

Tehdaskiinteistöjen lämmityksen optimointi

Jyri Rahkola

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2020
Tekniikan ala
Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikka

Tekijä(t) Rahkola, Jyri	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Huhtikuu 2020
	Sivumäärä 57	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Tehdaskiinteistöjen lämmityksen optimointi		
Tutkinto-ohjelma Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikka		
Työn ohjaaja(t) Marjukka Nuutinen, Taneli Ikonen, Matti Siistonen		
Toimeksiantaja(t) Valio Oy		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyössä perehdyttiin Valio Oy:n Lapinlahden tehtaan tehdaskiinteistöjen lämmitykseen. Tavoitteena oli saada korvattua höyryn käyttöä kiinteistöjen lämmityksessä hyötylämmöllä, joka tuotetaan prosessin hukkalämmöstä lämpöpumpun avulla. Tavoite oli tarkoitus saavuttaa laskemalla kiinteistöiltä palaavan lämmitysveden lämpötilaa, jolloin hyötylämmöllä voidaan tehokkaammin esilämmittää lämpöverkostoon menevää vettä. Toisena tavoitteena oli piirtää ajantasaiset putkistokaaviot tutkittavasta järjestelmästä.</p> <p>Aluksi mitattiin kiinteistöltä palaavan veden lämpötila ja sen jälkeen alettiin tutkia, mikä paluulämpötilaan vaikuttaa. Lämmitysjärjestelmästä piirrettiin kaaviokuvat, joista kävi ilmi, että järjestelmässä oli muutamia putkikiertoja, joiden kautta kuuma vesi pääsi palaamaan jäähtymättä paluupuolelle. Löydettiin myös säätöventtiileitä, jotka eivät toimineet oikein, sekä mitoitettiin kaksi uutta säätöventtiiliä. Venttiilien toimintaan vaikutti lämpöverkoston syöttöpumppu, joka oli asetettu maksimille, vaikka sitä oli tarkoitus ohjata paineen perusteella. Myös menolämpötilojen säätökäyrät olivat liian korkealla.</p> <p>Paluulämpötila saatiin laskettua 63 asteesta 46 asteeseen. Laskelmien perusteella tämän vuoksi höyryn käyttö vähenee noin 800 megawattituntia vuodessa. Säästetty höyry korvataan hyötylämmöllä, joka on huomattavasti höyryä edullisempaa etenkin talviaikaan, jolloin höyryntuotannossa joudutaan käyttämään varapolttoainetta.</p> <p>Raportissa esitetään myös muutamia jatkokehitysehdotuksia, jotka vaativat investointeja. Niiden kannattavuutta tulee tarkastella kriittisesti laskelmien avulla ennen mahdollista toteuttamista.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Lämmitysjärjestelmät, tehdaskiinteistöjen lämmitysjärjestelmät, lämmityksen optimointi, energiatehokkuus, lämpöpumput, hukkalämpö, hukkalämmön hyödyntäminen		
Muut tiedot (Salassa pidettävät liitteet)		

Author(s) Rahkola, Jyri	Type of publication Bachelor's thesis	Date April 2020 Language of publication: Finnish
	Number of pages 57	Permission for web publication: x
	Title of publication Title Optimizing the heating systems in factory properties	
Degree programme Degree programme in energy and environmental engineering		
Supervisor(s) Marjukka Nuutinen, Taneli Ikonen, Matti Siistonen		
Assigned by Valio Oy		
Abstract <p>The heating in the factory properties of Valio Oy's Lapinlahti plant was studied in the thesis. The aim was to replace the use of steam with useful heat produced in the process as waste heat with a heat pump in the heating of the buildings. The aim was to achieve the target by lowering the temperature of the heating water returning from the properties, which means that the water entering the heating network can be preheated more efficiently with the useful heat. Another goal was to draw up-to-date piping diagrams of the system under study.</p> <p>The beginning situation was determined by measurements. After that, what factors affect the return temperature was studied. Initially, piping diagrams were drawn of the system, showing that there were a few pipe cycles in the system through which the hot water could return to the return side without cooling. Control valves that did not work properly were also found and two new control valves were dimensioned. The valves did not work properly because the network supply pump was set to full power, even though it was meant to be controlled by pressure. The flow temperature control curves were also too high.</p> <p>The return temperature was lowered from 63 degrees to 46 degrees. Based on the calculations, this will reduce the use of steam by about 800 megawatt hours per year. The saved steam is replaced by useful heat, which is considerably cheaper than steam, especially in the winter, when spare fuel has to be used in the steam production.</p> <p>At the end, a few further development proposals are also presented. They require investments, so their profitability should be critically examined through calculations before implementation.</p>		
Keywords/tags (subjects) Heating systems, heating systems in factory buildings, optimization of heating systems, energy efficiency, heat pumps, waste heat, utilization of waste heat		
Miscellaneous (Confidential information)		

Sisältö

1	Johdanto	4
1.1	Opinnäytetyön tausta.....	4
1.2	Opinnäytetyön tavoitteet, rajaus ja menetelmät	5
1.3	Valio Oy.....	6
2	Lämmönsiirto	7
2.1	Johtuminen.....	8
2.2	Konvektio.....	9
2.3	Säteily	10
3	Teollisuuskiinteistöjen lämmönjakolaitteet.....	10
3.1	Säätöventtiilit	10
3.1.1	Venttiilityypit	11
3.1.2	Toimilaitteet	14
3.1.3	Säätöventtiilin mitoitus	17
3.1.4	Venttiilien ominaiskäyrät.....	18
3.2	Lämmönvaihtimet	19
3.2.1	Lämmönvaihdinten virtausasettelut ja pöörakenteet.....	20
3.2.2	Lämmönvaihdintyytit.....	21
4	Lämpöpumput teollisuudessa	25
4.1	Lämpöpumppuprosessin toiminta	25
4.2	COP-luku	27
4.3	Kylmäaineet.....	28
4.3.1	Kylmäaineiden nimeäminen.....	28
4.3.2	Yleisimmät kylmäaineet	29
5	Lämmönjakopiirin jäähtymän parantaminen.....	30
5.1	Tarkasteltavan järjestelmän kuvaus.....	30
5.2	Alkutilanne.....	33
5.3	Huonon jäähtymän syyt	34
5.3.1	Lämmönjakohuone 2-tehtaalla	34
5.3.2	Lämmön kulutuskohteet 2-tehtaalla	35

	2
5.3.3 Lämmönjakuhuone 3-tehtaalla	36
5.3.4 Lämmön kulutuskohteet 3-tehtaalla	38
5.4 Toimenpiteet	38
5.4.1 Turhien virtausten poisto	38
5.4.2 Säätoventtiilien lisäys	39
5.4.3 Säätoventtiilien korjaus	40
5.4.4 Säätokäyrien muutokset.....	42
6 Tulokset	44
7 Pohdinta.....	46
Lähteet	49
Liitteet.....	53
Liite 1. 2-tehtaan lämmönjakuhuoneen kaavio.....	53
Liite 2. 3-tehtaan lämmönjakuhuoneen kaavio.....	54
Kuviot	
Kuvio 1. Läppäventtiili	11
Kuvio 2. Palloventtiilin rakenne	12
Kuvio 3. Istukkaventtiili.....	13
Kuvio 4. Kaaviokuva sekoittavasta kolmitieventtiilistä	14
Kuvio 5. Kalvotoimilaitteellinen istukkaventtiili	15
Kuvio 6. Paineilmakäyttöinen mäntätoimilaite	16
Kuvio 7. Sähköinen toimilaite	17
Kuvio 8. Venttiilien sisäiset ominaiskäyrät	19
Kuvio 9. Periaatekuva myötävirtalämmönvaihtimesta	20
Kuvio 10. Periaatekuva vastavirtalämmönvaihtimesta	20
Kuvio 11. Regeneratiivisen ja rekuperatiivisen lämmönvaihtimen periaatekuvat	21
Kuvio 12. Höytylämmitysenergiankulutuksen jakautuminen rakennus- ja häviötyypeittäin	23

	3
Kuvio 13. Ilmanvaihtokoneen lämmityspatteri vastavirtakytkennällä.....	25
Kuvio 14. Nesteenerottimen sisältävä lämpöpumppuprosessi.....	26
Kuvio 15. Lämmitysjärjestelmän periaatekuva	31
Kuvio 16. Käyttöveden lämmitys	32
Kuvio 17. 2-tehtaan lämmönjakohuoneen varaajan kytkentä	34
Kuvio 18. 3-tehtaan höyrylämmönvaihtimen kytkentä.....	37
Kuvio 19. Kolmitieventtiin kytkentä 3-tehtaalla	38
Kuvio 20. 2-tehtaan kolmitieventtiin kytkentä	41
Kuvio 21. 2-tehtaan säätökäyrä alussa	43
Kuvio 22. 3-tehtaan säätökäyrä alussa	43
Kuvio 23. Paluueden lämpötilan trendi	44

Taulukot

Taulukko 1. Toimenpiteet ja niiden vaikutukset paluulämpötilaan	45
---	----

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön tausta

Tämän opinnäytetyön aiheena on tehdaskiinteistöjen lämmityksen optimointi. Toimeksiantaja oli Valio Oy. Työssä oli tarkoitus saada lisättyä prosessilämmön käyttöä kiinteistöjen lämmityksessä. Opinnäytetyössä tarkasteltavat tehdaskiinteistöt lämmitettiin aloitustilanteessa pääosin höyryllä, joka joudutaan talvella tuottamaan osittain varapolttoaineella, mistä seuraa se, että talviaikana höyry on melko kallista. Lämmitysjärjestelmässä on kuitenkin olemassa mahdollisuus käyttää lämpöpumpulla tuotettua hyötylämpöä kiinteistöjen lämmönjakopiirin paluuveden esilämmitykseen. Lämpöpumpun lämmönlähteenä ovat juustonvalmistuksessa syntyvän heran ja paineilmakompressorien jäähdytysvesipiirit. Hyötylämpö on talviaikana merkittävästi halvempaa kuin höyry. Opinnäytetyön aloitusvaiheessa tätä hyötylämpöä ei voitu hyödyntää, koska lämmönjakoverkoston paluuvesi tuli takaisin lämmönjakolaitteille liian kuumana.

Valiolla ei tämän tyyppiseen kiinteistöjen lämmityskustannusten säästöön ollut aiemmin mahdollisuutta paneutua, vaikka potentiaalinen säästömahdollisuus oli tiedossa. Opinnäytetyö tehtiin siis todelliseen tarpeeseen. Aiheeseen oli syytä paneutua myös siksi, että tulevaisuudessa hukkalämpövirtojen käyttö lisääntyy kiristyvien päästörajojen takia, joten tämän tyyppisen osaamisen syventämisestä oli myös itselleni paljon hyötyä.

Opinnäytetyön raportin on tarkoitus antaa kokonaiskuva teollisuuskiinteistöjen lämmityksestä sekä siitä, miten se voidaan hoitaa mahdollisimman energiatehokkaasti. Tavoitteena on kertoa laajemminkin eri teollisuusyrityksille, millaisia vaikutuksia kiinteistöjen lämmitysjärjestelmien optimoinnilla voidaan saavuttaa ja miten optimointia voi tehdä. Tämä on tärkeää siksi, että etenkin prosessiteollisuudessa huomio kiinnittyy yleensä itse prosessin toimintaan ja kiinteistöistä huolehtiminen jää vähemmälle. Tämä on ymmärrettävää, koska suurimmat lämpövirrat toki löytyvät aina itse prosessista ja myös tulos tulee prosessin hyvän toiminnan kautta. Kuitenkin jos

kiinteistöjen lämmitykseen ei ole paneuduttu sen tarkemmin, sieltä saattaa melko helposti löytyä parannuskohteita ja sitä kautta säästöjä. Mattilan (2012, 3) mukaan teollisuuskiinteistöjen lämmitykseen kuluu yli neljäsosa maamme lämmitysenergian kulutuksesta.

1.2 Opinnäytetyön tavoitteet, rajaus ja menetelmät

Opinnäytetyön ensisijaisena tavoitteena oli saada höyryn käyttö vähenemään kiinteistöjen lämmityksessä. Toinen tavoite oli piirtää ajantasaiset PI-kaaviot järjestelmistä, joiden parissa selvitystä tehtiin. Lopputuloksena piti olla tilanne, jossa saatavilla olevaa hyötylämpöä käytetään kiinteistöjen lämmitykseen tehokkaasti ja höyryn käytön osuus on pienentynyt, ja tietenkin raportti, jossa kerrotaan, kuinka tässä onnistuttiin. Tärkeimmät kysymykset, joihin haettiin vastausta, olivat seuraavat:

1. Millä eri tavoilla lämpö siirtyy?
2. Miten lämpöpumppu toimii ja millaisia kylmäaineita niissä käytetään?
3. Millaisilla laitteilla teollisuuskiinteistöjen lämmitys hoidetaan?
4. Mitkä asiat aiheuttavat kiinteistön lämmönjakopiirin huonon jäähtymän?
5. Millä tavoin lämmönjakopiirin jäähtymä saadaan paranemaan?

Työ rajattiin kahden jauhetehdaskiinteistön järjestelmiin. Samoin rajausta tehtiin työn edetessä siten, että otettiin mukaan ainoastaan ne asiat, joilla on vaikutusta jäähtymään ja sitä kautta höyryn kulutukseen. Vanhoista lämmönjakolaitteista löytyi muutakin korjattavaa, mutta selvitys piti rajata niihin asioihin, joilla arveltiin olevan vaikutusta tavoitteen saavuttamiseen.

Teoriaosuus rajattiin teollisuuskiinteistöjen lämmönjakolaitteisiin, lämmönsiirron teoriaan ja teollisuudessa käytettäviin lämpöpumppuihin. Teollisuuslämpöpumpuista on tehty opinnäytetöitä aiemminkin, mutta ne otettiin silti osaksi tätä työtä, koska siitä osaamisesta on hyötyä. Teollisuuskiinteistöjen lämmönjakolaitteista tehtyä ku-

vausta ei löytynyt ennestään, joten se on hyödyllistä tietoa. Myös lämmönsiirron teoria on oleellista asiaa tähän työhön, koska projektia tehtiin lämpöä siirtävien laitteiden parissa.

Tutkimustyyppinä työ on kvantitatiivinen kehittämistutkimus. Tämä tutkimusote valittiin, koska oli olemassa selkeä ongelma, johon lähdettiin tutkimuksen avulla hakemaan ratkaisuja. Kyse on kvantitatiivisesta tutkimuksesta, sillä tutkimuksen etenemistä voitiin havainnoida mittausten perusteella. Ongelma ratkaistiin tutkimalla lämmitysjärjestelmiä paikan päällä. Ensin kerättiin tietoa alkutilanteesta, esimerkiksi mitattiin lämpötiloja ja virtauksia, ja sitten alettiin tutkia, mikä niihin vaikuttaa. Kun parannuskohde löydettiin, se korjattiin yhteistyössä toimeksiantajan kanssa. Saatuja tuloksia on analysoitu sekä vertaamalla alku- ja lopputilanteita keskenään että kertomalla, millä toimenpiteillä tuloksiin on päästy. Mittauksilla todettiin alkutilanteessa ollut jakauma höyryn ja hyötylämmön käytön välillä. Projektin päätteeksi tehtiin samat mittaukset ja kerrottiin niiden perusteella, mitä on saatu aikaan. Lisäksi raporttiin on kirjattu ylös ilmi tulleet ideat toimenpiteistä, joilla tilannetta voi yhä jatkossa parantaa.

1.3 Valio Oy

Valio on Suomessa kaikkien tuntema yritys, joka valmistaa ruokatuotteita maidosta ja myös muista raaka-aineista. Valion tuotteita viedään noin 60 maahan ja vienti kattaa neljänneksen Suomen elintarvikeviennistä. Kaupassa myytävien tuotteiden lisäksi Valio vie elintarviketeollisuuden raaka-aineita, kuten esimerkiksi maitojauheita. (Meijeri ja ruokatalo n.d.; Valio yrityksenä n.d.)

Valion omistaa 5100 suomalaista maidontuottajaa osuuskuntien kautta. Osuuskuntia on 14 ja niistä 5 on tehnyt Valion kanssa hankintasopimuksen maidon toimittamisesta tiloilta Valion tuotantolaitoksille. Valion hallitus koostuu neljästä maitotilayrittäjästä. Tämä hallitus päättää maidon tilityshinnan osuuskunnille, ja osuuskunnat maksavat tuottajahinnan maataloille. Valion liiketoiminnan menestystä ei voi mitata liikevoiton määrällä, koska se ei pyri maksimoimaan voittoa vaan osuuskunnille maksamaansa maidon hintaa. Tässä Valio on myös onnistunut, sillä sen maksama maidon

hinta on pysytellyt keskimääräistä EU-hintaa korkeammalla koko 2000-luvun ajan. (Osuustoiminnallinen perusta n.d.)

Suomessa Valion tuotantolaitokset ovat Haapavedellä, Helsingissä, Joensuussa, Jyväskylässä, Lapinlahdella, Oulussa, Riihimäellä, Seinäjoella, Suonenjoella, Turengissa, Vantaalla ja Äänekoskella. Lapinlahden tehtaalla, jonne tämä opinnäytetyö tehtiin, valmistetaan Emmental-, Edam- ja erikoisjuustoja sekä maito-, hera- ja lastenruokajauhetta. Myös koejuustola ja jauheiden erikoistuotetehtas koko Valion tarpeisiin toimivat Lapinlahdella. Lisäksi Lapinlahdella toimii aluelaboratorio, joka tekee laadunvalvonta-analytiikkaa kaikille Valion tehtaille. (Tuotantolaitokset n.d.; Lapinlahti n.d.)

Lapinlahden tehtaalle vastaanotetaan vuosittain noin 450 miljoonaa litraa maitoa. Tuotantomäärä vuonna 2019 oli 62,1 miljoonaa kilogrammaa. Tästä määrästä 40 miljoonaa kiloa oli jauheita ja 22,1 miljoonaa kiloa juustoja. 75 % koko Lapinlahden tehtaan tuotannosta menee vientiin. Jauheita viedään EU-alueelle, Kiinaan ja Kaukoi-tään, ja juustojen vienti kohdistuu EU-alueelle ja Yhdysvaltoihin. Lapinlahden tehdas valmistaa Valion juuston kokonaistuotannosta 35 % ja jauheen kokonaistuotannosta 40 %. Työntekijöitä Lapinlahden tehtaalla on 292, joista tuotannossa 211, tehdaspalvelussa 40, laboratoriossa 38 ja henkilöstöravintolassa 3. (Lapinlahti n.d.)

2 Lämmönsiirto

Lämpö on energiamuoto, joka voi siirtyä paikasta toiseen ainoastaan lämpötilaeron avulla. Lämpö siirtyy aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan lämpötilaan ja lämmönsiirto pysähtyy, kun siihen osallistuvat aineet saavuttavat saman lämpötilan. Lämmön siirtyminen voi tapahtua kolmessa eri muodossa, jotka ovat johtuminen, konvektio ja säteily. (Cengel 2003, 17.)

2.1 Johtuminen

Johtuminen tarkoittaa lämmön siirtoa hiukkasten välillä siten, että energia siirtyy korkeenergisemmistä hiukkasista niiden vieressä oleviin matalamman energiatason hiukkasiin. Se voi tapahtua sekä kiinteissä aineissa että nesteissä ja kaasuissa. Kaasuissa ja nesteissä johtuminen aiheutuu molekyylien sekoittumisesta ja niiden välistä törmäyksistä, kun ne liikkuvat sattumanvaraisesti suuntiin. Kiinteissä aineissa johtuminen aiheutuu molekyylien hilarakenteen värinästä sekä vapaiden elektronien kuljettamasta energiasta. Johtumalla siirtyvän lämmön määrä riippuu väliaineen geometriasta, paksuudesta, materiaalista sekä tietenkin lämpötilaeron suuruudesta.

(Cengel 2003, 17-18.) Johtumislämpötehon kaava (1) seinämän läpi on

$$Q = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

jossa

Q = lämpöteho (W)

k = aineen lämmönjohtavuus (W/mK)

A = lämpöä siirtävä pinta-ala (m²)

ΔT = lämpötilaero aineiden välillä (K)

Δx = seinämän paksuus, jonka läpi lämpö johtuu (m)

Materiaalin lämmönjohtavuudella mitataan sen kykyä johtaa lämpöä. Korkea lämmönjohtavuuskerroin tarkoittaa aineen olevan hyvä lämmönjohtaja, kun taas matala kerroin tarkoittaa, että kyseessä on eriste. Lämmönjohtavuuden yksikkö on W/mK. Esimerkiksi kuparin lämmönjohtavuuskerroin 401 W/mK tarkoittaa, että metrin paksuinen kupariseinä johtaa lämpöä 401 watin teholla neliometriä kohden, jos lämpötilaero on yhden asteen verran. (Cengel 2003, 19 - 20.)

2.2 Konvektio

Konvektio tarkoittaa lämmönsiirtoa kiinteän pinnan ja sen vieressä liikkuvan nesteen tai kaasun välillä. Siinä yhdistyvät oikeastaan johtuminen ja nesteen tai kaasun liike. Jos neste ei liiku lainkaan, on kyseessä puhdas johtuminen eikä lämpö siirry kovin tehokkaasti. Mitä nopeammin neste tai kaasu eli fluidi virtaa kiinteän pinnan vieressä, sitä tehokkaampaa lämmönsiirto on. Konvektiossa lämpö siis ensin johtuu pinnasta viereiseen aineeseen, ja sen jälkeen viereisen fluidin liike kuljettaa lämmön pois, minkä seurauksena tilalle tulee viileämpää fluidia. (Cengel 2003, 25 - 26.)

On olemassa kahdenlaista konvektiota, luonnollista ja pakotettua. Pakotetusta konvektiosta on kyse, jos fluidi pakotetaan virtaamaan pinnalla esimerkiksi pumpun, puhaltimen tai tuulen voimalla. Luonnollista konvektiota taas tapahtuu silloin, kun fluidin liike aiheutuu lämpötilaeroista johtuvista tiheyseroista. Faasimuutoksen sisältävät lämmönsiirtoprosessit määritellään myös konvektioksi, koska fluidi liikkuu prosessin aikana. Esimerkiksi kiehumisessa liike aiheutuu nousevista höyrykuplista ja lauhtumisessa tippuvista nestepisaroista. (Cengel 2003, 26.) Konvektiolla tapahtuvan lämmönsiirron kaava (2) on

$$Q = hA(T_1 - T_2) \quad (2)$$

jossa

h = lämmönsiirron tehokkuus (W/m^2)

A = lämpöä siirtävä pinta-ala (m^2)

T_1 = pinnan lämpötila ($^{\circ}C$)

T_2 = fluidin lämpötila ($^{\circ}C$)

2.3 Säteily

Lämpösäteily on energiaa, jota eri aineet lähettävät sähkömagneettisen säteilyn välityksellä. Sähkömagneettinen säteily johtuu aineessa olevien molekyylien tilan muutoksista. Kaikki aineet, joiden lämpötila ylittää absoluuttisen nollapisteen $-273,15\text{ °C}$ lähettävät lämpösäteilyä. Toisin kuin konvektio ja johtuminen, säteily ei tarvitse edetäkseen väliainetta. Itse asiassa säteilemällä tapahtuva lämmönsiirto on nopeinta tyhjiössä, jossa se saavuttaa valon nopeuden. (Cengel 2003, 27.) Säteilemällä siirtyvän lämpötehon kaava (3) on

$$Q = \varepsilon\sigma A(T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

jossa

ε = säteilyä vastaanottavan kappaleen emissiivisyyskerroin

σ = Stefan Boltzmannin vakio ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

A = säteilyä vastaanottavan kappaleen pinta-ala (m^2)

T_1 = säteilyä lähettävän kappaleen lämpötila (K)

T_2 = säteilyä vastaanottavan kappaleen lämpötila (K)

3 Teollisuuskiinteistöjen lämmönjakolaitteet

3.1 Säätoventtiilit

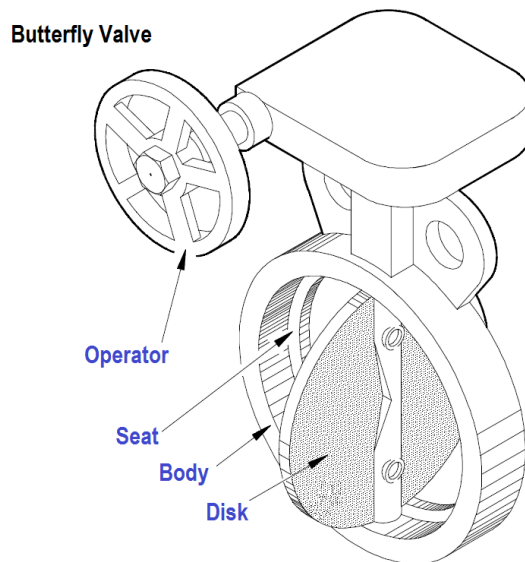
Säätoventtiilejä käytetään, kun halutaan säätää virtaus, lämpötila tai paine tietyn suuruiseksi järjestelmässä. Säätoventtiilin voi asettaa mihin asentoon hyvänsä täysin auki ja täysin kiinni -asentojen välillä. Tämä erottaa sen auki-kiinni venttiilistä, jolla on vain kaksi mahdollista asentoa. Venttiilin operointi voidaan tehdä joko käsin tai

automaattisella toimilaitteella. Toimilaitteella saavutetaan suurempi käyttövoima ja parempi tarkkuus venttiilin asennon määrittämisessä. (Valve types n.d.)

3.1.1 Venttiilityypit

Läppäventtiilit

Kuviossa 1 esitettyssä läppäventtiilissä toimielin on metallinen kiekko, joka on kiinnitetty karaan eli akseliin, jolla läppää käännetään. Kun venttiili suljetaan, se käännetään siten, että läppä on poikittain virtaussuuntaan nähden ja sulkee koko virtausaukon. Avattaessa venttiiliä läppä kääntyy virtauksen suuntaiseksi. Operoitaessa läppäventtiili saadaan täysin kiinni -asennosta täysin auki -asentoon kääntämällä karaa neljäosakerroksen verran. Tämä mahdollistaa venttiilin sulkemisen tai avaamisen erittäin nopeasti. Jos läppä jätetään osittain kiinni, saadaan aikaan virtauksen säätö kuristamalla. Läppäventtiiliä käytetäänkin monesti säätöventtiilinä silloin, kun ei vaadita täydellistä pitävyyttä. Yleensä läppäventtiileitä suositaan, koska ne ovat edullisempia verrattuna muihin venttiilityyppeihin. Ne ovat myös kevyitä, joten putken kannakoinnissakin säästetään. (Reddy n.d.b.)



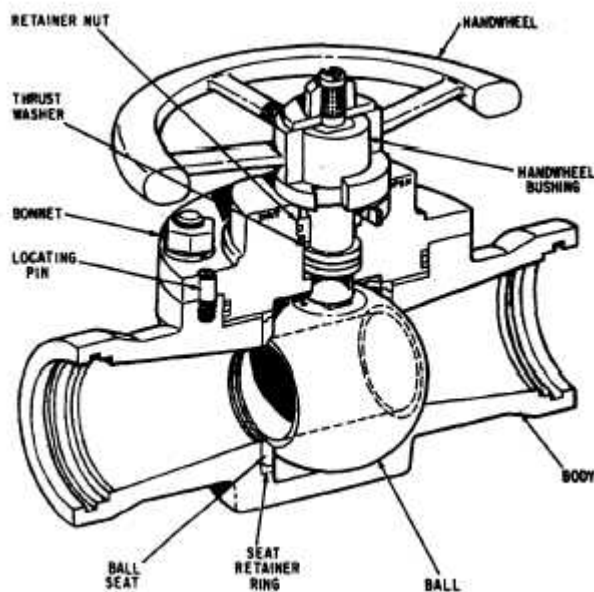
Kuvio 1. Läppäventtiili (Reddy n.d.c.)

Läppäventtiilin kara voi olla kiinnitetty eri kohtiin läppää riippuen siitä, millainen venttiili on kyseessä. Tavallisessa venttiilissä kara on joka suunnasta katsottuna kes-

kellä. Tällöin jokin osa läpistä on aina kosketuksessa tiivistepintaan riippumatta venttiilin asennosta. Tästä seuraa suuri kitka tiivistepinnan ja läpän välillä, joka johtaa tiivisteeseen nopeaan kulumiseen, jolloin venttiili ei pysy tiiviinä kovin pitkään. Kara voi olla kiinnitetty läppään myös epäkeskeisesti, jolloin läpän reunat ja tiivistepinta ovat kosketuksissa toisiinsa vasta silloin, kun venttiili on jo melkein kiinni. Tällainen asetus jatkaa tiivistepinnan kestoikää ja parantaa tiiveyttä. Toisaalta läpän koko kasvaa, mistä seuraa suurempi painehäviö. (Reddy n.d.e.; Pulli 2009, 119.)

Palloventtiilit

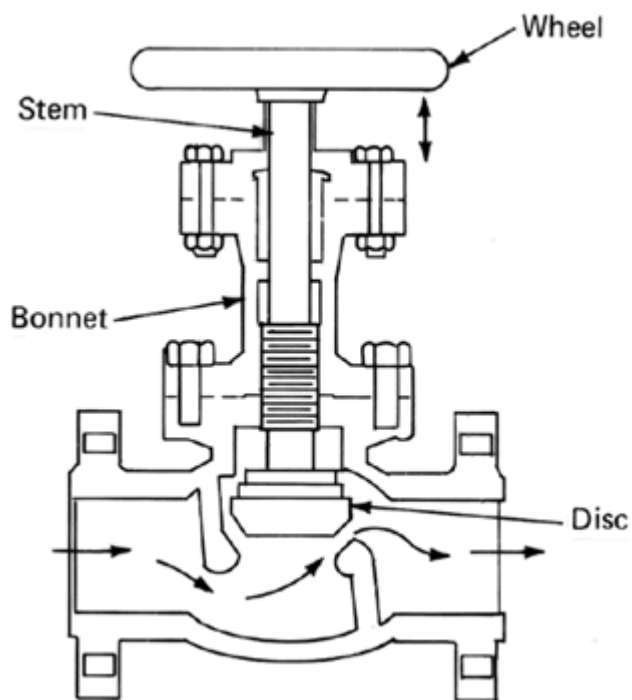
Kuviossa 2 esitetyn palloventtiilin toimielin on pallo, jonka keskellä on reikä, josta virtaus pääsee kulkemaan. Venttiili on auki silloin, kun pallon reikä on samansuuntainen virtauksen kanssa ja kiinni silloin, kun palloa käännetään 90 astetta. Palloventtiilit ovat kestäviä ja ne säilyttävät tiiveytensä pitkään. Tämän vuoksi niitä käytetään paljon sulkuventtiileinä. Niillä on auki ollessaan alhainen painehäviö, ja ne aiheuttavat vain vähän turbulenssia virtaukseen. (Reddy n.d.a.) Ne ovat kuitenkin myös melko hyviä säätöventtiileitä oikein mitoitetuna. Isot palloventtiilit ovat ison materiaalmäärän ja vaativan valmistustekniikan vuoksi kalliita rakentaa, joten isoimpiin nimeliskokoihin palloventtiili ei ole paras ratkaisu. (Pulli 2009, 122.)



Kuvio 2. Palloventtiilin rakenne (Hydraulic ball valve n.d.)

Istukkaventtiilit

Kuviossa 3 esitetty istukkaventtiili on yleisesti käytössä oleva säätöventtiilityyppi. Sitä käytetään paikoissa, joissa venttiiliä operoidaan usein ja on tarve säätää virtausta. (Reddy n.d.d.; Pulli 2009, 117.) Istukkaventtiilin rungon sisällä on seinämä, joka erottaa tulo- ja lähtöpuolet toisistaan. Seinämässä on reikä istukalle, jolla virtausta säädetään. Sääto tapahtuu suurentamalla tai pienentämällä virtausaukkoa liikuttamalla karan päässä olevaa istukkaa joko ylös tai alas. (Reddy n.d.d.) Istukkaventtiilillä on Pullin (2009, 117) mukaan rakenteensa vuoksi suuri painehäviö ja se on suurissa nimellisissä kallis.

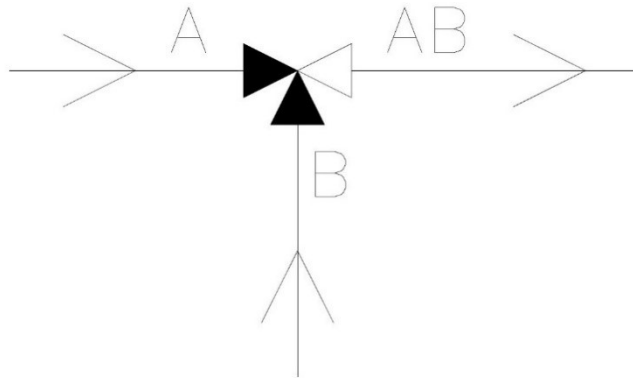


Kuvio 3. Istukkaventtiili (Globe valves information n.d.)

Kolmitieventtiili

Kolmitieventtiilien avulla lämmitysverkostoon menevän veden lämpötila voidaan säätää vastaamaan lämmön tarvetta. Sääto tehdään sekoittamalla lämpöverkostosta palaavaa vettä ja kuumaa vettä keskenään. Kaaviokuvassa (ks. kuvio 4) aina auki oleva haara on valkoinen ja säädettävät haarat mustia. Kun kolmitieventtiilin kara on ylä-asennossaan, vesi virtaa B-yhteestä AB-yhteeseen. Kun taas kara on ala-asennossaan, B-

yhde sulkeutuu ja vesi virtaa suoraan A:sta AB:hen. Karan liikkuesssa ylä- ja ala-asentojen välillä säätävät virtausaukot siten, että kun A-yhteen aukko pienenee, B-yhteen aukko vastaavasti suurenee ja päinvastoin. (Harju 2010, 87, 132.)

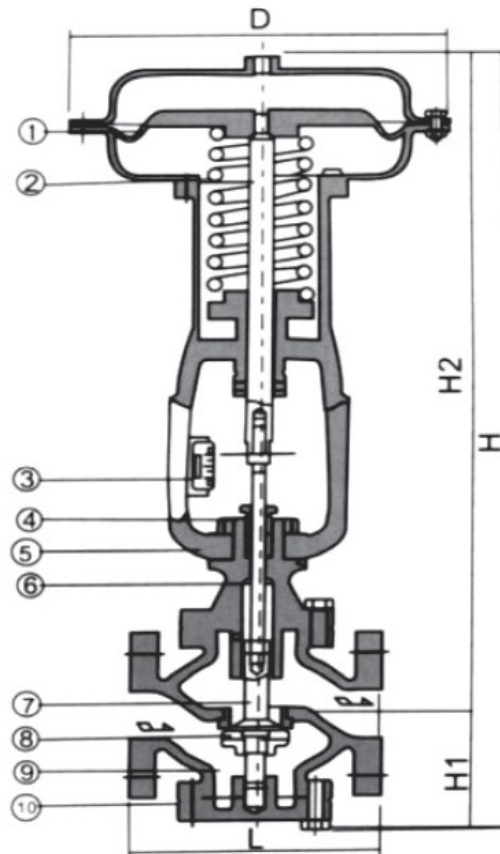


Kuvio 4. Kaaviokuva sekoittavasta kolmitieventtiilistä

3.1.2 Toimilaitteet

Kalvotoimilaite

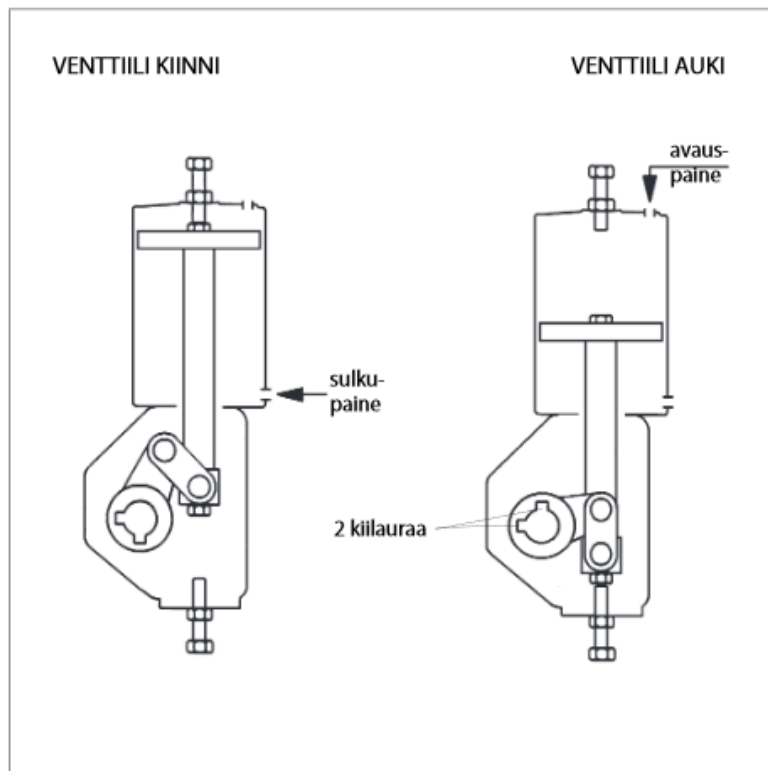
Paineilmakäyttöinen kalvotoimilaite (ks. kuvio 5) toimii siten, että joko kalvon ylä- tai alapuolelle johdetaan paineilmaa, joka saa kalvon liikkumaan. Venttiilin toimielimen kara on kiinni kalvossa, ja kalvon liike saa aikaan venttiilin asennon muutoksen. Toiseen suuntaan karaa liikutetaan vähentämällä painetta kalvon päällä, jolloin kara liikkuu jousen voimalla takaisin. Vaadittava kalvon koko määritetään venttiilin liikuttamiseen tarvittavan voiman ja saatavilla olevan ilmanpaineen avulla. Kalvotoimilaitteet ovat rakenteeltaan yksinkertaisia ja luotettavia, sekä lisäksi järkevän hintaisia. (Control valve handbook 2019, 72.)



Kuvio 5. Kalvotoimilaitteellinen istukkaventtiili (Single seated globe control valve n.d.)

Mäntätoimilaite

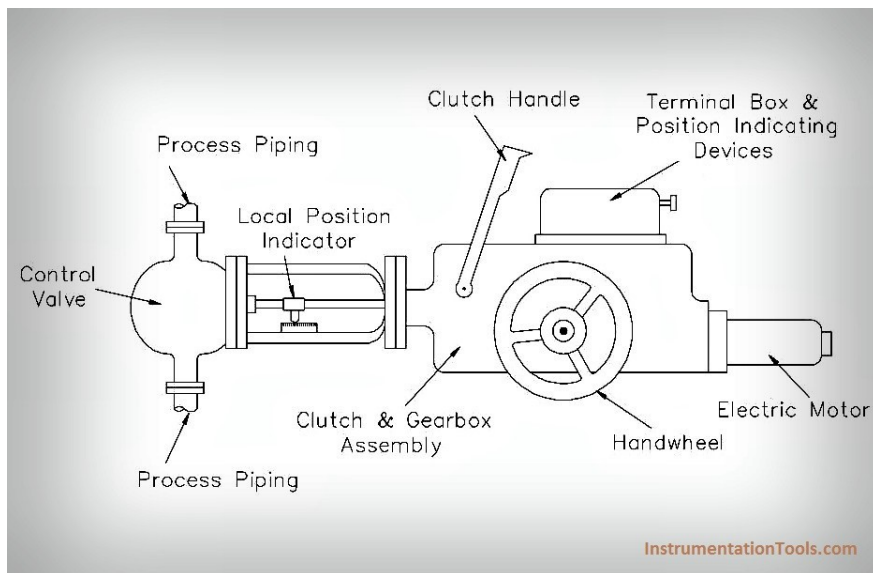
Myös mäntätoimilaitteet (ks. kuvio 6) toimivat paineilmalla. Niissä käytettävä ilmanpaine on suuri, jopa 10 bar, joten mäntätoimilaitteilla on mahdollista saavuttaa suuri työntövoima ja liikenopeus. Jos halutaan maksimaalinen työntövoima, on käytettävä kaksitoimista sylinteriä, jota ohjataan molempiin suuntiin paineilman avulla. Jos taas halutaan, että apuenergian hävitessä venttiili päättyy joko auki tai kiinni, on valittava jousipalautteinen sylinteri, jossa toinen liikesuunta hoidetaan paineilmalla ja toinen suunta jousen voimalla. (Control valve handbook 2019, 72.)



Kuvio 6. Paineilmakäyttöinen mäntätoimilaite (Pneumaattiset sylinteritoimilaitteet 2017, 3)

Sähköinen toimilaite

Sähköisessä toimilaitteessa (ks. kuvio 7) on sähkömoottori, joka liikuttaa venttiilin karran vaihteiston välityksellä. Perinteisesti sähköisiä toimilaitteita on ollut saatavilla vain auki-kiinni -venttiileihin, mutta nykyään niillä voidaan ohjata myös säätöventtiileitä. Sähköiset toimilaitteet ovat kalliimpia kuin paineilmakäyttöiset, mutta ne voivat olla järkevä ratkaisu, jos instrumentti-ilmaa ei ole saatavilla eikä kompressori-investointi ole järkevä venttiilien vähäisen määrän vuoksi. (Control valve handbook 2019, 72.)



Kuvio 7. Sähköinen toimilaite (Reddy n.d.f.)

3.1.3 Säätöventtiilin mitoitus

Jotta mikä tahansa prosessi voi toimia hyvin, pitää mittaus- ja säätölaitteiden toimia moitteetta. Säätöventtiilien toiminnalla on merkittävä vaikutus prosessin tehokkuuteen, luotettavuuteen ja elinkaarikustannuksiin, joten tarkka harkinta venttiiliä hankittaessa on todellakin tarpeen. (King 2018.)

Kun säätöventtiili on mitoitettu oikein, sen asennon pitäisi pysytellä 60 ja 80 prosentin välillä suurimmalla vaaditulla virtauksella. Mikäli mahdollista, pienimmällä virtauksella venttiilin avauman pitäisi pysytellä minimissään 20 prosentissa. Ideana on siis käyttää venttiilin säätöalueesta mahdollisimman suuri osa pitäen samalla huolta kohtalaisesta varmuusmarginaalista. (Monsen 2012.)

Jos venttiili on liian pieni, se ei tietenkään läpäise vaadittua virtausta. Liian pieneksi mitoitettut venttiilit ovat kuitenkin melko harvinaisia. Yleisempää on, että on valittu liian suuri venttiili. Tiettyyn tarkoitukseen ylisuuri venttiili on kalliimpi kuin oikean kokoinen vaihtoehto, mutta vielä suurempi haitta on ylimitoitettujen venttiilien säädön herkkyys. Tämä tarkoittaa, että pienet muutokset venttiilin asennossa aiheuttavat suuria muutoksia virtauksessa, mistä seuraa hankaluus saada prosessin säätö vaakaaksi ja tarkaksi. (Monsen 2012.)

Virtauskerroin kv on tekijä, jonka perusteella voidaan valita sopivan kokoinen säätöventtiili järjestelmään. Kv-arvo määrittelee virtauksen täysin auki olevan venttiilin läpi kuutiometreinä tunnissa, kun nesteen lämpötila on 20 °C ja paine-ero venttiilin yli 1 bar. (Harju 2010, 132; Sizing of high pressure valves with the coefficient of flow kv n.d.) Kaava (4), jolla vaadittava kv-arvo lasketaan, on

$$kv = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P}} \quad (4)$$

jossa

ΔP = venttiilin yli vaikuttava paine-ero (bar)

Q = virtaus (m³/h)

ρ = nesteen tiheys kg/dm³

Esimerkiksi kun vaadittu maksimivirtaus on 10 m³/h, paine-ero 0,5 bar ja veden tiheys 0,99 kg/dm³, venttiilin kv-arvoksi saadaan

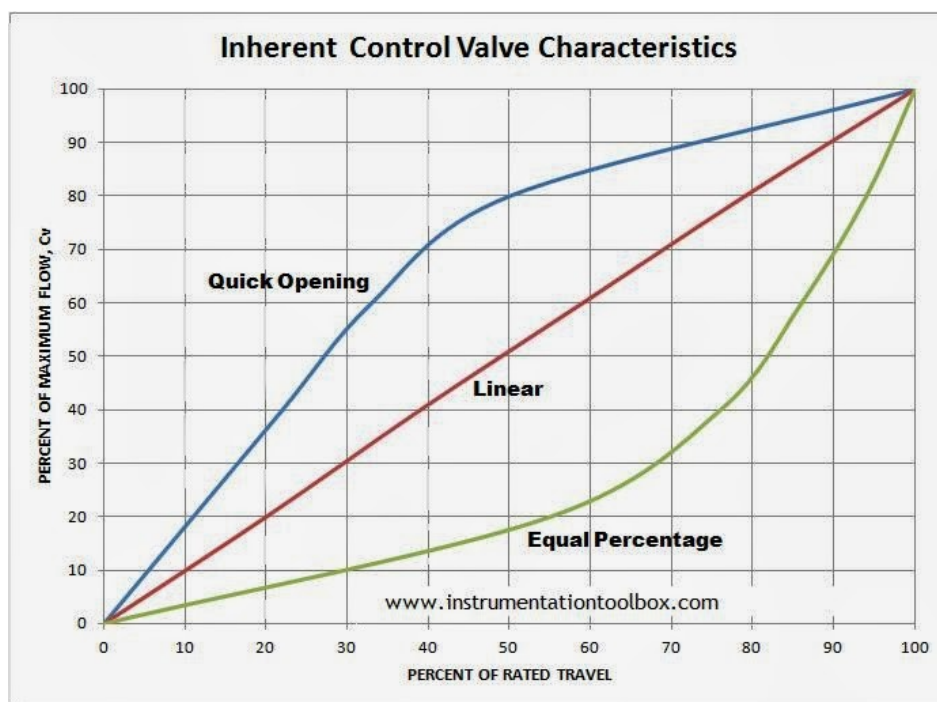
$$10 \text{ m}^3/\text{h} * \sqrt{\frac{0,99 \text{ kg/dm}^3}{0,5 \text{ bar}}} = 14,1 \text{ m}^3/\text{h}$$

Juuri tämän kokoista venttiiliä ei ole olemassa, joten joudutaan ottamaan ensimmäinen tämän arvon ylittävä venttiili. Esimerkiksi Honeywellin DN32-kokoisella venttiilillä on kv-arvo 16 m³/h, joten se olisi tähän esimerkkitilanteeseen sopivan kokoinen venttiili (Two way control valve PN16, flanged connections DN15-150, V5328A n.d).

3.1.4 Venttiilien ominaiskäyrät

Säätöventtiilin ominaiskäyrä kertoo sen, miten virtaus muuttuu tietyllä venttiilin asennon muutoksella. Ominaiskäyriä on kahta perustyyppiä, sisäinen ominaiskäyrä ja asennetun venttiilin ominaiskäyrä. (Control valve flow characteristics n.d.) Venttiilin sisäinen ominaiskäyrä on määritelty paine-eron venttiilin yli pysyessä vakiona. Kuitenkaan prosessiin asennetun venttiilin ominaiskäyrä ei vastaa sisäistä ominais-

käyrää, sillä putkistojärjestelmässä paine-ero ei pysy vakiona virtausmäärästä riippuvan putkiston painehäviön vuoksi. Asennetun venttiilin ominaiskäyrä siis muuttuu jonkin verran painehäviöiden vaikutuksesta verrattuna venttiilin teoreettiseen ominaiskäyrään. Venttiileillä on olemassa kolmenlaisia ominaiskäyriä, jotka nähdään kuvioista 8. Pikasulkuominaiskäyrällä lähes maksimivirtaus saavutetaan pienellä venttiilin avaumalla. Linearisella ominaiskäyrällä venttiilin asento (%) ja virtaaman osuus maksimivirtaamasta (%) vastaavat toisiaan. Tasaprosenttisella käyrällä samansuuruiset muutokset venttiilin asennossa aiheuttavat vakiosuuruisen prosentuaalisen muutoksen virtaamassa. (Pulli 2009, 113)



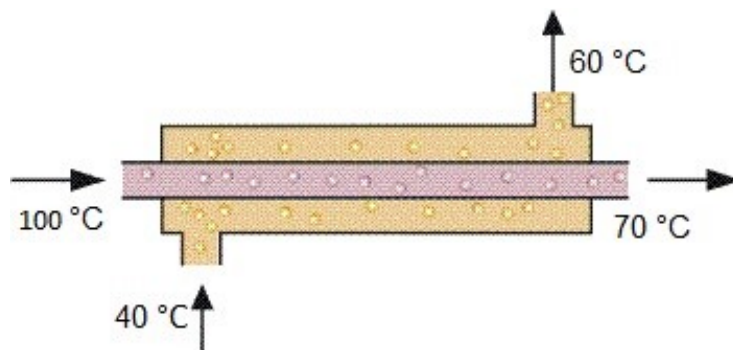
Kuvio 8. Venttiilien sisäiset ominaiskäyrät (Control valve flow characteristics n.d.)

3.2 Lämmönvaihtimet

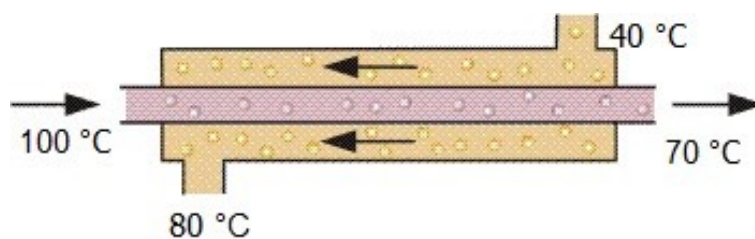
Lämmönvaihdin on laite, jota käytetään siirtämään lämpöenergiaa kahden tai useamman fluidin eli nesteen tai kaasun välillä. Lämmönvaihtimet voidaan luokitella kahdella tavalla, joko virtausten asettelun perusteella tai rakenteen perusteella. (Brogan 2011.)

3.2.1 Lämmönvaihdinten virtausasettelut ja päärakenteet

Erilaisia virtausten asetteluja ovat vastavirta, myötävirta ja ristivirta-asettelu. Vastavirtalämmönvaihtimessa fluidit virtaavat toisiaan vastaan. Tämä lämmönvaihdintyyppi on kaikkein tehokkain. Tehokkuus määritellään vertaamalla siirretyn lämmön määrää maksimilämpömäärään, joka olisi teoriassa mahdollista siirtää. Myötävirtavaihtimessa fluidit virtaavat samaan suuntaan, eikä sen tehokkuus ole vastavirtavaihtimen tasolla. Myötävirtavaihtimessa kylmän nesteen poistumislämpötila ei voi nousta kuuman nesteen poistumislämpötilan yläpuolelle. Vastavirtavaihtimessa tämä on mahdollista, koska kylmä neste poistuu kuuman virtauksen kuumimman kohdan "vierestä". Tämä nähdään kuvioista 9 ja 10. Kolmas lämmönvaihdintyyppi on ristivirtalämmönvaihdin, jossa virtaukset kohtaavat toisensa 90 asteen kulmassa. Tehokkuudeltaan se asettuu kahden edellä mainitun väliin. (Brogan 2011.)

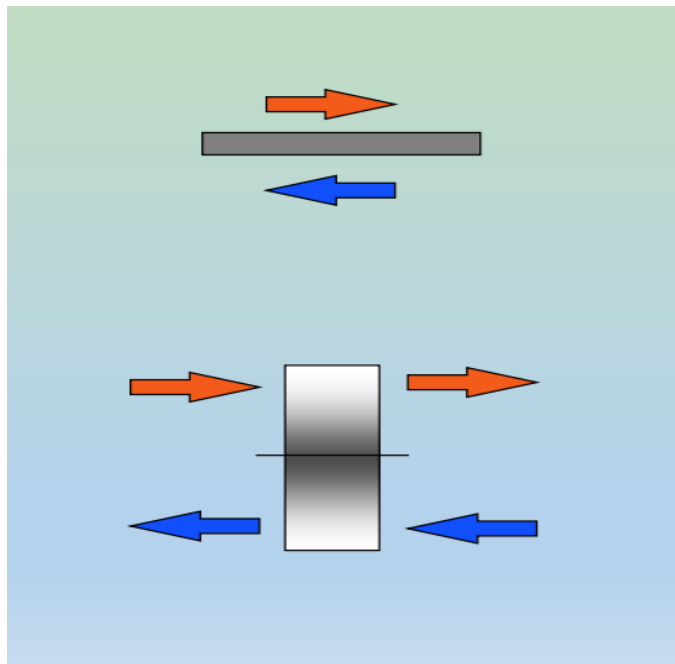


Kuvio 9. Periaatekuva myötävirtalämmönvaihtimesta (Brogan 2011, muokattu)



Kuvio 10. Periaatekuva vastavirtalämmönvaihtimesta (Brogan 2011, muokattu)

Rakenteen perusteella lämmönvaihtimet jaetaan kahteen päätyyppiin: regeneratiivisiin ja rekuperatiivisiin. Rekuperatiivisessa lämmönvaihtimessa (ks. kuvio 11 ylempi kuva) molemmat fluidit virtaavat omissa kanavissaan ja lämpö siirtyy seinämän läpi kylmempään fluidiin. Regeneratiivisessa lämmönvaihtimessa (ks. kuvio 12 alempi kuva) on kiekko, joka varaa lämpöä itseensä siirtäen lämpöä kuumalta puolelta kylmälle puolelle. Regeneratiivisen lämmönvaihtimen kiekko voi olla joko paikallaan pysyvä tai pyörivä. Molemmissa tyypeissä virtaukset osittain sekoittuvat keskenään, joten niitä ei voida käyttää kohteissa, joissa hygieniavaatimukset ovat korkeat. (Brogan 2011.)



Kuvio 11. Regeneratiivisen ja rekuperatiivisen lämmönvaihtimen periaatekuvat (Abdullah 2015)

3.2.2 Lämmönvaihdintyypit

Putkilämmönvaihdin

Lämmönvaihtimen tehokkuutta kokoonsa nähden kuvataan kompaktiusluvulla, joka mittaa lämmönsiirtopinta-alaa (m^2) suhteessa siirtimen käyttämään tilaan (m^3). Putkilämmönvaihtimien kompaktiusluku vaihtelee $70 m^2/m^3$:sta $500 m^2/m^3$:lle. (Özişik

2018, 527.) Putkilämmönvaihtimia käytetään laajasti ja niitä on saatavilla monen ko-
 koisina ja erilaisilla virtausasetteluilla. Ne sopivat myös suurille käyttöpaineille ja -
 lämpötiloille. Yleisimmin putkilämmönvaihdin koostuu pyöreistä putkista, jotka ovat
 pitkittäin lieriönmuotoisen kuoren sisällä. Putkia voi olla jopa satoja. Toinen fluidi kul-
 kee näiden putkien sisällä ja toinen ulkopuolella. Putkinipun ja kuoren lisäksi putki-
 lämmönvaihdin sisältää virtauksenohjauslevyjä, joilla ohjataan virtausta ja lisäksi tue-
 taan putkia. Virtaus ohjataan kulkemaan kohtisuoraan putkia vasten, jotta virtauk-
 seen saadaan enemmän nopeutta ja turbulentsuutta, jotka parantavat lämmönsiir-
 toa. Lämpö voidaan putkilämmönvaihtimella siirtää nesteestä nesteeseen, kaasusta
 nesteeseen tai kaasusta kaasuun. Kaasun lämmönsiirto-ominaisuudet ovat nestettä
 huonommat, joten putkiston kaasupuolelle täytyy lisätä rivoitus, jotta lämmönsiirto-
 pinta-alaa saadaan kasvatettua. (Özişik 2018, 528 - 529; Cengel 2006, 670.)

Levylämmönvaihdin

Levylämmönvaihdin koostuu nimensä mukaisesti levyistä, joiden väleissä fluidit kul-
 kevat. Kuumat ja kylmät virtaukset kulkevat joka toisessa välissä siten, että jokaista
 kuumaa virtausta ympäröi kaksi kylmää virtausta ja samoin jokaista kylmää virtausta
 ympäröi kaksi kuumaa virtausta. Tämän seurauksena levylämmönvaihdin on hyvin te-
 hokas. Levylämmönvaihtimien tehoa on levyjen määrää lisäämällä helppo kasvattaa
 myös jälkeenpäin. Levyt voivat olla sileitä tai niiden pintaan on voitu tehdä lämmön-
 siirron parantamiseksi kuviointi. Levyjen geometrisen muodon vuoksi levylämmön-
 vaihtimet eivät kestä yhtä korkeita paineita ja lämpötilaeroja kuin putkivaippaläm-
 mönvaihtimet, joten niitä käytetään kohteissa, joissa paineet ja lämpötilat ovat mal-
 tillisia. Niiden kompaktiusluku vaihtelee $120 - 230 \text{ m}^2/\text{m}^3$. (Özişik 2018, 529; Cengel
 2006, 670.)

Levyvaippalämmönvaihdin

Levyvaippalämmönvaihtimessa on yhdistetty levy- ja putkilämmönvaihtimien hyvät
 puolet. Vaipallisen rakenteensa ansiosta se kestää kovempia paineita ja lämpötiloja
 verrattuna levylämmönvaihtimeen. Lämmönsiirto tapahtuu kuitenkin vaipan sisällä
 olevien levyjen kautta, joten se saadaan kokoonsa nähden tehokkaammaksi verrat-
 tuna putkilämmönvaihtimeen. Lisäksi myös likaantuminen on vähäisempää putkiläm-
 mönvaihtimeen verrattuna, koska levyrakenteella virtaukseen saadaan enemmän

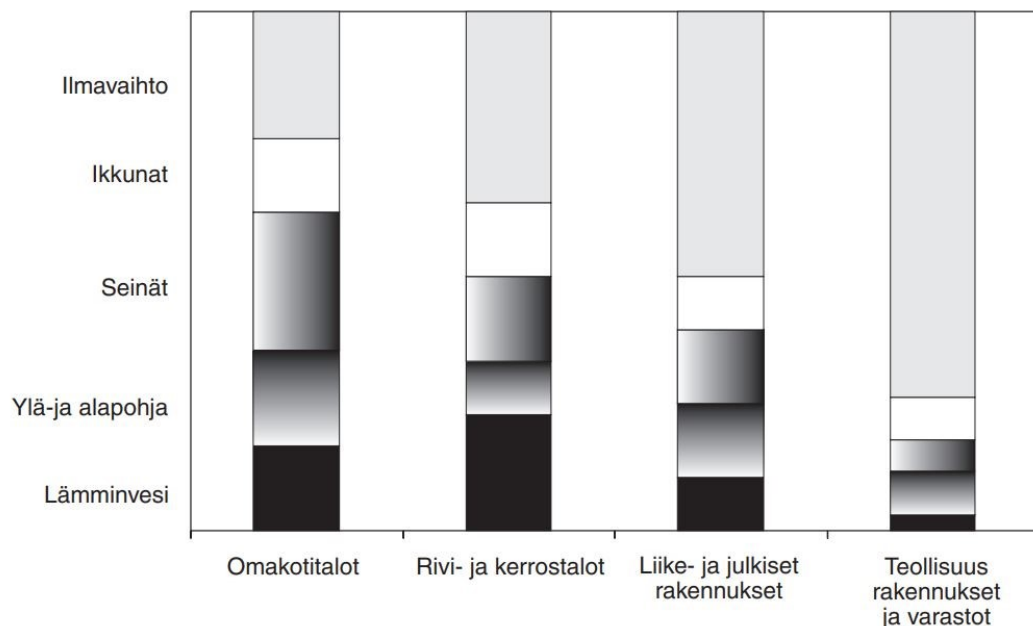
turbulenttisuutta. (SONDEX-levy- ja vaippalämmönsiirtimet n.d; Klahm & Stephan 2012.) Koska toinen fluideista virtaa vaipassa olevien aukkojen kautta, levyihin tarvitaan ainoastaan kaksi virtausaukkoa. Perinteisessä levylämmönvaihtimessa levyissä tulee olla neljä virtausaukkoa. (Klahm & Stephan 2012.)

Ripaputkilämmönvaihdin

Ripaputkilämmönvaihtimia käytetään, kun toisen fluidin paine on korkea ja toiselle puolelle tarvitaan paljon lämmönsiirtopinta-alaa. Tällaisessa vaihtimessa neste kulkee putkissa, jotka on kiinnitetty ohuiden ripojen tai lamellien keskelle. Kaasu taas virtaa ripojen välissä jäähdyttäen tai lämmittäen putkia ripojen kautta. Ripaputkilämmönvaihtimen kompaktiusluku on noin $330 \text{ m}^2/\text{m}^3$. (Özişik 2018, 530.)

Ilmanvaihtokoneen lämmityspatteri

Ilmanvaihtokoneiden lämmityspatterit käsitellään tässä erikseen omana kappaleenaan, vaikka erilaisia lämmönvaihdintyyppäjä esiteltäessä niiden rakennetta on jo käsitelty. Kuvio 12 nähdään, että teollisuuskiinteistöjen lämpöhäviöistä ylivoimaisesti suurin osa aiheutuu ilmanvaihdosta, joten ilmanvaihtokoneessa tapahtuva lämmitys kuuluu tähän työhön olennaisesti.

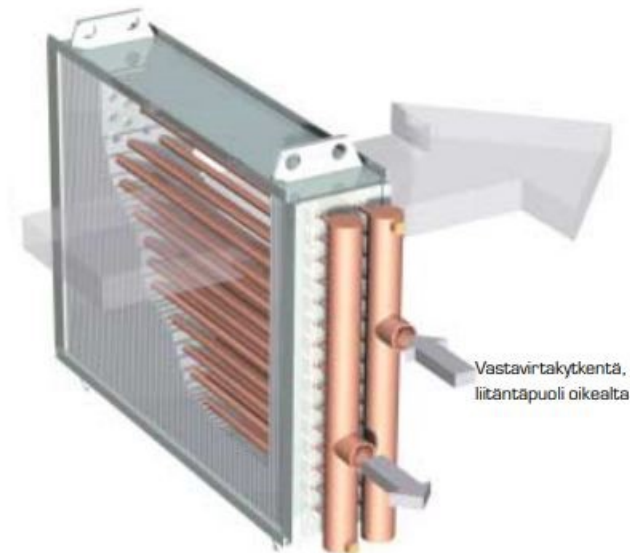


Kuvio 12. Höytylämmitysenergiankulutuksen jakautuminen rakennus- ja häviötyypeittäin (Vuolle 2005)

Ilman lämmittämiseen ilmapuhaltuskoneissa käytetään lämpöpattereita. Patterin tehtävä on siirtää ilmavirtaukseen mahdollisimman suuri lämpöteho mahdollisimman pienellä painehäviöllä. Koska ilmapuolen lämmönsiirto on paljon huonompi verrattuna nestepuoleen, on sen lämmönsiirtopinta-alaa kasvatettava käyttämällä lamelleja eli ohuita levyjä, joissa on reiät putkia varten. Reikiin asennetaan putket, jotka laajennetaan mekaanisesti kiinni lamelleihin. Yleensä lamellit on tehty alumiinista ja putket kuparista. Putkien päissä on kokoojatukit, jotka liitetään lämmitysverkostoon. Lämmönsiirtoaineena käytetään yleensä lämpöjohtoverkoston vettä, mutta joskus voidaan käyttää myös esimerkiksi höyryä, vesi-glykoliseosta, prosessineestettä tai öljyä. (Heinonen & Sandberg 2014, 170.)

Jos lämmönsiirtoaineena on vesi, patteri pitää varustaa jäätymissuojalla. Tämä toteutetaan puikkomaisella 200 - 300 mm pitkällä lämpötila-anturilla, joka asennetaan kylmimpään kohtaan eli siihen lamelliputkeen, jonka kautta vesi poistuu patterista. Anturin mittaamaa lämpötilaa estetään laskemasta alle jäätymisrajan. Jos neste silti pääsee jäätymään, vaurioituu patteri välittömästi aiheuttaen vuodon. Lämpöpatteri tulee varustaa aina pumppuryhmällä, joka kierrättää vettä patterissa koko ajan. Tällä tavoin huolehditaan siitä, että lamelliputkissa on aina samanlainen virtaus riippumatta lämmitystehosta, eikä jäätymisriskin aiheuttavia seisovan veden kohtia pääse syntymään. (Heinonen & Sandberg 2014, 170.)

Putkirivit tulisi kytkeä vastavirtaan ilman kulkusuuntaan nähden kuviossa 13 esitetyllä tavalla. Tällöin saadaan suurin mahdollinen lämpötilaero ilman ja veden välille. Erityisesti tämä korostuu lämmön talteenottopattereissa, joissa lamelliputkirivejä tarvitaan pienen lämpötilaeron takia kuudesta kymmeneen kappaletta ja patteri on ilman kulkusuunnassa pitkä. Lämmityspatterissa veden ja ilman välinen lämpötilaero on suuri, joten lamelliputkirivejä tarvitaan vain 1 tai 2 eikä ole suurta merkitystä, onko kytkentä tehty vasta- tai myötävirtakytkentänä. (Heinonen & Sandberg 2014, 170.)



Kuvio 13. Ilmanvaihtokoneen lämmityspatteri vastavirtakytkennällä (Lämmönsiirtimet n.d., 6.)

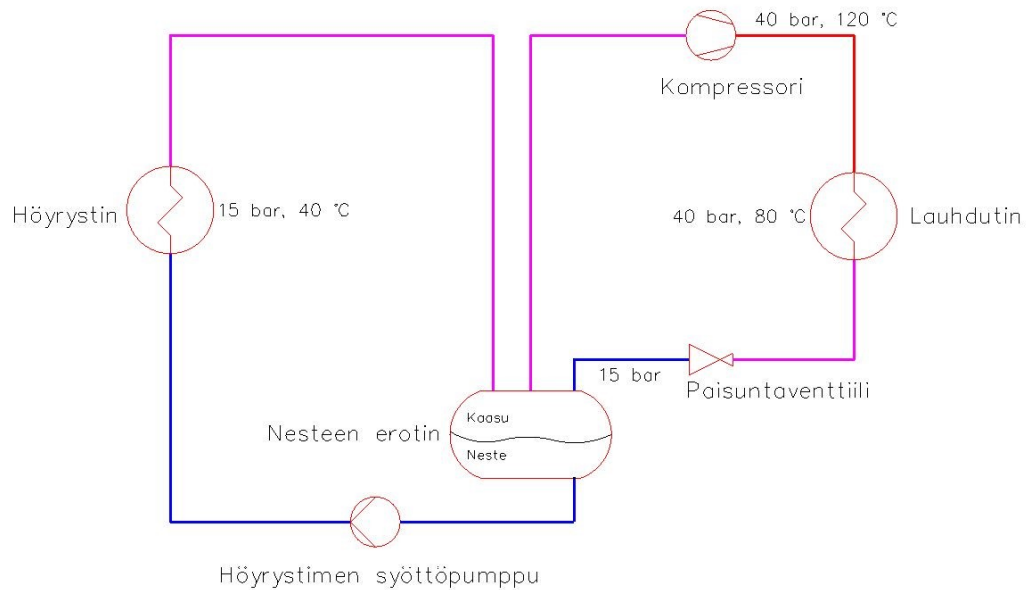
4 Lämpöpumput teollisuudessa

Lämpöpumppu on laite, jolla hukkalämmön lämpötila voidaan nostaa niin korkeaksi, että se voidaan hyödyntää. Ajatuksena on korvata hukkalämmöllä ostoenergiaa ja näin vähentää energiakustannuksia. Lämpötilan nosto ei kuitenkaan onnistu ilmaiseksi, koska lämpöpumppu vaatii käyttöenergiakseen ulkopuolista energiaa. Jotta tämä olisi järkevää, tulee lämpöpumpun tuottaman energian olla halvempaa kuin sillä korvattava energia, joka teollisuudessa useimmiten tuotetaan polttamalla jotain polttoainetta. (Industrial heat pumps for steam and fuel savings 2003, 1.)

4.1 Lämpöpumppuprosessin toiminta

Lämpöpumpun toiminta perustuu siihen, että nesteiden kiehumispiste nousee paineen noustessa. Tämän ominaisuuden mukaisesti neste myös höyrystyy paineen laskeessa ja lauhtuu takaisin nesteeksi paineen noustessa. (Thermodynamic cycle. n.d.; Harju 2010, 175.)

Höyrystimessä kiehuessaan neste sitoo lämpöä ympäriltään, jolloin sen ympäristö jäähtyy. Paineita alentamalla voidaan neste saada kiehumaan jopa -20 asteen lämpötilassa. Paineen alennus saadaan aikaan kompressorin avulla. Kompressorin puristuksessa lisää lämmennyttä kaasua jäähdytetään lauhduttimessa, jolloin se lauhtuu takaisin nesteeksi ja aiemmin sidottu sekä kompressorista tullut lämpö siirtyy ympäristöön. (Harju 2010, 175.)



Kuvio 14. Nesteen erottimen sisältävä lämpöpumppuprosessi

Tässä esimerkissä lämpöpumppuprosessista (ks. kuvio 14) kylmäaineena on ammoniakki. Prosessin ensimmäisessä vaiheessa kompressorin avulla kaasumaisen kylmäaineen paine nostetaan 15 baarista 40 baariin. Samalla myös ammoniakkin lämpötila nousee 120 asteeseen. (Thermodynamic cycle n.d.)

Seuraavassa vaiheessa tulistunut korkeapaineinen kaasu johdetaan lauhduttimelle, joka nimensä mukaisesti lauhduttaa kaasun nesteeksi. Ensin kaasu jäähtyy 120 asteesta 80 asteeseen, kunnes tulistus on poistunut. 80 asteessa kaasu lauhtuu nesteeksi. Lauhduttimen toisiopuolelta lämpö siirretään käyttökohteeseen. (Thermodynamic cycle n.d.)

Kolmannessa vaiheessa kylmäaine virtaa lauhduttimelta paisuntalaitteelle. Paisuntalaitteen tehtävä on laskea nestemäisen kylmäaineen painetta kuristamalla sen virtausta. Kun paine lasketaan 40 baarista takaisin 15 baariin, osa nesteestä höyrystyy ja samalla myös lämpötila laskee. (Thermodynamic cycle n.d.)

Syntynyt nesteen ja kaasun seos johdetaan seuraavaksi nesteen erottimeen. Erotettu kaasu menee kompressorille, ja nestemäinen aine jatkaa höyrystimelle. Höyrystimessä neste alkaa kiehua 40 asteessa ulkopuolisen lämmön vaikutuksesta. Tämä ulkopuolinen lämpö on teollisuudessa tavallisesti jokin matalalämpöinen hukkalämpövirta. Höyrystynyt nestepisaroita sisältävä kaasu menee uudestaan nesteen erottimeen, josta kaasu johdetaan kompressorille ja neste pumpataan höyrystimelle. (Thermodynamic cycle n.d.)

Edellä kuvatussa prosessissa lämpöpumppulaitteisto sisältää nesteen erottimen. Jokaisessa järjestelmässä nesteen erotusta ei ole. Tällöin kuitenkin mitoituksessa tulee varmistaa se, että höyrystin jaksaa höyrystää nesteen täysin. Muuten nestepisaroista koituu ongelmia niiden joutuessa kompressorin. (Mechanical heat pump n.d.)

4.2 COP-luku

Lämpöpumpun lämmöntuoton tehokkuus määritellään COP-lukuna. COP on lyhenne, joka tulee englanninkielisistä sanoista coefficient of performance. COP lasketaan kompressorin käyttämän sähköenergian ja lauhduttimelta saatavan lämpöenergian avulla. Jos lämpöpumpun COP-luku on 4, käytettäessä kompressoria 1 kW teholla saadaan lauhduttimelta 4 kW lämpötehoa. Lämpöpumpun COP-luvun suuruuteen vaikuttaa moni tekijä. Tärkein näistä on lauhtumis- ja höyrystymislämpötilojen ero. Mitä pienempi ero näiden kahden välillä on, sitä suurempi on COP. (Coefficient of performance n.d.) Teoreettinen COP-arvon maksimi lasketaan kaavalla 5.

$$\text{COP} = \frac{T_{\text{lauhd}}}{T_{\text{lauhd}} - T_{\text{höyr}}} \quad (5)$$

jossa

T_{lauhd} = kylmäaineen lauhtumislämpötila prosessissa (K)

$T_{\text{höyr}}$ = kylmäaineen höyrystymislämpötila prosessissa (K)

Toinen lämpöpumpun tehokkuuteen vaikuttava tekijä on käytössä oleva kylmäaine. Esimerkiksi ammoniakilla saavutetaan COP 6, jos höyrystymislämpötila on 30 ja lauhtumislämpötila on 70 astetta. Näillä samoilla lämpötiloilla saavutetaan ainoastaan COP-arvo 4,5 jos käytetään toista yleistä kylmäainetta R134a:ta. Muita tekijöitä, jotka vaikuttavat COP-arvoon ovat esimerkiksi järjestelmän säädöt ja apulaitteiden kuten puhaltimien ja pumppujen tehot. (Coefficient of performance n.d.) Todellinen COP-arvo lasketaan kaavalla 6.

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{lauhd}}}{W_{\text{net}}} \quad (6)$$

jossa

Q_{lauhd} = lauhduttimelta saatava lämpöteho (W)

W_{net} = kulutettu sähköteho (W)

4.3 Kylmäaineet

4.3.1 Kylmäaineiden nimeäminen

Käytössä olevat kylmäaineet on nimetty R-koodeilla. R tarkoittaa, että kyseessä on refrigerant eli jäähdytysaine ja sitä seuraava numero kertoo, mistä aineesta on kyse. Luvut nolasta 399:ään ovat yksikomponenttisiä aineita, joiden kemiallisen rakenteen pystyy päättelemään tämän luvun avulla. (Refrigerants n.d.)

Ensimmäinen numero kertoo ainemolekyylin hiiliatomien määrän vähennettynä yhdellä. Toinen numero kertoo vetyatomien määrän lisättynä yhdellä ja kolmas numero kertoo fluoriatomien määrän suoraan. Esimerkiksi aine R134a tarkoittaa, että sen molekyylit koostuvat kahdesta hiiliatomista, kahdesta vetyatomista ja neljästä fluoriatomista. Jos numeron perässä on kirjain, se tarkoittaa molekyylin sisältävän samat atomit kuin ilman kirjainta, mutta eri järjestyksessä. (Klein & Nellis 2012, 555.)

Jos R:n jälkeinen luku alkaa numerolla 4, on kyseessä tseotrooppinen seos useista eri kylmäaineista. R500-sarjan aineet ovat atseotrooppisia seoksia. R600-sarja tarkoittaa orgaanisia aineita ja R700-sarja epäorgaanisia aineita. (Refrigerants n.d.) Tseotrooppi tarkoittaa seoskylmäainetta, jolla ei vakiopaineessa ole eksaktia kiehumispistettä vaan lämpötila-alue, jossa höyrystymistä alkaa tapahtua. Myös atseotrooppi on seoskylmäaine, mutta sillä on vakiopaineessa eksakti kiehumispiste. (Hakala & Kaappola 2012, 23; Refrigerants n.d.)

4.3.2 Yleisimmät kylmäaineet

R134a

R134a:ta käytetään yleensä keskikokoisissa tai suurissa lämpöpumppujärjestelmissä. Verrattuna R407c:hen ja R410a:han sillä saavutetaan suurempia COP-lukuja, mutta se häviää tehokkuudessa kuitenkin ammoniakille. (Refrigerants n.d.)

R407c ja R410a

R407c ja R410a ovat seoskylmäaineita, joita käytetään pienissä ja keskikokoisissa järjestelmissä. Yleensä valitaan jompikumpi näistä, jos samalla järjestelmällä halutaan sekä jäähdyttää että lämmittää kohdetta (Refrigerants n.d.) R407c:llä on alhainen puristusaine, kun taas R410a:lla sekä puristusaine että tulistumisaste ovat korkeita (R407c kylmäaine kevyen ilmastoinnin järjestelmiin n.d.; Kylmäaine R410a keveisiin ilmastointilaitteisiin ja lämpöpumppuihin n.d.).

R600 ja R600a eli butaani ja isobutaani

Butaania ja isobutaania käytetään yleensä jäähdytyslaitteistoissa. Ne sopivat hyvin myös lämpöpumppukäyttöön, sillä butaanin ja isobutaanin käyttöpaine ei nouse lämpötilan noustessa yhtä jyrkästi kuin monilla muilla kylmäaineilla. Suurin ongelma butaanin käytössä on sen tulenarkuus. (Refrigerants n.d.)

R717 ammoniakki

Ammoniakki on yleensä sopivin teollisuuskokoluokan laitteistojen kylmäaineeksi. Sillä saavutetaan korkeita COP-lukuja ja lämpötila-alue ulottuu aina 80 asteeseen saakka. Yleensä ammoniakia käytetään eniten kylmälaitteistoissa, mutta se sopii yhtä hyvin

myös lämpöpumpukäyttöön. Sillä ei ole kasvihuonekaasuvaikutusta. Ammoniakki on tulenarkaa ja erittäin myrkyllistä, mutta sillä on hyvin voimakas haju, joten vuodot on helppo havaita. (Refrigerants n.d.)

R744 hiilidioksidi

Myös hiilidioksidia käytetään jäähdytyslaitoksissa ja lämpöpumpuissa. Yleensä hiilidioksidia ja ammoniakkia käytetään rinnakkain samassa laitoksessa, jotta myrkyllisen ja helposti syttyvän ammoniakin määrää voidaan vähentää. Hiilidioksidin kriittinen lämpötila on 31 astetta. Tämä tarkoittaa sitä, että 31 asteen yläpuolella kaasu- ja neste-faaseja ei enää ole, ja höyrystymispiste laajenee höyrystymislämpötila-alueeksi. Tästä syystä sitä voidaan käyttää lämpöpumpuissa vain, jos lämmön käyttäjä sallii lämpötilan muuttuvan lämpötilaliukuman takia. (Refrigerants n.d.)

R718 vesi

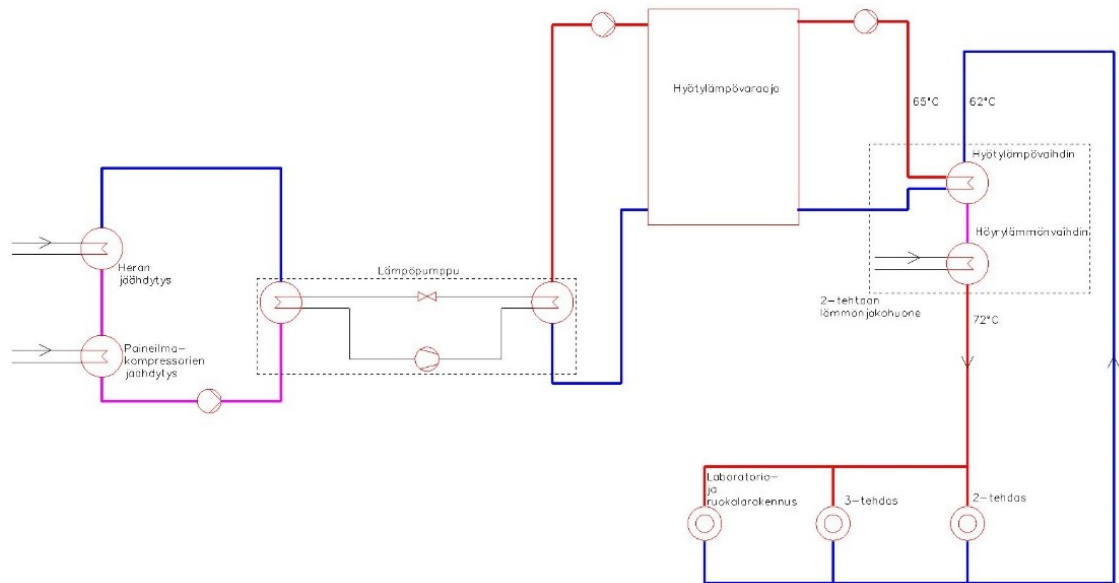
Jopa vettä voidaan käyttää kylmäaineena. Sen hyviä puolia ovat helppo saatavuus ja käytön turvallisuus sekä ihmisten että ympäristön kannalta. Sitä voidaan käyttää ai-noastaan yli sadan asteen lämpötiloissa, jolloin muiden kylmäaineiden paine nousee liian korkeaksi. Huono puoli vedessä kylmäaineena on vesihöyryn pieni tiheys, jonka vuoksi vaadittu kompressorikapasiteetti kasvaa suureksi. (Refrigerants n.d.)

5 Lämmönjakopiirin jäähtymän parantaminen

5.1 Tarkasteltavan järjestelmän kuvaus

Tehdaskiinteistöjen lämmitykseen käytettävä hyötylämpö saadaan lämpöpumpulta, jonka lämmönlähde on juuston valmistuksessa syntyvän heran ja paineilmakompressorien jäähdytysvesipiiri. Tästä piiristä saatava lämpötila on tavallisesti 25 ja 30 asteen välillä. Varaajasäiliön alaosasta tulevan 50-asteisen veden lämpötila nostetaan

lämpöpumpulla 65 - 70 asteeseen ja se pumpataan ensin varastosäiliön yläosaan. Säiliön yläosasta hyötylämpö pumpataan kulutuskohteille, joilta se palaa jäähtyneenä varaajasäiliön alaosaan. Sieltä vesi menee jälleen lämmitettäväksi lämpöpumpun lauhtuttimelle. Hyötylämmön kulutuskohteita on useita, mutta tässä työssä käsitellään 2-tehtaan lämmönjakuhuoneesta jaettavaa lämpöä. Järjestelmän periaatekuva on esitetty kuviossa 15.



Kuvio 15. Lämmitysjärjestelmän periaatekuva

Selvityksen kohteena olevassa 2-tehtaan lämmönjakuhuoneessa hyötylämmöllä voidaan esilämmittää sekä lämmintä käyttövettä että kiinteistöjen lämmönjakopiirin paluuvettä. Lämmönjakuhuoneen kytkentäkaavio esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 1. Hyötylämmöllä lämmönjakopiirin vesi voidaan saada noin 55 - 60-asteiseksi ja viimeinen tarvittava 10 - 15 astetta lämmitetään höyrylämmönvaihtimella. Lämpimän käyttöveden loppulämmitys tehdään lämpöverkoston menovedellä. Tämä kytkentä on esitetty kuviossa 16. Tästä johtuen höyryvaihtimen jälkeinen menoveden lämpötila on pidettävä korkealla riippumatta ulkolämpötilasta. Osaan lämmönjakoverkostoa menevän veden lämpötilaa voidaan säätää kuitenkin sekoittavien kolmitieventti-

oma höyryvaihtimensa, jolla voidaan tarvittaessa lämmitellä joko pelkästään 3-tehdasta tai sekä 2- että 3-tehdasta. Kolmostehtaan käyttövesi lämmitetään suoraan höyryllä, joten sitä ei tarkastella tässä työssä enempää.

5.2 Alkutilanne

Selvityksen alkaessa hyötylämmönvaihtimelle tulevan lämmitysverkoston paluuvien lämpötila oli 60 - 64 astetta ja höyrylämmönvaihtimelta lähtevän menoveden lämpötila 69 - 75 astetta riippuen ulkolämpötilasta (ks. kuvio 15, s. 31). Lämpöverkoston veden jäähtymä oli siis huono. Tästä on seurannut se, että kiinteistöt on lämmitetty lähes yksinomaan höyryllä, koska paluuvien ja hyötylämmön välille ei ole saatu riittävää lämpötilaeroa. Höyryn säätöventtiilin asento on vaihdellut 20 ja 30 prosentin välillä. Höyryn tai lauhteen mittausta ei ole olemassa, mutta höyrylämmönvaihtimen toisiopuolelta mitattu virtaus oli 15,44 l/s ja lämpötilaero 9 astetta. Tämä tarkoittaa höyryvaihtimen tehoksi mittaustilanteessa

$$15,44 \text{ l/s} * 0,99 \text{ kg/l} * 4,18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} * (75 - 64)^\circ\text{C} = 575 \text{ kW}$$

Koska hyötylämmön lämpötila on yleensä 60 - 65 astetta, sitä ei ole saatu hyödynnettyä lainkaan lämmitysverkostosta palaavan veden (60 - 63 °C) esilämmitykseen. Viiden asteen lämpötilaero periaatteessa mahdollistaisi hyötylämmön käytön ainakin pienissä määrin, mutta varaajasäiliölle palaavan veden lämpötila on rajoitettu automaatiojärjestelmän avulla viiteenkymmeneen asteeseen lämpöpumpun mitoitusarvojen takia. Jotta tämä ei rajoittaisi hyötylämmön käyttöä, myös lämmitysverkoston paluuvien lämpötila pitäisi saada reilusti alle viiteenkymmenen asteen.

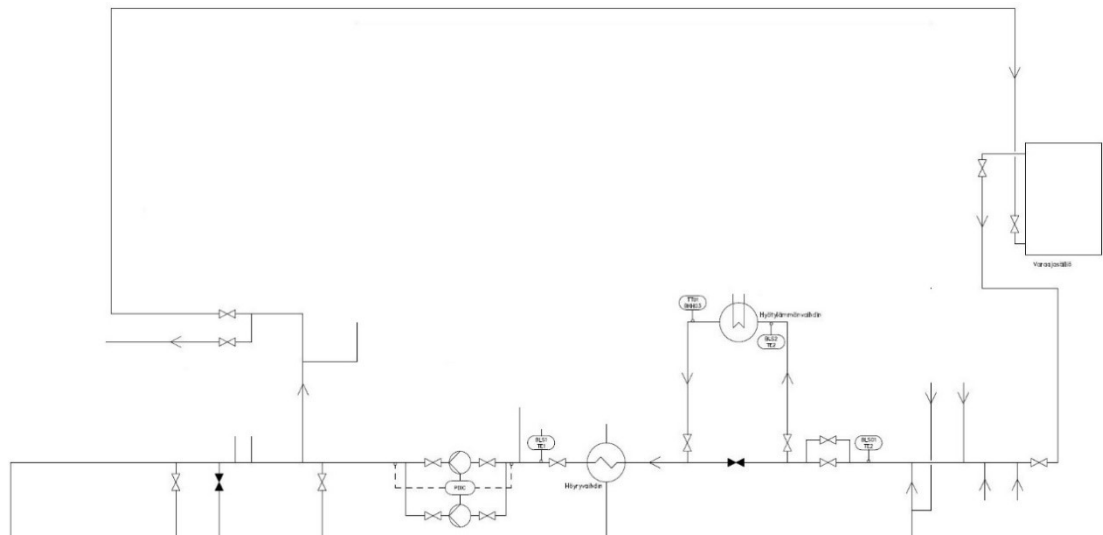
Ideaalitilanteessa vesi jäähtyisi lämpöverkostossa noin 30 astetta, jolloin paluuvien olisi 40-asteista ja lämpötilaeroa hyötylämpöön nähden olisi 65-40=25 astetta. Jos paluuvien saataisiin esimerkiksi 60-asteiseksi hyötylämmön avulla, höyryvaihtimen vastuulle jäisi nykyistä pienempi osuus lämpöverkoston ottamasta tehosta ja hyötylämmön ollessa lämmityskaudella höyryä edullisempaa myös säästöjä saataisiin.

5.3 Huonon jäähtymän syyt

5.3.1 Lämmönjakuhuone 2-tehtaalla

Tutkiminen aloitettiin 2-tehtaan lämmönjakuhuoneesta, josta ei ollut olemassa ajantasaista putkiston kytkentäkaaviota. Oli myös epäilyksiä siitä, että osa putkista oli yhdistetty virheellisesti suoraan menopuolelta paluupuolelle. Ensiksi piirrettiin putkia seuraamalla lämmönjakuhuoneesta PI-kaavio, josta näkee selvästi putkien kytkennät ja mahdolliset virheet niissä. Kaavio näkyy liitteessä 1.

Piirretystä kaaviosta kävi nopeasti ilmi, että kiinteistöjen lämmönjakopiirissä oleva varaajasäiliö oli kytketty järjestelmään väärin. Tämä varaaja on siis eri kuin lämpöpumppuun kytketty varaaja. Menopuoli meni varaajasäiliölle oikein, mutta varaajan toinen linja oli jostain syystä kytketty suoraan takaisin paluupuolelle, joten sieltä palaava vesi oli yhtä kuumaa kuin menopuolen vesi. Varaajalle menevät linjat ovat kooltaan DN150, joten huono jäähtymä tämän kytkennän kautta näytti selvältä. Kytkentä on esitetty kuviossa 17.



Kuvio 17. 2-tehtaan lämmönjakuhuoneen varaajan kytkentä

Kaavioita tutkimalla yritettiin selvittää, mitä varten varaajasäiliö oli kytketty järjestelmään näin. Mahdollisesti kytkentä oli tehty tällä tavoin siksi, että tarvittaessa 3-tehtaan höyrylämmönvaihtimella voidaan hoitaa 2-tehtaan lämmönjakohuoneen lämmityslaitteiden tehtävät. Tällä tavalla voidaan parantaa lämmön toimitusvarmuutta, eikä 2-tehtaan höyrylämmönvaihtimen vikaantumisen keskeytä kolmen rakennuksen (2-tehdas, 3-tehdas, laboratorio/ruokalarakennus) lämmönjakelua kokonaan. Kaaviosta kuitenkin todettiin, että tämä voidaan tehdä myös ilman varaajasäiliötä operoimalla olemassa olevia venttiilejä ja pumppuja. Jotain varten varaajasäiliö on tietysti rakennettu, mutta mitä varten, jäi arvoitukseksi. Toki kyseessä voi olla myös suunnitteluvirhe. Jos säiliötä haluaisi käyttää lämmöntarpeen puskurina, se tulisi kytkeä osaksi menolinjaa siten, että kuuma vesi menisi heti höyrylämmönvaihtimen jälkeen säiliöön ja jatkaisi sieltä matkaansa lämmön kulutuskohteille. Toki säiliö toimii periaatteessa puskurina tälläkin hetkellä, mutta samalla hankaloittaa hyötylämmön käyttöä koska paluulämpötila nousee. Lisäksi tällainen kytkentä lisää myös pumppauskustannuksia, koska säiliön kautta muodostuu tarpeeton vesikierto.

Lämmönjakohuoneessa on kolmitieventtiili, jonka tehtävä on säätää ilmastoinnin lämpöverkoston menoveden lämpö ulkolämpötilan mukaan tietyn suuruisiksi sekoittamalla meno- ja paluuvettä keskenään. Venttiili ei kuitenkaan toiminut tarkoitetulla tavalla, vaan sen kara oli jumittunut ääriasentoon, joten verkostoon virtasi höyryvaihtimen lämmittämä vesi sellaisenaan. Tarpeettoman kuuma menovesi nosti tietysti myös paluupuolen lämpötilaa.

5.3.2 Lämmön kulutuskohteet 2-tehtaalla

Kierrätysilmalämmittimet

Kahdessa vanhassa kierrätysilmalämmittimessä venttiilit olivat täysin auki, vaikka niiden puhaltimet eivät olleet käynnissä. Nämä lämmittimet ovat niin vanhoja, ettei niissä ole magneettiventtiiliä. Tämän vuoksi menupuolen vesi pääsi kiertämään vapaasti paluupuolelle jäähtymättä juuri lainkaan. Myös 2-tehtaan uudella puolella on kierrätysilmalämmittimiä. Niissä on magneettiventtiilit, joiden pitäisi avautua vasta, kun puhallin lähtee päälle. Uusienkin kierrätysilmalämmittimien paluuputket olivat

kuitenkin kuumia, vaikka puhallin ei ollut käynnissä. Vaikutti siltä, että jostain syystä venttiilit eivät sulkeutuneet puhaltimen pysähtyessä.

Ilmanvaihtokoneet

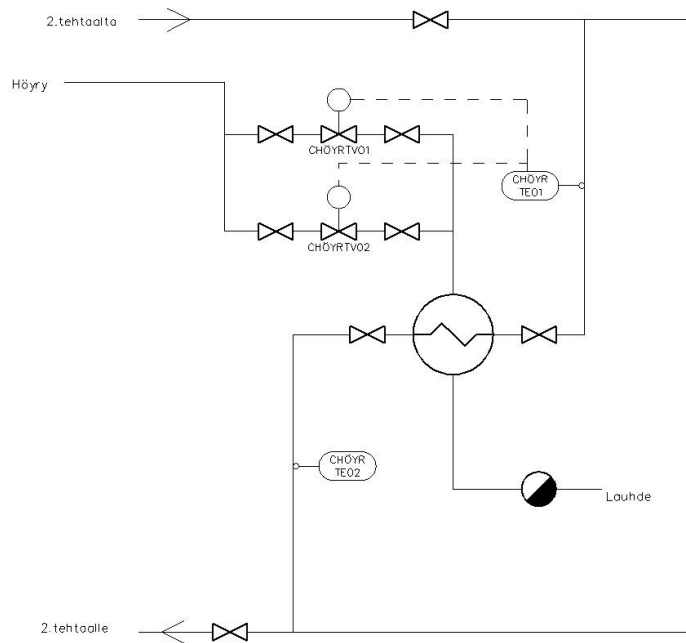
Kun Ilmanvaihtokoneen lämmityspatterit ei käytä lämpöä, patterille menevä lämpöjohto on tarkoitus pitää lämpimänä kierrättämällä pieni määrä vettä linjansäätöventtiilin kautta suoraan paluupuolelle. Kahdessa ilmanvaihtokoneessa tämä venttiili oli kuitenkin liian isolla, joten paluuvesi lämpeni tarpeettoman kuumaksi.

Lämmönvaihtimet

Kahdelle ilmanvaihtokoneelle menevät lämpöjohdot on katkaistu siten, että lämpöjohdon puolivälissä on lämmönvaihdin. Lämmönvaihtimien ensiöpuolella on siis lämmönjakohuone ja toisiopuolella kulutuskohte eli ilmanvaihtokoneen lämmityspatterit. Ensiöpuolen säätölaitteena oli ainoastaan linjansäätöventtiili. Venttiiliä joudutaan pitämään melko isolla varmuuden vuoksi, jotta ilmanvaihtokoneen lämpöpatterille menevän veden lämpötila pysyy kaikissa tilanteissa tarpeeksi korkealla eikä patterin jäätymissuoja laukea ja pysäytä ilmanvaihtoa. Lämmönvaihtimien läpi on siis sama virtaus riippumatta siitä, millainen kulutus ilmanvaihtokoneen lämmityksessä on. Tästä seuraa se, että pienellä lämmöntarpeella lämmönjakohuoneeseen palaava vesi on lähes yhtä kuumaa kuin menopuolen vesi.

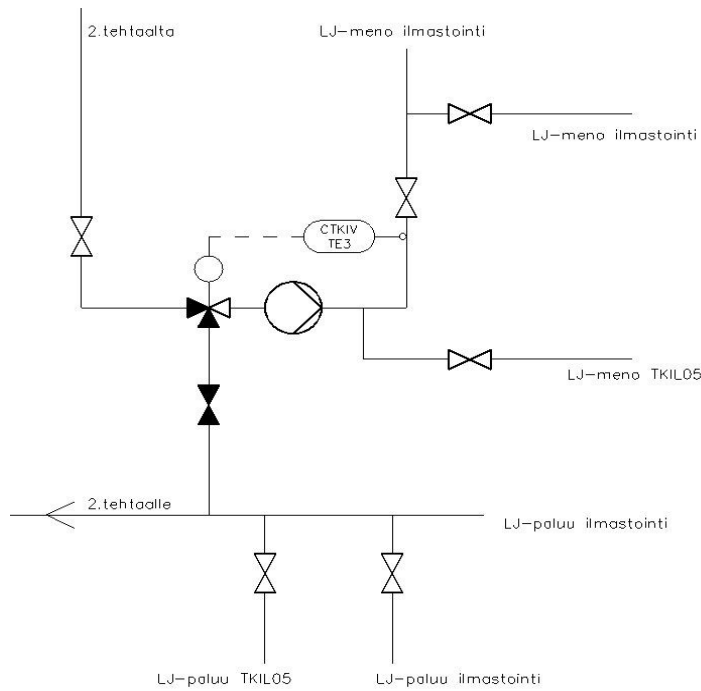
5.3.3 Lämmönjakohuone 3-tehtaalla

Myös 3-tehtaan lämmönjakohuoneesta piirrettiin kaavio, joka on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 2. Lämmönjakohuoneessa oleva höyrylämmönvaihdin on kytketty kuviossa 18 esitetyllä tavalla meno- ja paluulinjojen väliin. Kytkentä mahdollistaa sen, että normaalitilanteessa menopuolen vesi pääsee suoraan paluupuolelle vaihtimen kautta. Alkutilanteessa 2-tehtaalle palaavan veden lämpötila oli putken pinnasta mitattuna 77 astetta. Tämä tarkoittaa sitä, että käytännössä höyryvaihdin lämmitti menopuolen vettä vielä kuumemmaksi.



Kuvio 18. 3-tehtaan höyrylämmönvaihtimen kytkentä

Kolmostehtaan ilmanvaihtokoneille menevän veden lämpötilaa on tarkoitus säätää sekoittamalla meno- ja paluuvettä keskenään kolmitieventtiilillä, jonka kytkentä on esitetty kuviossa 19. Tämä venttiili ei kuitenkaan toiminut oikein. Jos venttiilin laitto automaattille, se ajautui sataan prosenttiin, jolloin kuuma puoli oli täysin auki, mutta menolämpötila laski silti liian alas. Tästä johtuen venttiilille menevä paluulinja oli laitettu kiinni, jolloin vesi saatiin pelkästään kuumalta puolelta. Seurauksena menoveden lämpötila oli turhan korkea, mikä vaikutti suoraan paluupuolen lämpötilaan samoin kuin kakkostehtaallakin.



Kuvio 19. Kolmitieventtiilin kytkentä 3-tehtaalla

5.3.4 Lämmön kulutuskohteet 3-tehtaalla

Kierrätysilmalämmittimissä on magneettiventtiilit, jotka päästävät kuumaa vettä läpi vasta puhaltimen käynnistyessä. Yhdessä lämmittimessä venttiili vaikutti olevan jumissa tai muuten vikaantunut, koska paluupuoli lämpeä, vaikka lämmitin ei ollut käynnissä. Kaikissa ilmanvaihtokoneissa meno- ja paluulinjojen välissä olevat linjasäätöventtiilit olivat liian isoja. Yhdessä koneessa venttiili oli jostain syystä jopa täysin auki.

5.4 Toimenpiteet

5.4.1 Turhien virtausten poisto

Kuten aiemmin mainittua, virtaus lämmönjakopiirissä oli alkutilanteessa 15,44 L/s eli 55,6 m³/h. Virtaus mitattiin putken pinnalta Fluxus F601 -ultraäänimittarilla. Ylimääräinen kierto laitettiin ensin kiinni varaajasäiliöltä. Tällöin virtaus pieneni 48,5 kuuti-

oon tunnissa. Seuraavaksi eristettiin 3-tehdas omaksi piirikseen ja laitettiin yksi kuuman veden läpi kierrättävä kiertoilmakoje kiinni. Näillä muutoksilla virtaus pieneni 37 kuutioon tunnissa. Paluueden lämpötila muuttui 63 asteesta 61 asteeseen, joten siihen ei saatu vielä suurta muutosta aikaan, vaikka virtaus pienenikin.

Seuraavaksi pienennettiin molempien kiinteistöjen ilmanvaihtokonehuoneissa olevien linjojen lämpimänä pitoon tarkoitettujen linjansäätöventtiileiden virtausta mahdollisimman pienelle. Kolmostehdas otettiin takaisin kakkostehtaan lämmityskiertoon, mutta 3-tehtaan höyrylämmönvaihtimen höyry- sekä vesipuolen venttiilit laitettiin kiinni. Tällä varmistettiin se, että kaikki kolmostehtaalle menevä lämmitysvesi kiertää lämmön kulutuskohteiden kautta. Näillä muutoksilla 2-tehtaan lämmönjakokeskuksen paluueden lämpötila pieneni 61 asteesta 58 asteeseen.

Toinen 2-tehtaan vanhojen kierrätysilmalämmittimien auki olleista venttiileistä saatiin käännettyä kiinni, jolloin kierto sen kautta loppui. Toinen puolestaan oli niin jumissa, ettei sitä saanut suljettua. Venttiili vaihdettiin uuteen, mutta sen sulkemisella ei saatu selkeästi havaittavaa muutosta paluulämpötilaan.

5.4.2 Säätöventtiilien lisäys

Vapaalla kierrolla olleille lämmönvaihtimille mitoitettiin säätöventtiilit. Niillä on tarkoitus pitää toisiopiirin menolämpötila halutulla tasolla siten, ettei ensiöpuolelta tarpeettomasti kierrätetä kuumaa vettä paluupuolelle. Mitoituksen lähtöarvoina olivat ilmanvaihtokoneen lämmityspatterien säätöventtiilien virtaama-arvot sekä pattereille virtaavan veden lämpötilaerot. Näiden tietojen perusteella laskettiin lämmityspatterien mitoitustehot. Lämmönvaihtimien ensiöpuolelle vaadittava virtaus laskettiin näiden mitoitustehojen perusteella.

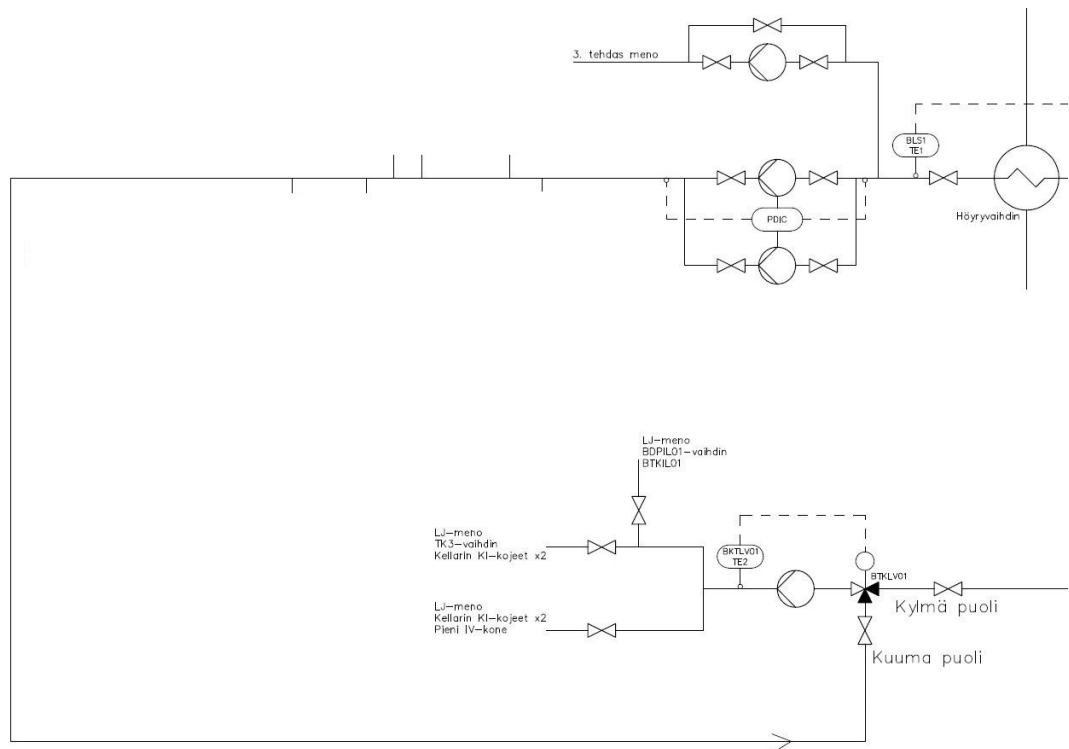
Koska säätöventtiilille suunnitellussa paikassa ei ollut painemittauksia, paine-ero laskettiin mitatun virtauksen perusteella. Kaavasta

$$k_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P}} \quad (4)$$

ratkaistiin paine-ero ja mitattiin virtaukset Fluxus F601-ultraäänimittarilla linjansäätöventtiilin eri asennoilla. Vexven internet-sivuilta saatiin kunkin asennon kv-arvo. Näiden tietojen perusteella laskettiin säätöventtiileille saatavilla oleva paine-ero. Paine-eron ja mitoitusvirtauksen avulla laskettiin yllä olevalla kaavalla venttiililtä vaadittava kv-arvo. Mitoituksen tuloksena toiseen lämmönvaihtimeen tilattiin DN40- ja toiseen DN25-koon säätöventtiili sähköisillä toimilaitteilla. Lisäksi tilattiin myös lämpötilamittaukset, joiden perusteella venttiilit saavat asetusarvonsa. Säätöventtiilejä ja lämpötilamittauksia ei saatu kuitenkaan tämän työn aikana asennettua, koska rakennusprojektin vuoksi hitsareita ei ollut vapaana. Niinpä säätöventtiilien vaikutus simuloitiin kuristamalla lämmönvaihtimien virtauksia manuaalisesti, jolloin paluulämpötila laski 48 asteesta 46 asteeseen. Lämmönvaihtimien virtauksen kuristus tehtiin viimeisenä, joten 46 astetta oli lopullinen tulos, johon muutoksilla päästiin.

5.4.3 Säätöventtiilien korjaus

Jumissa olleen kakkostehtaan kolmitieventtiilin toimilaitte paljastui rikkiäiseksi, joten se vaihdettiin. Venttiilin kara ei kuitenkaan alkanut liikkumaan uudellakaan toimilaitteella. Ongelmaa tutkittaessa kävi ilmi, että toinen verkoston menopuolen pumppuista kävi koko ajan täysillä, joka aiheutti venttiilin karan liikesuuntaa vastaan liian suuren paineen. KytKentä näkyy kuviossa 20. Pumput ovat taajuusmuuttajakäyttöisiä ja niitä on tarkoitus ohjata siten, että paine-ero pumppujen yli pysyy vakiona. Ilmeisesti jonkin aiemmin olleen tilanteen vuoksi ohjaus oli kuitenkin laitettu täysille. Kun se palautettiin normaaliksi, niiden tuottama paine-ero pieneni ja säätöventtiili alkoi toimimaan. Lämpötila venttiilin jälkeen laski muutamalla asteella ja paluulämpötila laski noin kuudella asteella 58 asteesta 52 asteeseen.



Kuvio 20. 2-tehtaan kolmitieventtiilin kytkentä

Kävi ilmi, että pumppujen väärä ohjaus oli vaikuttanut myös kolmostehtaan kolmitieventtiilin toimintaan. Kolmostehtaalte pumpattavan menoveden paine ei ollut ilmeisesti ollut riittävä, koska maksimiasetuksella ollut pumppu aiheutti liian suuren paineen kakkostehtaalte ja näin ”varasti” vettä kuviossa 20 ylimpänä näkyvältä kolmostehtaan pumpulta. Kun ohjausta muutettiin, alkoi myös kolmostehtaan lämpötilasäätö kolmitieventtiilillä toimia, vaikka venttiilille ja toimilaitteelle ei tehty mitään toimenpiteitä. Kun 3-tehtaan kolmitieventtiili laitettiin säätämään IV-lämpöverkoston menolämpötilaa alemmas, kokonaispaluulämpötila laski vielä parilla asteella 52 asteesta 50 asteeseen.

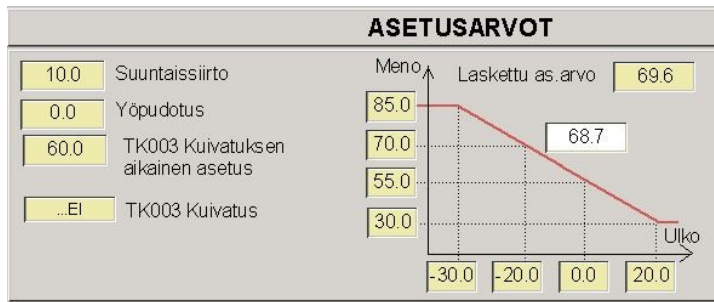
Kun venttiili alkoi säätää lämpötilaa, se näytti toimivan kohtuullisesti automaatiojärjestelmästä katsottuna, vaikka säätö huojuikin edestakaisin noin viiden asteen verran. Putken pinnasta mitattuna heilunta oli kuitenkin todella rajua. Menolämpötila vaihteli jopa 35 asteesta 65 asteeseen nopealla syklillä asetusarvon ollessa 58 astetta. Kiinteistöautomaatiossa näkyvä lämpötilamittaus ei ehtinyt mitata näin nopeita muutoksia lämpötilassa. Rajut muutokset venttiilin asennossa aiheuttivat myös

sen, että venttiilin aukaistessa kuumaa puolta menopuolen lisäksi myös paluupuolelle virtasi kuumaa vettä. Tämä ongelma vaikutti johtuvan jostain mekaanisesta viasta venttiilissä. Venttiilin vaihto ei tullut kuitenkaan lämmityskaudella kyseeseen, joten se päätettiin ohjata manuaalisesti sataan prosenttiin. Tällöin menovesi on liian kuumaa säätökäyrän asetusarvoon nähden, mutta kokonaistilanne on parempi, koska menovettä ei sekoitu paluuveden joukkoon.

Uusien kierrätysilmälämmittimien magneettiventtiilien ohjaus tarkistettiin ensin sähkö- ja automaatiopuolelta. Kävi ilmi, että venttiilin kelan napoihin ei tullut jännitettä kojeen ollessa pois päältä. Tämä ohjaus on oikea, mikäli venttiili on normaalisti kiinni olevaa mallia. Venttiilin ohjauksen toimiminen väärin päin pystyttiin sulkemaan pois, koska käytössä ollut lämmitin oli onnistunut säätämään erään tilan lämpötilaa oikein. Jos ohjaus olisi ollut väärin päin, venttiili olisi lämmittimen käynnistyessä sulkeutunut eikä tila olisi pysynyt lämpimänä. Vaihtoehdoksi jäi siis jokin mekaaninen vika. Kun venttiilien toimintaa tutkittiin uudestaan, kävi ilmi, että aiemmin mainittu pumpun ohjauksen muutos vaikutti myös magneettiventtiilien toimintaan. Liian suuri paine-ero magneettiventtiilien yli esti venttiilejä sulkeutumasta kokonaan ja pumpun ohjausmuutoksen jälkeen ne toimivat normaalisti.

5.4.4 Säätökäyrien muutokset

2-tehtaan höyrylämmönvaihtimelta lähtevä vesi joudutaan lämmittämään ulkolämpötilasta riippumatta kuumaksi, koska lämmin käyttövesi saa lämpönsä juuri tästä vedestä. Kolmitieventtiilillä voidaan kuitenkin säätää verkoston menolämpötilaa alemmaksi lämpimän käyttöveden lämmönsiirtimen jälkeen. Kuvioista 21 nähdään, että käyrä on ilmaston tarpeisiin aika korkealla tasolla, koska sille on tehty suuntaissiirto ylöspäin kymmenellä asteella. Säätöventtiilin perässä on edellä mainitut lämmönvaihtimet, jotka pitää huomioida käyrän säädössä. Jotta lämmönvaihtimien toisiopuolellekin saadaan tarvittava lämpö, pitää ensiöpuolen menolämpötilan olla noin 10 astetta ylempänä kuin toisiopuolella tarvittava lämpötila. Säätökäyrää laskettiin silti alaspäin ottamalla suuntaissiirto 10 astetta pois käytöstä, jolloin kaikki menolämpötilan asetusarvot pienenevät 10 asteella. Tällä muutoksella paluulämpötila pieneni 50 asteesta 48 asteeseen.



Kuvio 21. 2-tehtaan säätökäyrä alussa

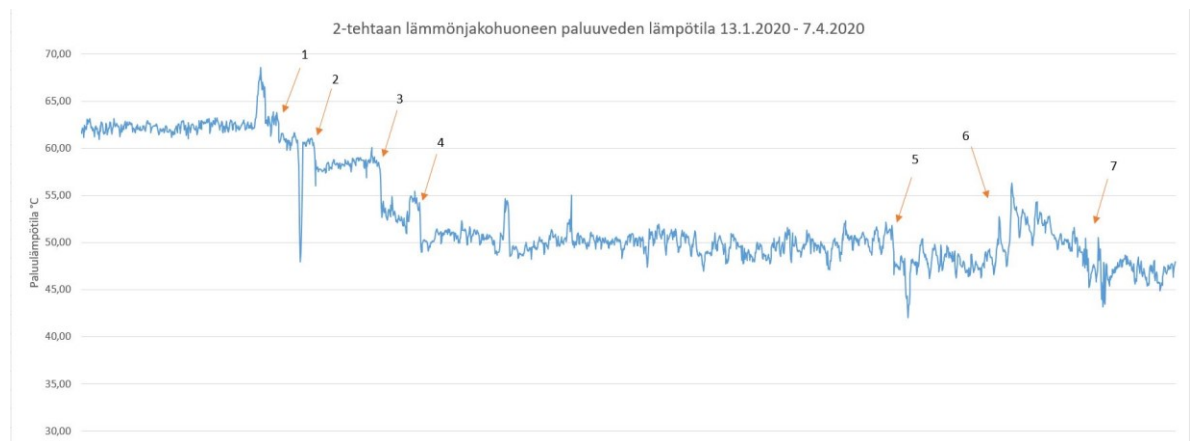
Kolmitieventtiilillä säädetään käyrän mukaisesti ilmanvaihdon lämpöverkoston menoveden lämpötilaa myös kolmostehtaalla. Kuvio 22 nähdään, ettei käyrä ole tasainen. Nollasta viiteen pakkasasteeseen ulkolämpötilan muutoksella menoveden asetusarvo nousee 55 asteesta 70 asteeseen eli 15 astetta. Kun taas ulkolämpötila muuttuu -5 asteesta -20 asteeseen, nousee asetusarvo ainoastaan 5 astetta. Korjaus tehtiin siten, että kuvassa 70 asteen menolämpötila muutettiin 60 asteeseen ja vastaava ulkolämpötilan arvo -10 asteeseen. Sen jälkeen muita menolämpötilan arvoja laskettiin viidellä asteella alaspäin. Kolmostehtaan säätökäyrän muutoksella ei kuitenkaan saatu paluulämpötilaan muutosta, koska itse säätöventtiili toimi niin huonosti.



Kuvio 22. 3-tehtaan säätökäyrä alussa

6 Tulokset

Paluuveden lämpötila saatiin laskettua 46 asteeseen. Alkutilanteessa paluuveden lämpötila oli 62 - 63 astetta. Nyt 70-asteisen hyötylämmön ja 46-asteisen paluuveden välillä on 24 asteen lämpötilaero. Myös hyötylämmön lämpötila on muuttunut, koska lämpöpumpun toimintaakin parannettiin projektin aikana. Se ei kuitenkaan liittynyt tähän työhön. Hyötylämmöllä voidaan nyt esilämmittää paluuvesi noin 56-asteiseksi. Paluulämpötilan trendi projektin ajalta näkyy kuviossa 23. Lisäksi kuvioon on laitettu toimenpiteiden kohdalle numeroidut nuolet ja taulukossa 1 on kerrottu mitä kunkin numeron kohdalla on tapahtunut ja millainen muutos on saatu aikaan.



Kuvio 23. Paluuveden lämpötilan trendi

Taulukko 1. Toimenpiteet ja niiden vaikutukset paluulämpötilaan

Toimenpiteen numero	Mitä tehtiin	Paluulämpötilan muutos
1	varaaja pois kierrosta, 3-tehdas pois kierrosta	63 °C → 61 °C
2	linjansäätöventtiilien pienennys, 3-tehdas takaisin kiertoon (höyryvaihtimen venttiilit kiinni)	61 °C → 58 °C
3	pumpun ohjauksen muutos, 2-tehtaan 3-tieventtiili toimintaan	58 °C → 52 °C
4	3-tehtaan kolmitieventtiili toimintaan	52 °C → 50 °C
5	2-tehtaan säätökäyrän alennus	50 °C → 48 °C
6	ilmanvaihtokoneet 2 kpl seis	48 °C → 52 °C
7	ilmanvaihtokoneet 2 kpl käyntiin, lämmönvaihtimien kuristus manuaalisesti, 3-tehtaan kolmitieventtiili 100% auki	52 °C → 46 °C

Kakkos- ja kolmostehtaan kiinteistöjen lämmittämiseen tarvittava kokonaisteho on noin 580 kW. Mittaus tehtiin -5 asteen ulkolämpötilassa. Se on melko lähellä Pohjois-Savon loka-huhtikuun keskilämpötilaa, joka on -4 astetta. (Tilastotietoa Maaningan sääasemalta, 2013). Tämän perusteella laskettiin karkea arvio kokonaisenergiankulutuksesta. Energiankulutus laskettuna viidelle lämmityskuukaudelle on

$$0,579 \text{ MW} * 3650 \text{ h} = 2114 \text{ MWh.}$$

Kun paluuvettä esilämmitetään 46:sta 56 asteeseen hyötylämmöllä, hyötylämmöllä katettu osuus kokonaisenergian tarpeesta talven aikana on 813 MWh, jolloin saadaan höyryn osuutta vähennettyä $2114 \text{ MWh} - 813 \text{ MWh} = 1301 \text{ MWh}$:iin. Höyryn hinta on salaista tietoa, mutta noin 800 megawattitunnin vuosittaisen höyrynkulutuksen korvaus hyötylämmöllä on merkittävä säästö.

Merkittävin muutos paluulämpötilaan, 6 astetta, saatiin aikaan 2-tehtaan pumpun ohjauksen muutoksella, koska se vaikutti monien venttiilien toimintaan. Muut muutokset saivat aikaan 1-2 asteen laskun paluulämpötilassa. Säätoventtiilien osuus oli yllättävän pieni, vain 2 astetta. Näin pieni muutos saattaa johtua siitä, että jo pumpun ohjausmuutos pienensi virtauksia lämmönvaihtimien ensiöpuolella jonkin verran. Toisaalta jo yhdenkin asteen muutos on vuositasolla säästönä merkittävä. Yhteensä paluulämpötila laski $62-46 = 16$ astetta.

7 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli saada höyryn käyttö vähenemään kiinteistöjen lämmityksessä. Tähän tulokseen oli tarkoitus päästä laskemalla lämpöverkoston paluuvien lämpötilaa, jolloin prosessilämmöstä lämpöpumpulla tuotettua hyötylämpöä voitaisiin käyttää paluuvien esilämmitykseen. Toisena tavoitteena oli piirtää putkisto-kaaviot kahdesta lämmönjakohuoneesta toimeksiantajan käyttöön. Tavoitteissa onnistuttiin, kuten tulokset-luvusta ja liitteinä olevista kaavioista nähdään.

Vaikka tavoitteet onnistuttiin saavuttamaan, projektin etenemisestä ei saatu kovin tarkkaa tietoa, koska pääosin tarkkailtiin ainoastaan yhtä lämpötilamittausta. Olisi ollut hyvä asentaa lämpötilamittaukset jokaiseen paluulinjaan, jotta olisi tarkasti nähtävistä haarasta kuuma paluuvesi tulee. Toimenpiteiden vaikutusta olisi myös tällä tavoin seurata tarkemmin. Kun tarkkailtiin ainoastaan kokonaispaluulämpötilaa, muutokset eivät olleet kovin suuria. Putkien pinnasta infrapunamittarilla mittaamalla ja paikallismittauksia lukemalla pysyttiin kuitenkin kartalla siitä, missä mennään. Projektin etenemistä olisi voitu seurata kuitenkin paremmin kiinteistä mittauksista. Lisäksi venttiiliasennukset etenivät niin hitaasti, että niitä ei saatu tähän raporttiin mukaan. Käsiventtiileillä kuristamalla tehdyillä simuloinnilla saatiin alustavaa tietoa säätoventtiilien vaikutuksesta. Lopussa tilanne ei ollut enää lämmityksen testaamisen kannalta kovin järkevä, koska kunnan pakkasia ei huhtikuussa ollut. Jos olisi tiedetty venttiiliasennusten hitaus, olisi niiden simulointi kannattanut ehdottomasti tehdä aikaisemmin, jotta olisi saatu pidempi pätkä dataa eri ulkolämpötiloilla. Toisaalta talvi oli todella lämmin, eikä kunnan pakkasia ollut juuri koko talvena.

Saavutettua tulosta voidaan pitää kohtalaisen luotettavana, vaikka ulkolämpötila ja siten lämmöntarve on vaihdellut melko paljon. Sen sijaan keskiarvon perusteella tehty energialaskelma on melko suurpiirteinen, koska kiinteitä virtausmittauksia eikä tämän vuoksi pitkän aikavälin dataa ollut. Paluulämpötilan trendiä tarkastelemalla nähdään, ettei ulkolämpötila ole merkittävästi vaikuttanut paluuveden lämpötilaan, vaikka menolämpötila vaihtelee ulkolämpötilan mukaan. Trendin loppuosassa kuitenkin näkyy, kuinka lämpötila muuttuu sykleissä. Päiväaikaan paluulämpötila on noussut ja yöllä laskenut. Luultavasti tämä johtuu siitä, että kuristetut lämmönvaihtimet jäädyttävät huomattavasti paremmin silloin, kun lämmöntarve on suurempi. Keväällä myös vuorokauden sisäiset lämpötilan vaihtelut ovat suuria. Tämän aiheuttama muutos paluulämpötilassa on kuitenkin suhteellisen pieni, noin asteen verran molempiin suuntiin. Myöskään prosessin tila ei vaikuttanut merkittävästi paluulämpötilaan, vaikka se vaikuttaa lämmönjakolaitteiden tehon tarpeeseen. Trendissä näkyvät kaksi isompaa pudotusta johtuivat putkivuodoista, joiden korjauksen aikana verkostossa ei ollut kiertoa.

Lämmitysjärjestelmien dokumentointi ei ollut ajan tasalla. Luultavasti kytkennöistä on ollut hiljaista tietoa henkilöillä, jotka eivät ole enää pitkiin aikoihin olleet töissä. Virhekytkentöjen perään oli mahdollista päästä vasta kaavion piirtämisen jälkeen, mikä on putkia seuraamalla melko hidasta puuhaa. Tällaiseen selvitykseen ei monesti kuitenkaan teollisuudessa ole aikaa, koska kiinteistöjen lämmityksen optimointi on tärkeysjärjestyksessä aika alhaalla, mikäli lämmitys toimii edes jollakin tavalla. Lämmön toimitusta on pyritty ilmeisesti varmistelemaan korkeilla lämpötiloilla, jolloin lämpöä varmasti riittää, mutta liian korkeat lämpötilat eivät ole erityisen energiatehokas tapa lämmittää. Ensinnäkin putkiston lämpöhäviöt ovat sitä suuremmat mitä korkeampi on menolämpötila, ja toisaalta kuumaa paluuvettä ei ole mahdollisuutta esilämmittää matalalämpöisellä hukkalämmöllä. Aiemmin ei paluulämpötilalla ole ollut myöskään niin suurta merkitystä, koska hyötylämpöjärjestelmä on otettu käyttöön vasta muutama vuosi sitten, eikä paluuvettä ole esilämmitetty ennen höyryvaihdinta.

Yksi keino saada lämpöverkoston paluulämpötilaa alemmas olisi se, että lämpöjohtoveden käyttö lämpimän käyttöveden lämmityksessä lopetettaisiin. Tämä vaatisi putkistomuutoksia ja nykyisen levylämmönvaihtimen tilalle höyryä kestävä vaihtoehto, esimerkiksi levyvaippalämmönvaihtimen, koska lämpimän käyttöveden lämmitys pitäisi muuttaa höyryllä toimivaksi. Tällöin lämpimän käyttöveden tarpeisiin ei enää tarvitsisi tehdä niin kuumaa lämpöverkoston vettä ja joka paikkaan saisi säädettyä juuri oikean lämpöisen veden. Tällä hetkellä liian kuuma menovesi menee 2-tehtaalla kolmelle ilmanvaihtokoneelle ja neljälle kierrätysilmalämmittimelle sekä laboratoriorakennukseen. Myös kolmostehtaalle joudutaan ajamaan liian kuumaa vettä, koska kolmitieventtiili ei alkanut toimia kunnolla. Jos venttiili vaihdetaan, voidaan paluulämpötilaa saada vielä alemmas.

Mikäli hyötylämmön käyttöä halutaan edelleen tehostaa, lämmönjakohuoneen putkistokytkentöihin voisi tehdä toisenkin muutoksen. Jos hyötylämpö käytettäisiin ensin lämpöverkoston veden esilämmitykseen ja vasta sitten lämpimän käyttöveden esilämmitykseen, voitaisiin palaavan hyötylämpöveden lämpötilaa saada alemmas nykyisestä 50 asteesta. Lämmön tarve kiinteistöjen lämmityksessä ja lämpimän käyttöveden valmistuksessa ei ole kuitenkaan yhtäaikaista, joten tällaisessa kytkennässä olisi syytä olla molemmille lämmönvaihtimille automaattiventtiileillä varustetut ohituslinjat.

Ilmastomuutoksen takia päästöjen vähennystarve nostaa päätään joka alalla. Tilanne on sikäli yritysten kannalta hyvä, että useimmiten päästöjen vähentämisestä koituu myös rahallista hyötyä, kuten tässä projektissa nähtiin. Toinen esimerkki päästöjä vähentävistä investoinneista on lämpö- ja voimalaitosten savukaasupesurit. Myös niistä saatava lämpöenergia on suhteellisen matalassa lämpötilassa, joten lämmön talteenotto prosessi on sitä tehokkaampi, mitä matalampilämpöiseen virtaukseen lämpöä siirretään.

Lähteet

- Abdullah, A. 2015. Heat exchanger recuperators. Diaesitys Slideshare-sivustolla. Viitattu 21.4.2020. <https://www.slideshare.net/AliAbdullah18/heat-exchanger-recuperators>.
- Brogan, R. 2011. Heat exchangers. Artikkele Thermopedia-sivustolla. Viitattu 20.2.2020. <http://www.thermopedia.com/content/832/>.
- Cengel, Y. 2003. Heat transfer: a practical approach. Second edition. McGraw Hill Companies Inc. Viitattu 20.2.2020. https://www.academia.edu/17008244/yunus_%C3%A7engel_heat_transfer.
- Cengel, Y. 2006. Heat and mass transfer: a practical approach. Third edition. McGraw Hill Companies Inc. Viitattu 20.2.2020. https://www.academia.edu/38856854/Heat_and_Mass_Transfer_A_Practical_Approach_3rd_Edition_by_Cengel20190418_8592_13b2vml.
- Coefficient of performance. N.d. Artikkele Industrial heat pumps -sivustolla. Viitattu 20.2.2020. http://industrialheatpumps.nl/en/how_it_works/cop_heat_pump/.
- Control valve flow characteristics. N.d. Artikkele Instrumentation toolbox -sivustolla. Viitattu 20.2.2020. <https://www.instrumentationtoolbox.com/2014/03/control-valve-flow-characteristics.html?m=1>.
- Control valve handbook fifth edition. 2019. Emerson Automation solutions. Viitattu 20.2.2020. <https://www.emerson.com/documents/automation/control-valve-handbook-en-3661206.pdf>.
- Globe valves information. N.d. Artikkele Globalspec-sivustolla. Viitattu 9.3.2020. https://www.globalspec.com/learnmore/flow_control_flow_transfer/valves/globe_valves.
- Hakala, P. & Kaappola, E. 2012. Kylmälaitoksen suunnittelu. 4. painos. Helsinki: Opetushallitus.
- Harju, P. 2010. Lämmitystekniikan oppikirja. 4. painos. Kouvola: Penan tieto-opus.
- Heinonen, J. & Sandberg, E. (toim.) 2014. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät, ilmastointitekniikka osa 1. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut.
- Hydraulic ball valve. N.d. Artikkele Valvehydraulic-sivustolla. Viitattu 2.3.2020. <http://www.valvehydraulic.info/valve-2/hydraulic-ball-valve.html>.
- Industrial heat pumps for steam and fuel savings. 2003. Opas USA:n energiainisteriön sivustolla. Viitattu 2.3.2020. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f15/heatpump.pdf>.

- King, M. 2018. Control valve sizing. Artikkelit Fluidflowinfo-sivustolla. Viitattu 20.2.2020. <https://fluidflowinfo.com/control-valve-sizing/>.
- Klahm, T. & Stephan, D. 2012. How Plate-and-Shell Heat Exchangers Work. Artikkelit Process worldwide -sivustolla. Viitattu 20.2.2020. <https://www.process-worldwide.com/how-plateandshell-heat-exchangers-work-a-367972/index2.html>, <https://www.process-worldwide.com/how-plateandshell-heat-exchangers-work-a-367972/>.
- Klein, S. & Nellis, G. 2012. Thermodynamics. Cambridge university press. Viitattu 2.3.2020. https://books.google.fi/books?id=FR2gVgjj3EEC&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbg_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false.
- Kylmäaine R410A keveisiin ilmastointilaitteisiin ja lämpöpumppuihin. N.d. Tuote-esite Darmentin sivuilla. Viitattu 2.3.2020. <https://darment.fi/kylmaaine/r410a/>.
- Lapinlahti. N.d. Valion sisäinen materiaali. Viitattu 2.3.2020. <https://valio1905.sharepoint.com/sites/intranet-fi/yhteisot/lapinlahti/Sivut/Esittely.aspx>.
- Lämmönsiirtimet. N.d. Fläkt Woods Oy:n tuote-esite. Viitattu 2.3.2020. <http://resources.flaktwoods.com/Perfion/File.aspx?id=9cc00cc1-7e4d-45e9-b4bd-c089429151a0>.
- Mattila V. 2012. Energiatehokas teollisuuskiinteistö. Opas Motivan sivuilla. Viitattu 2.3.2020. https://www.motiva.fi/files/5847/Energiatehokas_teollisuuskiinteisto.pdf.
- Mechanical heat pump. N.d. Artikkelit Industrial heat pumps-sivustolla. Viitattu 20.2.2020. http://industrialheatpumps.nl/en/how_it_works/mechanical_heat_pump/.
- Meijeri ja ruokatalo. N.d. Valion yritys-esittely. Viitattu 2.3.2020. <https://www.valio.fi/yritys/>.
- Monsen, J. 2012. Size matters: control valve sizing 101. Artikkelit Valvemagazine-sivustolla. Viitattu 20.2.2020. <http://www.valvemagazine.com/index.php/web-only/categories/education-training/4571-size-matters-control-valve-sizing-101>.
- Osuustoiminnallinen perusta. N.d. Valion yritys-esittely. Viitattu 2.3.2020. <https://www.valio.fi/vastuullisuus/osuustoiminta/>.
- Pneumaattiset sylinteritoimilaitteet. 2017. Sarja B1C Asennus-, käyttö- ja huolto-ohjeet. Käyttöohje. Metso Flow Control Oy. Viitattu 20.2.2020. <https://docplayer.fi/67781230-Pneumaattiset-sylinteritoimilaitteet-sarja-b1c-asennus-kaytto-ja-huolto-ohjeet.html>.
- Pulli, M. 2009. Virtaustekniikka, vedensiirtojärjestelmien toiminnallinen suunnittelu nykyaikaisin menetelmin. Tampere: Tammertekniikka.

Reddy, B. N.d.a. Basics of ball valves. Artikkele Instrumentation tools -sivustolla. Viitattu 20.2.2020. <https://instrumentationtools.com/basics-ball-valves/>.

Reddy, B. N.d.b. Basics of butterfly valves. Artikkele Instrumentation tools -sivustolla. Viitattu 20.2.2020. <https://instrumentationtools.com/basics-of-butterfly-valves/>.

Reddy, B. N.d.c. Butterfly Valves Construction, Types, Stem & Bonnet Assembly. Artikkele Instrumentation tools -sivustolla. Viitattu 14.4.2020. <https://instrumentationtools.com/butterfly-valves-construction-types-stem-bonnet-assembly/>.

Reddy, B. N.d.d. How globe valves work. Artikkele Instrumentation tools -sivustolla. Viitattu 20.2.2020. <https://instrumentationtools.com/globe-valves/>.

Reddy, B. N.d.e. Types of butterfly valves. Artikkele Instrumentation tools -sivustolla. Viitattu 20.2.2020. <https://instrumentationtools.com/types-of-butterfly-valves/>.

Reddy, B. N.d.f. What is a electric motor actuator. Artikkele Instrumentation tools -sivustolla. Viitattu 2.3.2020. <https://instrumentationtools.com/electric-motor-actuator/>.

Refrigerants. N.d. Artikkele Industrial heat pumps -sivustolla. Viitattu 20.2.2020. http://industrialheatpumps.nl/en/how_it_works/refrigerants/.

R407C kylmäaine kevyen ilmastoinnin järjestelmiin. N.d. Tuote-esite Darmentin sivuilla. Viitattu 2.3.2020. <https://darment.fi/kylmaaine/r407c/>.

Single seated globe control valve. N.d. Tuote-esite Valve-cn -sivustolla. Viitattu 2.3.2020. https://www.valve-cn.com/single_seated_globe_control_valve/VT_controlvalve_DN32.html.

Sizing of high-pressure valves with the coefficient of flow kv. N.d. Ohje Syn Corporationin sivustolla. Viitattu 2.3.2020. <http://www.syn-c.com/pdf/si/710DIME.pdf>.

SONDEX-levy- ja vaippalämmönsiirtimet. N.d. Tuote-esite Danfossin sivustolla. Viitattu 20.2.2020. <https://www.danfoss.com/fi-fi/products/heat-exchangers/dhs/welded-heat-exchangers/sondex-plate-and-shell-heat-exchangers-sps/#tab-overview>.

Thermodynamic cycle. N.d. Artikkele Industrial heat pumps -sivustolla. Viitattu 20.2.2020. http://industrialheatpumps.nl/en/how_it_works/thermodynamic_cycle/.

Tilastotietoa Maaningan sääasemalta. 2013. Taulukko ilmasto-opaan sivuilla. Viitattu 10.3.2020. <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/suomen-muuttuva-ilmasto/-/artikkeli/fbe6fae3-11fc-4652-8771-696e85adb466/pohjois-savo-jarvilaak-sot-vaikuttavat-ilmastoon.html>.

Tuotantolaitokset. N.d. Valion sisäinen materiaali. Viitattu 2.3.2020. <https://valio1905.sharepoint.com/sites/intranet-fi/valio-yrityksena/organisaatio-paikkakunnat/tuotantolaitokset>.

Two way control valve PN16, flanged connections DN15-150, V5328A. N.d. Tuotesite Honeywellin sivustolla. Viitattu 20.2.2020. https://products.ecc.emea.honeywell.com/europe/ecatdata/pg_gr-v5328v5049.html.

Valio yrityksenä. N.d. Valion yritysesittely. Viitattu 2.3.2020. <https://www.valio.fi/yritys/yritystieto/>.

Valve types. N.d. Artikkele GlobalSpec-sivustolla. Viitattu 20.2.2020. https://www.global-spec.com/pfdetail/valves/types_.

Vuolle, M. 2005. Laskelmat rakennusten energiataloudessa ja sisäilmaston hallinnassa. Artikkele Rakennustiedon sivustolla. Viitattu 2.3.2020. <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK050305.pdf>.

Özişik, M. 2018. Heat transfer. Scientific international. Viitattu 20.2.2020. https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpHT00002G/viewer-Type:toc//root_slug:heat-transfer/url_slug:heat-transfer?q=%26quot%3Bheat%20transfer%26quot%3B&sort_on=default&b-group-by=true&b-sort-on=default&b-content-type=all_references&include_synonyms=no.

Liite 2. 3-tehtaan lämmönjakuhuoneen kaavio

