



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Kalle Tuovinen

Lämpölaitoksen kaukolämpöverkon mitoittaminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

20.11.2019

Tekijä Otsikko	Kalle Tuovinen Lämpölaitoksen kaukolämpöverkon mitoittaminen
Sivumäärä Aika	32 sivua + 1 liite 20.11.2019
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Energia- ja ympäristötekniikka
Ohjaajat	Lehtori Tomi Hämäläinen Toimitusjohtaja Antti Vaittinen
<p>Opinnäytetyö tehtiin osana Tuusulan Energian hanketta, jossa hevostilan rakennuksien lämmitys korvataan biolämpölaitoksen energialla. Valmiin Säätötuli Oy:n 150 kW:n lämpölaitoksen lisäksi oli mitoitettava putkisto, paisuntasäiliö ja pumput, jotka olivat oleelliset komponentit lämpöenergian siirtämiseen liittyen.</p> <p>Opinnäytetyössä kerrottiin aluksi kaukolämmöstä Suomessa, minkä jälkeen käsiteltiin olennaista perustietoa kaukolämpöverkoston toiminnasta. Seuraavissa osioissa käsiteltiin mitoitettavien komponenttien valintaan vaikuttavia tekijöitä sekä laskentakaavat. Kaukolämpöputkien valinnassa tärkeää olivat materiaalit ja putken rakenne. Laskennan tuloksena saatiin putken sisähalkaisija, jonka perusteella putkikoko valittiin. Paisuntasäiliön mitoittamisessa määritettiin säiliön tilavuus. Pumppujen valinnassa oli ensin laskettava verkoston painehäviöt sekä tutkittava pumppujen ominaiskäyriä.</p> <p>Tuloksien perusteella päädyttiin valitsemaan putkien materiaaliksi PEX-muovi, kooksi DN 25 sekä rakenteeksi kaksiputkijohto. Paisuntasäiliön kooksi saatiin 110 l ja laitokseen valmiiksi asennettuna toimitettujen pumppujen tehon riittävyys varmistettiin.</p>	
Avainsanat	kaukolämpö, biolämpö, verkoston mitoitus

Author Title	Kalle Tuovinen Designing a District Heating Network for a Heating Plant
Number of Pages Date	32 pages + 1 appendices 20 November 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Energy and Environmental Engineering
Instructors	Tomi Hämäläinen, Lecturer Antti Vaittinen, CEO
<p>This Bachelor's thesis was done as a part of Tuusulan Energia's project where the objective is to provide heat energy to a racehorse farm's buildings with Säättötuuli company's 150 kW bioheating plant. The main three components to work with the otherwise functional bioheating plant are the pipes, expansion tank and pumps.</p> <p>The thesis first covers district heating in Finland, and then introduces the essential information on the operation of the district heating network. After that, the thesis studies the factors that affect the choice of components to be dimensioned, and the calculation formulas. The materials and the pipe structure were found important in the selection of district heating pipes. As a result of the calculation, the inner diameter of the tube was obtained, and the pipe size was selected accordingly. The expansion tank was dimensioned to determine its volume. In selecting the pumps, the first task was to calculate the pressure drop in the network and to study the pump characteristics.</p> <p>As a result, the material of the pipes was chosen to be PEX plastic, size DN 25 and with a two-pipe construction. The required size for the expansion tank was 110 liters and the provided pumps were proven to be sufficient.</p>	
Keywords	district heating, bioheating, network dimensioning

Sisällys

Käsitteet

1	Johdanto	1
2	Kaukolämmöstä Suomessa	1
3	Kaukolämpöverkoston mitoitus	2
3.1	Kaukolämpöputket	3
3.2	Paisuntasäiliö	9
3.3	Pumput	11
3.4	Lämmönsiirtimet ja lämmönjakokeskus	18
4	Projektin toteutus	20
4.1	Kaukolämpöputket	21
4.2	Paisuntasäiliö	22
4.3	Pumput	22
5	Yhteenveto	22
	Lähteet	24
	Liitteet	
	Liite 1. Laskenta	

Käsitteet

Mpuk	Kaksiputkijohto. Meno- ja paluuputki yhteisen suojakuoren sisällä. <i>M</i> tarkoittaa muovista suojakuorta, <i>pu</i> polyuretaanivaahtoeristettä ja <i>k</i> sitä, että putket ovat kiinteästi eristeessä.
2Mpuk	Yksiputkijohto. Meno- ja paluuputki ovat erilliset.
PEX	Ristisilloitettu polyeteeni.

1 Johdanto

Opinnäytetyö tehdään osana projektia, jossa hevostilan kiinteistöjen nykyinen sähkö- ja öljylämmitys korvataan keskitetyllä biolämpölaitoksella. Muutoksella haetaan taloudellista säästöä sekä lämmityksen keskittämistä, jotta polttoainevalinnalla. Laitoksessa voidaan polttaa lähellä tuotettua puuhaketta, joka on uusiutuva luonnonvara. Opinnäytetyössä mitoitetaan keskeisimmät komponentit, jotka energian siirtämiseen tarvitaan: kaukolämpöputket, paisuntasäiliö ja pumpit. Lisäksi esitellään lämmönvaihtimien toimintaa. Projektin toteuttaa Tuusulan Energia Oy, joka tulee vuokraamaan tilalle hankittua Säättöli Oy:n 150 kW:n biolämpölaitosta. Mitoituksien valmistuttua projekti etenee seuraavaan vaiheeseen, jossa tilattavista tuotteista kysytään myyjiltä tarjoukset.

Tuusulan Energia on perustettu vuonna 2003. Yritys perustettiin Hyrylän teollisuusalueelle Parma Consolis Oy:n tarpeesta tuottaa prosessilämpöä uusiutuvilla energiantuotantomenetelmillä. Parman betonitehtaan viereen pystytettiin Laatikattila Oy:n 2,5 MW:n kaasutuspolttokattila, jossa poltetaan haketta. Haketta saadaan hakettamalla risuja, joita saadaan Hakesampo Oy:n hallinnoimalta risuterminaalilta. Destaclean Oy:ltä tuodaan rakennusjätteestä tehtyä haketta. Kattilalla tuotetaan myös kaukolämpöä teollisuusalueella. Toinen alue missä yritys tuottaa kaukolämpöä, on Ristikiven teollisuusalue. Siellä on 500 ja 250 kW:n biolämpölaitokset, joista pienempää pidetään päällä vain kesäaikaan. Opinnäytetyön projektin 150 kW:n lämpölaitos ei ole vielä käytössä. (1.)

2 Kaukolämmöstä Suomessa

Suomen yleisin lämmitysmuoto on kaukolämpö, jota tuotetaan yleensä polttolaitoksissa joko pelkästään lämpönä tai sähkön kanssa yhteistuotantona (2). Laitokset käyttävät polttoaineena esimerkiksi hiiltä, puuta tai öljyä, jonka palamisessa syntyvällä lämpöenergialla kaukolämpövesi lämmitetään. Kaukolämpövesi siirretään putkistoja pitkin alueen asiakkaille, joita voivat olla yksityiset henkilöt ja teollisuuden toimijat. Kaukolämpöverkkoja on taloudellisesti kannattavinta rakentaa alueille, joissa asutus on tiheää, koska silloin lämpöenergiaa ei kuljeteta verkostossa pitkiä matkoja turhaan ja verkoston rakennuskustannuksissa säästetään. Pienimmät lämpölaitokset voivat olla kooltaan luokkaa 60 kW, jolloin lämmitetään käytännössä yhtä tai kahta taloa. Jos laitos on kuitenkin

erillään lämmitettävästä rakennuksesta, kaukolämmön periaatteet toteutuvat. Lämpölaitokset ovat pitkälle automatisoituja, jolloin logiikkaohjelma säättää polttoaineen syöttöä ja asetuksia automaattisesti mittalaitteiden arvojen mukaan. Laitokseen liittyviä töitä on kuitenkin polttoainevaraston ylläpito, toimintahäiriöt ja vuosihuolto. Isomman luokan laitoksissa toimintaa valvotaan jatkuvasti.

3 Kaukolämpöverkoston mitoitus

Kaukolämmössä on ideana tuottaa lämpöä keskitetysti ja tuoda lämpö kohteisiin veteen sidottuna. Vettä lämmitetään lämpölaitoksen kattilassa, ja se kiertää pumppujen avulla lämmityskohteisiin. Lämmityskohteiden lämmönvaihtimessa veden lämpötila laskee ja se palaa viileämpänä takaisin kattilaan. Kun lämmitettäviä rakennuksia on useita, on erilaisia vaihtoehtoja, miten putkiston reitit suunnitellaan. Lämpölaitokselta voidaan vetää esimerkiksi jokaiseen rakennukseen oma meno- ja paluuputki tai yksi silmukka, jonka varrella jokainen rakennus on. Reitien suunnittelu vaikuttaa samalla pumppujen mitoittamiseen sekä paisuntasäiliön kokoon, sillä verkoston vesitilavuus muuttuu. Tärkeimmät mitoittamisessa tarvittavat lähtötiedot ovat kattilan tuottama maksimiteho ja kunkin rakennuksen tarvitsema lämmitysteho.

Rakennuksen tarvitsemaa lämmitystehoa voidaan arvioida käyttämällä esimerkiksi taulukkoa 1. Siinä on määritelty ominaislämpötehoja eri rakennustyypeille. Tarvittava lämmitysteho saadaan kertomalla ominaislämpöteho rakennuksen lämmitettävällä tilavuu-
della.

Taulukko 1. Rakennusten ominaislämpöteho ja lämpöindeksi (3, s. 154)

Rakennustyyppi	Ominaislämpöteho (W/m ³)		Lämpöindeksi (kWh/m ³)	
	vanhat	uudet	vanhat	uudet
Pientalot	22-30	18-20	55-70	40-50
Kerrostalot	22-28	15-20	55-75	45-55
Liikerakennukset	20-34	20-30	45-80	34-45
Julkiset rakennukset	28-38	25-32	50-80	35-45
Teollisuusrakennukset	25-35	15-25	50-70	30-55

Tämän lisäksi on huomioitava käyttöveden lämmittämiseen tarvittava teho. Käyttöveden vesivirran tulisi olla 0,3 l/s, jolloin sen lämmittäminen 5 °C:sta 55 °C:seen vaatii 57 kW:n tehon (3, s. 57).

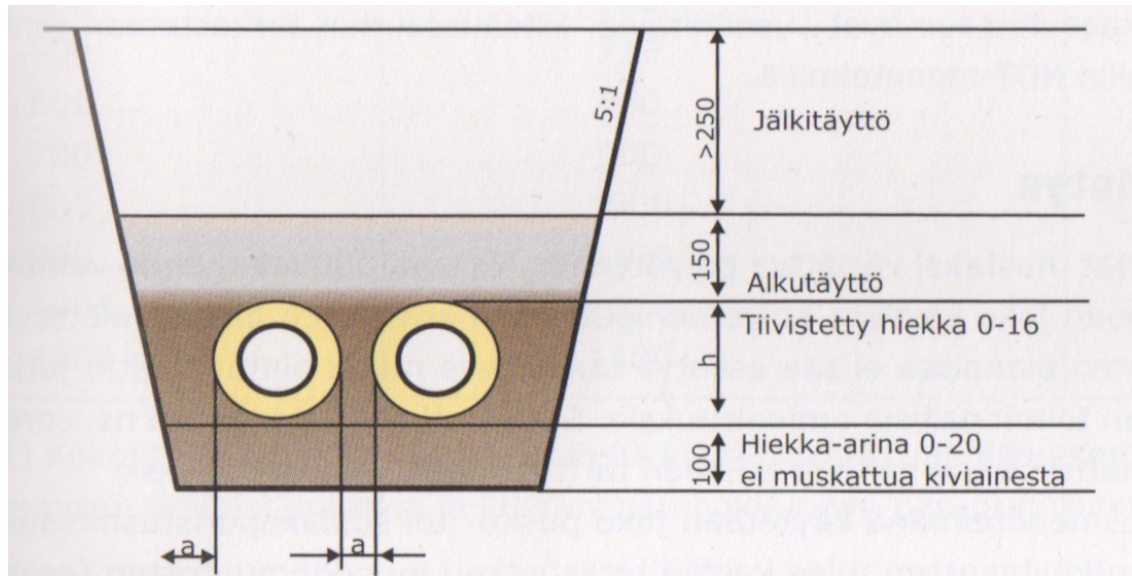
3.1 Kaukolämpöputket

Kaukolämpöputkia eli kaukolämpöjohtoja ryhmitellään niiden kanavarakenteen ja materiaalin mukaan. Putki koostuu virtausputkesta, eristeestä ja suojakuoresta. Yleisin johtotyyppi on kiinnivaahdotettu johto, jossa virtausputki on liitetty kiinteästi yhteen suojakuoreen polyuretaanieristeellä (kuva 1).

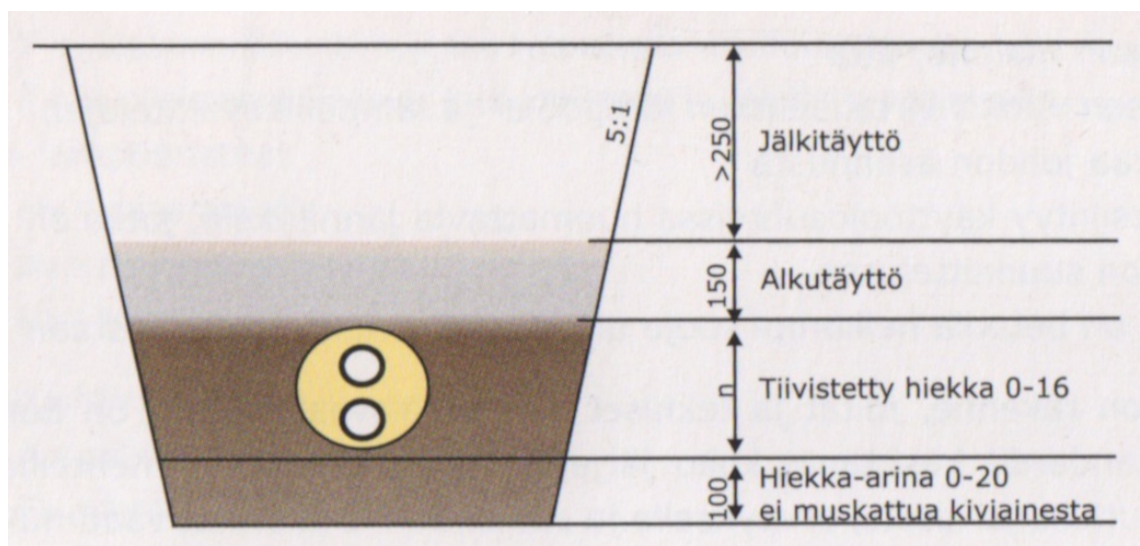


Kuva 1. Kiinnivaahdotettua teräsputkea (4)

Kiinnivaahdotettuja kaukolämpöjohtoja on kahta eri tyyppiä: yksiputkijohto ja kaksiputkijohto. Yksiputkijohto (2Mpuk) tarkoittaa, että meno- ja paluujohto ovat erilliset (kuva 2). Kaksiputkijohtossa (Mpuk) puolestaan meno- ja paluujohto ovat yhteisen suojakuoren sisällä (kuva 3). Suhteessa putkipituuteen kaksiputkijohdolla säästetään materiaalikulussa, päästään pienempiin lämpöhäviöihin sekä jatkosten tekeminen vähenee puoleen. Nimilyhenteessä Mpuk *M* tarkoittaa muovista suojakuorta, *pu* polyuretaanivaahtoeristettä ja *k* sitä, että putket ovat kiinteästi eristeessä.



Kuva 2. Yksiputkijohto 2Mpuk (3, s. 139)



Kuva 3. Kaksiputkijohto Mpuk (3, s. 140)

Virtausputket valmistetaan pääasiassa teräksestä ja muovista. Teräsputkilla toteutetaan suurin osa kaukolämmönsiirrosta. Niiden mitoitus perustuu enintään 120 °C:n käyttölämpötilaan sekä 16 baarin suunnittelupaineeseen. Kun jatkuva käyttölämpötila on 120 °C, tulee johdon teknisen käyttöiän ja lämpötilan kestävyuden olla vähintään 30 vuotta. Muoviputkijohdoilla voidaan toteuttaa matalamman lämpötilan, enintään 95 °C:n alueverkkoja. Muoviputken materiaalina on yleensä PEX (ristisilloitettu polyeteeni), joka on pinnoitettu diffuusionestokerroksella. Diffuusionestolla estetään putkea haurastuttava

hapan siirtyminen ilmasta muoviputken läpi kaukolämpövedeen sekä toiseen suuntaan tapahtuva vesihöyrydiffuusio (3, s. 143). Etuna muoviputkella suhteessa teräsputkeen on alhaisemmat materiaalikustannukset ja asennuksen helppous. Muoviputkijohdot ovat taipuisia, ja ne toimitetaan monesti kieppinä, joka on helppo rullata auki kaivantoon. Joh-tojen reitit ovat myös vapaammin suunniteltavissa taipuisuuden ansiosta, koska johto voidaan vetää kaarevaan linjaan. Huono ominaisuus PEX-muovilla on korkea lämpölaa-jenemiskerroin, joka on huoneenlämpötilassa $140 \cdot E^{-6} \text{ 1/K}$, kun teräkselle se on $12 \cdot E^{-6} \text{ 1/K}$ (5, s. 3). PEX-putken pituus vaihtelee sen takia 10 kertaa enemmän kuin teräsput-ken, mutta tämä huomioidaan putken päiden riittävän kiinteällä asennuksella.

Kuvassa 3 on suositukset putkien kaivannon toteuttamisesta. Kaivannon koko riippuu johtojen koosta ja lukumäärästä. Mitoituksessa on myös hyvä huomioida kaivannon riit-tävä leveys asennustöitä ajatellen (6, s. 16). Kuvassa 4 on kaukolämpöputkia kaivan-nossa.



Kuva 4. Kaukolämpöputkia kaivannossa (7)

Putken lämpölaajeneminen on huomioitava asennuksessa. Putkien asennusmenetelmä voi olla kitkakiinnitetty asennus esilämmityksellä tai kitkakiinnitetty kylmäasennus. Mo-lemmissa menetelmissä, kun kaivanto on täytetty, putki ottaa jännityksinä vastaan

lämpötilan muutoksista aiheutuvat voimat. Esilämmitetyssä asennuksessa putki lämmitetään ennen kaivannon täyttämistä lämpötilaan, joka on noin 50 °C matalampi kuin suurin käyttölämpötila. Tällä saadaan aikaan se, että putki on jännitteettömässä tilassa käyttölämpötilan vaihteluvälillä. Kylmäasennuksessa putkea ei esilämmitetä, joten asennus on nopeampi toteuttaa. Silloin on suunnittelussa varmistettava, että putkisto kestää korkeammat jännitystasot. Molemmissa menetelmissä kitkavoima heikkenee mentäessä kohti putken vapaita päitä, jolloin putki pääsee liikkumaan lämpötilamuutosten vaikutuksesta. Tämä liike kompensoidaan yleensä L- ja Z-kulmilla. Kompensointi hoituu samalla silloin, kun putki nousee kaivannosta maantasolle L-kulmalla rakennuksen läpivientiä varten. (3, s. 161–163.)

Muoviputkien suunnanmuutokset on helppo toteuttaa muovin taipuisuuden ansiosta, toisin kuin teräsputkien. Teräsputkille voidaan tehdä korkeintaan 5° viistesauama, ja suurempaa suunnanmuutosta tehtäessä viistesaumoja tehdään useampia. Toinen hyvä tapa on käyttää valmiita kulmaelementtejä, joita suositellaan kulmille 15–30° ja 60–75°. 90 asteen kulma toteutetaan L-kulmalla. Kulmaelementtejä 30–60° suositellaan käytettäväksi vain silloin, kun molemmilla puolilla kulmaa on sijoitettu kiintopiste, jolla estetään putken liikkuminen. Teräsputkia pystyy myös taivuttamaan asentamisen yhteydessä, mutta kaaren säteen tulee olla vähintään 500 kertaa teräsputken halkaisija. Esitaivutetuilla elementtiputkilla on mahdollista saada pienempi säde. (3, s. 164.)

Teräsputkien haaroittamisessa runkoputken sivuun tehdään reikä haaraa varten, ja putket yhdistetään hitsaamalla. Muoviputkilla käytetään erillistä T-haaraa, joita löytyy teräsputkillekin.

Erityisesti isoissa verkoissa tarvitaan liitos-, muutos- ja korjaustöitä varten venttiilejä, kuten sulkuventtiilit, ohitusventtiilit, säätöventtiilit, tyhjennysventtiilit ja ilmanpoistovenntiilit. Venttiileitä varten rakennetaan kaivoja, jotta venttiileihin päästään helposti käsiksi. Kaivo voidaan tehdä esimerkiksi betonielementistä, joka on peitetty valurautakannella. Lisäksi kaivo viemäroidään aina kun mahdollista (3, s. 146). Pienissä verkoissa kaivoja ei välttämättä tarvita, sillä tarvittavat venttiilit ovat ainoastaan putkien päissä.

Putkien mitoitukseen tarvitaan kahta laskukaavaa. Kaavalla

$$\Phi = c_p \rho q_v \Delta T, \quad (1)$$

jossa Φ on lämpöteho [W], c_p on veden ominaislämpökapasiteetti [J/kg°C], ρ on veden tiheys, q_v on veden tilavuusvirta [m^3/s] ja ΔT on meno- ja paluulämpötilojen erotus [°C], lasketaan veden tilavuusvirta, jota varten on päätettävä lämpötehon ja lämpötilojen erotuksen arvot (3, s. 198). Lämpöteho on se arvo, kuinka suurella teholla enimmillään kyseistä putkea pitkin tullaan siirtämään energiaa, eli yksinkertaisimmillaan voidaan käyttää laitoksen maksimitehoa, jos laitokselta lähtee vain yksi putki. Jos laitokselta taas lähtee eri kohteisiin omat putkensa, käytetään kunkin kohteen omaa tehontarvetta mitoituksessa. Meno- ja paluulämpötilojen erotus on arvioitava myös etukäteen. Lähtökohtaisesti erotus halutaan mahdollisimman suureksi, jotta putken koko pysyy pienenä, esimerkiksi 40–50 °C. Suurissa verkoissa erotus voi olla jopa 70 °C, mutta pienissä paikallisverkoissa, joissa menoveden lämpötila on matalampi, on turvallisempaa käyttää lämpötilaa 40 °C.

Kaavalla

$$D = \sqrt{\frac{4q_v}{\pi V_{mit}}}, \quad (2)$$

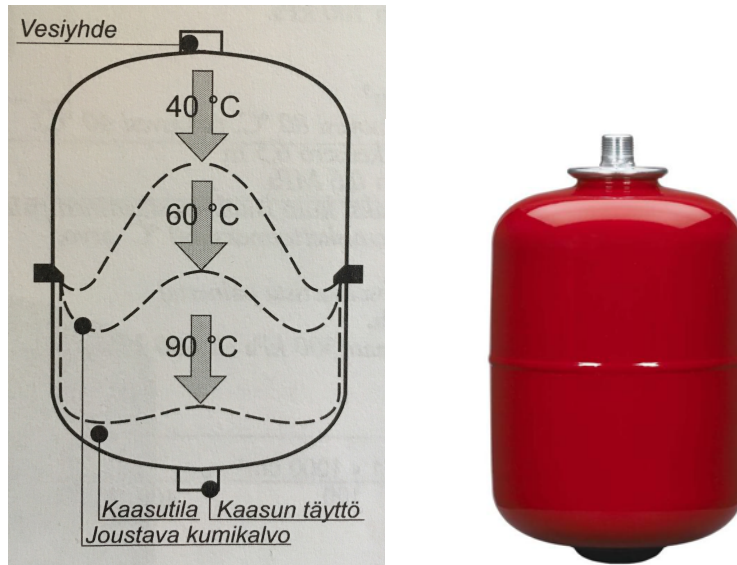
jossa D on putken sisähalkaisija [m] ja V_{mit} on veden mitoitus virtausnopeus [m/s], lasketaan putken sisähalkaisija. Laskussa käytetään edellä määritettyä tilavuusvirtaa ja valitaan sopiva virtausnopeus. Liian suuri virtausnopeus aiheuttaa putkiston kulumista ja korroosiota, ja sille käytetään teräsputkella arvoa 1,0 m/s. Kupariputkelle vastaava olisi 0,5 m/s. Muoviputki kestää suurempia virtausnopeuksia, mutta sille voidaan käyttää samaa arvoa kuin teräsputkelle. Putkikoot on standardoitu DN-luokkiin, ja taulukosta 2 voidaan valita putkikoko, joka on laskettua halkaisijaa seuraavaksi suurempi. Jos esimerkiksi laskettu halkaisija on 22 mm, valitaan koko DN 25.

Taulukko 2. Kaukolämpöputkivalmistajan yksiputkijohtojen tuotetietoja (8)

Teräsputki		Eristeluokka 1		Eristeluokka 2		Eristeluokka 3		L [m]
DN	d · s [mm]	D [mm]	Paino [kg/m]	D [mm]	Paino [kg/m]	D [mm]	Paino [kg/m]	
20	26,9 · 2,6	90	2,8	110	3,2	125	3,6	12
25	33,7 · 2,6	90	3,2	110	3,7	125	4,0	12
32	42,4 · 2,6	110	4,2	125	4,6	140	4,9	12
40	48,3 · 2,6	110	4,5	125	4,9	140	5,3	12
50	60,3 · 2,9	125	6,0	140	6,4	160	6,9	12
65	76,1 · 2,9	140	7,3	160	7,9	180	8,6	12
80	88,9 · 3,2	160	9,3	180	9,9	200	10,8	12
100	114,3 · 3,6	200	13,5	225	14,6	250	15,7	12, 16
125	139,7 · 3,6	225	16,4	250	17,5	280	19,1	12, 16
150	168,3 · 4,0	250	21,0	280	22,6	315	24,6	12, 16
200	219,1 · 4,5	315	30,8	355	33,5	400	36,8	12, 16
250	273,0 · 5,0	400	44,2	450	48,7	500	53,1	12, 16
300	323,9 · 5,6	450	57,6	500	62,4	560	68,5	12, 16
350	355,6 · 5,6	500	65,3	560	71,9	630	79,8	12, 16
400	406,4 · 6,3	560	83,0	630	91,6	710	101,6	12, 16
500	508,0 · 6,3	630	101,0	710	111,9	800	125,0	12, 16
600	610,0 · 7,1	710	131,6	800	145,7	900	162,0	12, 16

3.2 Paisuntasäiliö

Suljetussa verkostossa lämpötilan muutoksista johtuva veden tilavuuden vaihtelu kompensoidaan paisuntasäiliöllä. Paisuntasäiliön jakaa kumikalvo, jonka toisella puolella on typpikaasua, joka on paineistettu. Veden lämpötilan ja tilavuuden kasvu työntää kumikalvoa ja typpikaasua kasaan, muuttaen verkoston paineen kasvun kaasun paineen kasvuksi (kuva 5). Oikealla kaasun esipaineella varmistetaan, että paisuntasäiliöllä on riittävä kyky kompensoida paineen muutos ja painevaihtelut saadaan estettyä. Samalla pienennetään myös mm. venttiileistä johtuvien paineiskujen vaikutuksia. Tässä opinnäytetyössä käsitellään kalvopaisuntasäiliötä, sillä se on tyypillisin paisuntasäiliö projektia vastaavissa sovelluksissa. (9, s. 9.)



Kuva 5. Kalvopaisuntasäiliön periaate (10, s. 95) ja kalvopaisuntasäiliö (11)

Paisuntasäiliön tilavuus voidaan määrittää kaavalla

$$V = \frac{aV_0}{100} * \frac{1}{\frac{p_a - p_e}{p_a}}, \quad (3)$$

jossa V on paisuntasäiliön tilavuus [dm^3], a on nesteen lämpölaajenemiskerroin, V_0 on laitoksen vesitilavuus [dm^3], p_a on varoventtiilin absoluuttinen avautumispaine [kPa] ja p_e on paisuntasäiliön absoluuttinen esipaine [kPa] (10, s. 96). Nesteen lämpölaajenemiskerroin riippuu veden lämpötilasta. Mitoitusta varten valitaan laitoksen veden keskilämpötila, jota vastaava kerroin voidaan lukea taulukosta 3. Kaukolämpövedeen voidaan lisätä glykolia, jolla on hyviä vaikutuksia järjestelmän toimintaan: se vähentää korroosiota sekä parantaa lämmönsiirtokykyä pienentämällä pintajännitystä. Vesi-glykoliseos kestää myös paremmin pakkasta, joten laitoksen mahdollisissa vikatilanteissa jäätymisriski on pienempi. Glykolin lämpölaajenemiskerroin on suurempi kuin veden, mikä on huomioitava laskennassa.

Taulukko 3. Veden lämpölaajenemiskerroin (10, s. 96)

Veden lämpölaajenemiskerroin a %

<i>Laitoksen keskilämpötila °C</i>	<i>Vesi a %</i>
10	0,04
20	0,18
30	0,44
40	0,79
50	1,21
60	1,71
70	2,28
80	2,96
85	3,21
90	3,59
95	3,94

Laitoksen vesitilavuus koostuu kattilan, putkiston ja lämmönvaihtimien tilavuudesta. Las-
kutarkkuuden kannalta lämmönvaihtimien tilavuuden voi jättää käytännössä huomiotta,
sillä se on hyvin pientä verrattuna verkoston siirtoputkiin ja kattilan tilavuuteen.

Varoventtiili suojelee järjestelmää liialliselta paineelta avautumalla silloin, kun verkoston
paine ylittää asetusarvon. Varoventtiili mitoitetaan järjestelmän heikoimman osan mu-
kaan. Pienimpien kattiloiden rakennepaine on 150 kPa, mikä on usein rajoittava tekijä.

Paisuntasäiliön esipaineen määrittämiseen on erilaisia tapoja, ja yhden määritelmän mu-
kaan se saadaan, kun laitoksen staattiseen paineeseen lisätään 35...50 kPa. Staattinen
paine tulee laitoksen ylimmän laitteen ja paisuntasäiliön välisestä korkeuserosta, jossa
1 m vastaa 10 kPa. (10, s. 96.)

3.3 Pumput

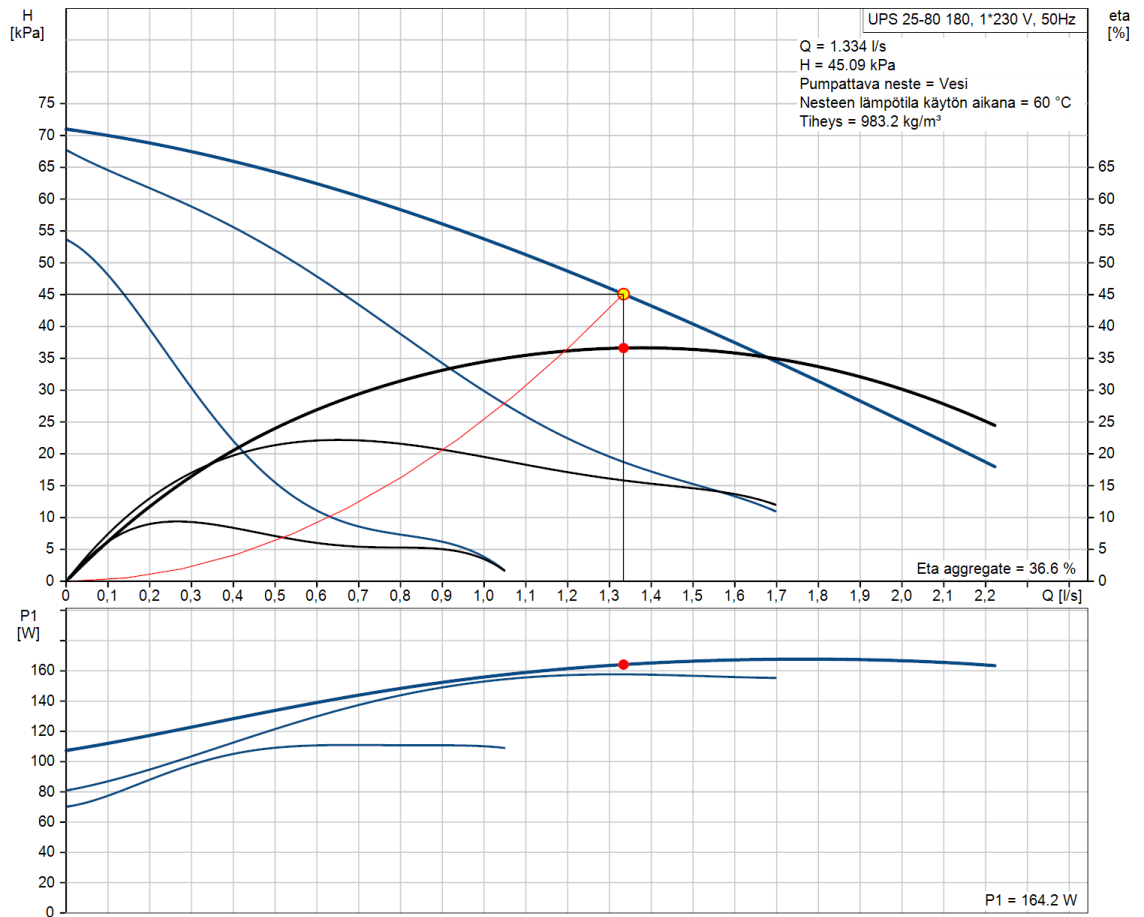
Pumpuilla luodaan verkostoon paine, jolla taataan veden liikkuminen koko verkostossa.
Kuva 6 on keskipakoispumpusta, jollaisia käytetään tyypillisesti veden kierrättämiseen
kaukolämpöverkossa.



Kuva 6. Kuva pumpusta (12)

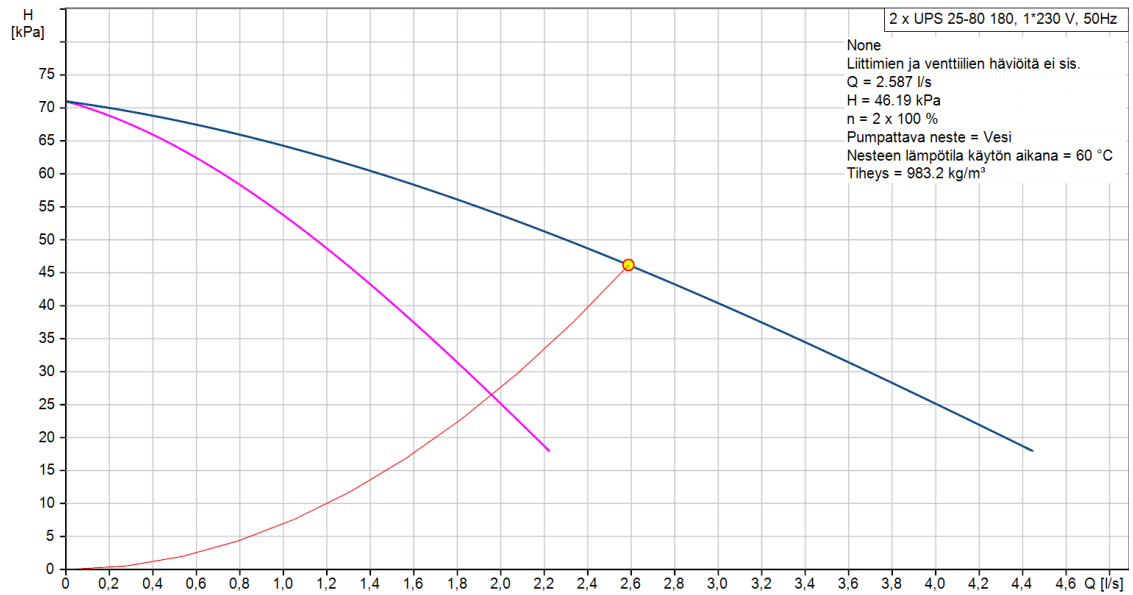
Pumput nimetään tietyllä tavalla, esimerkiksi UPS 25-80 180. Ensimmäinen luku 25 tarkoittaa putkiliitännän kokoa DN 25, toinen luku nostokorkeutta 80 dm ja kolmas luku asennusväliä 180 mm.

Pumppujen tuottoon eli tilavuusvirtaan sekä nostokorkeuteen voidaan vaikuttaa toimintatapistetta muuttamalla. Paras tapa tälle on pyörimisnopeuden muuttaminen. Kuvassa 7 on pumpun valmistajan sivuilta otettu kuvaaja, jossa pumpulla on kolme eri asetusta pyörimisnopeudelle, ja niitä esittävät vasemmalta ylhäältä lähtevät siniset viivat. Kuvassa esitetään myös käyrät hyötysuhteelle (η) sekä teholle (P_1), jotka riippuvat pyörimisnopeudesta. Punainen käyrä esittää verkon ominaiskäyrää, joka muodostuu verkoston painehäviöiden perusteella. Pumpun on tuotettava vähintään verkoston painehäviöiden verran. Puna-keltaisen pallon kohdalla sijaitsee nimellinen toimintapiste, jossa tuotokäyrä ja verkon ominaiskäyrä leikkaavat toisensa. Tässä pisteessä pumppu tuottaa täsmälleen verkoston tarvitseman paineen sekä toimii parhaalla hyötysuhteella. Pumppu ei siis tuota yhtään hukkaan menevää vesivirtausta ja muuttaa tehokkaimmin sähköenergiaa veden liikenopeudeksi.



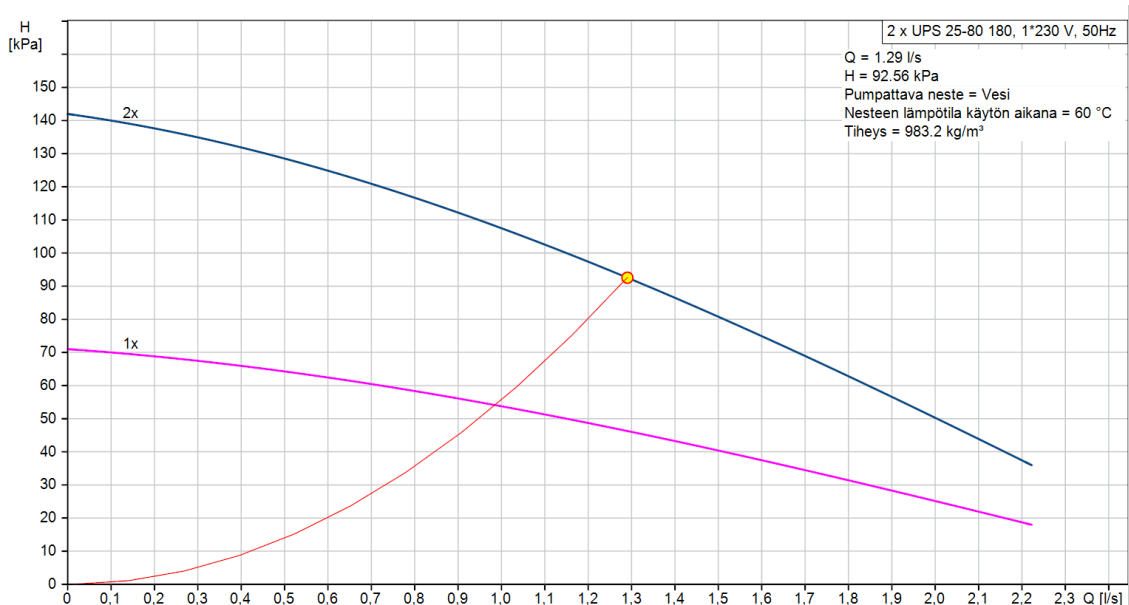
Kuva 7. Esimerkki tuottokäyrästä pumpulle Grundfos UPS 25-80 180 (13)

Pumppuja voidaan myös yhdistää sarjaan- ja rinnankytkennällä. Rinnankytkennällä saadaan kasvatettua tilavuusvirtaa ja sarjaankytkennällä puolestaan tavoitellaan paineen kasvattamista. Kuvassa 8 on kaksi samanlaista pumppua kytketty rinnan. Verkon ominaiskäyrä leikkaa pumppujen yhteen lasketun tuottokäyrän, mihin kohtaan toimintapiste asettuu.



Kuva 8. Kaksi samanlaista pumpppua rinnankytkettynä (13)

Kuvassa 9 on samanlaiset pumput sarjassa. Tilavuusvirran ollessa lähellä nolaa potentiaalinen paineen lisäys olisi kaksinkertainen, mutta verkon ominaiskäyrä huomioiden ja isommilla virtauksilla näin ei ole.



Kuva 9. Kaksi samanlaista pumpppua sarjankytkettynä (13)

Valmistajan tarjoamat kuvaajat ovat tärkeä työkalu pumppujen valinnassa. Toimintavarmuuden ja huoltamisen kannalta voi olla järkevää asettaa yhden isomman pumpun sijasta rinnan useampi pumppu, joita voidaan ajaa samaan aikaan tai vuorotellen.

Pumpun tehon riittävyyden arvioimiseksi on tiedettävä, kuinka suuri painehäviö verkostossa tapahtuu. Painehäviö koostuu lämmönsiirtimen painehäviöstä, jonka valmistaja on ilmoittanut, sekä putkiston painehäviöstä, joka on laskettava. Putkiston painehäviö lasketaan kaavalla

$$\Delta p = \xi \frac{8L\rho q_v^2}{D^5\pi^2}, \quad (4)$$

jossa Δp on painehäviö (Pa), ξ on kitkakerroin, L on putkipituus [m], ρ on veden tiheys [kg/m^3], q_v on veden tilavuusvirta [m^3/s] ja D on putken sisähalkaisija [m] (3, s. 199).

Kitkakerroin selvitetään kuvasta 10 Reynoldsin luvun ja sileysluvun avulla. Putken materiaalin sileysluvun perusteella määritetään vakio

$$\frac{k}{D},$$

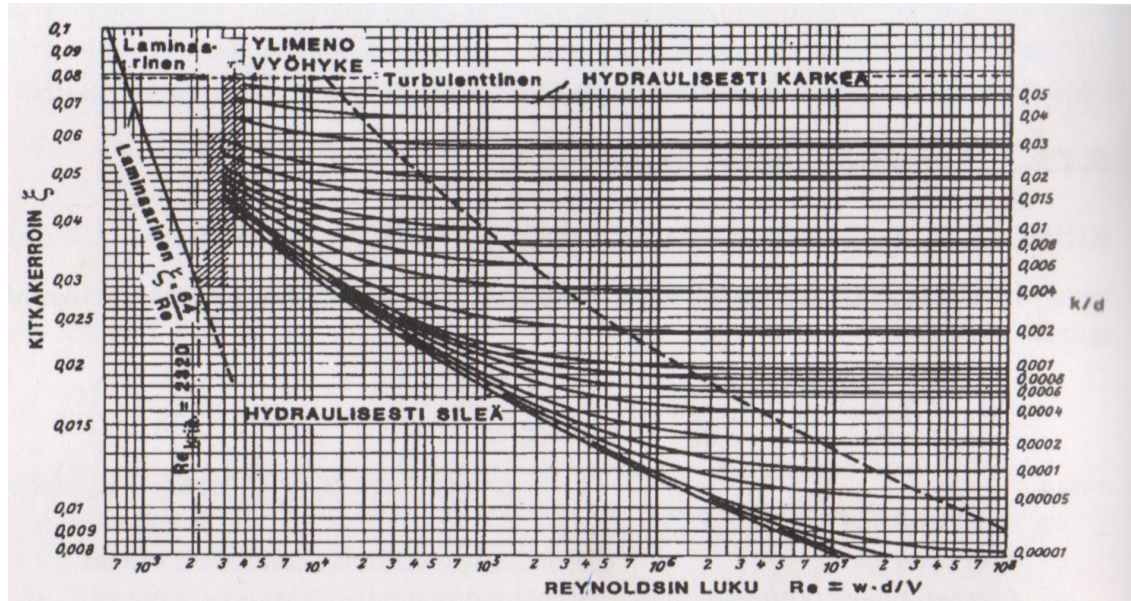
jossa k on sileysluku [m] ja D on putken sisähalkaisija [m].

Reynoldsin luku lasketaan kaavalla

$$Re = \frac{4q_v\rho}{\pi\eta D}, \quad (5)$$

jossa Re on Reynoldsin luku, q_v on tilavuusvirta [m^3/s], ρ on veden tiheys [kg/m^3], η on dynaaminen viskositeetti [kg/ms] ja D on putken sisähalkaisija [m].

Tiheys ja dynaaminen viskositeetti katsotaan kyseiselle veden keskilämpötilalle.

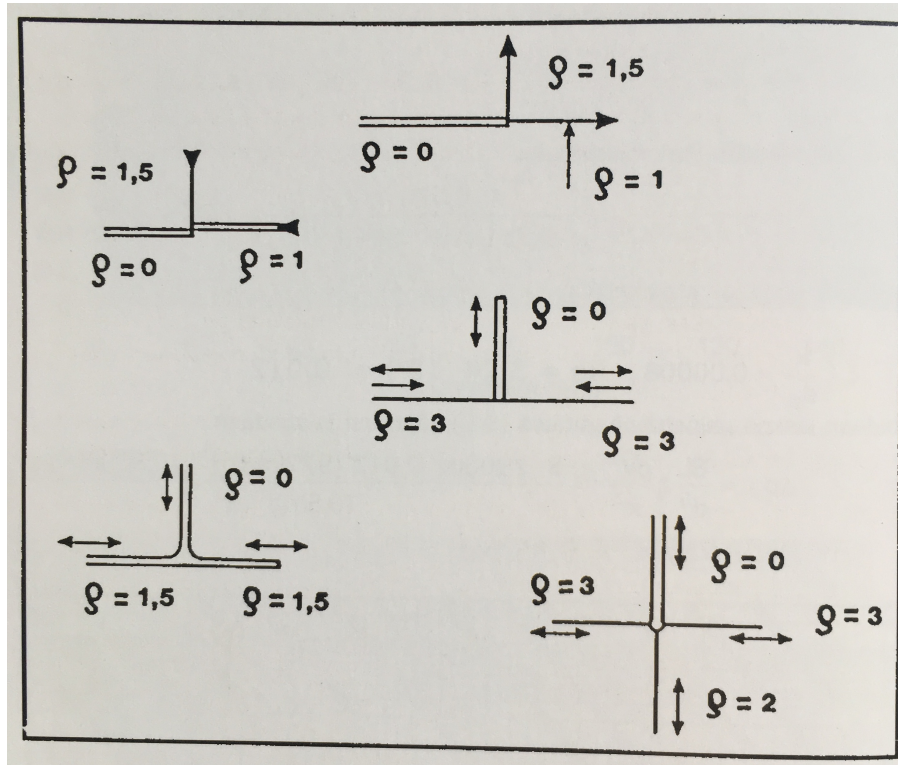


Kuva 10. Kitkakertoimen kuvaaja (3, s. 200)

Putkistossa on todellisuudessa käyriä ja haaroja, jotka ovat kertavastuksia ja lisäävät painehäviötä. Jos kertavastuksia on suhteessa putkiston pituuteen paljon, voi niiden painehäviön laskea kaavalla

$$\Delta p_k = \xi \frac{8\rho q_v^2}{D^4\pi^2}, \quad (6)$$

jossa Δp_k on kertavastuksen painehäviö ja ξ on kertavastusluku. Kertavastusluvun arvot voivat olla usein välillä 0–3, niin kuin kuvassa 11 on esitetty.



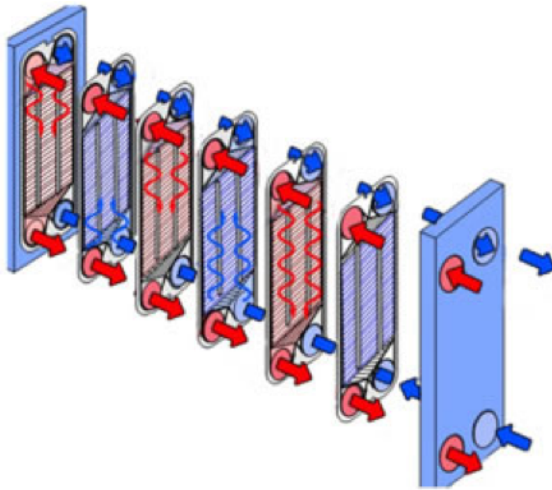
Kuva 11. Kertavastuslukuja (3, s. 202)

Suljetussa putkistossa painetason ollessa riittävä ei veden kiertoon vaikuta putkiston nousut eivätkä laskut (3, s. 340). Suljettu järjestelmä on tiivis ja täysin ilmattu, eikä pumpauksella tarvitse päihittää staattista painetta (14, s. 10). Pumpun tuotto määritetään putkiston painehäviöiden mukaan.

Lasketulla verkoston painehäviöllä sekä arvioidulla tilavuusvirralla muodostetaan toimintapiste, johon pumpun tehon on ainakin riitettävä. Laskennalla saatu verkoston painehäviö sekä arvioitu virtaus eivät välttämättä vastaa todellista käyttötilannetta, joten ylimeritys on turvallisempi tapa valita pumpu. Käytön aikana saadaan selville tarvittava tuotto sekä virtaama, minkä perusteella pumpun pyörimisnopeutta voidaan muuttaa esimerkiksi taajuusmuuttajalla toimintapisteen siirtämiseksi energiankulutuksen kannalta taloudellisempaan kohtaan. Taajuusmuuttaja muuttaa tehonsyötön taajuutta sekä jännitettä, jolloin pyörimisnopeus muuttuu (15).

3.4 Lämmönsiirtimet ja lämmönjakokeskus

Lämmönsiirtimessä ensiöpuolen kaukolämpövesi kohtaa toisiopuolen kiinteistössä kiertävän veden. Ne säilyvät erotettuina toisistaan, jolloin vain lämpöenergia pääsee siirtymään niiden välillä. Nykyään käytetään levylämmönsiirtimiä, joiden toimintaa esitellään kuvassa 12.



Kuva 12. Levylämmönsiirtimen periaate (16)

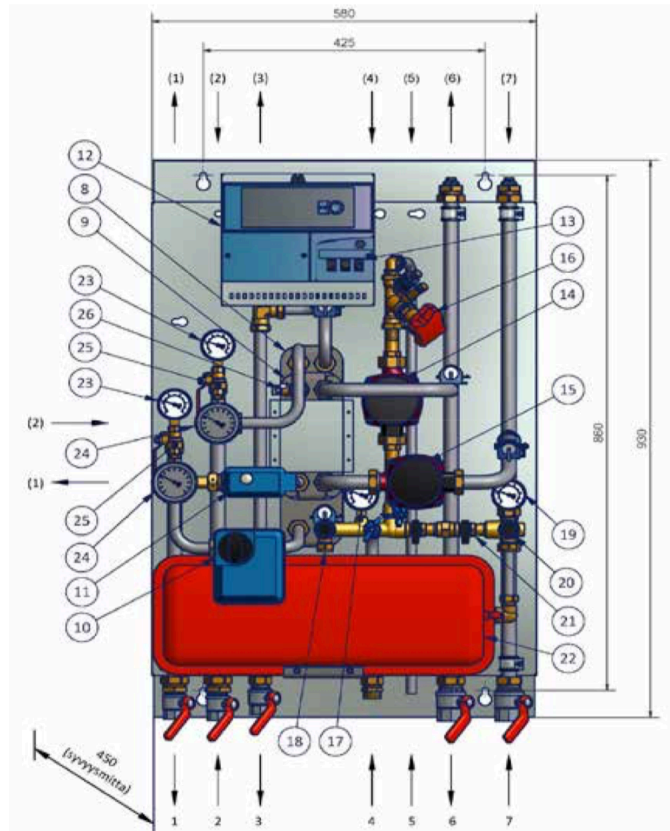
Punainen nuoli kuvaa ensiöpuolen lämmintä kaukolämpövettä ja sininen nuoli toisiopuolen lämmitettävää vettä. Levylämmönsiirtimen tehokkuus riippuu siitä, miten suuri pinta-ala lämmönvaihdolle saadaan rakennettua. Levyjen pinta on muotoiltu pinta-alan maksimoimiseksi.

Markkinoilla on paljon hyviä pakettiratkaisuja, joten kiinteistöön hankitaan enemmän lämmönjakokeskus, joka sisältää lämmönsiirtimien lisäksi tarvittavat laitteet ja logiikan. Lämmönjakokeskuksessa on ainakin käyttövedelle ja lämmitykselle omat lämmönsiirtimensä, joiden ilmoitetun tehon perusteella lämmönjakokeskus valitaan käyttökohteeseen sopivaksi. Valinnassa on hyvä huomioida mille ensiöpuolen lämpötilalle lämmönsiirtimen teho on määritetty. Jos teho on laskettu esimerkiksi lämpötilalle 115 °C, ei yhtä suureen tehoon päästä 90 °C lämpötilalla. (17, s. 2.)

UNIS 100-2RF

Nro Komponentti

- 1 Kaukolämpö, paluu
 - 2 Kaukolämpö, tulo
 - 3 Lämmin käyttövesi
 - 4 Kylmävesisyöttö
 - 5 Käyttöveden kierto
 - 6 Lämmitys meno
 - 7 Lämmitys paluu
 - 8 Lämmönsiirrin LS1 (käyttövesi)
 - 9 Lämmönsiirrin LS2 (lämmitys)
 - 10 Säätoventtiili /toimilaite TV1 (käyttövesi)
 - 11 Säätoventtiili /toimilaite TV2 (lämmitys)
 - 12 Käyttövesi- ja lämmityssäädin
 - 13 Pumpujen ohjaukkytkimet
 - 14 Kiertovesipumppu P1 (käyttövesi)
 - 15 Kiertovesipumppu P2 (lämmitys)
 - 16 Käyttöveden kierron linjasäätöventtiili
 - 17 Käyttöveden painemittari
 - 18 Käyttöveden varoventtiili, DN 15 / 1000 kPa
 - 19 Lämmitysverkon painemittari
 - 20 Lämmitysverkon varoventtiili, DN 15 / 250 kPa
 - 21 Lämmitysverkon täyttöventtiili
 - 22 Lämmitysverkon paisunta-astia, 12L
 - 23 Kaukolämmön painemittari, tulo / paluu
 - 24 Kaukolämmön lämpömittari, tulo / paluu
 - 25 Energiamittarin anturiyhteet (painemitt. sulun takana)
 - 26 Lämmityksen kesäkulku
- (Kuvassa on sulut () esitetty vaihtoehtoinen kytkentäsuunta)



Kuva 13. Lämmönjakokeskus UNIS 100-2RF (17, s. 3)

Kuvan 13 lämmönjakokeskuksessa on kaikki komponentit valmiiksi asennettuina, joten käyttöönotto vaatii ainoastaan ensiö- ja toisiopuolen putkiliitokset sekä sähköjen kytkemisen säätimeen.

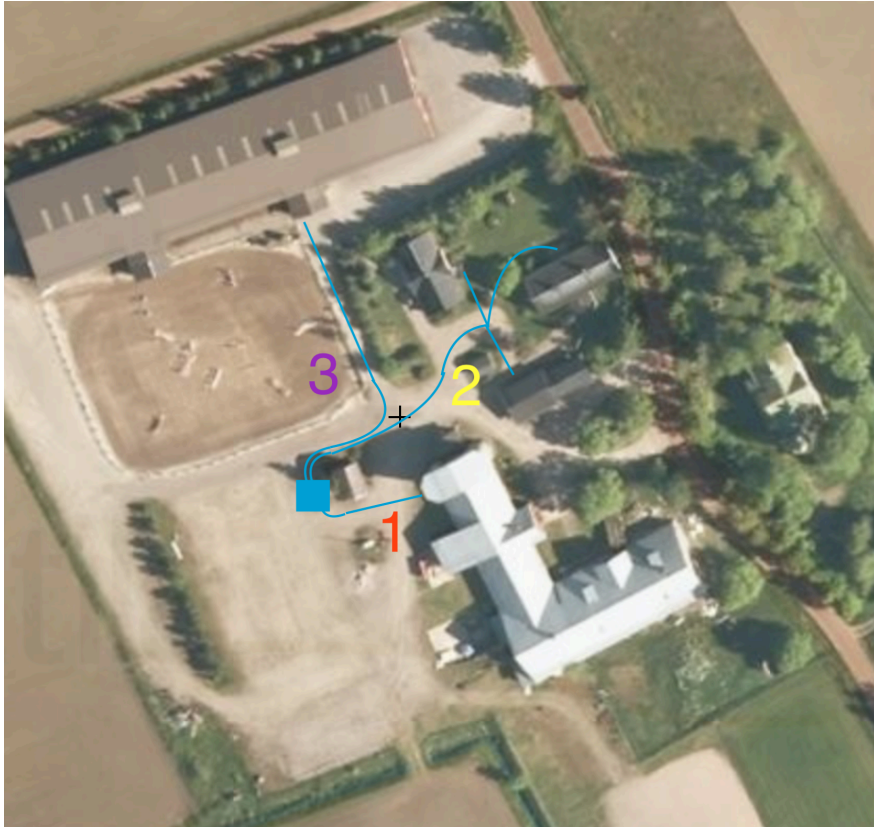
Taulukossa 4 on ote edellä mainitun lämmönjakokeskuksen tiedoista. Taulukosta saadaan tehon arvot ja lämpötilat, joilla teho on määritetty. Lisäksi siitä saadaan luettua lämmönvaihtimien painehäviöt. Huomionarvoista taulukossa on, että käyttöveden lämmönsiirrin on mitoitettu matalammalla ensiöpuolen lämpötilalla kuin lämmityksen lämmönsiirrin. Tällä varmistetaan lämpimän käyttöveden riittävyys myös kesäaikaan, kun kaukolämpövesi on usein viileämpää.

Taulukko 4. Lämmönjakokeskuksen tietoja UNIS 100-2RF (18)

LÄMMÖNSIIRTIMET		Yksikkö	KÄYTTÖVESI		LÄMMITYS1	
Valmistaja						
Malli			E8LASW-Nx44/1P		E5ASx34/1P	
PED Luokka						
Teho		kW	60		15	
			Ensiö	Toisio	Ensiö	Toisio
Virtaus		dm ³ /s	0,290	0,301	0,071	0,183
Lämpötilat		°C-°C	70 - 20	10 - 58	115 - 63	60 - 80
Painehäviö		kPa	13,2	34,3	0,2	1,0
Suunnittelupaine		MPa	1,6	1,6	1,6	1,6
Virtaava-aine			Vesi	Vesi	Vesi	Vesi
Rakennearine EN10028/7-			1.4401	1.4401	1.4401	1.4401
SÄÄTÖKESKUKSET			KÄYTTÖVESI		LÄMMITYS1	
Valmistaja					Ouman	
Malli					H23	
SÄÄTÖVENTTIILIT			KÄYTTÖVESI		LÄMMITYS1	
Valmistaja			Ouman		Ouman	
Malli			VD215-1.6		VD215-0.4	
Virtaus		dm ³ /s	0,29		0,071	
Painehäviö		kPa	42,6		40,8	
Koko/kvs-arvo		DN/kvs	15	1,6	15	0,4

4 Projektin toteutus

Kaukolämpöjohtojen reittien suunnittelussa käytettiin Maanmittauslaitoksen karttaa apuna, ja etäisyydet mitattiin paikan päällä rullamitalla. Kuvassa 14 on hahmoteltu putkien reitit. Sininen neliö kuvaa lämpölaitosta. Reitit suunniteltiin mahdollisimman lyhyiksi kiertäen maanpäälliset esteet, ja ne esitellään kaivuu-urakoitsijalle paikan päällä. Tämä huolehtii kaivantoja tehdessään, että maanalaiset esteet kierretään.



Kuva 14. Kaukolämpöjohtojen reittien suunnitelma

Laitokselta lähtee kolme eri meno ja paluuputkea. Putki 1 menee hevostalliin, jossa tehonkulutus on enimmillään 70 kW, josta suurin osa koostuu käyttöveden lämmityksestä ja loput tilojen lämmityksestä. Putki 2 menee autotalliin ja kahteen asuinrakennukseen, ja niiden suurin tehontarve on 50 kW. Putki 3 menee maneesille eli ratsastushallille, jonne voidaan tarvittaessa ajaa laitoksen tuottamaa ylimääräistä lämpöä 50 kW. Kaukolämpövedeen päätettiin lisätä 30 % etyleeniglykolia. Tällöin neste tiheys ja lämpölaajenemiskerroin on erilainen kuin pelkän veden, mikä huomioitiin laskennassa. Nesteen ominaisuudet määritettiin keskimääräisessä lämpötilassa 70 °C. Laskutoimitukset on esitetty liitteessä 1.

4.1 Kaukolämpöputket

Kaukolämpöputkeksi valittiin kaksiputkijohto, koska sillä säästetään materiaalikustannuksissa. Lisäksi päädyttiin käyttämään PEX-muoviputkea, sillä se on edullista ja helppo

asentaa, eikä lämpötilan tarvitse näin alueellisessa järjestelmässä olla korkeampi kuin 90 °C. Kaksiputkijohdon tarpeeksi mitattiin 276 m. Kaavoilla 1 ja 2 laskettiin kullekin kolmelle eri putkelle halkaisijat ja valittiin koko DN 25 suurimman halkaisijan mukaan. Laskennassa käytettiin meno- ja paluulämpötilojen erotuksena 40 °C ja virtausnopeutena 1,0 m/s.

4.2 Paisuntasäiliö

Paisuntasäiliön koko laskettiin kaavalla 3. Varoventtiilin absoluuttisena avautumispainena käytettiin 250 kPa ja esipaineen absoluuttisena paineena 180 kPa. Nesteen lämpölaajenemiskertoimeksi valittiin 3% keskimääräisen lämpötilan ollessa 70 °C. Laitoksen vesitilavuudeksi määritettiin 960 l. Paisuntasäiliön vähimmäistilavuudeksi saatiin 103 l, jolloin säiliön koko on käytännössä 110 l tai suurempi.

4.3 Pumput

Lämpölaitokseen on asennettu eri lähdöille valmiiksi omat pumppunsa: Grundfos UPS 25-60 180, UPS 25-80 180 ja UPS 32-120 F 220. Verkoston painehäviöt laskettiin kaavoilla 4, 5 ja 6. Kertavastuksien painehäviöt päätettiin jättää huomioimatta laskennassa. Putkiosuudelle 1 määriteltiin painehäviöiksi 90 kPa ja tilavuusvirraksi 0,44 l/s, jolle varattiin tehokkain pumppu UPS 32-120 F 220. Putkiosuudelle 2 saatiin painehäviöiksi 60 kPa ja tilavuusvirraksi 0,32 l/s ja pumpuksi valittiin UPS 25-80 180. Putkiosuudelle 3 riittää pienin pumppu UPS 25-60 180, kun lasketut painehäviöt olivat 40 kPa sekä tilavuusvirta 0,32 l/s. Painehäviöiden ja tilavuusvirtojen osoittamaa pistettä verrattiin kunkin pumpun ominaiskäyrään. Pumppujen tehot todettiin riittäviksi. Kyseisissä pumpuissa ei ole portaatonta taajuusmuuntajaa vaan kolme valmista asetusta kierrosnopeuksiksi, joten energiatehokkuuden tarkka säätäminen vaatisi erilliset taajuusmuuntajat.

5 Yhteenveto

Opinnäytetyössä esiteltiin perusteet paikallisen kaukolämmön siirron mitoittamiseen. Työtä voi soveltaa suoraan vastaaviin yksityisiin hankkeisiin, joissa pihapiiriin hankitulla

lämpövoimalalla aiotaan tuottaa rakennuksien vaatima lämmitys. Jos mittakaava on isompi ja poistutaan omalta tontilta, joudutaan miettimään maanrakennukseen liittyviä lupa-asioita, joihin tämä opinnäytetyö ei ota kantaa. Putkien, paisuntajärjestelmän ja pumppujen lisäksi vastaavassa projektissa joutuu mitoittamaan muitakin asioita, kuten sähkön ja veden tuonnin laitokselle. Niiden valinta ei kuitenkaan vaadi laskentaa, joten ne rajattiin pois aiheen käsittelystä. Rakennuksiin on tarpeen valita myös radiaattorit ja tarpeen mukaan venttiilit ja mittalaitteet. Öljylämmitteiseen taloon projekti on helppo toteuttaa, sillä lämpölaitokselta tulevan veden voi kierrättää suoraan öljykattilan läpi, jolloin se lämmittää talon patteriverkoston vettä. Sähkölämmityksen korvaaminen vaatii patteriverkoston rakentamisen.

Lähteet

- 1 Tuusulan Energia. 2019. Verkkoaineisto. <<https://tuusulanenergia.fi>>. Luettu 20.10.2019.
- 2 Kaukolämpö tuotetaan lähellä asiakasta. 2019. Verkkoaineisto. <https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/kaukolammon_tuotanto>. Luettu 16.10.2019.
- 3 Koskelainen, Lasse. Saarela, Rauli. Sipilä, Kari. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Kirjapaino Libris Oy.
- 4 Arvo-putki kaukolämpöputki. Verkkoaineisto. Netlet Oy. <<https://www.rakennusoutlet.com/tuote/myydaan-tarjousten-perusteella/arvo-putki-kaukolampoputki-kulmaelementti-90>>. Luettu 1.10.2019.
- 5 Calpex - Aluelämpöputket. 2005. Verkkoaineisto. <https://www.pipesystems.com/domains/pipesystems_com/data/free_docs/Calpex-kansio.pdf>. Luettu 19.10.2019.
- 6 Annala, Henri. 2011. Kaukolämpörakentamisen työohje maanrakennusurakoitsijalle. Insinööriyö.
- 7 Isotalo, Aku. 2017. Valokuva. <<https://www.ess.fi/uutiset/paijathame/art2381730>>. Luettu 2.10.2019.
- 8 Uponor Wehotharm. 2017. Verkkoaineisto. <https://is-suu.com/uponorfi/docs/41003-wehotharm-05-2014_8fba3c8f63a23d/2>. Luettu 9.11.2019.
- 9 Kauppila, Jani. 2015. Paineen käyttäytyminen suljetussa kiertovesiverkostossa ja paisuntasäiliön asennuksen vaikutus suljetun kiertovesiverkoston staattisiin paineisiin. Insinööriyö.
- 10 Harju, Pentti. 2010. Lämmitystekniikan oppikirja. Anjalankoski: Solverpalvelut Oy.
- 11 Paineistettu paisuntasäiliö 8 l. 2019. Verkkoaineisto. <http://profil.fi/index.php?main_page=product_info&cPath=149_52&products_id=1414&zenid=lcfrlt46rttj4q7bnh592vj492>. Luettu 5.10.2019.
- 12 Verkkoaineisto. <http://www.onlinepumpsupplies.com/media/catalog/product/cache/7/image/398x/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/u/p/ups-commercial_160_1.jpg>. Luettu 10.10.2019.

- 13 Grundfos UPS 25-80 180. Verkkoaineisto. <https://product-selection.grundfos.com/product-detail.product-detail.html?from_suid=15712141419760552016068312365&pumpsystemid=675985223&qcid=675995531>. Luettu 16.10.2019.
- 14 Grundfos E-pumput. Verkkoaineisto. <<https://docplayer.fi/67867947-Grundfos-datakirja-grundfos-e-pumput-pumput-sisaisella-taajuusmuuttajalla-50-60-hz.html>>. Luettu 12.11.2019.
- 15 Mikä on taajuusmuuttaja. Verkkoaineisto. <<https://www.danfoss.com/fi-fi/about-danfoss/our-businesses/drives/what-is-a-variable-frequency-drive/>>. Luettu 17.11.2019.
- 16 Verkkoaineisto. <<http://pheindustry.es/1-3-free-flow-plate-heat-exchanger.html>>. Luettu 16.10.2019.
- 17 Högfors UNIS. Verkkoaineisto. <https://hogforsgst.com/files/HogforsGST_UNISesite-WEB.pdf>. Luettu 16.10.2019.
- 18 Tunnistetiedot Unis. 2015. Verkkoaineisto. <https://hogforsgst.com/files/Tunnistetiedot_Unis_100-2RF-O.pdf>. Luettu 19.10.2019.

Laskenta

Tilavuusvirrat ja putkien halkaisija

Putki 1

$$q_v = \frac{\Phi}{c_p \rho \Delta T} = \frac{70 \text{ kW}}{3,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * 1020 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 40^\circ\text{C}} = 0,00044 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0,44 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4q_v}{\pi V_{mit}}} = \sqrt{\frac{4 * 0,00044 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\pi * 1,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}}} = 0,024 \text{ m} = 24 \text{ mm}$$

Putki 2 ja putki 3, molemmissa sama teho.

$$q_v = \frac{\Phi}{c_p \rho \Delta T} = \frac{50 \text{ kW}}{3,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * 1020 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 40^\circ\text{C}} = 0,00032 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0,32 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4q_v}{\pi V_{mit}}} = \sqrt{\frac{4 * 0,00032 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\pi * 1,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}}} = 0,020 \text{ m} = 20 \text{ mm}$$

Paisuntasäiliö

$$V = \frac{aV_0}{100} * \frac{1}{\frac{p_a - p_e}{p_a}} = \frac{3 * 960 \text{ l}}{100} * \frac{1}{\frac{250 \text{ kPa} - 180 \text{ kPa}}{250 \text{ kPa}}} = 103 \text{ l}$$

Putkiston painehäviöt

$$\frac{k}{D} = \frac{0,0005 \text{ mm}}{25 \text{ mm}} = 0,00002$$

Putki 1

$$Re_1 = \frac{4q_v\rho}{\pi\eta D} = \frac{4 * 0,00044 * 1020 \frac{kg}{m^3}}{\pi * 715 * 10^{-6} \frac{kg}{ms} * 0,025 m} = 31970$$

Kitkakerroin kuvaajasta

$$\xi_1 = 0,014$$

$$\Delta p_1 = \xi_1 \frac{8L\rho q_v^2}{D^5\pi^2} = 0,014 * \frac{8 * 86 m * 1020 \frac{kg}{m^3} * 0,00044^2}{0,025^5\pi^2} = 20 kPa$$

Putki 2 ja putki 3

$$Re_{23} = \frac{4q_v\rho}{\pi\eta D} = \frac{4 * 0,00032 * 1020 \frac{kg}{m^3}}{\pi * 715 * 10^{-6} \frac{kg}{ms} * 0,025 m} = 23250$$

$$\xi_{23} = 0,015$$

$$\Delta p_2 = \xi_{23} \frac{8L\rho q_v^2}{D^5\pi^2} = 0,015 * \frac{8 * 276 m * 1020 \frac{kg}{m^3} * 0,00032^2}{0,025^5\pi^2} = 36 kPa$$

$$\Delta p_3 = \xi_{23} \frac{8L\rho q_v^2}{D^5\pi^2} = 0,015 * \frac{8 * 190 m * 1020 \frac{kg}{m^3} * 0,00032^2}{0,025^5\pi^2} = 25 kPa$$

Kokonaispainehäviöt = putkiston painehäviöt + lämmönvaihtimet

Putki 1 = 90 kPa

Putki 2 = 60 kPa

Putki 3 = 40 kPa