönvaihdin, johon se siirtää talteen otetun lämmön ja avustava jäähdytysvaihdin, josta lämpö siirretään jäähdytysveteen, mikäli sitä ei tarvita. Tuoteprosessia pystytään myös jäähdyttämään tehokkaasti, kun välikierron lämpötila on optimoitu vain yhden yksikköoperaation jäähdytysvaihtimia varten.

6.2.1 Energiatase

Aspen simulaatio tehtiin myös tästä muutosehdotuksesta. Tuotekemikaalin tuotantokapasiteetti on 1700 yksikköä ja jäähdytystehot sen mukaiset. Energiatase on laskettu tammiukuulle.

	TY1	TY2	Tytäryhtiö/tehdas	Höyry	Yhteensä
Tytäryhtiö	8500	7822	-2392	60	13990
Kaupunki	8140	0	0	3073	11213
Tehdas	0	0	2392	30	2422
Yhteensä	16640	7822	0	3163	27625

Taulukko 5 Muutosehdotus 2:n lämpömäärät ja jakautuminen

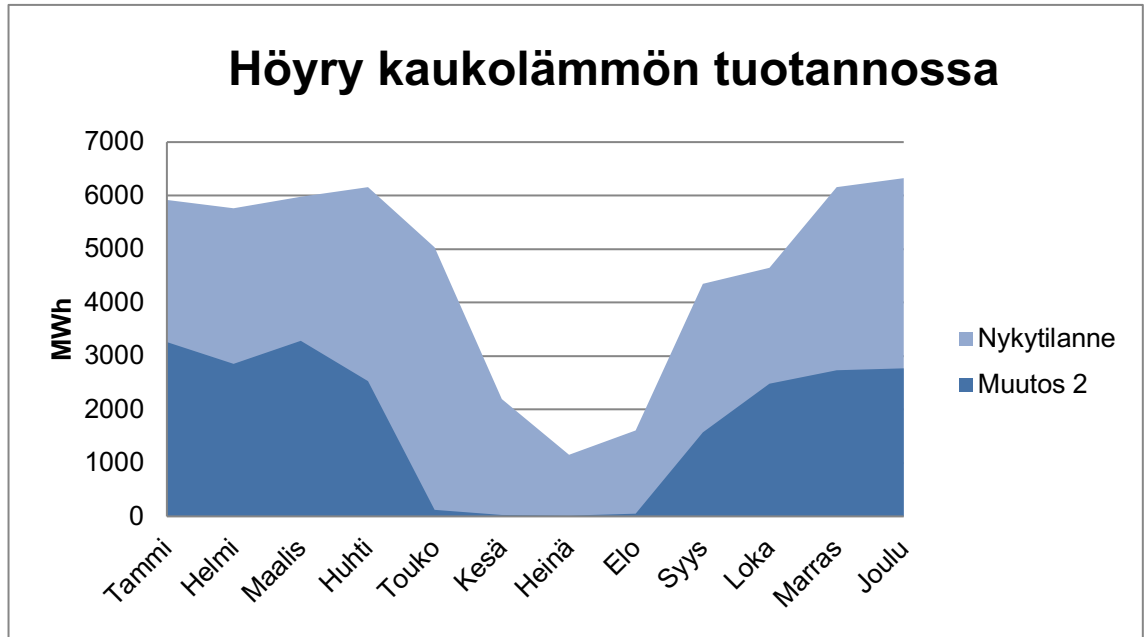
	Lämpömäärä	
	MWh	Teho MW
KL-vaihtimet		
LV006	1853	2,7
LV001	4200	5,6
LV002	8140	16,6
LV003	5969	7
LV004	2392	3,2
LV005	5190	8,4
Höyryvaihtimet		
LV007	628	0
LV008	3107	8,4
LV009	1026	0

Taulukko 6 Muutosehdotus 2:n lämmönsiirtimien maksimi tehot

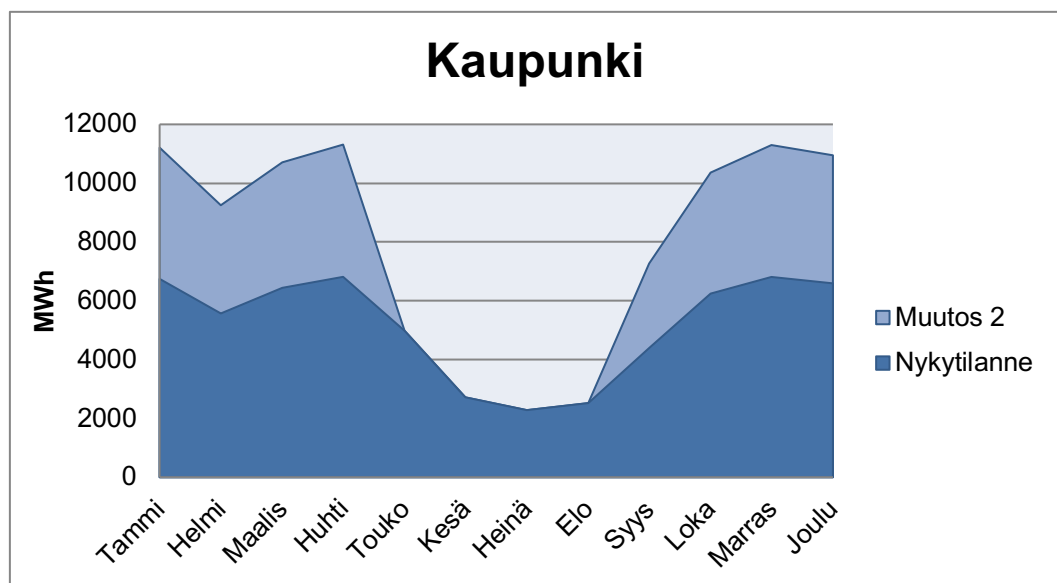
Tehdasyksikköihin tehtyjen muutosten myötä talteen otetun energian määrä nousee huomattavasti. Lämpöä otetaan talteen myös huomattavasti enemmän, kuin sille on kullustarvetta opinnäytetyön tekohetkellä. Taulukoista voidaan laskea, että muutoksen jälkeen kaukolämpöä menisi tehtaalle 3 MW teholla, kaupunkiin 25 MW teholla ja tytäryhtiölle 20 MW teholla.

6.2.2 Vertailu nykytilanteeseen

Höyryn käyttö nykytilanteeseen verrattuna laskee huomattavasti. Tytäryhtiön ei tarvitse käyttää höyryä ollenkaan ja tehtaankin lämmöntarve saadaan pääosin katettua prosessista saatavalla lämmöllä. Muutostilanne 2:n Aspen simulaation perusteella höyryä säästetään vuositasolla noin kokonaisuudessaan 37 000 MWh.



Kaavio 5 Höyryn kulutuksen muutos verrattuna nykytilanteeseen



Kaavio 6 Kaupungin kaukolämmön tuotanto muutosehdotus 2 jälkeen

Koska virtaukset ja prosessin lämpötilat nousevat reilusti aikaisemmasta saadaan kaupunkiin tuotettua lämpöä noin 30 000 MWh vuodessa enemmän. Tätä kuvaa kaavio 6. Mikäli kaupunki päättää kasvattaa kaukolämpöverkkoa laajemmaksi nykyisestä, on kohdeyrityksellä mahdollisuus kasvattaa vielä entisestäänkin kaukolämmöntuotantoa. Prosessilämpöä olisi mahdollisuus hyödyntää talvipäivänä vielä noin 5–7 MW.

Höyryn hintana laskelmissa on käytetty 15 €/MWh ja myydyn kaukolämmön hintana 15,7 €/MWh. Kaupungin kaukolämpökiertoon siirretystä lämmöstä saadaan jatkossa tuottoa noin 500 000 euroa vuodessa enemmän. Höyryn käytön vähentymisestä syntynyt säästö on noin 500 000 euroa vuodessa. Kokonaistuotto järjestelmälle on siis noin miljoona euroa vuodessa.

6.2.3 Kustannusarvio

Kustannusarvio on laskettu suhteessa nykytilanteeseen eli siihen ei ole otettu huomioon muutosehdotus 1:ssä jo tehtyjä hankintoja, vaan ne on laskettu kokonaissummaan. Muutosehdotus 2:n alustava kokonaiskustannusarvio on esitetty liitteessä 2. Investointisumma on arvioitu noin 1,1 miljoonaa euroa.

Kustannusarviossa ei ole otettu huomioon uusia pumppuja tai putkia kaupungin kaukolämpöverkostoon. Koska merkittäviä investointikuluja jätettiin arvioimatta, ei NPV ja IRR tunnuslukuja laskettu muutokselle 2.

6.3 Vertailu muutosehdotusten välillä

Muutosehdotukset 1 ja 2 ovat tehdasyksikkö 1 puolelta samanlaiset ja siksi toteutettavissa molemmat joko niin, että muutos 1 tehdään ensin ja 2 myöhemmin tai muutos 2 voidaan tehdä ilman välivaihetta. Vastaavasti muutos 2:sta ei tarvitse tehdä järjestelmän toimivuuden kannalta ollenkaan, se vain yksinkertaistaa järjestelmää. Muutokset on esitetty kohdeyritykselle niin, että muutosehdotus 1 tehdään 1450 yksikön välivaiheen aikana ja muutosehdotus 2 vasta, kun 1700 yksikön tuotantokapasiteetti on mahdollinen. Muutosehdotusten vertailu on kuitenkin järkevintä tehdä 1700 yksikölle.

6.3.1 Kustannukset

Kustannusarvioiksi on aiemmin mainittu muutosehdotus 1:lle 800 000 euroa ja 2:lle 1,1 miljoonaa euroa. Muutosehdotus 1:n alkuinvestointi on siis vain hieman pienempi, kuin muutosehdotus 2:en. Erona on kaksi uutta avustavaa jäähdytysvaihdinta, pumppu ja putkitukset tehdasyksikkö 2:n yksikköprosessi C:ltä LV006 vaihtimelle. Laitteista aiheutuvat kustannukset olisivat noin 70 000 euroa.

Kustannuksissa ei ole otettu huomioon mahdollisia muutoksia kaupungin kaukolämpöverkoston. Ne olisivat kuitenkin samat riippumatta siitä tehdäänkö muutosehdotus 2 ollenkaan.

6.3.2 Toimivuus

Tehdasyksikkö 1:n ollessa molemmissa muutosehdotuksissa sama, menee kaupunkiin saman verran lämpöä molempien jälkeen. Lämpöä saadaan talteen hieman enemmän, kun myös tehdasyksikkö 2 on jaettu kahteen erilliseen kiertoon. Toisaalta ilman sitä tehdasyksikkö 1 puolella lämmöntalteenotto hieman tehostuu. Yhteensä lämpöä menisi hukkaan talvipäivänä muutosehdotus 1:n jälkeen 10,4 MW ja muutosehdotus 2:n jälkeen 9,7 MW.

Aikaisemmin on talteen otettua lämpöä on voitu siirtää jäähdytysveteen myös siksi, että se on ollut helpointa. Muutosehdotus 1 muuttaa järjestelmää parempaan päin, mutta muutosehdotus 2 avulla saadaan järjestelmästä kaikki hyöty irti.

7 PÄÄTELMÄT

Kohdeyrityksen prosessilämmön talteenottojärjestelmän nykytilanteen selvityksen avulla saatiin tehtyä kaksi muutosehdotusta, jotka ovat toteuttavissa sekä erikseen, että yhdessä. Muutosehdotukset sopivat niin 1450 yksikön, kuin 1700 yksikön tuotantokapasiteetille. Tuotantomuutokset keskittyvät tehdasyksikkö 1:lle, jossa jäähdytystarve kohoaa ensin arvosta 20 MW lukemaan 26 MW, ja lopulta vielä lukemaan 38 MW.

Muutosehdotus 1:stä suositellaan tehtäväksi 1450 yksikön prosessimuutosten yhteydessä. Nykytilanteenkin talteenottojärjestelmällä saadaan kasvanut tuotemäärä jäähdytettyä, mutta kasvanut kaukolämmön tuotanto toisi hyötyjä niin kohdeyritykselle, kuin kaupungillekin. Kaupungin ei tarvitsisi välttämättä käynnistää lisävoimaloita, kun lämmöntarve on suuri. Tytäryhtiölle olisi myös mahdollista taata nykytilannetta suurempi määrä energiaa ja säätömahdollisuuden takia myös kulutuspiikkejä voitaisiin tasata aikaisempaa paremmin. Muutosehdotuksessa yksikköoperaatiota B jäähdyttävä välikierto mitoitetaan 1700 yksikön tuotantokapasiteetille, ettei laitteita tarvitse uusia kahteen kertaan. Muutosehdotus 1 ratkaisee kasvavan jäähdytystarpeen mahdollisimman pienillä kustannuksilla.

Viimeistään tuotantokapasiteetin noustessa 1700 yksikköön on talteenottojärjestelmään pakko tehdä muutoksia. Välikierron virtausmäärä nousee niin paljon, että nykyisellään laitteissa ja putkistossa painehäviöt kasvavat liian suuriksi. Myös välikierron jäähdytysvaihtimesta loppuu todennäköisesti teho kesäpäivinä, kun lämpöä ei tarvita kaupungissa tai tytäryhtiöllä yhtä paljon kuin talvella. Muutosehdotus 2:sta suositellaan tehtäväksi 1700 yksikön prosessimuutosten yhteydessä, mutta myös muutosehdotus 1 toimii tilanteessa yhtä hyvin. Muutosehdotus 2 yksinkertaistaa järjestelmää ja helpottaa sen ajamista, kun jokaisella yksikköoperaatiolla on oma välikierto ja jokaisella välikierrolla on jäähdytysvaihdin, jonka avulla lämpö otetaan prosessista talteen, kaukolämmönvaihdin, johon se siirtää talteen otetun lämmön ja trimmausvaihdin, josta lämpö ajetaan viemäriin, mikäli sitä ei tarvita.

Muutosehdotuksilla saavutetaan myös taloudellisia hyötyjä. Kaukolämpöä saadaan myytyä kaupungin kaukolämpöverkkoon aikaisempaa enemmän, mikä vastaa opinnäytetyön tekemishetkellä noin 109 000 euroa vuodessa muutosehdotus 1:n jälkeen. Muutosehdotus 1:n optimoinnilla on kuitenkin mahdollista kasvattaa tuottoa kaukolämmöstä noin

380 000 eurolla vuodessa. Kun tuotantokapasiteetti kasvaa 1700 yksikköön, kaukolämmöstä saadaan tuottoa noin 500 000 euroa vuodessa enemmän, kuin nykytilanteessa.

Höyryn käyttöä vähentämällä on myös saavutettavissa kustannussäästöjä. Muutosehdotus 1 laskee höyryyn kuluvia kustannuksia noin 165 000 eurolla vuodessa. Muutosehdotus 2 ja 1700 yksikön tuotantokapasiteetti laskee niitä lopulta 500 000 eurolla vuodessa.

Muutosehdotus 1 maksaisi siis itsensä takaisin noin kolmessa vuodessa, kun alkuihvestointi olisi 800 000 euroa. Muutosehdotus 2 kustannusarvio olisi noin 1,1 miljoonaa euroa prosessin osalta, jolloin järjestelmä maksaisi itsensä takaisin reilussa vuodessa. Kaupungin kaukolämpöverkkoon mahdollisesti tehtäviä muutoksia ei kuitenkaan ole otettu siinä huomioon, joten takaisin maksuaikaa ei voida pitää täysin luotettavana.

Opinnäytetyössä tehtyjä virtauskaavioita ja -malleja kohdeyritys voi jatkossa käyttää muun tehdasdokumentaation tukena. Niistä saa käsityksen koko järjestelmästä ja virtausmalleilla voidaan simuloida erilaisten tilanteiden vaikutusta talteenottoprosessiin. Ne luovat myös pohjaa jatkokehitykselle. Kustannusarviot ja tuottolaskelmat auttavat lopullisen investointipäätöksen tekemisessä. Tuloksia hyödynnettiin suoraan Pöyry Finland Oy:n projektissa.

7.1 Tulosten virheanalysointi

Kaikki tulokset ovat suuntaa-antavia laskentoja. Vertailevat laskennat nykytilanteen ja muutosehdotusten välillä on tehty Aspen simulaation tulosten pohjalta. Kaukolämmön kulutusprofiilien oletettiin pysyvän suurin piirtein samanlaisena kuin kohdeyrityksen kaukolämpöraportissa 2017. Lämmitystarvelukuja tarkastellessa voidaan huomata, että vuosi 2017 oli jonkin verran keskiarvoa lämpimämpi vuosi eli lämmitystarveluvut olivat alhaisemmat. Keskiarvo muodostuu vuosien 1981–2010 väliltä. (Ilmatieteen laitos 2018.) Toisaalta, ilmastonmuutoksen myötä 2010-luku on ollut aikaisempaa lämpimämpi, mikä mahdollisti vertaamisen vuoteen 2017.

Nykytilanteen ja muutosehdotusten Aspen simulaatiot tehtiin kolmelle eri ulkolämpötilalle, jotka olivat $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Näistä saatiin maksimi- ja minimiarvot kaupungin ja tytäryhtiön kaukolämpökiertojen komponenteille. Nykytilanteen lämpömäärät kerrottiin maksimiarvojen suhteella, jolloin muutosehdotuksille saatiin arvio siitä, kuinka paljon lämmöntuotanto voisi kasvaa. Kesäkuukausina lämmöntuotanto pysynee samalla

tasolla, kuin nykytilanteessa, koska lämpöä ei ole tarvittu aikaisemminkaan niin paljon, kuin sitä olisi ollut tarjolla.

Käytetyn höyryn määrä laskettiin samalla tavalla eli suhteessa nykytilanteen ja muutos-
ehdotusten maksimimäärään. 1700 yksikön tuotantokapasiteetilla höyryn käyttö kaupun-
gin kaukolämpöverkkoon laskee nollaan, kun ulkona on pakkasta 5 °C. Näin ollen ke-
väästä syksyyn ei arvioitu höyryä tarvittavan käytännössä yhtään. Huoltoseisokkien ja
häiriöiden mahdollisuuksien takia vertailuun lisättiin muutama sata MWh käytettyä höy-
ryä näillekin kuukausille.

Tuloksiin voi vaikuttaa negatiivisesti, jos lämmön tarve merkittävästi kaupungissa laskee
aikaisemmasta. Normaalina huomattavasti lämpimämpi talvi voisi olla tällaiseen yksi vaih-
toehto. Myös höyryn hinnan nousu tai kaukolämmön hinnan lasku voivat vähentää muu-
toksista saatavia hyötyjä. Vastaavasti positiivisesti tuloksiin voi vaikuttaa kaupungin kas-
vanut lämmön tarve. Jos tarve kaupungissa paljon kasvaa, voi olla tarpeen uusia nykyi-
siä kaukolämpöjohtoja ja -komponentteja. Näitä ei ole otettu huomioon kustannuslaskel-
missa, mutta ne voivat vaikuttaa niihin merkittävästi, riippuen kuinka suuren osan niistä
maksaa kohdeyritys.

Säästö- ja tuottolaskelmissa ei ole otettu huomioon pumppujen sähkönkulutusta, joka
voi kasvaa virtausmäärien kasvaessa. Koko järjestelmän aiheuttamia painehäviöitä ei
kuitenkaan tiedetty, eikä pumppujen ottotehoa voitu kunnollisella tarkkuudella laskea.

LÄHTEET

Energiatehokas koti. 2018. Lämmitys. Viitattu 29.10.2018 https://www.energiatehokas-koti.fi/suunnittelu/talotekniikan_suunnittelu/lammitys

Energiateollisuus ry 2018. Hukkalämpöjä ostetaan – Kaikki käy. Viitattu 14.11.2018 <http://www.energiuutiset.fi/kaukolampo/hukkalampoja-ostetaan-e2-80-94-kaikkikay.html>

Energiateollisuus ry 2017. ”Jäätävää kasvua”. Viitattu 29.10.2018 <http://www.energiuutiset.fi/uutiset/jaatavaa-kasvua.html>

Energiateollisuus ry 2016. Suuret lämpöpumput voivat kattaa jopa 10 % kaukolämmön myynnistä. Viitattu 18.11.2018 https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/suuret_lampopumput_voivat_kattaa_yli_10_kaukolammon_myyntista.html#material-view

Energiateollisuus ry. 2007. Käytä kaukolämpöä oikein. Viitattu 29.10.2018 http://www.wse.fi/filebank/13-kayta_kaukolampoa_oikein_0.pdf

Energiateollisuus ry a. Kaukolämpö tuotetaan lähellä asiakasta. Viitattu 29.10.2018 https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/kaukolammon_tuotanto

Energiateollisuus ry b. Kaukolämmön hinta. Viitattu 29.10.2018 https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/asiakkaat/kaukolammon_asiakkuus/kaukolammon_hinta

Energiateollisuus ry c. Hukkalämpö hyödyksi kaukolämpönä! Viitattu 28.11.2018. https://energia.fi/files/253/Lammitys_ja_jaahdytys_matkalla_hiilineutraaliin_tulevaisuuteen.pdf

Gebwell. 2017. Kaukolämmön toimintaperiaate. Viitattu 29.10.2018 <https://www.gebwell.fi/kaukolampo/kaukolammon-toimintaperiaate/>

Hokajärvi E. 1986. Lämmön siirtyminen. Helsinki: Valtion painatuskeskus

Ilmatieteen laitos Lämmitystarveluku eli astepäiväluku. Valittu vuosi 2017. Viitattu 17.11.2018. <https://ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut>

Jantunen H. 2016. ”Kaksisuuntainen kaukolämpö voi lisääntyä jos pientuotannon hinta laskee”. Viitattu 17.11.2018 <https://www.verkkouutiset.fi/kaksisuuntainen-kaukolampo-voi-lisaantya-jos-pientuotannon-hinta-laskee-54210/>

Kontu J. 2013. Tuotannon hukkalämpö hyödyksi. Motiva. Viitattu 14.11.2018 https://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.pdf

Koskenranta R. 2018. Hukkalämpö talteen – investointi joka kannattaa. Viitattu 14.11.2018 <https://www.yrittajat.fi/uutiset/572306-hukkalampo-talteen-investointi-joka-kannattaa>

Koskelainen, L., Saarela, R. & Sipilä, K. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Energiateollisuus ry.

Lampinen M. & Kotiaho V. 2015. Johdatusta lämmönsiirto-oppiin. Viitattu 18.11.2018 <https://docplayer.fi/22094657-Eny-c2001-termodynamiikka-ja-lammonsiirto-syksy-2015-johdatusta-lammonsiirto-oppiin-markku-j-lampinen-ja-voitto-w-kotiaho.html>

Leino R. 2017. Hukkalämmön hyödyntäminen on hyvin tuottavaa – silti lämpö menee harakoille jopa 30 ydinvoimalan vuosituotannon verran. Viitattu 14.11.2018 <https://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/energia/hukkalammon-hyodyntaminen-on-hyvin-tuottavaa-silti-lampoa-menee-harakoille-jopa-30-ydinvoimalan-vuosituotannon-verran-6679088>

Motiva. 2017a. Tuotannon ylijäämälämpö hyödyksi. Viitattu 17.11.2018 https://www.motiva.fi/yritykset/ohjeita_ja_vinkkejä/tuotannon_ylijaamalampo_hyodyksi

Motiva. 2017b. Kaukolämpö. Viitattu 17.11.2018 https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/kaukolampo

Motiva. 2017c. Energiatehokkuussopimukset. Viitattu 17.11.2018 <http://www.energiatehokkuussopimukset2017-2025.fi/energiatehokkuussopimukset/>

Motiva. 2016. Energiatehokas lämmönsiirto. Viitattu 18.11.2018 https://www.motiva.fi/files/11078/Energiatehokas_lammonsiirto_opas.pdf

Pöyry Finland Oy. 2015. ”Hukkalämmöstä jäähdytystä - mitä on kaukokylmä?”. Viitattu 29.10.2018 <http://www.poyry.fi/uutiset/artikkelit/hukkalammosta-jaahdytysta-mita-kaukokylma>