



Hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämmityksessä

Jari-Petteri Ahola

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2022

Talotekniikan tutkinto-ohjelma
LVI-talotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Talotekniikan tutkinto-ohjelma
LVI-talotekniikka

AHOLA, JARI-PETTERI:
Hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämmityksessä

Opinnäytetyö 54 sivua, joista liitteitä 7 sivua
Toukokuu 2022

Tämä opinnäytetyö tehtiin Elecster Oyj:lle Reijjärven tehtaalle. Tehtaalla oleva VOC-polttolaitos polttaa painokoneen liuotinhöyryjä ja polttolaitosta käytetään lämmöntuotannossa. Polttolaitoksen lämpöä hyödynnetään painokoneen kuivausilman lämmittämiseen, mutta tehonkulutus on lämmöntuottoa pienempi. Hyödynnettävä teho polttolaitoksesta on käytön aikana 20–60 kW.

Tavoitteena on hyödyntää VOC-polttolaitoksen tuottama ylimääräinen hukkalämpö hyötykäyttöön. Opinnäytetyössä vertaillaan, kannattaako hukkalämpöä hyödyntää kiinteistön patteriverkon lämmittämiseen lämmityskustannuksia säästämällä vai kannattaako energiaa myydä kaukolämpöyhtiölle ympärivuotisesti. Työssä vertaillaan myös, olisiko kannattavaa myydä lämpöä kaukolämpöyhtiölle vain kesällä, jolloin lämmityskauden aikana lämpöä hyödynnetään radiaattoreiden lämmittämiseen.

Tutkimuksessa selvitettiin polttolaitoksen tehokemia, investointikustannuksia sekä sähkön ja lämmön hintoja. Lämmitysverkon laajennus, eli hukkalämpöverkko, suunnitellaan patteriverkon lämmittämistä varten, jolloin saadaan hyvä kuvaus investoinnin kustannuksista. Investoinnissa kustannuksia aiheuttavat sekä materiaalikustannukset että työn kustannukset. Materiaalikustannukset ovat suoria kuluttajahintoja ja työn kustannukset on laskettu työehtosopimuksen normituntien avulla. Pitkät putkivedot lisäävät investointikustannuksia. Lämmönjakohuoneeseen täytyy rakentaa uusi kaukolämpöliittymä, jotta lämmön myynti kaukolämpöyhtiölle onnistuu.

Tuloksista selviää, että tässä tapauksessa hukkalämpöä kannattaa hyödyntää kiinteistön patteriverkon lämmittämiseen. Kaukolämpöliittymän rakentaminen ei kuitenkaan ole kannattavaa, koska tehontuotto on liian pieni. Investoinnin voidaan ajatella olevan toteuttamismielessä kannattavaa, mikäli takaisinmaksuaika on alle 10 vuotta.

Asiasanat: voc-polttolaitos, hukkalämpö, hukkalämpöverkko

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Building Service Engineering
HVAC Systems

AHOLA, JARI-PETTERI:
Utilization of Waste Heat in District Heating

Bachelor's thesis 54 pages, appendices 7 pages
May 2022

This thesis was made for Elecster Oyj Reisjärvi factory. The VOC incinerator of the factory burns solvent vapors from a printing press and the incinerator is used for heat production. The heat of the incinerator is already used to heat the drying air for the printing press, but the heat consumption is lower than the yield. The power to be utilized from the incinerator during operation is between 20–60 kW.

The purpose of this thesis was to find out how to utilize the extra waste heat from the VOC incineration plant for recovery. The thesis compares, whether it is worth utilizing the waste heat to heat the radiator network of the property and save on heating costs, or should the surplus energy be sold to a district heating company in all year around. The thesis also compares, whether it is profitable selling heat to a district heating company only in summertime, at which time the heat is used to heat radiators during the heating season.

This study was carried out by clarifying incinerator's power readings, investment costs and energy prices for electricity and district heat. Expansion of the heating network is planned to heat the radiator network, whereupon giving a good description of the investment costs. The costs are caused by material costs and labor costs. Material costs are direct consumer prices and labor costs are calculated according to the standard hours of the collective agreement. Long pipelines are causing more expenses. A new district heating connection must be built in the heat distribution room to sell heat for the district heating company.

As a result, it was found out that waste heat should be used to heat the radiator network of the property in this case. However, it is not profitable to build a district heating connection because the power output is too low. The investment is profitable if the payback time is under 10 years.

Key words: voc incineration plant, waste heat

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	ELECSTER OYJ	7
	2.1 Konserni lyhyesti	7
	2.2 Reisjärven tehdas	7
3	TEHTAAN LAITTEISTOT	8
	3.1 VOC-polttolaitos	8
	3.1.1 Polttolaitoksen rakenne	8
	3.1.2 Polttolaitoksen käyttilat	10
	3.2 Painokone	11
4	TIETOPERUSTA	13
	4.1 Painehäviön laskenta	13
	4.1.1 Virtausnopeus	13
	4.1.2 Kitkakerroin	13
	4.1.3 Vastuskertoimet	16
	4.1.4 Painehäviö	17
	4.2 Lämpöteho	18
5	LÄMMITYSJÄRJESTELMÄN KOMPONENTIT	19
	5.1 Lämmönsiirtimet	19
	5.2 Pumppu	19
	5.2.1 Pumppausenergian laskeminen	20
	5.2.2 Kavitaatio	23
	5.2.3 Juoksupyörän halkaisijan muuttaminen	24
	5.2.4 Pumpun valintaan vaikuttavat tekijät	25
	5.3 Paisuntajärjestelmä	26
	5.4 Muuta huomioitavaa paisuntajärjestelmästä	29
	5.5 Säätoventtiili	29
	5.6 Muuta huomioitavaa säätoventtiileistä	32
	5.7 Tasaussäiliö	32
	5.8 Sekalaisia komponentteja	32
6	PUTKIMATERIAALIT JA PUTKISTOJEN PUHTAUS	34
	6.1 Ilma	34
	6.2 Putkien korroosio	34
	6.3 Vaihtoehtoiset putkimateriaalit	35
7	INVESTOINTI	37
	7.1 Lähtötiedot	37

7.2	Tehontuotanto ja tehonmitoitus	38
7.3	Työtuntien arviointi	40
7.4	Materiaalikustannukset	41
8	TULOKSET	42
8.1	Patteriverkon lämmitys	42
8.2	Kaukolämmön ensiöpuolen paluuv veden lämmitys kesällä	42
8.3	Ympäri vuotinen lämmön myynti kaukolämpö yhtiölle	43
9	JOHTOPÄÄTÖKSET	44
	LÄHTEET	45
	LIITTEET	48
	Liite 1. Työtunnit hukkalämpöverkon rakentamisesta.	48
	Liite 2. Hukkalämpöverkon kustannuslaskelma.	49
	Liite 3. Takaisinmaksuaika patteriverkon lämmittämiselle.....	50
	Liite 4. Työtunnit kaukolämpöliittymän rakentamisesta.	51
	Liite 5. Kaukolämpöliittymän kustannuslaskelma.....	52
	Liite 6. Takaisinmaksuaika kesäaikaiselle lämmönmyynnille.	53
	Liite 7. Takaisinmaksuaika ympärivuotiselle lämmönmyynnille.....	54

1 JOHDANTO

Työssä on tavoitteena hyödyntää VOC-polttolaitokselta syntyvä lämpö mahdollisimman kustannustehokkaasti hyötykäyttöön. Polttolaitokselta syntyvää lämpöä hyödynnetään jo flexopainokoneen kuivatusilman lämmittämiseen nestekiertoisella lämmityspatterilla, mutta sen tehonkulutus on korkeintaan vajaa 10 kW. Nykyisessä teollisuusprosessissa polttolaitokselta voidaan hyödyntää korkeintaan 60 kW lämmitysteho. Työ tehdään Elecster Oyj:n Reisjärven tehtaalle.

Opinnäytetyössä suunnitellaan lämmitysverkoston laajennus, eli hukkalämpöverkko siten, että polttolaitokselta tuleva lämpö hyödynnetään kiinteistön kaukolämmityksessä ja mahdollisesti kesällä myös kaukolämmön ensiöverkon paluuveden lämmittämässä. Suunnittelu sisältää putkikuvat ja laskennat. Pitkät putkivedot kuitenkin aiheuttavat paljon putkimateriaalikustannuksia. Jotta lämmön myynti kaukolämpöyhtiölle onnistuisi, on lämmönjakohuoneeseen rakennettava uusi kaukolämpöliittymä. Tässä opinnäytetyössä tuodaan esille muitakin putkimateriaaleja, kuin kuumasinkityt teräspuutket, joita alkuperäisessä ja suunnitteilla olevissa putkiverkoissa käytetään.

Tavoitteena on toteuttaa hukkalämpöverkon rakentaminen mahdollisimman kustannustehokkaasti ja laskea investoinnille takaisinmaksuaika. Investointiprojektin toteuttaminen katsotaan kannattavaksi, mikäli takaisinmaksuaika on alle 10 vuotta. Tuotantovolyymi ja painoväriin kulutus erilaisiin painatusprosesseihin vaikuttaa takaisinmaksu-aikaan. Hukkalämpöpiirin ja kaukolämpöliittymän rakentamisessa vertaillaan takaisinmaksuaikoja lämmittämällä pelkästään tehtaan vesiradiaattoreita lämmityskaudella, myymällä hukkalämpöä kaukolämpöyhtiölle vain kesällä tai myymällä hukkalämpöä kaukolämpöyhtiölle ympärivuotisesti.

2 ELECSTER OYJ

2.1 Konserni lyhyesti

Elecster Oy on Helsingin pörssissä noteerattu julkinen osakeyhtiö, jonka kotipaikka on Akaa. Konsernilla on valmistamistoimintaa Suomen lisäksi Virossa, Keniassa ja Venäjällä. Elecster-konserni suunnittelee ja valmistaa pääasiassa Ultra High Temperature (UHT), eli iskukuumennetun maidon prosessointilaitteita, pakkauslinjoja sekä maidon pakkaukseen liittyviä pakkausmateriaaleja. Konsernin liiketoiminta jakautuu kolmeen segmenttiin, jotka ovat teollisuustuotteet, kuluttajatuotteet ja muut tuotteet. Teollisuustuoteasiakkaisiin kuuluvat pääasiassa meijerit ja kuluttajatuoteasiakkaita ovat rauta- ja sisustusalan tukkuliikkeet. Muiden tuotteiden segmenttiin kuuluvat alihankintapalvelut. (Elecster vuosikertomus 2020 n.d: 9.)

Konsernin liikevaihto vuonna 2020 oli 39,401 milj. euroa, ja liikevoitto 3,92 milj. euroa. Kansainvälisen liiketoiminnan osuus liikevaihdosta oli 89,9 %. Henkilöstön määrä oli vuoden 2020 tilikaudella keskimäärin 292, josta ulkomailla 162. Asiakassegmenteittäin henkilöstön määrä jakautui teollisuustuotteisiin 208, kuluttajatuotteisiin 28 ja muihin tuotteisiin 56. (Elecster vuosikertomus 2020 n.d: 9, 10.)

2.2 Reisjärven tehdas

Reisjärven tehdas on perustettu v. 1974. Tehtaan toimintaan kuuluvat konepajateollisuus, joka käsittää meijereiden prosessointi- ja pakkauslaitteiden kokoonpanon. Konepajateollisuuteen kuuluvat myös hitsauslaitteet, sorvikoneet porakoneet, jne. Maitopussien valmistus käsittää kalvokoneita, joissa valmistetaan sekä 3-kerros-, että 5-kerroskalvoa, kalvon väripainoa flexopainokoneella, leikkausta, eli slitteriä ja regranulointia, jossa tarpeeton kalvo kierrätetään takaisin kalvokoneille. Tehtaalla on myös ruohomaton valmistusta.

3 TEHTAAN LAITTEISTOT

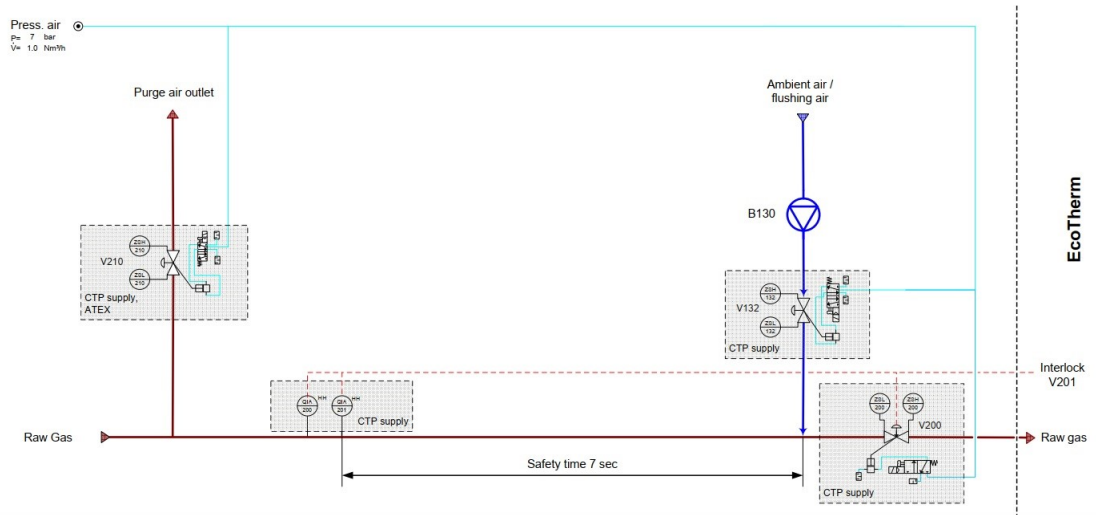
3.1 VOC-polttolaitos

VOC-lyhenne tulee sanoista volatile organic compound, jolla tarkoitetaan haihtuvia orgaanisia yhdisteitä. Tehtaalla sijaitsee CTP:n valmistama polttolaitos, jolla poltetaan fleksopainokoneelta tulevia liuotinhöyryjä. Polttolaitos on tarpeellinen, koska painokoneelta tulevien VOC-poistokaasujen päästöraja-arvo on 100 milligrammaa orgaanista kokonaishiiltä kuutiometriä kohti [$\text{mg C} / \text{m}^3$], kun liuottimia kulutetaan yli 15 tonnia vuodessa. Mittausten aikana kaikkien lukemien keskiarvo ei saa ylittää $100 \text{ mg C} / \text{m}^3$ eikä yhdenkään mittauksen tuntikeskiarvo saa ylittää kyseistä päästöraja-arvoa 1,5-kertaisesti. Päästöraja-arvo hajapäästöille on 25 % käytetyistä liuottimista uusille laitoksille. Hajapäästöjä syntyy liuottimien säilytyksestä, jolloin haihtuvat liuotinhöyryt tuulettuvat rakenteiden kautta ulos. Hajapäästöjen vähentämistä varten tehdään liuottimien hallintasuunnitelma. (Valtioneuvoston asetus eräiden orgaanisia liuottimia käyttävien toimintojen ja laitosten ilmaan johdettavien päästöjen rajoittamisesta n.d.)

3.1.1 Polttolaitoksen rakenne

Kuviossa 1 painokoneelta tulevat liuotinhöyryt, eli "raw gas" ajetaan kanavaa pitkin polttolaitosta kohti. Raakakaasu sekoitetaan ilmaan, eli "ambient air" ennen polttolaitokselle ajoa. Mikäli liuotinhöyryjen orgaanisten hiilivetyjen pitoisuus nousee liian korkealle, reagoivat LEL-anturit QIA 200 ja QIA 201, jolloin polttolaitokselle johtava venttiili V200 sulkeutuu. Tällöin huuhteluilma, eli "flushing air" puhalletaan kohti puhdistusilmakanavaa, eli "purge air outlet", joka on myös ATEX-tila, jolloin venttiili V210 aukeaa. Huuhtelujärjestelmä on tarpeen, koska orgaanisten hiilivetyjen pitoisuus ei saa nousta 25 %:iin polttolaitokselle ajettaessa räjähdysvaaran takia. Puhdistettu väkevä kaasu ajetaan ulos kyseisessä hätätilanteessa, jolloin pitoisuuden laskiessa raja-arvon alle kanava puhdistetaan vielä seuraavat 7 sekuntia. Kyseinen hälytystilanne on kuitenkin erittäin harvinainen ja hälytyksen sattuessa kyse on yleensä kuluneista antureista. Paineilmaa, eli

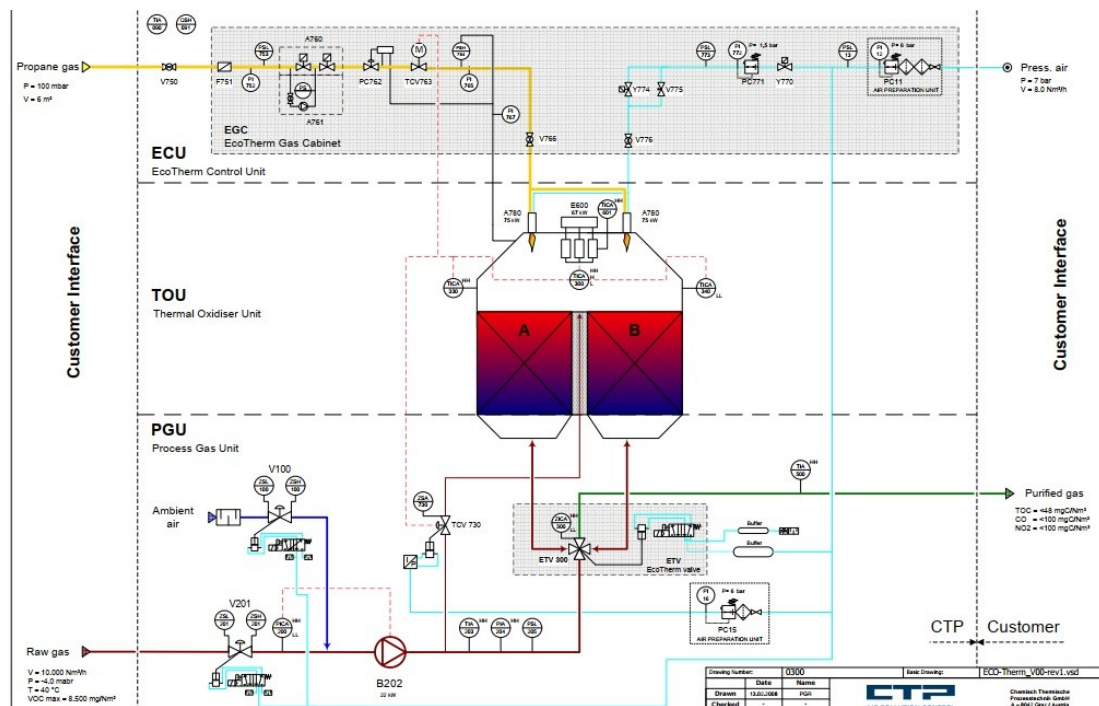
”press air” tarvitaan venttiilien toimintaa varten. (Operation manual 2008 n.d: Part 1 & Rupponen, M.)



KUVIO 1. Huuhtelun toimintaperiaate. (Flow sheet LPP 2008 n.d.)

Kuviossa 2 painokoneelta tulevat liuotinhöyryt sekoitetaan sopivaan suhteeseen ilmaa prosessikaasuyksikössä (PGU), jonka jälkeen liuotinhöyryt johdetaan lämmönvarauskennoihin A ja B vuorotellen ja sitä kautta polttokammioon. Itse polttimet toimivat propaanilla ja paineilmalla, jolloin liekkiä saadaan hyvin säädettyä. TCV-730 ohituksen tarkoituksena on jäädyttää polttokammiota painokoneen liuotinhöyryillä, kun lämpökennot ovat kuumia. Lämpökennoissa lämmön varaaminen tapahtuu kennojen solissa polttamisen jälkeen. Kennoblokit on sijoitettu päällekkäin useampaan kerrokseen väleillä muodostaen lämpökennon. Painokoneen poistokaasut saapuvat lämpökennoon sisääntulokartioiden kautta ja virtaavat polttokammioon, jossa on laipalla liitetyt kaasujen injektiosuuttimet. Lämpökennot ovat tarpeen, koska reaktoriastia ei saa ylikuumeta ja lämpökennot toimivat myös liuotinhöyryjen esilämmittiminä. Polttokammiossa lämpötila on n. 850 °C, eikä polttokammion lämpötila saa nousta 920 °C. Polttokammiossa hiilivedyt palavat ja palamistuotteiksi muodostuvat pääasiassa vesi ja hiilidioksidi. Palanut, eli puhdistettu kaasu johdetaan toiseen lämpökennoon, josta puhdaskaasu kulkee nelitieventtiilin kautta ulos. Painokoneelta johdettu kaasu ajetaan lämpökennoon A, poltetaan ja ajetaan lämpökennoon B:n kautta ulos korkeintaan 2 minuutin ajan. Kun kenno B kuumenee tarpeeksi, johdetaan painokoneen liuotinhöyryt kennoon

B, poltetaan ja puhdaskaasu ajetaan kennoon A, jolloin taas lämpökenno A kuumenee ja sama sykli jatkuu. Ulos johdettu kaasu ajetaan vielä joko lämmöntalteenottopellin kautta savupiippuun tai lämmöntalteenoton ohituspellin kautta savupiippuun, mikäli lämmöntalteenoton lämmönsiirtoneste kuumenee liikaa. Ulospuhalletun kaasun lämpötila on lopulta n. 70–110 °C. (Operation manual 2008 n.d: Part 1 & Rupponen, M.)



KUVIO 2. Polttolaitoksen toimintaperiaate. (Flow sheet 2008 n.d.)

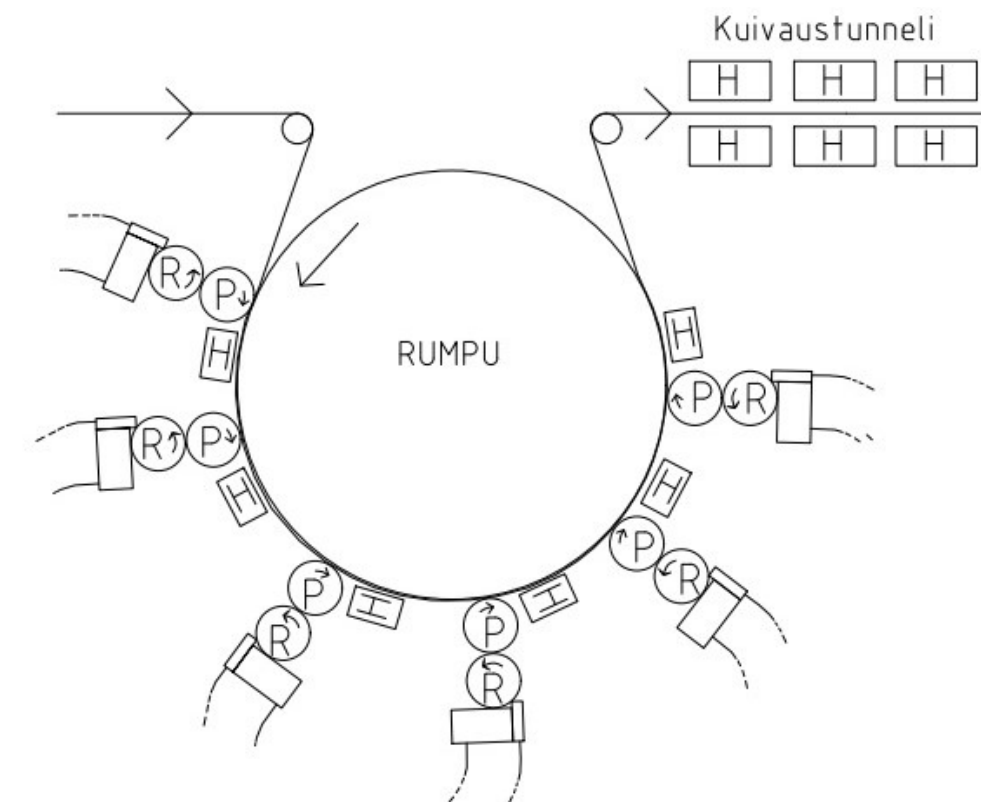
3.1.2 Polttolaitoksen käyntitilat

Kylmää laitosta ei saa prosessoida suoraan, vaan kammiot ja lämpökennot on ensin esilämmitettävä. Ennen esilämmitystä polttokammio on aina huuhdeltava raittiilla ilmalla turvallisuussyistä ja huuhtelu kestää n. 6 min. Esilämmitys voidaan tehdä lämmittämällä polttokammiota sähkövastuksilla, jolloin kammion läpi ei tarvita virtausta. Tämä on kuitenkin osoittautunut kalliiksi, joten esilämmitys suoritetaan propaanipolttimilla. Kaasuruiskutusikäynnistystä ei kuitenkaan saa tehdä, mikäli kaasuboksin lämpötila on alle -15 °C, joten polttimen höyrystimessä on sähkövastukset. Esilämmitys kestää korkeintaan 6,5 h, jonka jälkeen laitos on

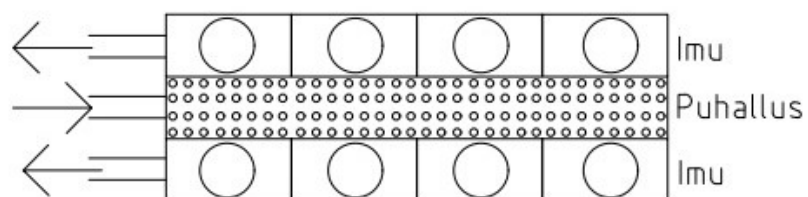
käyttövalmis. STANDBY-tilassa kaasulämmitys on päällä, jolloin järjestelmän kaasuvirtaus on n. 20 % nimellisestä arvosta, eli 2 380 Nm³/h. STANDBY-tilan tarkoituksena on ylläpitää kammion lämpötilaa ennen operointia, jolloin vain propanikaasu palaa. Operointitilassa painokoneen liuotinhöyryt johdetaan polttiin, jolloin kaasuvirta on yleensä 4 000–10 000 Nm³/h. Siirtyminen STANDBY-tilasta operoinnille kestää 3 min, kun taas esilämmitetyn laitoksen siirtyminen operoinnille kestää 20 min. SEIS-tilassa kaikki sähköiset ja mekaaniset laitteet sammuvat ja venttiilit menevät turva-asentoon. Mahdollisia huoltotilanteita varten laitosta voidaan jäähdyttää, jolloin propanikaasulinjasta johdetaan ulkoilmaa polttokammioon, jolloin jäähdytys kestää 20 h. Hälytystiloja on monenlaisia, jolloin laitos menee joko STANDBY-tilaan (esim. LEL-hälytys) tai tarvittaessa pysähtyy. (Operation manual 2008 n.d: Part 1, Operation manual 2008 n.d: Part 2 & Rupponen, M.)

3.2 Painokone

Tehtaalla on käytössä Miraflex AM8-flexopainokone. Painokoneella tehdään väripainoa muovikalvon pinnalle. Painatusprosessissa painoväri saapuu värisäiliöstä letkuja pitkin pieneen astiaan, josta rasteritela pyörii, ottaa värin ja siirtää värin painotelalle. Painotela pyörähtää rasteritelasta kalvon pinnalle, jolloin väri saadaan kalvolle. Väripainettu kalvo kuivataan puhaltamalla 50–65 °C:sta ilmaa kalvon pinnalle, jolloin väri saadaan kuivumaan. Värin voimakkaat liuotinhöyryt imetään kuivaushuuvien avulla poltettavaksi VOC-laitokselle. Tulo- ja poistoilmaa tarvitaan heti painotelan jälkeen isossa rummussa, jota vasten painotela pyörii. Rummun jälkeen painoväri kuivataan vielä erillisessä kuivaustunnelissa, johon tarvitaan myös sekä tulo- että poistoilmaa. Painokoneen painatusprosessi on kuvattu kuviossa 3. Kuviossa 3 R tarkoittaa rasteritelaa, P painotelaa ja H huuva. (Rupponen, M.)



HUUVAN RAKENNE:



Imut ja puhallukset oltava yhtä voimakkaita kaikissa 4:ssä huuvassa

KUVIO 3. Painatusprosessin kuvaus. (Rupponen, M.)

4 TIETOPERUSTA

4.1 Painehäviön laskenta

4.1.1 Virtausnopeus

Virtausnopeus ilmaistaan yksikössä m/s. Putkessa virtaavan fluidin virtausnopeus [v] voidaan laskea seuraavasti:

$$v = \frac{4 \cdot q_v}{\pi \cdot d^2} \quad (1)$$

jossa q_v on tilavuusvirta (m^3/s) ja d putken sisähalkaisija metreinä. (Virtausnopeuslaskuri 2022 n.d.)

4.1.2 Kitkakerroin

Aluksi on tiedettävä fluidin kinemaattinen viskositeetti [ν]. Kinemaattinen viskositeetti ilmaistaan yksikössä (m^2/s), joka lasketaan seuraavasti:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

jossa μ on fluidin dynaaminen viskositeetti ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) ja ρ on fluidin tiheys (kg/m^3). Veden dynaaminen viskositeetti on $1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Veden tiheys hieman vaihtelee lämpötilan mukaan, mutta lämmitysverkostoja mitoittaessa voidaan tässä työssä käyttää veden tiheytenä $980 \text{ kg}/\text{m}^3$. Silloin veden kinemaattinen viskositeetti on $1,02245 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. (Mekaniikka 2022 n.d., Korpela, J 2021 & Viskositeetti 2020 n.d.)

Kun kyseessä on 40-prosenttista vesi-etyleeniglykolia, niin sen dynaaminen viskositeetti on $3,15 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ja tiheys $1\,050 \text{ kg}/\text{m}^3$. Silloin kinemaattinen viskositeetti vesiglykolille on $3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. (Technical data sheet n.d: DOWCAL™100, DOWCAL™100E.)

Kitkakertoimen $[\lambda]$ selvittämiseksi on seuraavaksi laskettava Reynoldsin luku $[Re]$, joka lasketaan seuraavasti:

$$Re = \frac{d \cdot v}{\nu} \quad (3)$$

jossa ν on fluidin kinemaattinen viskositeetti (m^2/s). Virtaus on laminaarista, kun $Re < 2\,320$ ja turbulenttista, kun $Re > 3\,000$. Laminaarisen virtauksen kitkakerroin saadaan laskettua yhtälöstä 4.

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (4)$$

Muissa virtaustyypeissä tarvitaan putken karheuskerrointa $[k]$. Karheuskerroin kuvaa putken sisäpinnan karheutta, joka aiheuttaa kitkaa virtaukseen. (Putkivirtaus 2009 n.d. & Seppänen, O 2001: 138.)

TAULUKKO 1. Karheuskertoimia eri putkimateriaaleille k (mm). (Chaurette, J 2003 & Seppänen, O 2001: 139.)

Vedetty messinki tms putki (myös kupariputki)	0,0015
PVC- ja PE-putket	0,007
Teräsputki	0,045
Sinkitty teräsputki	0,15
Ruostunut teräsputki	0,15...1,0
Hyvin ruostunut teräsputki	1,0...3,0
Valurautaputki	0,4...0,6
Bitumoitu valurautaputki	0,125
Joustava putki	0,6...0,8

Turbulenttisessa virtauksessa kitkakertoimen määrittäminen on työläämpää, koska se riippuu Reynoldsin luvusta ja putken karheudesta. Hydraulisesti sileille johdoille kitkakerroin voidaan laskea Blasiuksen yhtälöllä 5, kun Reynoldsin luku on $2\,320 < Re < 10^5$

$$\lambda = 0,3164 \cdot Re^{-0,25} \quad (5)$$

Nikuradsen yhtälöllä 6, kun $10^5 < Re < 10^6$

$$\lambda = 0,032 + 0,221 \cdot Re^{-0,237} \quad (6)$$

Prandtl-Karmanin yhtälöllä 7, kun $Re > 10^6$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \lg (Re \cdot \sqrt{\lambda}) - 0,8 \quad (7)$$

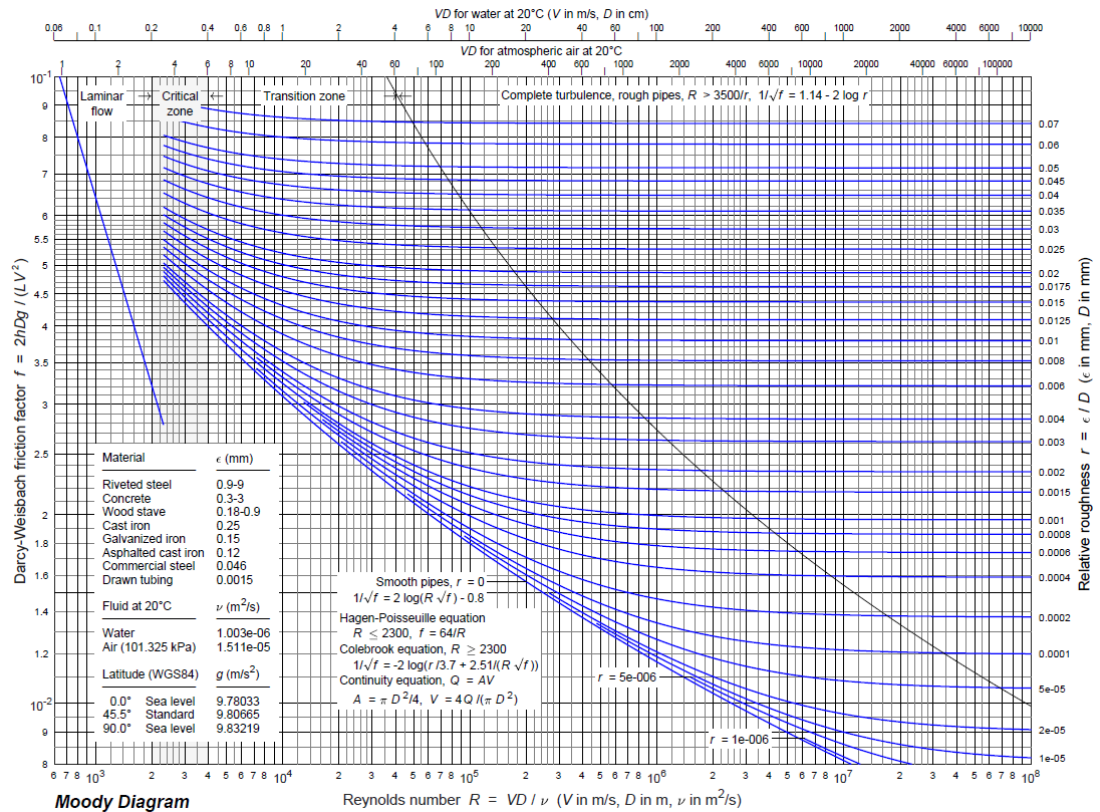
Hydraulisesti karheat putket yhtälöllä 8, kun $Re - k/d > 1\,300$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \lg \frac{d}{k} + 1,14 \quad (8)$$

Moodyn yhtälöllä 9.

$$\lambda = 0,0055 + 0,15 \cdot \left(\frac{k}{d}\right)^{1/3} \quad (9)$$

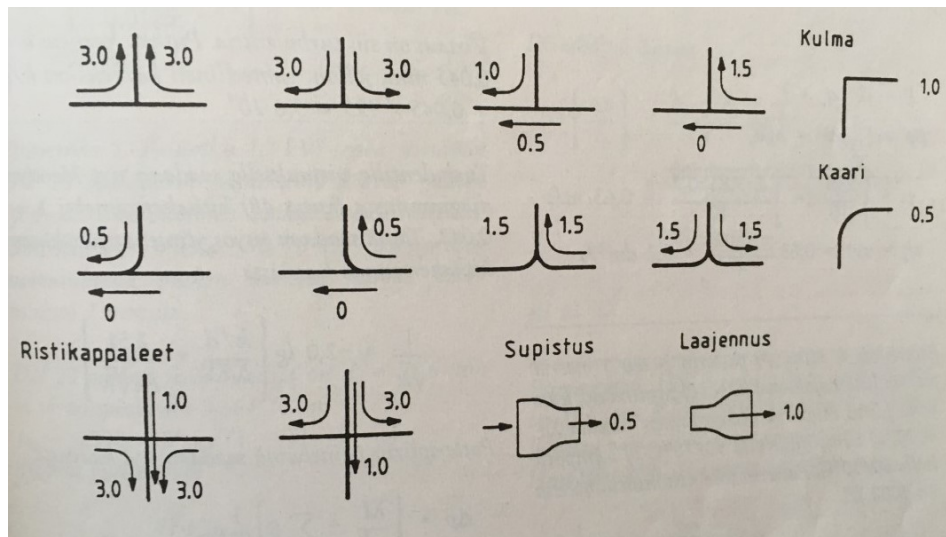
Kitkakertoimen laskeminen on työlästä, joten työelämässä kannattaa käyttää mahdollisimman paljon taulukoita. Moodyn diagrammista saadaan kitkakerroin, kun tiedetään Reynoldsin luku ja putken suhteellinen karheus. Diagrammista katsotaan kohta, jossa laskettu Reynoldsin luku kohtaa putken suhteellisen karheuden kuvaajan. Tästä leikkauspisteestä vedetään suora viiva vasemmalle, jolloin selviää kitkakerroin (kuvio 4). Kitkakertoimen laskeminen onnistuu myös Moody Chart Calculator -ohjelmalla. (Maley, M & Putkivirtaus 2009 n.d.)



KUVIO 4. Moodyn diagrammi kitkakertoimen määrittämiseen. (Davis, T 2022.)

4.1.3 Vastuskertoimet

Putkien eri osat aiheuttavat virtauksessa pyörteilyä, joka kuluttaa energiaa. Vastuskerroin on suuri suurella virtausnopeudella, jossa virtauksen suunta muuttuu radikaalisti. Vastuskertoimeen vaikuttaa näin ollen putkenosan (esim. käyrän) lisäksi myös virtausnopeus. Putkien vastuskerroin ilmaistaan symbolilla ζ . Vastuskerrointa kutsutaan myös painehäviökertoimeksi. Tavallisimpien putkenosien vastuskertoimet on esitetty kuviossa 5. (Seppänen, O 2001: 139, 141.)



KUVIO 5. Tavallisimpien putkenosien vastuskertoimia. (Seppänen, O 2001: 141.)

4.1.4 Painehäviö

Kitkakertoimesta aiheutuvat painehäviöt, eli kitkahäviöt $[\Delta p_\lambda]$ lasketaan yhtälöstä 10.

$$\Delta p_\lambda = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \quad (10)$$

Vastuskertoimista aiheutuva painehäviö $[\Delta p_\zeta]$ lasketaan yhtälöstä 11.

$$\Delta p_\zeta = \zeta \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \quad (11)$$

Kokonaispainehäviö koostuu sekä vastuskertoimien painehäviöstä että kitkahäviöistä.

$$\Delta p = \Delta p_\lambda + \Delta p_\zeta = \left(\frac{\lambda \cdot l}{d} + \zeta \right) \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \quad (12)$$

jossa l on putkipituus metreinä, jolloin painehäviön yksiköksi tulee Pascal (Pa).
(Putkivirtaus 2009 n.d.)

4.2 Lämpöteho

Nestekiertoisen järjestelmän lämpöteho [Φ] saadaan laskettua yhtälöstä 13.

$$\Phi = q_v \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (13)$$

jossa c_p on fluidin ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK) ja ΔT on fluidin lämpötilamuutos lämmönsiirtimessä (K). Ominaislämpökapasiteetti vedelle on 4,19 kJ/kgK ja vesiglykolille 3,61 kJ/kgK. Yhtälöstä 13 voidaan laskea myös ilmanvaihtojärjestelmän lämpöteho [Φ], jossa ilman tiheys on 1,15 kg/m³, ominaislämpökapasiteetti 1,01 kJ/kgK, ΔT on lämpötilan muutos prosessissa ja q_v on prosessin il-mavirta (m³/s). Ilmanvaihtojärjestelmässä voi olla tilanteita (esim. jäähdytys), jossa ilman energiasisältöön vaikuttaa toinenkin muuttuja, kuin lämpötilaero. Tämä muuttuja on yleensä ilman kosteussisältö. Silloin tehontarve saadaan las-kettua yhtälöstä 14.

$$\Phi = q_v \cdot \rho \cdot \Delta H \quad (14)$$

jossa ΔH on ilman entalpiaero (kJ/kg). Ilman entalpiaero saadaan mollier-dia-grammista. (Sandberg, E 2016: 83–87., Seppänen, O 2001: 102–104, 142, 427, 430 & Technical data sheet n.d.)

5 LÄMMITYSJÄRJESTELMÄN KOMPONENTIT

5.1 Lämmönsiirtimet

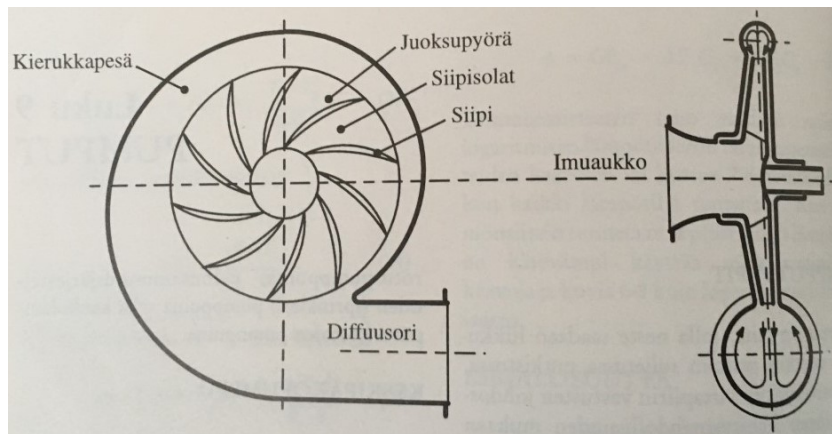
Tässä opinnäytetyössä käsitellään kahta lämmönsiirintä: VOC-poistokaasulämmöntalteenottoa ja lämmönjakokeskuksessa toimivaa lämmönsiirintä, jonka tarkoitus on siirtää lämpöä VOC-lämmöntalteenottopiiristä patteriverkon lämmityspiiriin. Lämmönsiirtimen tarkoitus on siirtää lämpöä ainevirrasta toiseen sekoittamatta aineita keskenään. Rekuperatiivisessa lämmönsiirtimessä kulkee kaksi seinämällä erotettua ainevirtaa lämmön siirtyessä ainevirrasta toiseen seinämän läpi. Lämmönsiirtimen tehoa määrittäessä voidaan käyttää logaritmista lämpötilaeroa $[\Delta T_{ln}]$ yhtälöstä 15.

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (15)$$

jossa ΔT_1 on virtojen lämpötilaero lämmönsiirtimen alkupäässä ja ΔT_2 on virtojen lämpötilaero lämmönvaihtimen loppupäässä. Yhtälö 15 toimii parhaiten vasta- ja myötävirtalämmönsiirtimissä. (Seppänen, O 2001: 223, 228.)

5.2 Pumppu

Lämmitysverkostoissa käytetään yleensä keskipakopumppua. Keskipakopumpussa fluidi virtaa juoksupyörän siipisoliin akselin suunnassa pyörän keskiössä. Juoksupyörä antaa pyöriessään fluidille liike-energiaa ja sinkoaa nesteet kehällä olevaa kierrukapesää kohti. Kierrukapesä laajenee diffuusorin tapaan pumpun paineaukkoa kohti. Kierrukapesässä fluidin nopeus alenee ja liike-energia muuttuu paine-energiaksi. (Seppänen, O 2001: 229.)

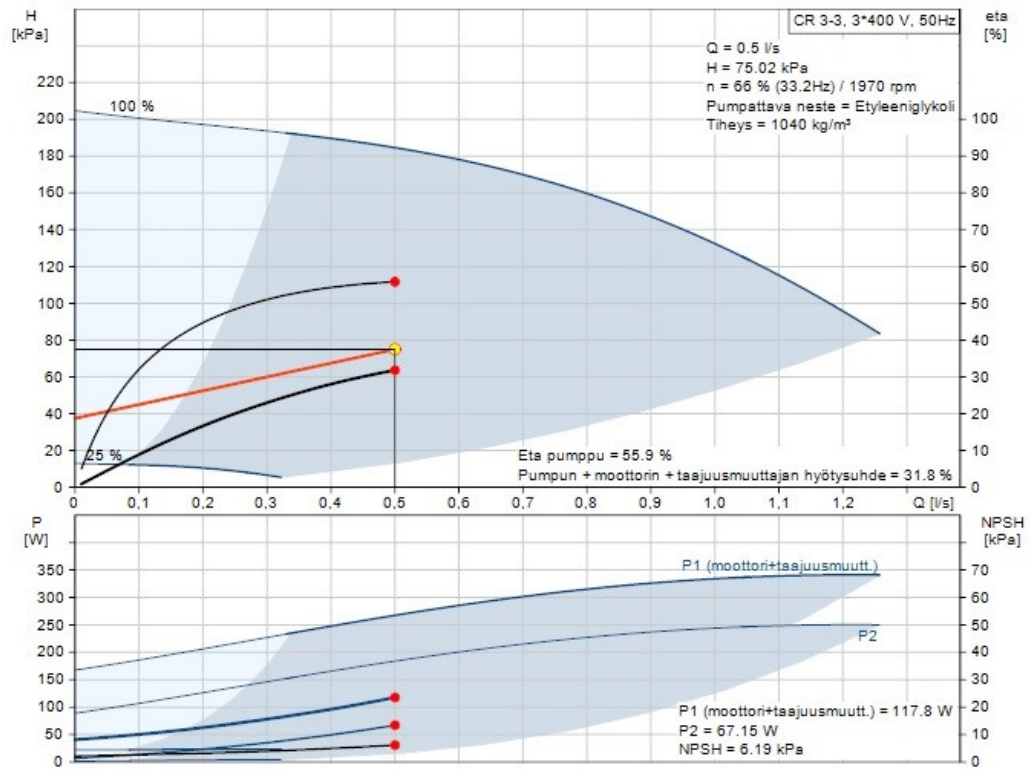


KUVIO 6. Keskipakopumppu. (Seppänen, O 2001: 230.)

5.2.1 Pumppausenergian laskeminen

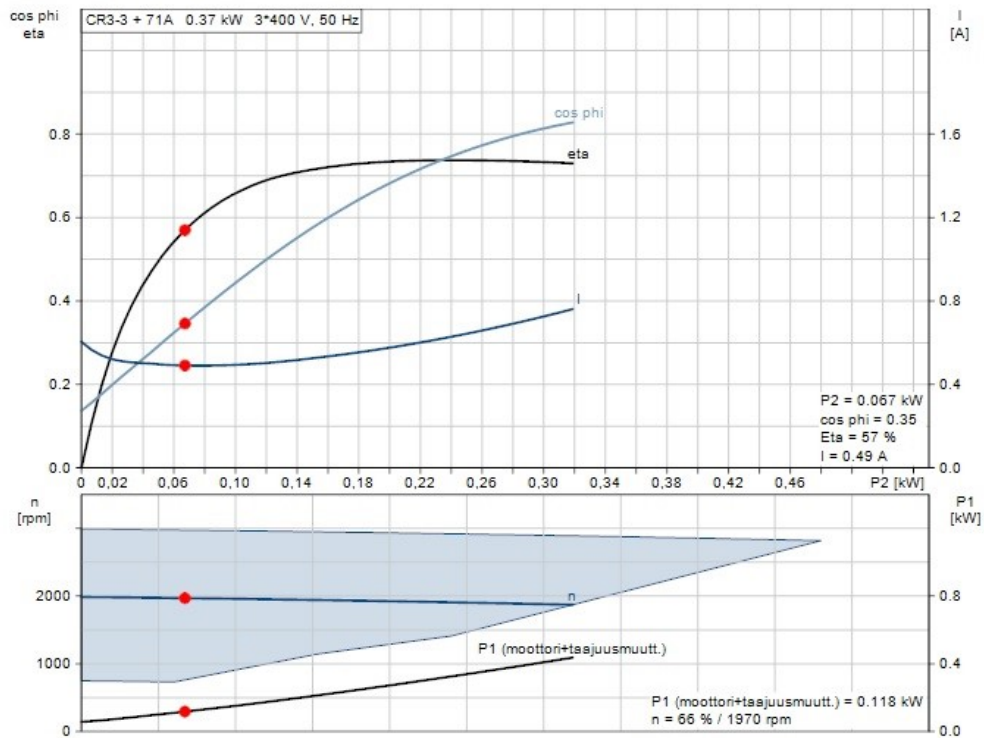
Pumppua valittaessa on kiinnitettävä huomiota pumpun ominaiskäyrään. Ominaiskäyrästä katsotaan toimintapiste pumpun paineen, eli nostokorkeuden ja tilavuusvirran avulla. Ominaiskäyrän lisäksi saatavilla on yleensä myös tehontarve- ja hyötysuhdekäyrät. Ominaiskäyrät on esitetty kuviossa 7 ja 8. Kuviossa 7 on esitetty pumpun ominaiskäyrästä, jossa on tilavuusvirran ja nostokorkeuden toimintapiste sekä vastaava tehontarvekäyrä ja NPSH-arvo. Kuviossa 8 on esitetty pumpun hyötysuhdekäyrästä, jossa hyötysuhde (η), jännitteen ja virran vaihekulma ($\cos \phi$), virrankulutus (I), pyörimisnopeus (n) sekä tehonkulutus (P_1). Kuvioista 8 näkee, että pumpun pyörimisnopeutta voidaan säätää taajuusmuuttajalla. (Seppänen, O 2001: 235, 242.)

SUORITUSKYKY



KUVIO 7. Pumpun ominaiskäyrästä. (Grundfos product center n.d.)

MOOTTORI



KUVIO 8. Pumpun hyötysuhdekäyrästä. (Grundfos product center n.d.)

Pumpun paineen $[\Delta p_1]$ muuntaminen nostokorkeuteen $[H]$ lasketaan yhtälöllä 16.

$$H = \frac{\Delta p_1}{\rho g} \quad (16)$$

jossa g on putoamiskiihtyvyys $9,81 \text{ m/s}^2$. Kiertopumpun akselin tarvitsema teho $[P_2]$ saadaan laskettua yhtälöllä 17.

$$P_2 = \frac{q_v \cdot \rho \cdot g \cdot H}{\eta_p} \quad (17)$$

jossa η_p on pumpun hyötysuhde. Yhtälö 17 voidaan pumpun paineen avulla laskea myös seuraavasti:

$$P_2 = \frac{q_v \cdot \Delta p_1}{n_p} \quad (18)$$

Pumpun todellinen tarvitsema sähköteho on kuitenkin suurempi kuin pelkän akselin tarvitsema teho, koska häviöitä syntyy sähkömoottorissa ja moottorin säätölaitteessa. Näin ollen pumpun ottama sähköteho $[P_1]$ määräytyy yhtälöstä 19.

$$P_1 = \frac{P_2}{n_m \cdot n_s} \quad (19)$$

jossa n_m on moottorin hyötysuhde ja n_s on säädön hyötysuhde. Pumpun energiankulutus $[Q]$ saadaan, kun ottoteho kerrotaan ajanjakson pituudella yhtälöstä 20.

$$Q = P_1 \cdot t \quad (20)$$

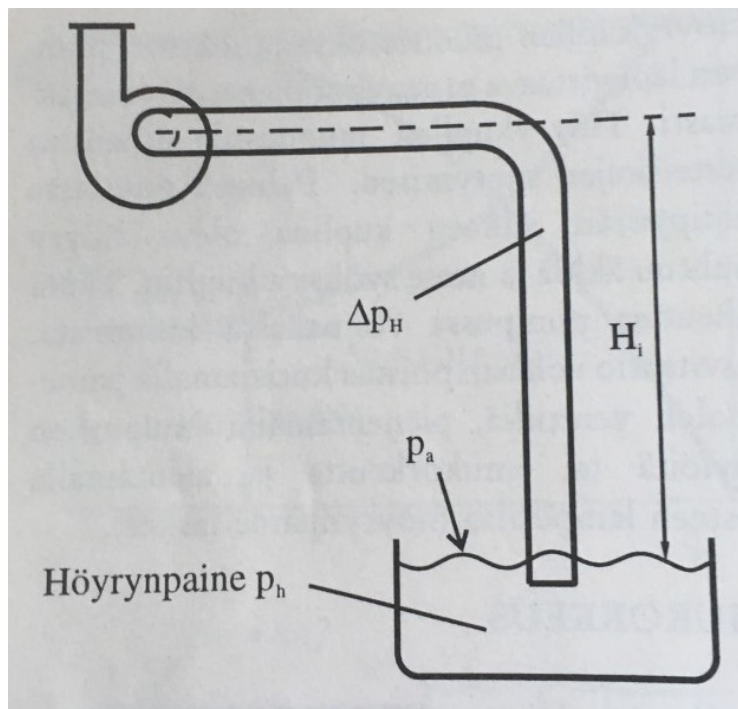
jossa t on ajanjakson pituus tunneissa. Yhtälöissä 17–19 käytetään ja saadaan pumpun tehot watteina, kun taas yhtälössä 20 käytetään kilowatteja ja saadaan energiankulutus kilowattitunneiksi. (Energiatehokkaat pumput 2011 n.d: 9–14 & Seppänen, O 2001: 233–235.)

5.2.2 Kavitaatio

Keskipakopumpun siipisolien tulee olla täynnä nestettä, jotta pumppu pystyy imemään nestettä. Kavitaatiossa paine laskee liian alas pumpun imupuolella ja neste höyrystyy, jolloin syntyy höyrykuplia. Höyrykuplien sinkoutuessa siipipyörien avulla kierrukkapesään ja diffuusoriin paine nousee ja höyrykuplat lauhtuvat, jolloin neste syöksyy kupliin painepuolella. Kavitoiva pumppu pitää häiritsevää ääntä ja kuluu nopeasti. Kavitaatiota edellyttävät matala paine, korkea nesteen lämpötila, mutta myös pumppurakenteella on merkitystä kavitaatioherkkyydelle. Paineen laskua juoksupyörässä ilmoitetaan NPSH-arvolla, joka riippuu juoksupyörän ominaisuuksista. Jotta kavitaatiota ei tapahtuisi, täytyy paine juoksupyörässä p_b olla suurempi kuin nesteen höyrinpaineen p_h ja NPSH:n summa. Höyrinpaine riippuu lämpötilasta.

Juoksupyörän painetta alentaa myös imuputken häviöt Δp_H . (Seppänen, O 2001: 238, 239.)

$$p_b = p_a - \Delta p_H - \rho g H_i - \rho g (NPSH) \quad (21)$$



KUVIO 9. Mahdollinen imuputken nostokorkeus H_i alentaa juoksupyörän painetta. (Seppänen, O 2001: 239, 240.)

5.2.3 Juoksupyörän halkaisijan muuttaminen

Juoksupyörää vaihtamalla voidaan pumpun tilavuusvirtaa ja nostokorkeutta muuttaa vaihtamatta koko pumppua. Juoksupyörän vaihtaminen ei kuitenkaan ole kaikissa tilanteissa mahdollista. Esim. ruostumattomasta teräksestä valmistettua juoksupyörää ei pystytä koneistamaan. Suuret muutokset juoksupyörän halkaisijassa tuottavat arvaamattomia vaikeuksia eikä suurempi juoksupyörä aina mahdu kierrukkapesään. Pumpun tilavuusvirta muuttuu suoraan verrannollisesti juoksupyörän halkaisijan suhteessa, koska juoksupyörien siipien leveys on yleensä vakio [$b_1 = b_2$].

$$\frac{q_{v1}}{q_{v2}} = \frac{D_1 b_1}{D_2 b_2} \approx \frac{D_1}{D_2} \quad (22)$$

jossa D_1 on vanhan juoksupyörän halkaisija ja D_2 on uuden juoksupyörän halkaisija. Pumpun tilavuusvirta on suoraan verrannollinen myös pumpun pyörimisnopeuteen $[n_1]$ ja $[n_2]$:

$$\frac{q_{v1}}{q_{v2}} = \frac{n_1}{n_2} \quad (23)$$

Pumpun tuottama paine on taas suoraan verrannollinen juoksupyörän halkaisijan neliöön:

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left[\frac{q_{v1}}{q_{v2}} \right]^2 \approx \left[\frac{D_1}{D_2} \right]^2 \quad (24)$$

Juoksupyörää vaihtaessa pumpun tehontarve on taas suoraan verrannollinen juoksupyörän halkaisijan kuutioon:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left[\frac{q_{v1}}{q_{v2}} \right]^3 \approx \left[\frac{D_1}{D_2} \right]^3 \quad (25)$$

Yhtälöstä 25 on varmistettava, että pumpun moottori jaksaa pyörittää mahdollisesti kasvatettua juoksupyörää. (Federley, J 2009: 7 & Seppänen, O 2001: 234, 241.)

5.2.4 Pumpun valintaan vaikuttavat tekijät

Pumpun materiaalin on sovelluttava pumpattavalle nesteelle, koska esim. tiivisteet ovat arkoja kemikaalien vaikutukselle. Nopeuden on oltava alle 3 m/s pumpun yhteissä. Pumpun toimintapiste valitaan mahdollisimman korkean kokonaisyötysuhteen alueelta. Kolmivaihemoottori on luotettavampi, kuin yksivaihemoottori. Jyrkkä ominaiskäyrä on hyvä, jos paine tulee vaihtelevaan paljon. Loiva ominaiskäyrä on taas käytännöllisempi, jos tilavuusvirta tulee vaihtelevaan paljon. Pumpun herkkyys kavitaatiolle on selvitettävä etenkin lämpötilan ollessa korkea.

Lisäksi ylimitoitusta on vältettävä, koska siitä seuraa energianhukkaa ja ääniongelmia. (Seppänen, O 2001: 242.)

5.3 Paisuntajärjestelmä

Paisuntajärjestelmä koostuu täyttöputkesta, varoventtiilistä, paisunta-astiasta ja painemittarista. Suljetussa nestekiertojärjestelmässä käytetään yleensä kalvo-paisunta-astiaa. Paisunta-astiaa mitoittaessa on tiedettävä ensin staattinen paine [p_{st}], joka saadaan korkeuserosta ylimmän ja alimman laitteen väliltä. Esipaine on 1–10 kPa staattista painetta suurempi. Paisunta-astian mitoituskerroin [K_{mit}] riippuu esipaineesta ja valitun varoventtiilin avautumispaineesta taulukon 2 mukaan. Taulukossa ihannealue on lihavoituna. Taulukossa oleva esipaine [p_e] on suhteellinen paine, jolloin absoluuttinen esipaine on 100 kPa suhteellista painetta suurempi. (Paisuntajärjestelmän valinta ja mitoitus 2011 n.d: 1–3.)

TAULUKKO 2. Paisunta-astian mitoituskertoimen esipaineen ja varoventtiilin valinnan mukaan. (Paisuntajärjestelmän valinta ja mitoitus 2011 n.d: 3.)

Esipaine kPa	Paisunta-astian mitoituskertoimen K_{mit} Varoventtiilin avautumispaine kPa					
	300	350	400	450	500	600 ($p_{max} = 540$)
50	3,11	2,67				
60	3,28	2,76				
70	3,48	2,88	2,53			
80	3,73	3,01	2,61			
90	4,02	3,16	2,71			
100	4,38	3,33	2,81	2,50		
110	4,81	3,54	2,93	2,58		
120	5,37	3,78	3,07	2,67		
130	6,09	4,06	3,22	2,77		
140	7,05	4,39	3,40	2,88	2,56	
150	8,40	4,80	3,60	3,00	2,64	
160		5,30	3,83	3,14	2,73	
170		5,93	4,10	3,29	2,83	
180		6,73	4,42	3,47	2,95	
190		7,82	4,80	3,66	3,07	
200		9,33	5,25	3,89	3,21	2,57
210			5,81	4,15	3,36	2,65
220			6,50	4,45	3,53	2,74
230			7,40	4,80	3,73	2,83
240			8,60	5,21	3,94	2,94
250			10,29	5,71	4,19	3,05
260				6,33	4,47	3,17
270				7,09	4,80	3,30
280				8,08	5,19	3,45
290				9,40	5,64	3,61
300					6,19	3,79

TAULUKKO 3. Esimerkki lämpölaajenemiskertoimesta [a] vedelle ja etyleeniglykolille. (Paisuntajärjestelmän valinta ja mitoitus 2011 n.d: 4.)

Laitoksen mitoitustilämpötila	Lämpölaajenemiskerroin a			
	Vesi	Vesi-glykoli 30 %	Vesi-glykoli 40 %	Vesi-glykoli 50 %
°C	%	%	%	%
10	0,04	0,96	1,40	1,69
20	0,18	1,40	1,88	2,18
30	0,44	1,88	2,38	2,72
40	0,79	2,39	2,92	3,28
50	1,21	2,94	3,50	3,89
60	1,71	3,52	4,12	4,54
70	2,28	4,15	4,77	5,22
80	2,96	4,81	5,47	5,94
85	3,21	5,15	5,84	6,31
90	3,59	5,52	6,21	6,70
95	3,94	5,88	6,60	7,10
100	4,35	6,26	6,99	7,51
105	4,74	6,65	7,39	7,92
107	4,99	6,90	7,65	8,19
110	5,15	7,06	7,82	8,36
120	6,06	7,89	8,69	9,25
130	6,94	8,78	9,61	10,20

Taulukossa 3 lämpölaajenemiskerroin [a] valitaan suurimman verkostossa esiintyvän lämpötilan mukaan. Liuoksen lämpölaajenemiskerroin kannattaa varmistaa valmistajalta. Paisunta-astiaa valittaessa on tiedettävä laitoksen vesitilavuus [V₀], jolloin paisunta-astian tilavuus [V] lasketaan seuraavasti:

$$V = V_0 \cdot a \cdot K_{mit} \quad (26)$$

Yhtälössä 26 käytetään lämpölaajenemiskerrointa suhdelukuna. Kun esipaine p_e ja varoventtiilin laukaisupaine p_{sv} tiedetään, on verkoston ylipaineen hälytysraja p_{hāl}⁺ = p_{sv} – 20 kPa. Verkoston enimmäiskäyttöpaine p_{max} = p_{sv} – 50 kPa tai 0,9 x p_{sv} (pienempi näistä). Verkoston alipaineen hälytysraja p_{hāl}⁻ = p_e + 20 kPa. Verkoston vähimmäiskäyttöpaine p_{min} = p_e + 50 kPa. Verkoston (suurin) täyttöpaine p_{täyttö} = p_{min} + 10 kPa. Kaikki edellä mainitut paineet ovat suhteellisia paineita. (Paisuntajärjestelmän valinta ja mitoitus 2011 n.d: 2, 3.)

5.4 Muuta huomioitavaa paisuntajärjestelmästä

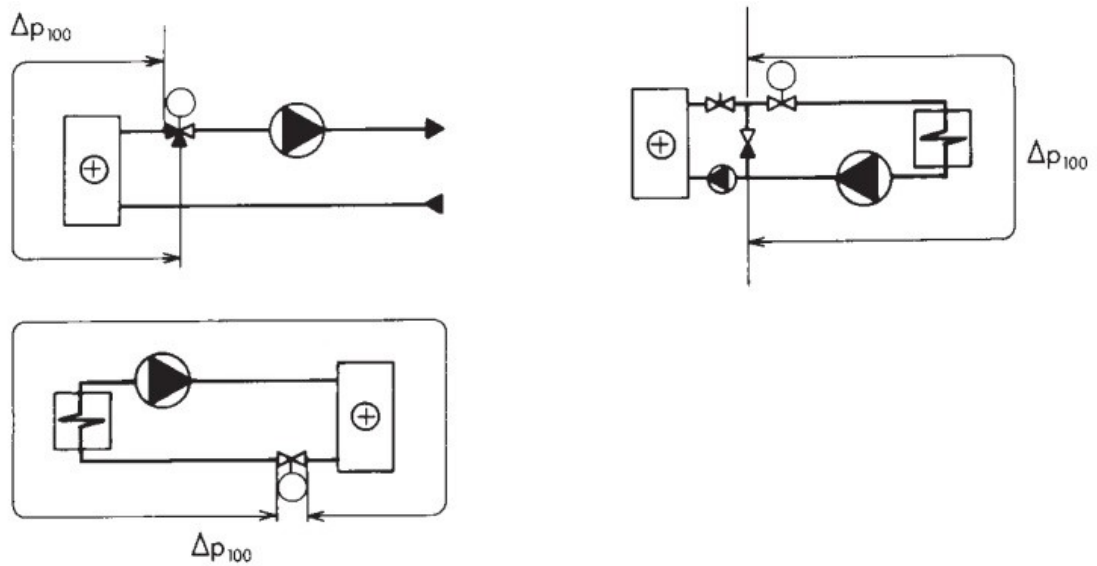
Paisunta-astian kalvon kestävyys on varmistettava käytetylle glykoliliuokselle. Käytetty glykoli ja seosvahvuus on merkittävä täyttöastian läheisyyteen. Lisäksi pumpun vähimmäisimupaine on tarkistettava pumppua valittaessa, koska pumpun toimintapiste pumppukäyrällä ja nesteen lämpötila vaikuttavat imupaineeseen. (Paisuntajärjestelmän valinta ja mitoitus 2011 n.d: 4.)

5.5 Säätoventtiili

Säätoventtiilin tehtävänä on säätökeskuksen ohjaamana säätää lämmönsiirtimen läpi menevää virtausta kuristamalla paine-ero niin, että haluttu lämpötila lämmönsiirtimen toisiopuolen menovedessä saavutetaan. Venttiilin virtausarvot normaaliolosuhteissa määritetään kapasiteettikertoimella, eli K_v -arvoilla. K_{vs} -arvo on valmistajan ilmoittama kapasiteettikerroin, jolla ilmoitetaan se vesimäärä (+5 ... +30 °C), joka virtaa venttiilin läpi sen ollessa täysin auki ja paine-eron ollessa 1 bar (= 100 kPa). Säätoventtiilin K_{vs} -arvo lasketaan seuraavasti:

$$K_{vs} = \frac{q_{100}}{\sqrt{\Delta p_{v100}}} \quad (27)$$

jossa q_{100} on mitoitettu nimellisvirtaama (m^3/h) ja Δp_{v100} on venttiilin painehäviö sen ollessa täysin auki mitoitetulla nimellisvirtaamalla (bar). Säätoventtiiliä valittaessa on tiedettävä painehäviö siinä osassa verkostoa, jonka virtausta säädetään [Δp_{100}]. (Lämmitysverkoston säätoventtiilin mitoitus 1989 n.d: 2 & Seppänen, O 2001: 278, 279.)

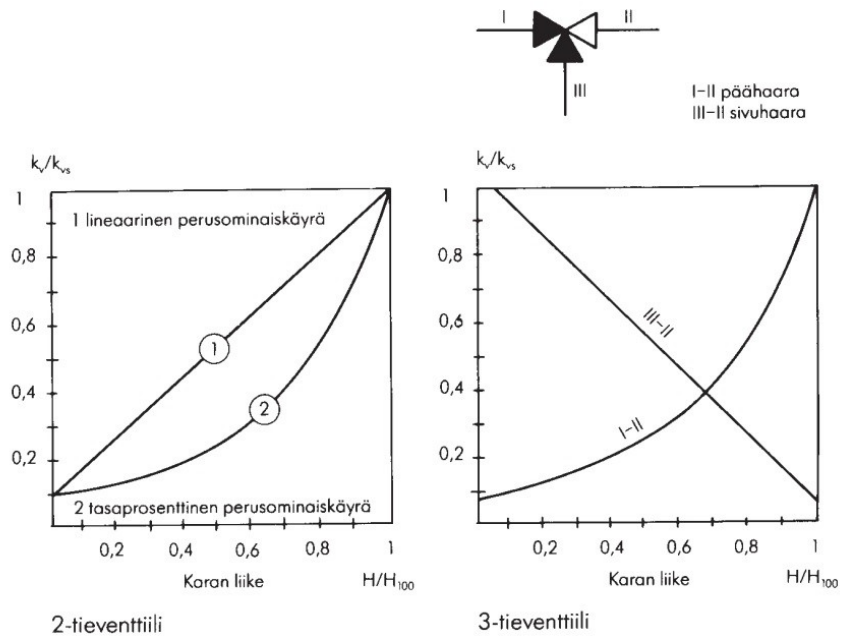


KUVIO 10. Paine-eron Δp_{100} esimerkkejä. (Lämmitysverkoston säätöventtiilin mitoitus 1989 n.d: 2.)

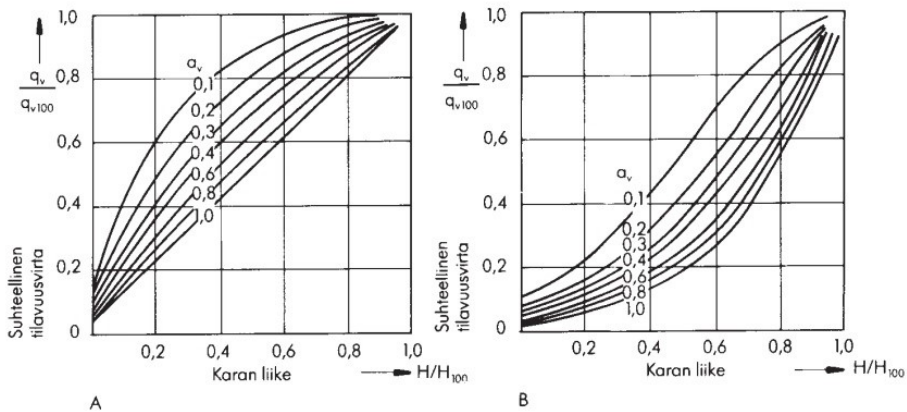
Putkikytkennät, lämmönsiirrin ja venttiilit on mitoittettava siten, että säätöventtiilin vaikutusaste, eli auktoriteetti [a_v] on vähintään 0,5. Auktoriteetti lasketaan seuraavasti:

$$a_v = \frac{\Delta p_{v100}}{\Delta p_{v100} + \Delta p_{100}} \quad (28)$$

Kolmitieventtiiliä käytettäessä säädettävyys ja kokonaisvesivirta riippuvat pää- ja sivuhaaran perusominaiskäyristä sekä auktoriteetista. (Lämmitysverkoston säätöventtiilin mitoitus 1989 n.d: 3, 5.)



KUVIO 11. Venttiilien perusominaisuuskäyrät. (Lämmitysverkoston säätöventtiilin mitoitus 1989 n.d: 2, 3.)



KUVIO 12. Perusominaiskäyrältään lineaarisen (A) ja tasaprosenttisen (B) käyttöominaiskäyrät eri vaikutusasteilla. (Lämmitysverkoston säätöventtiilin mitoitus 1989 n.d: 2.)

5.6 Muuta huomioitavaa säätöventtiileistä

Kahta tai useampaa rinnankytkettyä säätöventtiiliä käytetään, mikäli tehovaihtelut ovat suuria. Kahden säätöventtiilin rinnankytkentä on suositeltava, kun K_{vs} -arvoksi tulee yli 6,3. Kolmitieventtiiliä käytettäessä kokonaisvesivirta pysyy parhaiten vakiona, kun päähaaran ominaiskäyrä on tasaprosenttinen ja sivuhaaran lineaarinen, kuten kuviossa 11. Säätöventtiilit suositellaan sijoitettavaksi paluupuolelle. Venttiileitä valittaessa on varmistettava glykolikestävyys ja paineenkesto. Lisäksi glykoliliuos vaikuttaa venttiilin valintaan virtauskertoimella, joka tässä työssä on 0,83. Kyseistä virtauskerrointa käytetään glykolitapauksessa yhtälössä 27. (Lämmitysverkoston säätöventtiilin mitoitus 1989 n.d: 1–3., Rakennusten kaukolämmitys 2014 n.d: 16, 17 & Välimaa, H 2001.)

5.7 Tasaussäiliö

Tasaussäiliötä ei yleensä käytetä lämmitysjärjestelmissä. Tässä tapauksessa kuitenkin tasaussäiliö vähentää säädön horjumista, koska teollisuusprosessit ja polttolaitokselta tuleva lämpöteho vaihtelevat. Kaukorasta saatavilla tasaussäiliöillä on lämpötilankesto 110 °C ja paineenkesto 6 bar. Hukkalämpöverkkoon olisi parasta saada asennettua 1 800-litrainen säiliö, mutta tilanpuutteen johdosta joudutaan todennäköisesti tyytymään vain 300-litraiseen säiliöön. (Eskola, A.)

5.8 Sekalaisia komponentteja

Putkikytkennässä on lämpötila-antureita, jotka yleensä asennetaan suojataskuihin upotettuna. Myös pinta-antureita käytetään. Anturit asennetaan sellaisiin kohtiin, joissa lämpötilat ovat tasoittuneet. Esim. kaukolämmön menoveden lämpötila-anturi sijoitetaan lämmönsiirtimen jälkeen sellaiseen kohtaan, jossa lämpötilat ovat tasoittuneet ja mittaustulos vastaa todellista arvoa. Anturin tehtävänä on ohjata säätöventtiilejä toimilaitteen avulla. Kaksiasentoisia on/off -toimilaitteita ohjataan digitaalisella viestillä (1 tai 0) ja portaaton ohjaus 0–10 VDC jänniteviestillä.

Toimilaitteen käyttöjännite on yleensä 24 V AC/DC tai 230 VAC. (Kenttälaitteet 2021 n.d: 2, 20 & Rakennusten kaukolämmitys 2014 n.d: 17, 18.)

Lianerottimen suodatinverkon silmäkoko saa olla enintään 1 mm. Lianerottimen DN-koko on oltava vähintään putken kokoa ja sen on oltava puhdistettavissa. Erillistä lianerotinta ei kuitenkaan tarvita, jos jokin muu laite sisältää määräysten mukaisen lianerottimen. (Rakennusten kaukolämmitys 2014 n.d: 25.)

Ilmanpoistin on laite, joka poistaa ilman verkostosta. Ilmanpoistin sijoitetaan verkoston ylimpään kohtaan. Ilman poistaminen on tärkeää, jotta verkosto toimii moitteettomasti eikä ruostu. Ilmanpoistinta ei pidä sekoittaa ilmanerottimeen. Ilmanerotin sijaitsee lämmitysverkostossa heti lämmönsiirtimen jälkeen. (Pihlajamaa, P 2017 Ilmanpoistin: 2, 6.)

6 PUTKIMATERIAALIT JA PUTKISTOJEN PUHTAUS

6.1 Ilma

Ilmaa kerääntymistä lämmönsiirtojärjestelmään edellyttävät suuret painevaihtelut, heikosti toimiva paisuntajärjestelmä ja glykolitapauksessa myös lämpötilavaihtelut, koska glykolin viskositeetti muuttuu lämpötilan vaihtuessa. Myös täytön yhteydessä lämmönsiirtojärjestelmään menee ilmaa. Putkistoon kerääntyneet ilmakuplat heikentävät lämmönsiirtotehoa ja edistävät korroosiota. Putkistoon kertynyt korroosiosakka häiritsee toimilaitteita. Lämmönsiirtonesteessä oleva glykoli sisältää lisäaineita, jotka saattavat aiheuttaa ilmanpoistimien tukkeutumisen. Näin ollen ilmanpoistimien toimintaa on syytä välillä tarkistaa. (Kärkkäinen, A & Valli, M 2014.)

6.2 Putkien korroosio

Lämmitysputkissa suositeltava virtausnopeus on 0,3–1 m/s. Putkistomitoitus tehdään siten, että painehäviö on keskimäärin 50–75 Pa/m. Sinkityssä teräsputkessa korroosiota aiheuttavat asennusvirheet, valmistusvirheet sekä lämmönsiirtonesteen laatuongelmat. Yksi tapa puhdistaa putkia on kemikaalikäsittely, eli inhibointi. Inhiboinnissa käytetään peittauskemikaaleja happojen tai emästen kera, jotka poistavat hapettumat, kerrostumat, sakat ja liat. Inhibointi lisää putkien käyttöikää, parantaa korroosiokestoa ja lämmönjohtavuutta. Lämmönsiirtonesteseen voidaan myös laittaa ruostumista estäviä kemikaaleja. (Pihlajamaa, P 2017 Putkistojen puhtaus: 13, 14, 17 & Vesikiertoinen patterilämmitys 2002 n.d: 6.)

6.3 Vaihtoehtoiset putkimateriaalit

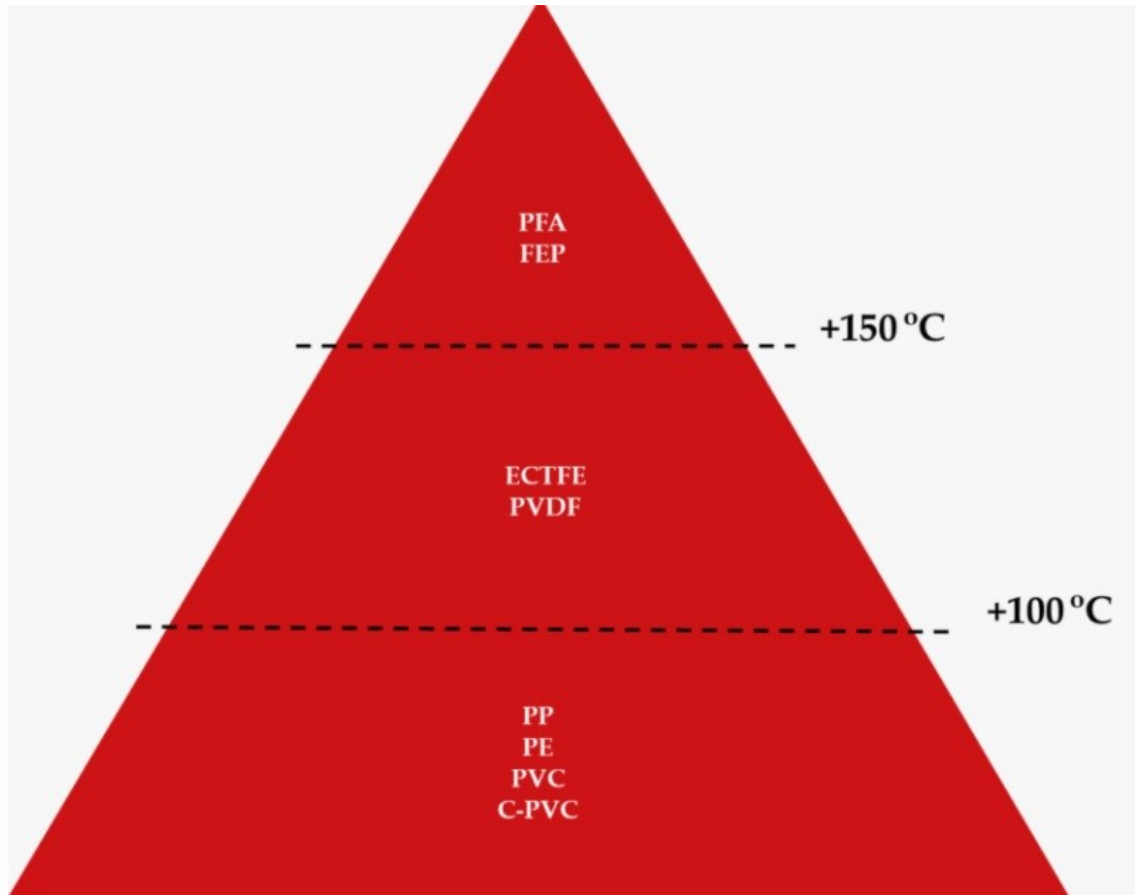
Polttolaitoksen ja painokoneen välille on asennettu kuumasinkittyä teräsputkea. Laajennusverkkoon ei kannata asentaa muita metallisia putkia, koska siinä on riski sähkökemialliselle syöpymiselle. Myöskään PEX-putkia ei voida käyttää heikon lämpötilankeston takia. (Pihlajamaa, P 2017 Putkistojen puhtaus: 8 & Usein kysytyt kysymykset PEX-järjestelmästä n.d.)

TAULUKKO 4. Korroosioparitaulukko. (Pihlajamaa, P 2017 Putkistojen puhtaus:12.)

kiinnike → ↓ kiinnitettävä tuote	Sähkösinkitty teräs	Kuumasinkitty teräs	Alumiini / alumiiniseokset	Rakenneteräs (musta teräs)	Ruostumaton / haponkestävä teräs A2 & A4	Messinki
Sähkösinkitty teräs	mitätön riski	mitätön riski	mitätön riski	mitätön riski	mitätön riski	mitätön riski
Kuumasinkitty teräs	mitätön riski	mitätön riski	mitätön riski	mitätön riski	mitätön riski	mitätön riski
Alumiini / alumiiniseokset	Korroosiovaara	pieni riski	mitätön riski	mitätön riski	mitätön riski	mitätön riski
Kadmium päällystetty metalli	Korroosiovaara	pieni riski	mitätön riski	mitätön riski	mitätön riski	mitätön riski
Rakenneteräs (musta teräs)	Korroosiovaara	Korroosiovaara	Korroosiovaara	mitätön riski	mitätön riski	mitätön riski
Valurauta	Korroosiovaara	Korroosiovaara	Korroosiovaara	Korroosiovaara	mitätön riski	mitätön riski
Ruostumaton teräs A2	Korroosiovaara	Korroosiovaara	Korroosiovaara	Korroosiovaara	mitätön riski	pieni riski
Haponkestävä teräs A4	Korroosiovaara	Korroosiovaara	Korroosiovaara	Korroosiovaara	mitätön riski	Korroosiovaara
Tina	Korroosiovaara	Korroosiovaara	Korroosiovaara	Korroosiovaara	mitätön riski	pieni riski
Kupari	Korroosiovaara	Korroosiovaara	Korroosiovaara	Korroosiovaara	Korroosiovaara	Korroosiovaara
Messinki	Korroosiovaara	Korroosiovaara	Korroosiovaara	Korroosiovaara	Korroosiovaara	mitätön riski

Metallien mahdollinen kallistuminen tulevaisuudessa aiheuttaa tarvetta rakentaa putkiverkostot muovimateriaaleista. Lämpöä, painetta ja kemikaaleja kestäviä muoviputkia on jatkuvasti kehitteillä lisää ja niiden yleistyessä hinnat voivat laskea. Putkimateriaalia valittaessa on tiedettävä lämpötilavaihtelut, painevaihtelut,

kemikaalit ja myös ulkoiset tekijät, kuten ulkoinen lämpötila ja mahdollinen auringonsäteily. (Luhtala, M 2019.)



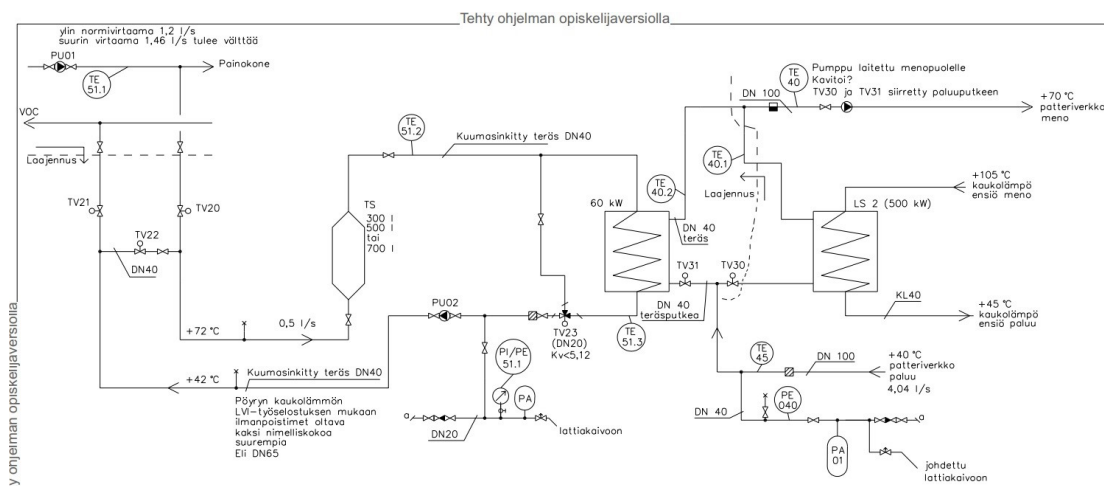
KUVIO 13. Erilaisia muoviputkia ja niiden lämpötilankestot. (Muoviputkiston valinta n.d.)

Opinnäytetyössä suunniteltu hukkalämpöverkko olisi ollut mahdollista toteuttaa käyttämällä PVDF-putkia. PVDF-putket kestävät ainakin 100 °C:n lämpötilaa, ovat hyvin kemikaalinkestäviä, kestävät auringonsäteilyä ja lämpötilavaihteluita. Tämänhetkisten tarjousten perusteella nämä muoviputket ovat kuitenkin terästä ja jopa kuparia kalliimpia. (Monola, J & Material properties n.d.)

7 INVESTOINTI

7.1 Lähtötiedot

Hukkalämpöverkko rakennetaan kuumasinkityillä teräsputkilla. Lämmönsiirrossa on mahdollista käyttää lämminvesivaraajaa lämmönsiirtimenä, jolloin tasaussäiliötä ei tarvita, mutta varaajan sisällä olevan kierreputken suuri painehäviö aiheuttaa jopa pumpun vaihtotarpeen patteriverkon puolelle, jonka lisäksi kyseinen varaaja on erikoistilauksen takia kallis, joten tämä on poissuljettu ratkaisu. Polttolaitoksen nestekiertoinen lämmöntalteenottoverkosto on jo rakennettu polttolaitokselta painokoneelle ja nyt suunniteltavassa laajennusverkostossa on tarkoitus rakentaa putkivetoja painokoneen kohdalta lämmönjakohuoneeseen, jolloin putkivetoja tulee n. 84+84 metriä. Rinnakkaislämmönlähde kytketään lämmönsiirtimen rinnankytkennällä tilojen lämmitystapauksessa. (Eskola, A & Rakennusten kaukolämmitys 2014 n.d: 89.)



KUVIO 14. Putkisuunnitelma, jolla polttolaitoksen hukkalämpö aiotaan hyödyntää patteriverkon lämmittämiseen DN40-teräsputkilla.

Kaukolämmön hinta on 74 €/MWh ja sähkön keskihinta on 80 €/MWh. Mikäli polttolaitokselta tuotettaisiin lämpöä kaukolämmön ensiöverkon paluupuolelle, maksaa kaukolämpöyhtiö tästä lämmöntuotannosta tehtaalle arviolta vain 25 €/MWh, jonka lisäksi tämä vaatisi uuden kaukolämpöliittymän, jonka hinta on n. 15 000 €.

Lämmityskauden pituus on 8,5 kk, eli n. 70 % vuoden ajasta. (Kinnula, T., Liimatainen, A & Pirinen, P 2014: 16.)

7.2 Tehontuotanto ja tehonmitoitus

VOC-polttolaitoksen operointitilassa ja painokoneen painatusvaiheessa huomataan, että yli puolet savukaasuista ohjataan lämmönvaihtimen ohituspellin kautta savupiippuun, joka selittää sen, että polttolaitokselta olisi hyödynnettävissä lisää lämpötehoa. Lämmönvaihtimen ohitusautomaattikka on tarpeen, koska lämmönsiirtoneste ei saa ylikuumeta ja kiehua. Tällä hetkellä painokonetta ajetaan pääsääntöisesti 1-vuorotyönä, mutta joskus 2-vuorotyönä. Vuoden 2020 kevään seurannan mukaan painokonetta on ajettu noin 3 000 h/a. Vaikka hukkalämmönsiirtimeksi mitoitusteho on 60 kW, niin erilaisissa painatusprosesseissa liuotinhöyryjen tuotannot vaihtelevat, joka vaikuttavat polttolaitoksen lämmöntuotantoon. Tätä keskimääräistä lämmöntuotantoa on vaikea arvioida, mutta se on seurannan perusteella arvioitu olevan n. 38 kW. Seuraavaksi mitoitetaan hukkalämmönsiirtimeksi mitoitusteho polttolaitoksen savukaasulämmönsiirtimeksi nimellistehosta.

Lämmönsiirtonesteenä oli alun perin suunnitteilla käyttää 35 %:sta vesiglykolia nykyisen 40 %:n sijaan, jonka virtaama oli 1,11 l/s, painehäviö savukaasulämmönsiirtimeksi 40 kPa, lähtevä liuos 60 °C ja paluuneste 30 °C Polttolaitoksen savukaasulämmönsiirtimeksi nimellisteho oli 127 kW, kun savukaasun lämpötila oli 75 °C ja savukaasuvirta 12 000 Nm³/h. Nykyisissä teollisuusprosesseissa savukaasuvirta on enintään 5 000 Nm³/h, koska suurin mitattu savukaasuvirta AX-Suunnittelun toimesta on ollut vain 4 600 Nm³/h. Silloin tehontuotanto olisi:

$$\frac{5\,000\text{ Nm}^3/\text{h}}{12\,000\text{ Nm}^3/\text{h}} \cdot 127\text{ kW} = 52,92\text{ kW}$$

Seuraavaksi on huomioitava logaritmisen lämpötilaeron vaikutus tehontuotantoon yhtälön 15 mukaan. Lämpötilaero alkuperäisessä tilanteessa on ollut:

$$\frac{60 - 30}{\ln\left(\frac{30 - 75}{60 - 75}\right)} = 27,31 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tällä hetkellä lämmönsiirtonesteen lämpötilatasot ovat 72/42 °C ja savukaasun lämpötila on 90 °C. Silloin logaritminen lämpötilaero on:

$$\frac{72 - 42}{\ln\left(\frac{42 - 90}{72 - 90}\right)} = 30,59 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tällöin nykyinen tehontuotto ja hukkalämmönsiirtimeen nimellistehon on oltava:

$$\frac{30,59 \text{ } ^\circ\text{C}}{27,31 \text{ } ^\circ\text{C}} \cdot 52,92 \text{ kW} \approx 60 \text{ kW}$$

Kun painokonetta ei ajeta, on polttolaitos yleensä STANDBY-tilassa. Polttolaitos tuottaa pieniä lämpötehoja myös STANDBY-tilassa, koska kaasulämmitys on silloin päällä. Kaikki savu kulkee lämmönvaihtimen kautta savupiippuun, eikä ohiuspelti ole auennut. Polttolaitoksen tehontuotanto STANDBY-tilassa on laskettu kuviossa 15. Tehontuotanto on todellisuudessa pienempi, koska lämmityskaudella patteriverkko saattaa tarvita 70 °C:sta vettä, jolloin polttolaitokselta tuleva 59,5 °C lämmin menovesi ei lämmitä patteriverkkoa. Keskimääräinen tehontuotanto STANDBY-tilassa on arviolta 2 kW.

Standby-VOC energiantuotanto	
Menovesi 59,5 astetta	delta T
paluuvesi 57,6 astetta	2 astetta
	virtaus
ominaislämpökapasiteetti	0,75 l/s
3,61 kJ/kgK	0,00075 m3/s
Tiheys	
1050 kg/m3	TEHO:
	5,68575 kW
	HÄVIÖT:
	0,936 kW (nykyinen putkiverkko: 50 mm eristettä ja nesteen lämpötila vain 50 astetta)
	0,706 kW ("hukkalämpöverkko": 50 mm eristettä ja nesteen lämpötila vain 50 astetta)
	0,27 kW (Tasaussäiliö)
	Häviöt laskettu PAROC-calculus -ohjelmalla
	STANDBY-teho enimmillään:
	<u>3,77375</u> kW

KUVIO 15. Polttolaitoksen tehontuotanto STANDBY-tilassa.

7.3 Työtuntien arviointi

Putkiasentajan työtunnit kannattaa arvioida Talotekniikka-alan LVI-toimialan työehtosopimuksen avulla. Työtunteja voidaan arvioida asennettavien putkien mukaan metriä kohti ja eri laitteistojen asennustunnit kokoluokkansa mukaan. Työtunnit kerrotaan vielä asennustyössä esiintyvillä olosuhde- ja vaativuuslisillä. Lisäksi asennustyö aiheuttaa pientä haittaa tehtaan tuotannolle, joten haittalisä on 16 %. Lämmönjakohuoneessa putkimetriä normitunnit korotetaan 35 %:lla. On myös ennakoitava joitakin työvaiheita, mitä normiaikoihin ei sisälly, kuten läpiviennit. Työtuntilaskelma hukkalämpöverkon rakentamisesta on esitetty liitteessä 1 ja kaukolämpöliittymän lämmönjakohuonetöistä liitteessä 4. (Talotekniikka-alan LVI-töyehtosopimus 2020–2022 n.d: 103–126.)

7.4 Materiaalikustannukset

Materiaalikustannukset koostuvat putkistoista, putkien eristeistä, kappaleessa 5 mainituista komponenteista, putkien kannakeosista, erilaisista putkiliittimistä, venttiililiitoksista ja työkaluista. Tuotteiden hintoja on selvitetty erilaisten LVI- ja rakennustarvikeliikkeiden verkkosivuilta. Liitteessä 2 on määritelty hukkalämpöverkon kokonaiskustannukset ja liitteessä 5 kaukolämpöliittymän kokonaiskustannukset. Materiaalihinnat ovat suoria kuluttajahintoja, jolloin teollisuusyritys saa todennäköisesti hieman halvemmän tarjouksen kyseisistä osista. Liitteissä 2 ja 5 ei ole huomioitu pienimpiä putkiosia, kuten kannakkeita, kiskoja, työkaluja ja ruuveja. Hinnat sisältävät arvonlisäveron. Liitteissä 2 ja 5 on laskettu kaikki kustannukset yhteen, jolloin tuloksena syntyvät kokonaiset investointikustannukset.

8 TULOKSET

8.1 Patteriverkon lämmitys

Kun putki-investoinnista tiedetään kustannukset ja hukkalämmönsiirtimen tehontuotanto sekä sähkön ja lämmön hinnat, voidaan investoinnille laskea takaisinmaksuaika. Takaisinmaksuaikaan vaikuttavat kuitenkin erilaisten painatusprosessien liuotinhöyrytuotanto ja mahdolliset tuotantovolyymien muutokset. Tällä hetkellä liuotinhöyryjen tehontuotanto on keskimäärin 38 kW ja painokonetta ajetaan keskimäärin 3 000 h/a. Pumppaus kuluttaa sähköä, joten se hieman lyhentää takaisinmaksuaikaa. Takaisinmaksuaika on esitetty liitteessä 3. Liitteestä huomataan, että putki-investointi maksaa itsensä takaisin lämmityskustannusten säästöllä n. 8 vuodessa. Jos painokonetta ajetaan 4 000 h/a olisi takaisinmaksuaika 6 vuotta. Jos painokonetta ajetaan kolmivuorotyönä 6 000 h/a, maksaa investointi takaisin jopa 4 vuodessa.

8.2 Kaukolämmön ensiöpuolen paluuvien lämmitys kesällä

Ensiöverkon lämmittäminen kannattaa ainoastaan lämmityskauden ulkopuolella, koska kaukolämpöyhtiö maksaa luovutetusta energiasta ainoastaan kolmanneksen myyntihinnasta. Patteriverkon lämmittämisestä poiketen pumppauskustannuksia ei ole laskettu kyseiseen investointiin, koska kiertopumpun pumppauskustannukset on jyvitetty ainoastaan patteriverkon lämmittämiseen. Takaisinmaksuaika on esitetty liitteessä 6. Liitteestä huomataan, että investointi maksaa itsensä takaisin n. 21 vuodessa. Jos painokonetta ajetaan 4 000 h/a olisi takaisinmaksuaika 16 vuotta. Jos painokonetta ajetaan kolmivuorotyönä 6 000 h/a, maksaa investointi takaisin 10 vuodessa.

8.3 Ympärivuotinen lämmön myynti kaukolämpöyhtiölle

Jos VOC-polttolaitoksen hukkalämpöä aiotaan myydä kaukolämpöyhtiölle ympärivuotisesti, täytyy investointikustannuksiin laskea yhteen hukkalämpöverkon rakentamiskustannukset ja kaukolämpöliittymän hinta. Myös pumppauskustannukset täytyy laskea takaisinmaksuaikaan ja laskelma on esitetty liitteessä 7. Liitteestä huomataan, että investointi maksaa itsensä takaisin n. 23 vuodessa. Jos painokonetta ajetaan 4 000 h/a olisi takaisinmaksuaika 17 vuotta. Jos painokonetta ajetaan kolmivuorotyönä 6 000 h/a, maksaa investointi takaisin 11 vuodessa.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia ja selvittää, kannattaako VOC-polttolaitoksen hukkalämpöä hyödyntää patteriverkon lämmittämiseen vai kannattaako hukkalämpöä myydä kaukolämpöyhtiölle ympärivuotisesti. Työssä selvitettiin myös, olisiko kannattavaa myydä polttolaitoksen hukkalämpöä kaukolämpöyhtiölle ainoastaan kesällä, jolloin hukkalämpöä hyödynnetään patteriverkon lämmittämiseen lämmityskauden aikana. Hukkalämpöverkkoa suunnitteleamalla ja osallistaa kokoamalla selvitettiin materiaalikustannusten hinta-arvio kuluttajahintojen pohjalta ja asennustyön työtunnit Talotekniikka-alan LVI-toimialan työehtosopimuksen avulla. Kun myös työn ja energian hinnat ovat selvillä, voidaan investointikustannukselle laskea takaisinmaksuaika. Tulosten perusteella voidaan todeta, että polttolaitoksen hukkalämpö kannattaa hyödyntää patteriverkon lämmittämistä varten, jolloin säästetään lämmityskustannuksissa.

Kaukolämmön ensiöpuolen paluueden lämmittäminen kesällä ei sen sijaan ole kannattava investointi, koska nykyinen takaisinmaksuaika on 21 vuotta. Käytännössä painokoneella on tehtävä vähintään kolmivuorotyötä ja mielellään jopa viikonlopputyötä, jotta investointi olisi kannattavaa. Hukkalämmön myyminen kaukolämpöyhtiölle ympärivuotisesti ei myöskään ole kannattava vaihtoehto. Tuotanto-olosuhteet saattavat kymmenessä vuodessa muuttua niin paljon, että hukkalämpöpiiriä ei tarvita lainkaan. Investointeihin on mahdollista saada Business Finland -energiatukea, koska investoinneilla tehostetaan energiankäyttöä saavuttamatta kuitenkaan pakollisia ympäristövelvoitteita. Kustannuslaskelmiin ei ole huomioitu mahdollista energiatukea. (Business Finland -energiatuki n.d.)

LÄHTEET

Business Finland -energiatuki. n.d. Business Finland. Verkkoaineisto. Viitattu 6.4.2022. <https://www.businessfinland.fi/suomalaisille-asiakkaille/palvelut/rahoitus/energiatuki>.

Chaurette, J. 2003. Pipe roughness values. Pumpfundamentals.com. Verkkoaineisto. Viitattu 27.1.2022. <https://www.pumpfundamentals.com/PIPE%20ROUGHNESS%20VALUES.pdf>.

Davis, T. 2022. Moody diagram. Jp.Mathworks.com. Verkkoaineisto. Viitattu 19.4.2022. <https://jp.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/7747-moody-diagram>.

Elecster vuosikertomus 2020. n.d. Elecster. Verkkoaineisto. Viitattu 25.1.2022. <https://www.vuosikertomukset.net/elecster/>.

Energiatehokkaat pumput. 2011. n.d. Motiva. Verkkoaineisto. Viitattu 7.2.2022. https://www.motiva.fi/files/5343/Energiatehokkaat_pumput.pdf.

Eskola, A. Projektimyyntipäällikkö. Puhelinkeskustelu & sähköpostiviestit 22.7.2021.

Federley, J. 2009. Energiatehokas pumppausjärjestelmä. Motiva. Verkkoaineisto. Viitattu 9.2.2022: https://www.motiva.fi/files/2419/Energiatehokas_pumppaus_j_rjestelm_.pdf.

Flow sheet. LPP. 2008. Graz. n.d. Chemisch Thermische Prozesstechnik GmbH.

Flow sheet. 2008. Graz. n.d. Chemisch Thermische Prozesstechnik GmbH.

Grundfos product center. Pumppujen ja pumppuratkaisujen mitoitus. n.d. Oy Grundfos pumput Ab. Www-laskuri. Viitattu 18.2.2022: <https://product-selection.grundfos.com/fi>.

Kenttälaitteet. 2021. Rakennusautomaatiojärjestelmillä yleisimmin käytetyt anturit ja toimilaitteet. Opetusmateriaali. n.d. Tampereen Ammattikorkeakoulu.

Kinnula, T. Tuotantoinisinööri. 2021. Palaveri 4.6.2021. Elecster Oyj. Reisjärvi.

Korpela, J. 2021. Kinemaattinen viskositeetti. Datatekniikka ja viestintä. Verkkoaineisto. Viitattu 27.1.2022. <https://jkorpela.fi/yksikot/9.9.html>.

Kärkkäinen, A. Lämmitys- ja jäähdytysverkostojen ilmaongelmien syyt ja niiden hallinta.

Liimatainen, A. Käyttöpäällikkö. 2022. Puhelinkeskustelu 17.1.2022.

Luhtala, M. 2019. Muoviputkiston valinta. Plasthouse. Verkkoaineisto. Viitattu 6.4.2022. <https://plasthouse.fi/muoviputkiston-valinta/>.

Lämmitysverkoston säätöventtiilin mitoitus. LVI 12-10126. 1989. n.d. Rakennustietosäätiö.

Maley, M. Moody chart calculator. Michael Maley's Engineering Site. Www-laskuri. Viitattu 2.5.2022. https://www.advdelpsys.com/michael_maley/Moody_chart/.

Material properties. n.d. Agru.

Mekaniikka. 2022. n.d. Taulukot.com. Verkkoaineisto. Viitattu 13.4.2022. https://www.taulukot.com/fysiikka/mekaniikka_ter-modynamiikka/#veden_tiheys_lampotiloissa_0%C2%B0c_%E2%80%93100%C2%B0c.

Monola, J. Varatoimitusjohtaja. 2022. Sähköpostiviestit 23.3.2022.

Operation manual 2008: Part 1, Specification. Graz. n.d. Chemisch Thermische Prozesstechnik GmbH.

Operation manual 2008: Part 2, Operation. Graz. n.d. Chemisch Thermische Prozesstechnik GmbH.

Paisuntajärjestelmän valinta ja mitoitus. LVI 11-10472. 2011. n.d. Rakennustietosäätiö.

Pihlajamaa, P. 2017. Ilmanpoistin / erotin putkijärjestelmässä. Opetusmateriaali. Tampereen Ammattikorkeakoulu.

Pihlajamaa P. 2017. Putkistojen puhtaus / puhdistus -osio. Opetusmateriaali. Tampereen Ammattikorkeakoulu.

Pirinen, P, Simola, H, Nevala, S, Karlsson, P, Ruuhela, R. 2014. Ilmastonmuutos ja lämmitystarveluku paikkatietoarviona suomessa. Ilmatieteen laitos. Helsinki.

Putkivirtaus. 2009. n.d. Metropolian wikipalvelu. Verkkoaineisto. Viitattu 27.1.2022. <https://wiki.metropolia.fi/display/koneautomaatio/4.+Putkivirtaus>.

Rakennusten kaukolämmitys. 2014. Määräykset ja ohjeet K1/2013. Helsinki. n.d. Energiateollisuus ry.

Rupponen, M. Automaatioinsinööri. 2021. Haastattelu 6.7.2021. Elecster Oyj. Reisjärvi.

Sandberg, E. 2016. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Forssa. Talotekniikka-Julkaisut Oy.

Seppänen, O. 2001. Rakennusten lämmitys. Jyväskylä. Suomen LVI-liitto ry.

Talotekniikka-alan LVI-työehtosopimus 2020–2022. 2020. Helsinki. n.d. LVI-tek-niset urakoitsijat LVI-TU Ry ja Rakennusliitto Ry.

Technical data sheet. n.d. DOWCAL™100.

Technical data sheet. n.d. DOWCAL™100E.

Usein kysytyt kysymykset PEX-järjestelmästä. n.d. Uponor. Verkkoaineisto. Viitattu 14.3.2022. <https://www.uponor.com/fi-fi/palvelut/palvelut-ammattilaisille/usein-kysytyt-kysymykset/ukk-pex-jarjestelma>.

Valli, M. 2014. Pakkasnesteistä ilmavaivoja lämmönsiirtoon. Talotekniikka-lehti.

Valtioneuvoston asetus eräiden orgaanisia liuottimia käyttävien toimintojen ja laitteiden ilmaan johdettavien päästöjen rajoittamisesta 64/2015. n.d. Finlex. Viitattu 1.7.2021. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150064>.

Vesikiertoinen patterilämmitys. LVI 12-10343. 2002. n.d. Rakennustietosäätiö.

Virtausnopeuslaskuri. 2022. n.d. Hydrauliiikkapumppu. Www-laskuri. Viitattu 13.4.2022. <https://www.hydrauliiikkapumppu.fi/laskurit/virtausnopeus>.

Viskositeetti. 2020. n.d. Wikipedia. Verkkoaineisto. Viitattu 27.1.2022. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Viskositeetti>.

Välimaa, H. 2001. Virtauskerroin. Oras Oy.

LIITTEET

Liite 1. Työtunnit hukkalämpöverkon rakentamisesta.

Työtuntien muodostuminen				
tuote	tunnit	l (m)	Lämmönjako- huonelisä	tunnit
Teräsputki DN40	0,55 nh/m	160	1	88
Teräsputkikytkennät DN80	0,7 nh/m	5	1,35	4,725
Teräsputki DN40	0,55 nh/m	10	1,35	7,425
Teräsputki DN20	0,5 nh/m	7	1	3,5
Teräsputki DN65	0,5 nh/m	2	1	1
Lämmönsiirrin (alle 100 kg)				3,5
Paisunta-astia (alle 35 kg)				0,9
Pumppu (alle 35 kg)				1,2
Tasaussäiliö (esim. 300 kg)				4
Säätöjärjestelmä (Du 114,3) (1 kpl)				15
Säätöjärjestelmä (Du 23 - 54) (4 kpl)				44
Säätöjärjestelmä kolmitieventtiilillä (Du 23 - 54) (1 kpl)				4
			yht:	177,25
Lisät:				
Haittalisä 16 %				
Työskentelytilat vaihtelevat, joten olosuhteisää enintään 50 %				294,235
Työtunteja syntyy myös telineiden rakentamisesta, läpivienneistä ja eristämisestä arviolta n. 25 h				25
			Työtunnit yhteensä:	<u>319,235</u>

Liite 2. Hukkalämpöverkon kustannuslaskelma.

Tuote	hinta (€)	muuta huomioitavaa
Putkiosat		
Teräsputket (DN40) 174 m	4315	24,8 €/m
Alucoat T T48-50 (29 kpl)	2550	87,9 €/6 m
Kumipäällysteet	700	arvio
mutkaosien eristeet (48 kpl)	610	arvio
Lämmönjakokeskus & venttiilit		
Danfoss lämmönsiirrin	3000	Kovajuotettu
Teräsputki DN40 (8 m)	198,4	24,8 €/m
TV30 teräs DN100	600	
TV31 teräs DN40	171	
Lämmönsiirtimen eristäminen	200	arvio
Thermokon PT100 lämpöanturi	225	5 kpl
Akva Pro 500 tasaussäiliö	2000	500-litrainen
Oras DN20 3-tieventtiili	337	
Palloventtiilit (esim. oras)	210	7 kpl
Oras DN40 linjasäätöventtiilit	630	3 kpl
Toimilaitteet & asennoittimet	3900	3 kpl (Belimo)
Toimilaitteet & asennoittimet	2250	3 kpl (Belimo) kiinni-auki
kaapelit, kontaktorit, yms	500	
Lämmönsiirtoneste 1,488 €/l	3274	2 200 l
1/2 Flexvent super ilmanpoistimet	154	2 kpl
Teräsputki DN65 ilmanpoistimille	57,5	2 m (28,75 €/m)
Lianerotin	223	(esim. Cyclone DN40) // Mutasihdit halvempia!
Paisuntajärjestelmä		
Altech 200 l paisunta-astia	434	
Yhdysputket DN20 (teräs) 7,5 m	87	11,6 €/m
syöttösekoitusventtiili	167	pallo- yksisuunta- ja varoventtiili
Varoventtiili	29,82	ms altech dn20 3 bar
Liitinosat		
Käyrät + liittimet DN40 48 kpl	960	20 €/kpl
T-yhteet (7 kpl)	140	n. 20 €/kpl
Teräskäyrät (4 kpl)	128	32 € / kpl
Teräsputkiliittimet (7 kpl)	201	Hinnat vaihtelevat suuresti
venttiililiitokset 30 kpl	1125	37,5 € / kpl
Pumppu		
Grundfos CR 3-4 A-A-A-E-HQQE	2013	P1 käytössä 122 W
Työ		
Automaatio-ohjelmointi 40 €/h	3000	75 h
Putkiasennustyö 40 €/h	12760	319 h
Investoinnin hinta (€)	47149,72	

Liite 3. Takaisinmaksuaika patteriverkon lämmittämiselle.

Sähkön hinta	Kaukolämmön hinta
0,08 €/kWh	0,074 €/kWh

Tehoa saadaan talteen 50 kW

Painokone päällä **3 000 h/a** ja lämpöä pystytään hyödyntämään koko lämmityskaudella (8,5 kk) Eli 70 % kaikista käyttötunneista. Lisäksi operointitilan lämpeneminen kestää 1 h arkipäivänä, ennen kuin lämpöä voidaan hyödyntää ja näitä arkipäiviä on 175 kpl. Operointitilan lämpenemisvaiheessa painokone tarvitsee lämpöä ensisijaisesti, jolloin hukkalämpöverkko on pois käytöstä.

Hyödynnettävä teho on 50 kW yleensä, mutta 40 % painoajasta voidaan hyödyntää vain 20 kW:n teho, joten hyödynnettävä teho on ajossa keskimäärin 38 kW

Loput ajoista VOC-polttolaitos on STANDBY-tilassa, jolloin hyödynnettävä teho on noin 2 kW

Operointitunnit vuodessa	hyödynnettävä teho laskelmiin
1925 h	38 kW

STANDBY-tunnit vuodessa	STANDBY-teho laskelmiin
4032 h	2 kW

Energia vuodessa
81214 kWh/a

Kaukolämmön kulutussäästöt vuodessa
6009,836 €/a

Sähkönkulutus pumppaukseen	P1 käyttö	122 W
1068720 Wh		
1068,72 kWh/a		

Pumppauskustannukset
85,4976 €/a

Säästöt kokonaisuudessa
5924,3384 €/a

Järjestelmän hinta
47150 €

Takaisinmaksuaika
7,958694594 a

Liite 4. Työtunnit kaukolämpöliittymän rakentamisesta.

Työtuntien muodostuminen kaukolämpöliittymän asennustöistä				
tuote	tunnit	l (m)	lämmönjako- huonelisä	tunnit
Teräsputki DN40	0,55 mh/m	5	1,35	3,7125
Säätöjärjestelmä kolmitieventtiilillä (Du 23 - 54) (1 kpl)				4
			yht:	7,7125
Lisät:				
Haittalisä 16 %				
Työskentelytilat voivat olla ahtaita jolloin olosuhteissa on 50 %				12,0315
			Työtunnit yhteensä:	<u>12,0315</u>

Liite 5. Kaukolämpöliittymän kustannuslaskelma.

Tuote	hinta (€)	muuta huomioitavaa
Kaukolämpöliittymä (sis. Putkitukset ja kaivuutyöt)	15000	
Teräsputket (DN40) 5 m	124	24,8 €/m
lämmönsiirrin	0	kuuluu kaukolämpöliittymään
lämmönsiirtimeen eristys	0	kuuluu kaukolämpöliittymään
Thermokon PT100 lämpöanturi	45	
Oras DN20 3-tieventtiili	337	
sulkuventtiili	140	
Toimilaitte & asennoitin	1300	1 kpl (Belimo)
kaapelit + kontaktori	100	
Lämmönsiirtoneste 1,488 €/l		enintään 10 l mitätön hinta suurella mittakaavalla!
Käyrät + liittimet DN25 4 kpl	72	18 €/kpl
T-yhteet (1 kpl)	13	
venttiililiitokset (4 kpl)	120	30 €/kpl
Automaatio-ohjelmointi 40 €/h	320	8 h (arvio)
Putkiasennustyö 40 €/h	480	12 h
Investoinnin hinta yht: (€)	<u>18051</u>	

Liite 6. Takaisinmaksuaika kesäaikaiselle lämmönmyynnille.

Sähkön hinta	Kaukolämmön luovutuksesta maksetaan
0,08 €/kWh	0,025 €/kWh

Tehoa saadaan talteen 50 kW

Painokone päällä **3 000 h/a** ja lämpöä siirretään kaukolämmön paluuverkkoon kesällä (3,5 kk) eli 30 % kaikista käyttötunneista. Lisäksi operointitilan lämpeneminen kestää 1 h arkipäivänä, ennen kuin lämpöä voidaan hyödyntää ja näitä arkipäiviä on 75 kpl. Operointitilan lämpenemisvaiheessa painokone tarvitsee lämpöä ensisijaisesti, jolloin hukkalämpöverkko on pois käytöstä.

Hyödynnettävä teho on 50 kW yleensä, mutta 40 % painoajasta voidaan hyödyntää vain 20 kW:n teho, joten hyödynnettävä teho on ajossa keskimäärin 38 kW

Loput ajoista VOC-polttolaitos on STANDBY-tilassa, jolloin hyödynnettävä teho on noin 2 kW

Operointitunnit vuodessa	hyödynnettävä teho laskelmiin
825 h	38 kW

STANDBY-tunnit vuodessa	STANDBY-teho laskelmiin
1728 h	2 kW

Energia vuodessa
34806 kWh/a

Tulot vuodessa
870,15 €/a

Järjestelmän hinta
18051 €

Takaisinmaksuaika
20,74469919 a

Liite 7. Takaisinmaksuaika ympärivuotiselle lämmönmyynnille.

Sähkön hinta	Kaukolämmön luovutuksesta maksetaan
0,08 €/kWh	0,025 €/kWh

Tehoa saadaan talteen 50 kW

Painokone päällä **3 000 h/a** ja lämpöä siirretään kaukolämmön ensiöpuolen paluuverkkoon ympärivuotisesti. Lisäksi operointitilan lämpeneminen kestää 1 h arkipäivänä, ennen kuin lämpöä voidaan hyödyntää ja näitä arkipäiviä on 175 kpl. Operointitilan lämpenemisvaiheessa painokone tarvitsee lämpöä ensisijaisesti, jolloin hukkalämpöverkko on pois käytöstä.

Hyödynnettävä teho on 50 kW yleensä, mutta 40 % painoajasta voidaan hyödyntää vain 20 kW:n teho, joten hyödynnettävä teho on ajossa keskimäärin 38 kW

Loput ajoista VOC-polttolaitos on STANDBY-tilassa, jolloin hyödynnettävä teho on noin 2 kW

Operointiunnit vuodessa	hyödynnettävä teho laskelmiin
2825 h	38 kW

STANDBY-tunnit vuodessa	STANDBY-teho laskelmiin
5760 h	2 kW

Energia vuodessa
118870 kWh/a

Kaukolämpöyhtiö maksaa:
2971,75 €/a

Sähkönkulutus pumppaukseen	P1 käyttö	122 W
1068720 Wh		
1068,72 kWh/a		

Pumppauskustannukset
85,4976 €/a

Säästöt kokonaisuudessa
2886,2524 €/a

Järjestelmän hinta
65200 €

Takaisinmaksuaika
22,58984696 a