



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Juho Rantanen

Lämmitysverkoston laajentamisen vir- taustekniset vaikutukset

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

2.12.2019

| | |
|---|--|
| Tekijä Otsikko | Juho Rantanen Lämmitysverkoston laajentamisen virtaustekniset vaikutukset |
| Sivumäärä Aika | 50 sivua + 6 liitettä 2.12.2019 |
| Tutkinto | insinööri (AMK) |
| Tutkinto-ohjelma | talotekniikka |
| Ammatillinen pääaine | LVI-suunnittelu |
| Ohjaajat | suunnittelupäällikkö Matias Koskinen yliopettaja Jukka Yrjölä |
| <p>Insinööriyössä tutkittiin laskennallisesti lämmitysverkoston laajentamisen virtausteknisiä vaikutuksia olemassa olevaan verkostoon. Työn tavoitteena oli kehittää yleispätevä ohjeistus virtausteknisten lähtöarvojen selvittämiseen ja verkoston säätämiseen laajentamisen jälkeen.</p> <p>Työ tehtiin pääosin laskennallisena tarkasteluna, eikä työhön liitetty mittauksia tai muuta kentällä tapahtuvaa toimintaa. Osana insinööriytötä suoritettiin simulaatiotarkasteluja erään kohteen lämmitysverkostoon. Taustamateriaalina työssä hyödynnettiin alan kirjallisuutta ja haastateltiin alalla työskenteleviä ammattilaisia.</p> <p>Insinööriyö jaettiin aihepiirien mukaan neljään pääosaan. Ensimmäisessä osassa esitellään virtaustekniikan teoriaa. Toisessa osassa käsitellään lämmitysverkoston tasapainotuksen teoreettisia perusteita sekä pumppujen toimintaa osana verkostoa. Kolmannessa osassa tutkitaan verkostoon kohdistuvan muutoksen vaikutuksia olemassa olevaan verkostoon, sekä esitellään simulaatiotarkasteluiden pohjalta tehtyjä havaintoja. Neljännessä osassa kuvataan, kuinka lähtöarvojen selvittäminen ja järjestelmän säätäminen muutoksen jälkeen voitaisiin suorittaa käytännössä.</p> <p>Tarkastelujen tuloksena laadittiin ohjeistus tarvittavista mittauksista, laskelmista ja säätötoimista, joilla verkoston laajentamisen vaikutuksia voidaan arvioida ilman, että koko verkostoa tarvitsee mallintaa. Oleellista on, että olemassa olevan verkoston toiminta ei häiriinny merkittävästi muutoksen jälkeen. Työn perusteella voidaan sanoa, että mitä lähemmäs lämmöntuottolaitteistoa lisättävä haara liitetään ja mitä pienempi sen suhteellinen lisäteho on, sitä pienempi on riski olemassa olevan verkoston merkittäväälle häiriintymiselle.</p> | |
| Avainsanat | lämmitysverkosto, verkoston laajentaminen, virtaustekniikka |

| | |
|---|--|
| Author Title Number of Pages Date | Juho Rantanen Effects of Expansion of Heating Network on System Fluid Mechanics 50 pages + 6 appendices 2 December 2019 |
| Degree | Bachelor of Engineering |
| Degree Programme | Building Services Engineering |
| Professional Major | HVAC Design |
| Instructors | Matias Koskinen, Planning Manager Jukka Yrjölä, Principal Lecturer |
| <p>The purpose of this final year project was to study how an expansion of the heating network of a building affects the fluid mechanics of the network. Based on the results, the aim was to create two sets of instructions. The first set of instructions was to address the calculation of starting values, and the second the adjustment of the heating network once it had been extended. The study was mainly computational although some simulations of the heating network of a school building were also done.</p> <p>The final year project established that, as a rule of thumb, the closer to a heat generating piece of equipment a branch is added, the lower the risk of significant disruption in the existing heating network. In any case, by following the instructions created in the thesis, the designer and client can be sure that both the added part and the existing network operate correctly after the extension.</p> | |
| Keywords | heating network, expansion of heating network, fluid mechanics |

Sisällys

Lyhenteet

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Virtaustekniikan teoria | 2 |
| 2.1 | Paine | 2 |
| 2.2 | Virtaus putkistossa | 3 |
| 2.3 | Paine suljetussa verkostossa | 5 |
| 2.3.1 | Paineet suljetussa verkostossa | 5 |
| 2.3.2 | Bernoullin yhtälö eli energiayhtälö | 6 |
| 2.4 | Virtausvastukset | 7 |
| 2.4.1 | Kitkallisen virtauksen energiayhtälö | 7 |
| 2.4.2 | Viskositeetti | 8 |
| 2.4.3 | Reynoldsin luku | 9 |
| 2.4.4 | Putkivirtauksen luonteet | 9 |
| 2.4.5 | Kitkavastuskerroin | 10 |
| 2.4.6 | Kertavastuskerroin | 12 |
| 2.4.7 | Kitkavastusten aiheuttama painehäviö | 12 |
| 2.4.8 | Kertavastuksen aiheuttama painehäviö | 13 |
| 2.4.9 | Kiertopiirin painehäviö | 13 |
| 3 | Lämmitysverkoston virtaustekninen toiminta | 14 |
| 3.1 | Verkoston virtaustekninen tasapainottaminen | 14 |
| 3.1.1 | Paineen jakautuminen verkostossa | 15 |
| 3.1.2 | Virtaustekninen tasapainottaminen | 17 |
| 3.1.3 | Verkoston ominaiskäyrä | 18 |
| 3.2 | Keskipakopumput | 19 |
| 3.2.1 | Nostokorkeus | 19 |
| 3.2.2 | Ominaiskäyrä | 19 |
| 3.2.3 | Affiniteettisäännöt | 20 |
| 3.2.4 | Pumpun säätötavat | 21 |
| 4 | Lämmitysverkoston virtaustekniset muutokset muutostilanteessa | 22 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1 | Virtaustekniset muutokset muutostilanteessa | 23 |
| 4.1.1 | Haaran lisääminen ennen vanhan verkoston ensimmäistä haaraa | 24 |
| 4.1.2 | Haaran lisääminen vanhan verkoston ensimmäisen haaran jälkeen | 28 |
| 4.2 | Simulaatiotarkastelut | 34 |
| 4.2.1 | Kohteen esittely | 35 |
| 4.2.2 | Tarkasteluiden toteutus | 35 |
| 4.2.3 | Tulokset ja niiden analysointi | 36 |
| 5 | Virtausteknisten lähtöarvojen selvittäminen ja järjestelmän säätäminen | 38 |
| 5.1 | Liityntäpisteen valinta ja lähtöarvojen selvitys | 38 |
| 5.1.1 | Liityntäpisteen valinta | 39 |
| 5.1.2 | Liityntäpisteen virtausteknisten lähtöarvojen selvittäminen mittaamalla | 42 |
| 5.2 | Lisättävän haaran suunnittelu | 44 |
| 5.2.1 | Lisättävän haaran mitoittaminen | 44 |
| 5.2.2 | Lisättävän haaran tasapainottaminen ja liittäminen verkostoon | 44 |
| 5.3 | Järjestelmän säätäminen haaran lisäyksen jälkeen | 45 |
| 5.3.1 | Pumpun säätäminen muutoksen jälkeen | 45 |
| 5.3.2 | Lisätyn haaran ja vanhan verkoston keskinäinen tasapainottaminen | 46 |
| 6 | Yhteenveto | 46 |
| | Lähteet | 49 |
| | Liitteet | |
| | Liite 1. Verkostokaavio: Patteriverkosto | |
| | Liite 2. Verkostokaavio: IV-lämmitysverkosto | |
| | Liite 3. Simulaatiotarkasteluiden tapaukset | |
| | Liite 4. Simulaatiotarkasteluiden tulokset | |
| | Liite 5. Virtausteknisten lähtöarvojen selvitysohje | |
| | Liite 6. Järjestelmän säätöohje muutoksen jälkeen | |

Lyhenteet ja merkinnät

| | |
|-----------------------|---|
| A | Pinta-ala (m^2) |
| A | Putken poikkipinta-ala (m^2) |
| F | Voima (N) |
| H | Pumpun tuottama nostokorkeus (m) |
| P | Pumpun teoreettinen teho (kW) |
| Q | Tilavuusvirta (dm^3/s) |
| Re | Reynoldsin luku (-) |
| c_p | Fluidin ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK) |
| d | Putken sisähalkaisija (m) |
| d_h | Virtausputken hydraulinen halkaisija (m) |
| d_s | Putken sisähalkaisija (m) |
| g | Maan vetovoiman kiihtyvyy (9,81 m/s^2) |
| h | Korkeusasema (m) |
| k | Putken seinämän karheus (-) |
| l | Putkiosan pituus (m) |
| n | Kierrosnopeus (rpm) |
| p | Paine (N/m^2) |
| p_d | Dynaaminen paine (Pa) |
| p_s | Staattinen paine (Pa) |
| p_t | Kokonaispaine (Pa) |
| q_m | Massavirta (kg/s) |
| q_v | Tilavuusvirta (m^3/s) |
| v | Fluidin virtausnopeus (m/s) |
| Δp | Painehäviö (Pa) |
| Δp_{vir} | Putkijohdon virtausvastukset (Pa) |
| Δp_ζ | Kertavastuksien aiheuttama painehäviö (Pa) |
| Δp_λ | Kitkavastusten aiheuttama painehäviö (Pa) |
| ΔT | Fluidin lämpötilan muutos (K) |
| Δv | Nopeuden muutos (m/s) |
| Δy | Etäisyyden muutos (m) |
| $\sum \Delta p_\zeta$ | Peräkkäisten putkiosuuksien kertavastusten yhteenlaskettu painehäviö (Pa) |

| | |
|--------------------------|---|
| $\Sigma\Delta p_\lambda$ | Peräkkäisten putkiosuuksien kitkavastusten yhteenlaskettu painehäviö (Pa) |
| \emptyset | Teho (kW) |
| ζ | Kertavastuskerroin (-) |
| η | Dynaaminen viskositeetti (kg/ms) |
| λ | Kitkavastuskerroin (-) |
| ν | Kinemaattinen viskositeetti (m ² /s) |
| ρ | Fluidin tiheys (kg/m ³) |
| τ | Leikkausjännitys (Pa) |

1 Johdanto

Erityisesti suuriin kiinteistöihin tehdään usein osittaisia käyttötarkoituksen muutoksia. Näitä muutosalueita palvelevat LVI-verkostot palvelevat useimmiten koko rakennusta tai suurta osaa siitä. Toisinaan kiinteistöt ovat vanhoja, eikä niiden olemassa olevia LVI-verkostoja ja niihin kohdistuneita muutoksia ole dokumentoitu rakennuksen elinkaaren aikana, joten niitä ei tunneta virtausteknisiltä ominaisuuksiltaan.

Usein muutosalueelle lisättävä verkosto on liitettävä vanhaan olemassa olevaan verkostoon, koska suhteellisen pienelle muutosalueelle on harvoin järkevää rakentaa omaa tuottojärjestelmää. LVI-suunnittelijan tehtäväksi on usein määritetty uuden verkoston liityntäpisteiden selvitystyö olemassa olevaan verkostoon. [1.] Liityntäpisteessä on oltava riittävästi tehokapasiteettia uutta verkostoa varten. Tämän lisäksi vanhan verkoston toiminta ei saa vaarantua lisättävän verkoston seurauksesta. LVI-suunnittelijan on huolehdittava, että myös vanha verkosto toimii muutostyön jälkeenkin asiaankuuluvalla tavalla.

Yleisesti ottaen LVI-suunnittelijalla on kaksi keinoa liityntäpisteen kapasiteetin selvittämiseksi. Ensimmäinen, kevyempi tapa, on asiantuntijan arvio liityntäpisteen virtausteknisestä kapasiteetista. Toinen, huomattavasti raskaampi ja kalliimpi vaihtoehto, on koko verkoston selvitys- ja mallintamistyö.

Molemmissa yllämainituissa tavoissa on varjopuolensa. Koska olemassa olevaa verkostoa ei tunneta virtausteknisesti, erityisesti kokemattomamman LVI-suunnittelijan on vaikeaa hahmottaa liityntäpisteen kapasiteettia ja lisättävän verkoston vaikutusta olemassa olevan verkoston käyttäytymiseen ja toimintaan. Kokeneenkin suunnittelijan tekemä parhain arvio liityntäpisteen tehokapasiteetin riittävydestä ja lisättävän verkoston vaikutuksista vanhan verkoston toimintaan on kuitenkin vain arvio ilman mittauksiin perustuvia faktoja. Muutostöiden tilaajan liiketoiminnan näkökulmasta ei taas useimmiten ole mieluista teettää kallista ja aikaa vievää vanhan verkoston selvitys- ja mallinnustyötä.

Insinööriyön tavoitteena on luoda yleispätevä selvitys- ja säätöohje liityntäpisteen virtausteknisten arvojen selvittämiseksi ja verkoston säätämiseksi liityntäpisteen tilanteessa, jossa verkostoa ei virtausteknisiltä ominaisuuksiltaan tunneta. Ohjeiden avulla

LVI-suunnittelija tai tilaaja voisi teettää tietyt mittaukset ja toimenpiteet kiinteistössä ennen uuden verkoston suunnittelun aloittamista. Tällöin saataisiin liityntäpisteen virtaustekniset tiedot suunnittelun lähtöarvoiksi, jolloin uusi verkosto voitaisiin suunnitella siten, että myös vanha verkosto toimii muutoksen jälkeen varmuudella asianmukaisella tavalla.

Insinööri työ tehdään Vahanen Talotekniikka Oy:lle. Vahanen Talotekniikka Oy on Vahanen-konserniin kuuluva taloteknistä suunnittelua ja konsultointia tuottava yritys. Yritys työllistää noin 30 työntekijää.

2 Virtaustekniikan teoria

Tarkasteltaessa lämmitysverkoston käyttäytymistä muutoksen jälkeen, on oleellista ymmärtää, mitkä tekijät vaikuttavat, ja kuinka voimakkaasti, verkoston virtaustekniseen toimivuuteen, ja kuinka virtaustekniikan eri osa-alueet ovat kytköksissä toisiinsa.

Tässä luvussa käsitellään virtaustekniikan teoriaa insinööri työ myöhemmissä vaiheissa käsiteltävien asioiden pohjustukseksi.

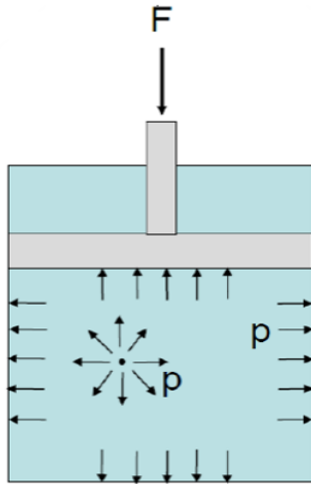
2.1 Paine

Kaavan 1 mukaisesti paine on nesteeseen tai kaasuun kohdistuvan kohtisuoran puristuksen voima pinta-alaa kohden.

$$p = \frac{F}{A} \quad (1)$$

p on paine, N/m²
 F on voima, N
 A on pinta-ala, m²

Paine jakautuu tasaisesti koko nesteeseen ja sitä ympäröiviin pintoihin, jolloin jokaisessa pisteessä vaikuttava paine on yhtä suuri. [2, s. 27.] Kuvassa 1 havainnollistetaan paineen jakautumista suljetussa tilassa.



Kuva 1. Paine jakautuu suljetussa astiassa tasaisesti koko nesteeseen ja rajoittaviin pintoihin [3, s.9]

2.2 Virtaus putkistossa

Virtaavan aineen yleisnimitys on fluidi. Fluidi voi olla joko kaasua tai nestettä. Putkivirtaukset voidaan jaotella kokoonpuristumattomiin (nesteet) sekä kokoonpuristuviin (kaasut) virtauksiin. Kokoonpuristumattomissa virtauksissa tiheys pysyy vakiona, ja kokoonpuristuvissa se muuttuu. [4, s. 6.]

Putkessa esiintyvän virtauksen suuruus ilmoitetaan usein joko tilavuusvirtana tai massavirtana. Tilavuusvirran kaava (2) kertoo poikkipinta-alan läpi kulkevan virtausaineen tilavuuden aikayksikössä. Massavirran kaavasta (3) saadaan aikayksikössä poikkipinta-alan läpi kulkevan virtausaineen massa.

$$q_v = Av \quad (2)$$

q_v on tilavuusvirta, m³/s
 A on putken poikkipinta-ala, m²
 v on fluidin virtausnopeus, m/s

$$q_m = \rho q_v \quad (3)$$

q_m on massavirta, kg/s
 ρ on fluidin tiheys, kg/m³

Virtausnopeus tietyssä putkidimensiossa tietyllä tilavuusvirralla saadaan kaavasta 4.

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

d on putken sisähalkaisija, m

Jatkuvuusyhtälö ilmaisee massavirran säilymisen putkiston eri osissa. Kaavan (5) mukaan virtausaineen nopeus kasvaa lineaarisesti putken poikkipinta-alan pienentyessä ja päinvastoin (kokoonpuristumaton virtausaine).

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (5)$$

Mikäli virtausaineen tiheys pysyy vakiona, tulee kokoonpuristumattoman aineen jatkuvuusyhtälö muotoon (6).

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (6)$$

2.3 Paine suljetussa verkostossa

2.3.1 Paineet suljetussa verkostossa

Suljetun verkoston putkivirtauksessa esiintyy kahdenlaista painetta: staattista ja dynaamista. Näiden paineiden summa on putkistossa vallitseva kokonaispaine (7).

$$p_t = p_s + p_d \quad (7)$$

p_t on kokonaispaine, Pa

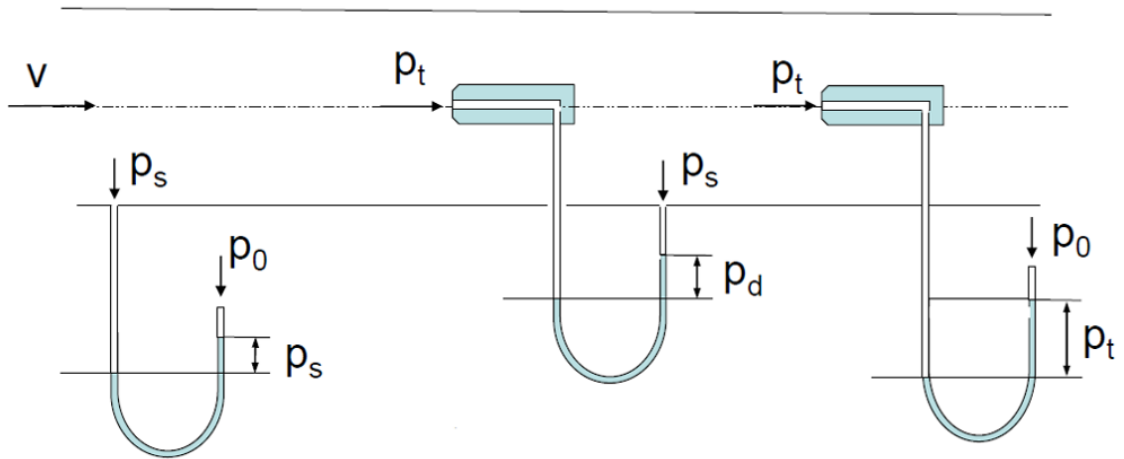
p_s on staattinen paine, Pa

p_d on dynaaminen paine, Pa

Staattinen paine on nesteen sisäistä painetta, joka vaikuttaa putkistossa kaikkiin suuntiin yhtä suurena. Dynaaminen paine on taas nesteen virtauksesta aiheutuvaa painetta, joka vaikuttaa vain nesteen virtaussuunnassa. Dynaamisen paineen suuruuteen vaikuttaa nesteen tiheys sekä virtausnopeus (8). [2, s. 56.]

$$p_d = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (8)$$

Yllä mainittuja paineita ja niiden mittausperiaatteita voidaan havainnollistaa kuvan 2 avulla. Putkistossa vallitseva staattinen paine vaikuttaa samansuuruisena joka suuntaan. Kuvassa sen suuruuden osoittaa kohtisuorassa putken seinämää vasten olevaan mittausputkeen (pietso-putkeen) kohdistuva paine p_s . Dynaaminen paine p_d vaikuttaa vain virtaussuunnassa, joten se voidaan mitata asettamalla mittausputki (pitot-putki) kohtisuoraan virtausta vasten. Koska putkistossa vallitseva staattinen paine vaikuttaa myös pitotputken virtausaukossa, osoittaa pitotputkessa vaikuttava paine kokonaispaineen p_t . Vähentämällä kokonaispaineesta p_t putkistossa vallitseva staattinen paine p_s saadaan putkiston virtaussuunnassa, eli nopeuden suunnassa vaikuttava dynaaminen paine p_d . [2, s. 56.]



Kuva 2. Staattisen, dynaamisen ja kokonaispaineen mittaus [3, s. 38].

2.3.2 Bernoullin yhtälö eli energiayhtälö

Bernoullin yhtälö ilmaisee stationäärisessä ja kitkattomassa putkivirtauksessa esiintyvien energioiden riippuvuuden toisistaan. Yhtälön mukaan virtauksessa vaikuttavien asema-, paine- ja liike-energioiden summa eli kokonaisenergia on aina vakio. Asemaenergia on riippuvainen hydrostaattisesta paineesta, paine-energia on riippuvainen staattisesta paineesta ja liike-energia eli kineettinen energia on riippuvainen dynaamisesta paineesta. Olettaessa virtausaineen tiheys vakioksi paineesta riippumatta voidaan johtaa Bernoullin laki kokoonpuristumattomasta virtauksesta. [2, s. 56.] Tällöin yhtälö saa muodon

$$p_s + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{vakio} \quad (9)$$

g on maan vetovoiman kiihtyvyys, $9,81 \text{ m/s}^2$

h on korkeusasema, m

Suljetussa putkistossa hydrostaattisen paineen muutosta eli staattista painehäviötä ei synny, vaikka korkeuseroja olisikin. Tämä johtuu imuista, jonka alaspäin virtaava neste luo putkistoon. Imu on suuruudeltaan yhtä suuri kuin hydrostaattinen painehäviö, jolloin alaspäin virtaava neste jatkuvasti imee ylöspäin virtaavaa nestettä. [11, s. 6.] Tarkasteltaessa suljettua putkistoa, voidaan Bernoullin yhtälö johtaa muotoon

$$p_s + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{vakio} \quad (10)$$

Tällöin potentiaalienergiasta ja kineettisestä energiasta muodostuva kokonaisenergia pysyy vakiona virtauksessa. Yhtälön mukaan toisen paineen laskua seuraa toisen paineen nousu. Esimerkiksi jos staattinen paine kasvaa, pienenee silloin dynaaminen paine eli kineettinen energia, koska kokonaisenergian tulee pysyä vakiona. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että virtausnopeuden kasvaessa staattinen paine laskee ja päinvastoin.

2.4 Virtausvastukset

Todellisessa putkivirtauksessa ilmenee aina virtausvastuksia, jotka aiheuttavat painehäviötä eli paineen alenemista. Virtausvastukset jaetaan kitkavastuksiin ja kertavastuksiin. Tässä alaluvussa käsitellään sekä virtausvastusten suuruuteen vaikuttavia tekijöitä että virtausvastusten laskentakaavoja.

2.4.1 Kitkallisen virtauksen energiayhtälö

Todellisen putkivirtauksen virtausvastukset muuttuvat verkostossa lämpöenergiaksi. Tarkastellaan kitkallisen, todellisen virtauksen energiayhtälöä.

Energiayhtälössä käsiteltäviä energioita ovat

- paine-energia p_s
- asemaenergia ρgh
- liike-energia $\frac{1}{2}\rho v^2$

Termeistä voidaan päätellä seuraavaa. Koska korkeus h on riippumaton kitkasta, ei myöskään asemaenergia voi olla riippuvainen kitkasta. Myöskään liike-energia ei ole riippuvainen kitkasta, koska virtausnopeus v on tilavuusvirran q_v ja putken poikkipinta-alan A suhde, ja nämä molemmat ovat kitkasta riippumattomia. Täten kitkahäviöt

ilmenevät paine-energian muutoksena eli painehäviöinä. Paine p_{s2} on siis painehäviöiden Δp verran pienempi tarkasteltavan putken loppupäässä. [2, s.91] Nyt Bernoullin yhtälö saa muodon

$$p_{s1} + \rho gh_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_{s2} + \rho gh_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \Delta p \quad (11)$$

Δp on tarkasteltavalla osuudella syntyvät kitkahäviöt, Pa

2.4.2 Viskositeetti

Viskositeetti on suure, joka kertoo virtausaineen kyvyn vastustaa vierekkäisten kerrosten välisiä siirtymiä. Se siis ilmaisee virtausaineen sisäisen kitkan. Viskositeetti on riippuvainen paineesta ja lämpötilasta. Nesteiden viskositeetti pienenee paineen ja lämpötilan noustessa, kun taas kaasujen viskositeetti kasvaa. Pienen viskositeetin omaava fluidi on ”ohutjuoksuista” ja suuren viskositeetin fluidi ”sakeajuoksuista”. Esimerkiksi veden viskositeetti on pieni, ja polttoöljyllä se on suuri. [2, s. 15; 4, s. 7.]

Virtausaineet jaetaan niiden valuamisominaisuuksien mukaan newtonilaisiin ja ei-newtonilaisiin. Newtonilaiset ovat ohutjuoksuista eli matalan viskositeetin omaavia aineita ja ei-newtonilaiset ovat sakeajuoksuista korkean viskositeetin aineita. LVI-tekniikassa käytetyt fluidit kuuluvat pääsääntöisesti newtonilaisiin. [2, s. 15.]

Fluidin viskositeetti jaetaan dynaamiseen viskositeettiin (12) ja kinemaattiseen viskositeettiin (13). Dynaaminen viskositeetti kuvaa virtausaineen muodonmuutosta vastustavia sisäisiä kitkavoimia. Kinemaattinen viskositeetti saadaan jakamalla dynaaminen viskositeetti fluidin tiheydellä. [4, s. 7.]

$$\tau = \eta * \frac{\Delta v}{\Delta y} \quad (12)$$

τ on leikkausjännitys, Pa

η dynaaminen viskositeetti, kg/ms

Δv on nopeuden muutos, m/s

Δy on etäisyyden muutos, m

$$v = \frac{\eta}{\rho} \quad (13)$$

v on kinemaattinen viskositeetti, m^2/s

2.4.3 Reynoldsin luku

Reynoldsin luku on dimensioton luku, joka kuvaa virtauksen luonnetta (ks. luku 2.4.4). Luku saadaan kertomalla putken hydraulinen halkaisija ja virtausnopeus keskenään sekä jakamalla saatu arvo fluidin kinemaattisella viskositeetilla (14).

$$Re = \frac{d_h * v}{\nu} \quad (14)$$

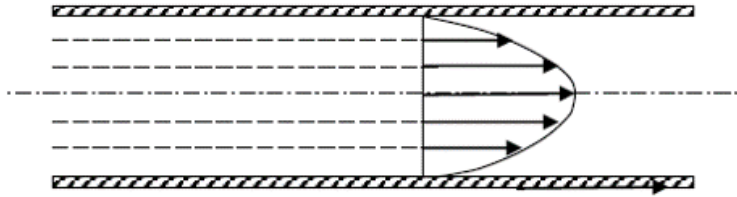
Re on Reynoldsin luku

d_h on virtausputken hydraulinen halkaisija (pyöreällä putkella sisähalkaisija), m

2.4.4 Putkivirtauksen luonteet

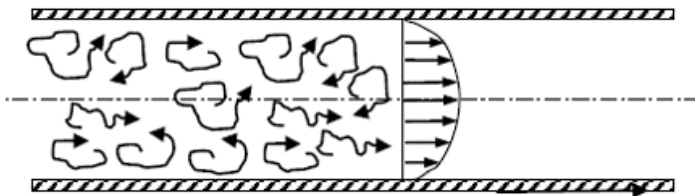
Putkivirtaukset jaetaan virtauksen muodon eli luonteen perusteella laminaariseen ja turbulenttiseen virtaukseen. Näillä virtauksilla on erilaiset fysikaaliset ominaisuudet [2, s. 87]. Reynoldsin luku kertoo virtauksen luonteen kussakin tapauksessa.

Laminaarisessa eli pyörteettömässä virtauksessa virtauspartikkelit eivät sekoitu keskenään, vaan ne liikkuvat virtaviivoja pitkin putken pituusakselin suuntaisesti (kuva 3). Laminaarisen virtauksen nopeusprofiili on paraabelin muotoinen. Kun Reynoldsin luku on vähemmän kuin 2 320 on virtaus aina laminaarista. [2, s. 88.]



Kuva 3. Laminaarinen virtaus [5, s. 21].

Turbulenttisessa eli pyörteellisessä virtauksessa virtauspartikkelit voivat putken pituusakselin suuntaisen liikkeen lisäksi liikkua myös poikittain, jonka seurauksena virtausosaset sekoittuvat keskenään (kuva 4). Turbulenttisen virtauksen nopeusprofiili on moniulotteinen eikä sitä käsitellä tässä yhteydessä. Virtaus on turbulenttinen, kun Reynoldsin luku on enemmän kuin 3 000. [2, s. 88.] Mikäli Reynoldsin luku on $2\,320 < Re < 3\,000$, on virtaus siirtymäalueella ja muuttuu laminaarisesta turbulenttiseksi. [5, s. 26.]



Kuva 4. Turbulenttinen virtaus [5, s. 22].

2.4.5 Kitkavastuskerroin

Kitkavastuskerroin on dimensioton kerroin, joka on riippuvainen virtauksen luonteesta sekä putken suhteellisesta karheudesta. Kitkavastuskertoimelle ei ole yhtä kaavaa, vaan sitä joudutaan tarkastelemaan tapauskohtaisesti. [3, s. 33.]

Laminaarisessa virtauksessa putken seinämän karheudella ei ole merkitystä kitkavastuskertoimeen. Laminaarisen virtauksen kitkavastuskerroin lasketaan seuraavasta kaavasta (15).

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (15)$$

λ on kitkavastuskerroin, -

Turbulenttisisessa virtauksessa putken seinämän karheus tulee ottaa huomioon laskettaessa kitkavastuskerrointa. Turbulenttisen virtauksen kitkavastuskertoimen laskennassa eri karheustyypeille tulee käyttää eri yhtälöitä [3, s. 34]. Seinämän karheustyyppiä ovat

- hydraulisesti sileä $Re * k/d < 65$
- hydraulisesti karhea - $Re * k/d > 1\,300$
- hydraulisesti edellisten välillä $65 < Re * k/d < 1\,300$.

Seinämän suhteellista karheutta kuvaava termi k/d saadaan jakamalla seinämän sisäpinnan karheus (k) putken sisähalkaisijalla (d). Oikean tuloksen saamiseksi on oleellista, että molempien tekijät ovat muunnettu samaan yksikköön.

Sileän putken kitkavastuskertoimen laskemiseksi voidaan käyttää Reynoldsin luvusta riippuen kaavaa 16, 17 tai 18. Kaavojen soveltuvuusalueet on merkitty kaavat kehitelneiden henkilöiden nimien perään.

Blasius ($2\,320 < Re < 10^5$)

$$\lambda = 0,314 * Re^{-0,25} \quad (16)$$

Nikuradse ($10^5 < Re < 10^6$)

$$\lambda = 0,0032 + 0,221 * Re^{-0,237} \quad (17)$$

Prandtl-Karman ($10^6 < Re < 10^7$)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 * \lg \frac{Re * \sqrt{\lambda}}{2,51} \quad (18)$$

Putkelle, jonka seinämä on karhean ja sileän välillä, voidaan kitkavastuskerroin laskea Prandtl-Colebrookin yhtälöllä (19).

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 * \lg \left[\frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{k/d}{3,71} \right] \quad (19)$$

LVI-tekniikassa Prandtl-Colebrookin yhtälö on yleisimmin käytetty, sillä se soveltuu riittäväällä tarkkuudella koko turbulenttiselle alueelle [3, s. 37].

Hydraulisesti karhealle putkelle kitkavastuskerroin voidaan laskea joko Nikuradsen yhtälöllä (20) tai Moodyn yhtälöllä (kaava 21).

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 * \lg \frac{3,71}{k/d} \quad (20)$$

$$\lambda = 0,0055 + 0,15 * \left(\frac{k/d}{d} \right)^{0,333} \quad (21)$$

Kitkavastuskerroin transitoalueen virtaukselle voidaan määrittää joko Moodyn käyrästä tai kirjallisuudessa esitettyjen erilaisten kaavojen avulla [4, s. 18].

2.4.6 Kertavastuskerroin

Kertavastuskerroin on kitkavastuskertoimen tavoin dimensioton luku, jonka avulla voidaan laskea putkiverkoston kertavastuksen painehäviö. Kertavastuskertoimen muodostuminen on monisäikeinen asia, eikä sitä tulla käsittelemään tarkemmin tässä työssä. Pääsääntöisesti kertavastuskertoimet perustuvat mittauksiin, ja niiden arvot saadaan käsikirjoista tai komponenttivalmistajilta. [2, s. 105.]

2.4.7 Kitkavastusten aiheuttama painehäviö

Suorassa putkessa kitkavastusten aiheuttama painehäviö on verrannollinen putken pituuteen, nopeuden neliöön, sekä kääntäen verrannollinen putken sisähalkaisijan kolmanteen potenssiin. Painehäviöitä tarkasteltaessa on hyvä huomata, että painehäviöt eivät ole staattisesta paineesta riippuvaisia. [6, s. 137.]

$$\Delta p_{\lambda} = \lambda * \frac{l}{d_s} * p_d \quad (22)$$

Δp_{λ} on kitkavastusten aiheuttama painehäviö, Pa

l on putkiosan pituus, m

2.4.8 Kertavastuksen aiheuttama painehäviö

Kertavastuksen aiheuttama painehäviö lasketaan kertomalla kertavastuskerroin putki-
osuuden pituudella ja dynaamisella paineella sekä jakamalla saatu tulos putken sisähäl-
kaisijalla. Painehäviön laskentaa varten nopeus katsotaan yleensä kertavastuksen jäl-
keiseltä putkiosuudelta [5, s. 56].

$$\Delta p_{\zeta} = \zeta * \frac{l}{d_s} * p_d \quad (23)$$

Δp_{ζ} on kertavastuksien aiheuttama painehäviö, Pa

ζ on kertavastuskerroin, -

2.4.9 Kiertopiirin painehäviö

Suljetun verkoston kiertopiirin kokonaispainehäviö voidaan laskea kaavalla 24.

$$\Delta p = \Delta p_{vir} = \sum \Delta p_{\lambda} + \sum \Delta p_{\zeta} = \sum \left(\frac{\lambda * l}{d_s} + \sum \zeta * \frac{1}{2} \rho v^2 \right) \quad (24)$$

Δp on kiertopiirin aiheuttama painehäviö, Pa

Δp_{vir} on putkijohdon virtausvastukset, Pa

$\sum \Delta p_{\lambda}$ on peräkkäisten putkiosuuksien kitkavastusten
yhteenlaskettu painehäviö, Pa

$\sum \Delta p_{\zeta}$ on peräkkäisten putkiosuuksien kertavastusten
yhteenlaskettu painehäviö, Pa

d_s on putken sisähalkaisija, m

$\sum \zeta$ on kertavastusten summa putkiosuudella l , Pa

Olettaen kitkavastuskerroin λ ja kertavastuskerroin ζ virtausnopeudesta riippumattomiksi ja ottaen huomioon, että $p_d = \frac{1}{2}\rho v^2 = \frac{1}{2}\rho \frac{q_v^2}{A^2}$, voidaan suljetun verkoston kiertopiirin kokonaispainehäviön kaavasta (24) johtaa virtaamien ja painehäviöiden tarkasteluun soveltuva kaava (25). [8, s. 20.]

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left(\frac{q_{v1}}{q_{v2}}\right)^2 \quad (25)$$

Painehäviö on verrannollinen tilavuusvirran toiseen potenssiin. Mikäli yhtäsuuruusmerkin toisella puolella jonkin tekijän arvo muuttuu, muuttuu arvo myös toisella puolella, koska yhtäsuuruus säilyy.

3 Lämmitysverkoston virtaustekninen toiminta

Lämmitysverkoston tehtävänä on siirtää tarvittava lämpöteho kullekin kulutuspisteelle [7, s. 7]. Tarvittava lämpöteho saadaan suunnitteluvaiheessa lämpöhäviölaskelmista, joita ei käsitellä tässä työssä. Pumppukiertoisessa järjestelmässä lämpötehot siirretään pumppun verkostoon aiheuttaman virtaaman avulla. [6, s. 146, 229.] Jotta virtaaman mukana kulkeutuva lämpöteho saataisiin jaettava halutulla tavalla verkoston eri osiin, on verkosto tasapainotettava [8, s. 23].

Tässä luvussa tarkastellaan verkoston virtausteknistä tasapainotusta sekä pumppujen toimintaa osana verkostoa.

3.1 Verkoston virtaustekninen tasapainottaminen

Lämmitysverkoston tehtävä on kuljettaa haluttu lämpöteho kulutuspisteille. Jokaiselle kulutuspisteelle on lämpöhäviölaskelmien perusteella määritetty teho, joka huoneeseen tulee luovuttaa mitoitusilanteessa. Kaava 26 osoittaa tilavuusvirran riippuvuuden tehosta, lämpötilatasoista sekä fluidin ominaisuuksista. [6, s. 119, 146.]

$$q_v = \frac{\dot{\phi}}{c_p \rho \Delta T} \quad (26)$$

$\dot{\phi}$ on teho, kW

c_p on fluidin ominaislämpökapasiteetti, kJ/kgK

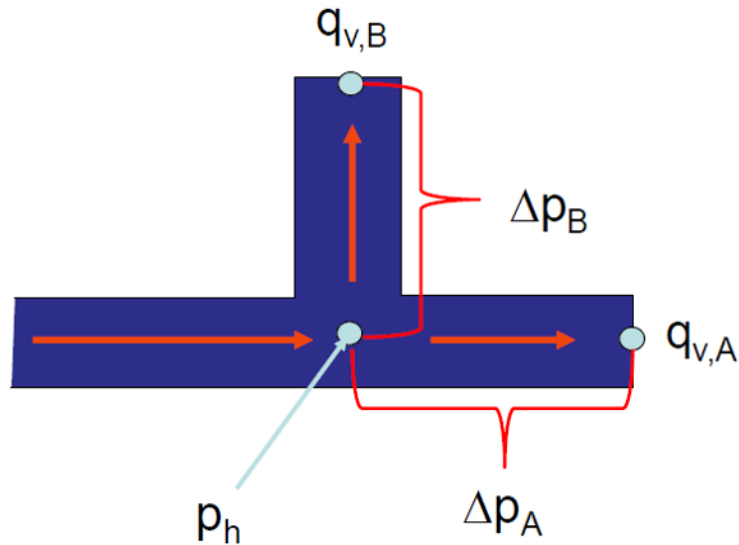
ΔT on fluidin lämpötilan muutos, K

3.1.1 Paineen jakautuminen verkostossa

Tässä alaluvussa tarkastellaan teoreettisesti paineen jakautumista ja käyttäytymistä todellisessa verkostossa. Paineen jakautumisesta verkostossa käytetään myös termiä verkoston painesuhteet.

Koska verkostossa syntyy painehäviöitä, jotka ilmenevät staattisen paineen pienentymisenä, kokonaispaine verkostossa laskee virtaussuuntaan edettäessä [2, s. 91]. Tällöin kokonaispaine verkoston eri osissa ei ole vakio. Suljetussa verkostossa paisuntasäiliö on verkoston painetasojen nolllapiste [9, s. 7]. Se tarkoittaa, että siitä lasketaan muiden verkoston osien paine staattisen paineen muutoksina. Koska staattinen paine verkostossa ei saa laskea liian alas kavitoinnin ja muiden haittavaikutusten välttämiseksi, on verkostoon asetettavan ylipaineen nolllapisteessä oltava suurempi kuin pumpun tuottama nostokorkeus.

Kuvassa 5 on esitetty vasemmalta tulevan virtauksen jakautuminen kahteen avoimeen haaraan. Kuva on esitetty ylhäältäpäin ja siinä q_v kuvaa tilavuusvirtaa, p painetta ja Δp paine-eroa. Kuvasta huomataan, että paine p_h on molemmille haaroille yhteinen eli molemmilla haaroilla on sama paine käytettävissä. Kummankin haaran ollessa auki ulkoilmaan, on myös paineiden haarojen lopussa oltava samat. Koska alkupaine on molemmille sama ja kummankin haaran loppupaineet ovat yhtäläiset, on välttämättä myös haaroissa aiheutuvien painehäviöiden oltava yhtä suuret, $\Delta p_{,A} = \Delta p_{,B}$.



Kuva 5. Paineen jakautuminen haarakohdassa [8, s. 24].

Tarkastellaan kuvan 5 virtaustilannetta kahden tarkastelun avulla. Ensimmäisessä tarkastelussa oletetaan A ja B haarojen putket yhtä pitkiksi sekä putkidimensiot samoiksi. Kuvan mukaisesti haaroja ei kuristeta. Mikäli haaroihin halutut tilavuusvirrat ovat erisuuret $q_{v,A} \neq q_{v,B}$, on selvää, että myös putkistoissa tapahtuvien laskennallisten painehäviöiden täytyy olla erisuuret $\Delta p_{A} \neq \Delta p_{B}$, koska $\frac{q_{v,A}}{q_{v,B}} \neq 1$, jolloin myös $\frac{\Delta p_A}{\Delta p_B} \neq 1$.

Koska paine kuitenkin jakautuu tasaisesti, haaroissa tapahtuvien painehäviöiden tulee olla yhtä suuret $\frac{\Delta p_A}{\Delta p_B} = 1$, mikä johtaa tässä tapauksessa, putkien pituuksien ja halkaisijoiden ollessa yhtäläiset, tilanteeseen, jossa $\frac{q_{v,A}}{q_{v,B}} = 1$. Halutut tilavuusvirrat tässä tapauksessa siis poikkeavat todellisista tilavuusvirroista.

Toisessa tarkastelussa oletetaan, että haara A on hieman pidempi kuin haara B. Haaran A putken halkaisija on pienempi kuin haaran B. Halutut tilavuusvirrat oletetaan saman suuruisiksi $q_{v,A} = q_{v,B}$. Tällöin haarassa A syntyvät laskennalliset painehäviöt ovat suuremmat kuin haarassa B, $\Delta p_{A} > \Delta p_{B}$. Jälleen painehäviötä on synnyttävä molemmissa haaroissa saman verran, koska pisteessä p_h on molemmille haaroille käytettävissä sama paine. Päästäkseen samaan painehäviöön haaran B kanssa haara A joutuu tinkimään virtaamasta (ks. luku 2.4.7). Tällöin halutut tilavuusvirrat jäävät saavuttamatta painehäviöiden tasaantuessa.

Yllä esitetyt esimerkit riittänevät kuvaamaan, että mikäli putkistoissa ei aiheuteta tietoisesti jokaiseen kiertopiiriin yhtä suuria painehäviöitä, suunniteltuja virtaamia ei voida käytännössä saavuttaa. Mikäli olisi verkosto, jossa olisi esimerkiksi 2 kiertopiiriä, ja molemmat aiheuttaisivat halutuilla virtaamilla yhtä suuren painehäviön, tämä onnistuisi. Kuitenkin todellisissa verkostoissa on poikkeuksetta useita kiertopiirejä ja niiden pituudet vaihtelevat, jolloin ilman joihinkin piireihin tai haaroihin tuotettua lisäpainehäviötä halutut virtaamat kulutuspisteillä jäävät saavuttamatta.

3.1.2 Virtaustekninen tasapainottaminen

Putkiverkoston tasapainottamisen tavoitteena on tuottaa jokaiseen kiertopiiriin yhtä suuri painehäviö, jolloin suunniteltu virtaama saadaan kuljetettua kulutuspisteille ja halutut lämpöolot saavutetaan [8, s. 20; 6, s. 119]. Virtaustekniseen tasapainoon (mikäli suunnitellaan uutta verkostoa) voidaan vaikuttaa kahdella tavalla [8, s. 25]:

- putkistojen mitoituksella
- kuristuselimillä.

Putkistojen mitoituksella vaikutetaan virtauksen aiheuttamien painehäviöiden suuruuteen. Mikäli suurelle tilavuusvirralle valitaan pieni putkikoko, tuloksena on suuri virtausnopeus ja painehäviö (ks. kaavat 6 ja 24). Putkistot pyritään mitoittamaan niin, että putkiston aiheuttama painehäviö on suhteellisen pieni ($R < 50 \text{ Pa/m}$), jolloin meno- ja paluujohdon välille ei muodostu suuria paine-eron vaihteluita [6, s. 147]. Suuret paine-eron vaihtelut meno- ja paluujohdon välillä vaikeuttavat verkoston tasapainotusta.

Kuristuselinten tehtävänä on tuottaa painehäviötä verkostoon, jotta saadaan estettyä ylisuuret virtaamat ja siirrettyä kullekin kulutuspisteelle suunniteltu vesivirta. Yleisimmät LVI-tekniikassa käytetyt kuristuselimet ovat kertasäätöventtiilit ja patteriventtiilit. Kertasäätöventtiileillä aiheutetaan jokaiseen linjaan tarvittava painehäviö ja patteriventtiilillä säädetään yhden linjan sisällä oleville kiertopiireille yhtäläinen painehäviö. Tällöin järjestelmän jokaisen kiertopiirin painehäviö saadaan säädettyä yhtä suureksi.

Verkoston virtaustekninen tasapainottaminen etenee seuraavalla tavalla [6, s. 149]:

1. Lasketaan verkoston jokaisen putkiosuuden virtaama.
2. Valitaan kullekin putkiosuudelle sopivat putkikoot. Putkikoon valintaan vaikuttavat käytössä olevat mitoituskriteerit.
3. Lasketaan jokaisen putkiosuuden painehäviö.
4. Selvitetään virtausteknisesti haastavin reitti, eli reitti, joka aiheuttaa verkostoon suurimmat painehäviöt.
5. Aiheutetaan jokaiselle kiertopiirille yhtä suuri painehäviö vaikeimman reitin kanssa. Tällöin kaikki reitit ovat painehäviöllisesti yhtä suuret, jolloin suunnitellut virtaamat (tehot) saadaan kuljetettua kulutusasteille.

3.1.3 Verkoston ominaiskäyrä

Putkiverkoston ominaiskäyrä kuvaa painehäviöiden kasvua verkostossa tilavuusvirran kasvaessa. Ominaiskäyrä voidaan piirtää, kun tunnetaan virtausteknisesti vaikein reitti verkostossa sekä verkoston tilavuusvirta mitoitusasteella. Näiden arvojen avulla voidaan laskea kerroin K (28). Verkoston ominaiskäyrä on muodoltaan paraabeli (ks. kuva 6). Verkoston ominaiskäyrän kaava (27) johdetaan kiertopiirin kokonaispainehäviön kaavasta (24). Ominaiskäyrän kaavassa on oletettu, että kitkavastus- ja kertavastuskertoimet ovat virtausnopeudesta riippumattomia, sekä huomioitu, että $p_d = \frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{1}{2} \rho \frac{q_v^2}{A^2}$.

$$\Delta p = K * q_v^2 \quad (27)$$

$$K = \frac{\Delta p}{q_v^2} \quad (28)$$

K on vakio, -

3.2 Keskipakopumput

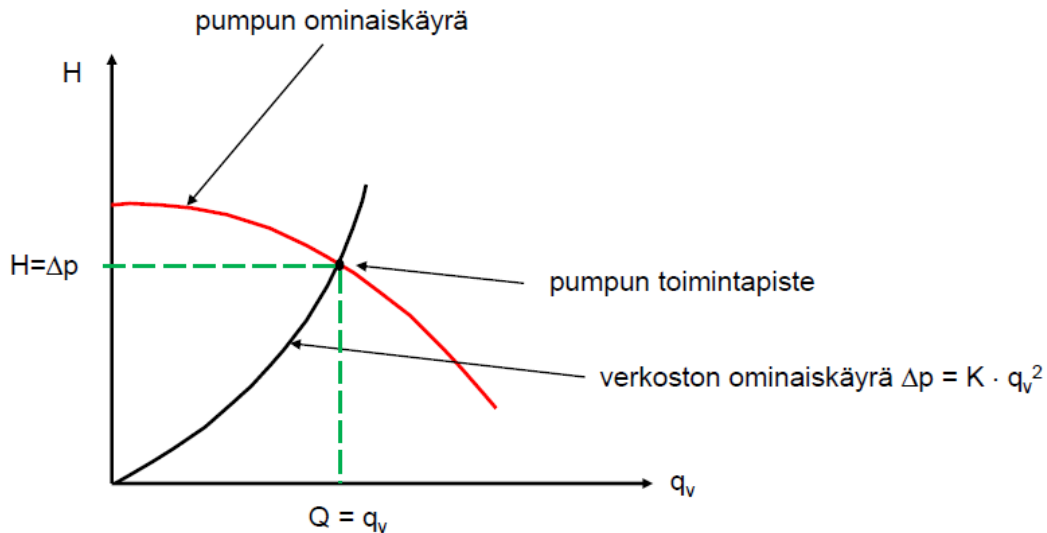
Pumppu on koje, jolla neste saadaan virtaamaan putkistossa. LVI-tekniikassa käytetyt pumput ovat pääsääntöisesti keskipakopumppuja [8, s. 229]. Pumput tuottavat pumpun painepuolelle imupuolta suuremman paineen, jonka seurauksena neste alkaa virtaamaan. Keskipakoispumppussa moottorin pyörittämä juoksupyörä imee keskiönsä vettä, jolloin vesi keskipakoisvoiman vaikutuksesta sinkoutuu kineettistä energia saaneena laajenevaan kierukkapesään. Nopeuden alentuessa kierukkapesässä kineettinen energia muuttuu paine-energiaksi. [10, s. 12.]

3.2.1 Nostokorkeus

Suljetussa verkostossa pumpun tehtävänä on tuottaa niin suuri paineenkorotus eli nostokorkeus, kuin verkoston painehäviöt ovat [11, s. 5]. Pumpun kokonaisnostokorkeus muodostuu staattisen ja dynaamisen nostokorkeuden summasta. Staattinen nostokorkeus muodostuu pumpun paine- ja imupuolen välisestä korkeuserosta ja dynaaminen nostokorkeus verkoston virtausvastuksista. Suljetussa verkostossa staattista nostokorkeutta ei oteta huomioon (ks. luku 2.3.1). [12, s. 19–20.] Nostokorkeus ilmoitetaan usein metreinä vesipatsasta (mvp).

3.2.2 Ominaiskäyrä

Pumppuvalmistajat laativat pumppuille pumppukohtaiset omaiskäyrät, jotka ilmaisevat pumpun nostokorkeuden tilavuusvirran funktiona tietyllä pyörimisnopeudella ja juoksupyörän halkaisijalla. Käyrästä kertoo pumpun toiminta-alueen, jossa pystyakselilla on nostokorkeus (H) ja vaaka-akselilla virtaama (Q). Kun samaan käyrästään sijoitetaan verkoston ominaiskäyrä, kertoo käyrien leikkauspiste pumpun toimintapisteen. [13, s. 209, 213.] Kuvassa 6 on esitetty käyrästä, johon on yhdistetty sekä pumpun että verkoston ominaiskäyrät.



Kuva 6. Ominaiskäyrät ja pumpun toimintapiste [12, s. 25].

Ominaiskäyrästä nähdään, että pumpun kyky tuottaa painetta heikkenee tilavuusvirran kasvaessa. Kun verkostossa tapahtuu muutoksia, siirtyy toimintapiste pumpun ominaiskäyrää pitkin ylös tai alas riippuen muutoksen suunnasta. Esimerkiksi mikäli verkostossa kuristetaan venttiiliä, verkoston painehäviö kasvaa ja pumpun läpi kulkeva virtaama pienenee. Verkoston ominaiskäyrä jyrkkenee, ja uusi toimintapiste on verkoston uuden ominaiskäyrän ja pumpun ominaiskäyrän leikkauspisteessä.

3.2.3 Affiniteettisäännöt

Keskipakoispumpun tuottoarvojen muutosta suhteessa kierrosnopeuden muutokseen voidaan riittävällä tarkkuudella arvioida affiniteettisääntöjen perusteella [13, s. 78]. Affiniteettisäännöt pätevät suljetuissa verkostoissa [12, s. 44].

Sääntöjen mukaan pumpun tuotto kasvaa lineaarisena verrattuna pumpun kierrosluku-suhteeseen, paineenkorotus kasvaa verrannollisena kierroslukusuhteen neliöön ja teoreettinen teho verrannollisena kierroslukusuhteen kolmanteen potenssiin.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (29)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad (30)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n}{n}\right)^3 \quad (31)$$

n on kierrosnopeus, rpm

Q on tilavuusvirta, dm³/s

H on nostokorkeus, m

P on pumpun teoreettinen teho, kW

3.2.4 Pumpun säätötavat

Pumppuja tarvitsee säätää, jotta verkoston edellyttämä virtaama saavutettaisiin [6, s. 240]. Säätötapoja on useita, ja tässä käsitellään niistä seuraavia:

- ohitusvirtaussäätö
- kuristussäätö
- säätö juoksupyörän halkaisijaa muuttamalla
- kierroslukusäätö.

Ohitusvirtaussäädössä osa pumpun painepuolen virtaamasta johdetaan takaisin pumpun imupuolelle. Säätömuodossa ohitusventtiili asennetaan pumpun rinnalle, jolla säädetään ohivirtauksen suuruutta. Säätötapa sopii pumpuille, joiden nostokorkeus on matalahko suhteessa tilavuusvirtaan. [10, s. 49.] Vaikka ohitusvirtaussäädössä pumpun tuotosta vain osa johdetaan verkostoon, pumpun toimintapiste pysyy ennallaan. Ohitusvirtauksen aiheuttama häviöteho muuntuu lämmöksi nesteeseen. [6, s. 241.]

Kuristussäätö on perinteinen säätötapa, jossa pumpun painepuolelle asennetaan kuristusventtiili, jolla säädetään haluttu virtaama verkostoon. Kuristusventtiiliä kiristämällä aiheutetaan painehäviötä, jolloin pumpun tilavuusvirta pienenee. Kuristussäätö sopii pumpuille, joiden tilavuusvirran tuotto on pieni suhteessa nostokorkeuteen. [10, s. 52.]

Pumpun juoksupyörän kokoa muuttamalla voidaan vaikuttaa pumpun tuottamaan tilavuusvirtaan ja nostokorkeuteen. Tilavuusvirta muuttuu likimain juoksupyörien halkaisijoiden suhteessa. Paineentuotto on riippuvainen juoksupyörien halkaisijoiden suhteen neliöstä. Pumpun säätö juoksupyörää vaihtamalla sopii tilanteisiin, joissa pumppausteho on havaittu riittämättömäksi tai liialliseksi. [6, s. 241.]

Kierroslukusäädössä pumpun pyörimisnopeutta säädetään joko portaattaisesti tai portaattomasti [6, s. 241]. Kun pumpun pyörimisnopeus muuttuu, myös sen tuottoarvot muuttuvat. Suljetussa verkostossa pumpun uusi toimintapiste voidaan arvioida riittävällä tarkkuudella affiniteettisääntöjen mukaisesti [14, s. 78]. Lähes pääsääntöisesti pyörimisnopeuden säätö toteutetaan taajuusmuuttajalla, joka muuttaa pumpun sähkömoottorille syötettävän sähkönsäätötaajuutta muuttaen sen kierrosnopeutta. Tällöin myös pumpun juoksupyörän pyörimisnopeus muuttuu. [15, s. 9.]

Lämmitysverkostoissa pumpun kierrosnopeutta ohjataan yleisesti paineantureilla mitatun paine-eron perusteella. Tämä paine-ero voidaan mitata joko pumpun yli tai kulutus-pisteen yli. Pumpun kierrosnopeutta ohjataan siten, että paine-ero mitattujen pisteiden välillä pysyy vakiona. Virtausteknisesti on parempi ohjata pumppua pitämällä paine-ero vakiona kulutus-pisteen yli, koska silloin verkostoon menevä vesivirta ja pumpun tuottama nostokorkeus säätyy dynaamisesti verkoston tarpeiden mukaisesti. Jos pumpun yli pidetään vakio paine-ero, täytyy nostokorkeuden asetusarvo kiinnittää mitoitusarvoja vastaavan toimintapisteen mukaiselle korkeudelle. Pumpun yli mitatussa vakio paine-ero ohjauksessa pumppu käy lähes jatkuvasti liian suurella teholla, jolloin energian kulutus on huomattavasti suurempaa kuin kulutus-pisteen paine-erolla ohjatussa pumpussa. [16.]

4 Lämmitysverkoston virtaustekniset muutokset muutostilanteessa

Edellä on käsitelty verkoston virtausteknisestä tasapaino- tai tasapainottomuustilanteen vaikutusta lämmitysverkoston toimintaan (ks. luku 3). Mikäli verkosto on virtausteknisesti epätasapainossa, suunnitellut virtaamat kullakin kulutus-pisteellä jäävät saavuttamatta, koska suljetussa tilassa paine jakautuu tasaisesti, niin että jokaisessa kiertopiirissä syntynyt painehäviö virtaustilanteessa on yhtäläinen. Tällöin virtausteknisesti vaikeampiin

piireihin kulkeutuu haluttua vähemmän tilavuusvirtaa ja päinvastoin virtausteknisesti helpompiin piireihin haluttua enemmän.

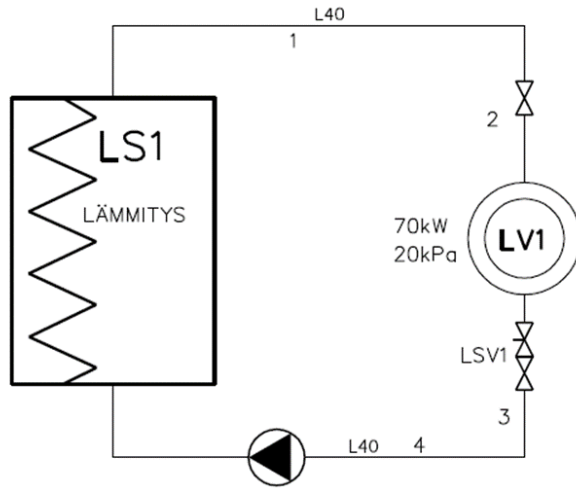
Tässä luvussa tarkastellaan, kuinka muutos verkostossa, esimerkiksi tehon lisääminen, vaikuttaa koko verkoston virtaustekniseen tilaan. Ensin selvennetään näiden muutosten vaikutuksia ja luvun lopussa esitellään tämän työn osana tehdyistä simulaatiotarkaste- luista saatuja havaintoja ja tuloksia.

4.1 Virtaustekniset muutokset muutostilanteessa

Kuvassa 7 on esitetty kuvitteellisen kohteen yksinkertaistettu toisiopuolen toimintakaavio. Kuvassa on näytetty verkoston teho ja siinä aiheutuva painehäviö. Putkiosuudet on merkitty paljain numeroin sekä putkikoot on merkitty esimerkiksi tavalla ”L40”, joka tarkoittaa, että putken nimellishalkaisija on DN40.

Kyseisen pumppukiertoisen järjestelmän toimintaperiaate on yksinkertainen. Pumppu kierrättää nestettä kulutuspiisteille (LV1), josta jäähtynyt neste kulkeutuu pumpun kautta lämmönlähteelle (LS1), jossa se lämpenee.

Virtausteknisesti kiertokulku on seuraavanlainen: Pumppu kierrättää nestettä, lisäten siihen staattista painetta, jolloin kokonaispaine kasvaa. Kokonaispaine verkostossa on korkeimmillaan pumpun jälkeen. Kun neste lähtee kiertämään verkostossa kohti kulutuspiisteitä, matkalla olevat virtausvastukset vähentävät verkostossa vallitsevaa staattista painetta (ks. luku 2.4.1). Kokonaispaine putoaa jatkuvasti virtaussuuntaan edetessä, ja on pienimmillään pumpun imuaukossa. Pumppu nostaa staattista painetta verkostossa aiheutuvien painehäviöiden verran.



Kuva 7. Pumpputkiertoisen järjestelmän toisiopuolen toimintakaavio.

Taulukosta 1 nähdään kunkin putkisto-osuuden tuottamat painehäviöt verkostossa sekä pumpun (PU) tuottama nostokorkeus eli paineenkorotus. Pumpun paineenkorotus on laskettu summaamalla putkisto-osien painehäviöt ja verkoston painehäviö, joka on esitetty kuvassa 7.

Taulukko 1. Putkisto-osien painehäviöt ja virtaamat kuvassa 7.

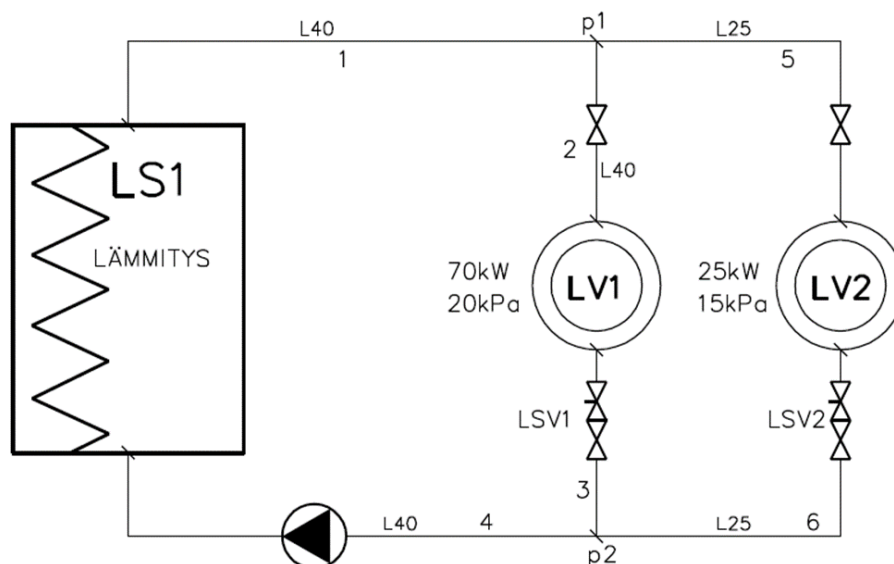
| Putkisto-osa | Painehäviö kPa | Virtaama l/s |
|--------------|----------------|--------------|
| PU | -37,5 | 0,556 |
| LS | 10 | 0,556 |
| LSV1 | 4 | 0,556 |
| 1 | 1 | 0,556 |
| 2 | 0,75 | 0,556 |
| 3 | 0,75 | 0,556 |
| 4 | 1 | 0,556 |

4.1.1 Haaran lisääminen ennen vanhan verkoston ensimmäistä haaraa

Tarkastelu 1

Kuvassa 8 on esitetty kuvan 7 järjestelmä, mutta nyt järjestelmään on lisätty yksi haara, eli rinnakkainen verkosto. Putkidimensiot vanhan verkoston osalta pysyvät samana kuin kuvassa 7. Lähtötilanteessa (ennen LV2:n lisäämistä) oletetaan, että verkosto LV1 toimii

tasapainossa asianmukaisella tavalla. Nyt tarkastellaan, kuinka haaran lisääminen vaikuttaa virtausteknisesti verkoston eri osissa. Oletetaan, että pumpussa ja lämmönsiirtimessä riittää tehokapasiteettia muutosta varten eivätkä lämmönsiirtimen suurimmat sallitut painehäviöt ylitä.



Kuva 8. Toisiopuolen toimintakaavio.

Kun verkoston kautta siirrettävää tehoa lisätään, olettaen että verkoston lämpötilatasot pysyvät samoina, virtaama kasvaa lineaarisesti tehon kasvun mukaan (ks. luku 3.1). Virtaaman lisääntyminen putkessa aiheuttaa painehäviön kasvua (ks. luku 3.1.1). Kuvan 8 tapauksessa huomataan, että virtaaman ja näin ollen myös painehäviön kasvua tapahtuu lämmönsiirtimen lisäksi putkiosuuksilla 1 ja 4. Muissa osissa virtaama ei kasva alkuperäisiin arvoihin verrattuna olettaen, että halutut tehot jakaantuvat halutulla tavalla verkostoihin. Taulukossa 2 on esitetty verkosto-osien painehäviöt ja virtaamat haaran lisäämisen jälkeen.

Lisätty verkosto LV2 putkistoineen on mitoitettu virtausteknisesti väljemmäksi kuin verkosto LV1. Tällöin linjasäätöventtiiliin LSV2 on aiheutettava painehäviö, joka vastaa verkostojen LV1 ja LV2 kiertopiirien painehäviöiden erotusta. Tässä tapauksessa linjasäätöventtiilillä LSV2 aiheutettava painehäviö tulee olla 8,5 kPa, jotta verkostot toimivat tasapainotilassa.

Taulukko 2. Putkisto-osien painehäviöt ja virtaamat kuvassa 8.

| Putkisto-osa | Painehäviö kPa | Virtaama l/s |
|--------------|----------------|--------------|
| PU | -47,5 | 0,754 |
| LS | 18,4 | 0,754 |
| LSV1 | 4 | 0,556 |
| LSV2 | 8,5 | 0,198 |
| 1 | 1,8 | 0,754 |
| 2 | 0,75 | 0,556 |
| 3 | 0,75 | 0,556 |
| 4 | 1,8 | 0,754 |
| 5 | 1 | 0,198 |
| 6 | 1 | 0,198 |

Tarkastellaan seuraavaksi painetta kuvassa 8 esitetyissä pisteissä p1 ja p2. Aluksi tarkastellaan pisteen p1 painetta tilanteessa, jossa verkostoa LV2 ei ole vielä lisätty. Tällöin paine kyseisessä pisteessä saadaan vähentämällä pumpun jälkeisestä paineesta virtausvastukset pisteelle p1 asti. Painetta pisteessä p1 on siten

$$37,5 \text{ kPa} - 10 \text{ kPa} - 1 \text{ kPa} = 26,5 \text{ kPa}.$$

Edettäessä edelleen LV1 suuntaan paine vähenee jatkuvasti ja pisteessä p2 se on

$$26,5 \text{ kPa} - 0,75 \text{ kPa} - 20 \text{ kPa} - 4 \text{ kPa} - 0,75 \text{ kPa} = 1 \text{ kPa}.$$

Paine-ero pisteiden p1 ja p2 välillä on näin ollen 25,5 kPa.

Taulukosta 2 nähdään putkisto-osien painehäviöt muutoksen jälkeen eli silloin, kun lisätty haara on liitetty järjestelmään. Painehäviöt kasvavat vain niillä osuuksilla, joissa virtaama on kasvanut. Pisteiden p1 ja p2 välillä olevan paine-eron on oltava sama kuin tilanteessa, jossa lisättyä verkostoa ei ollut, koska verkoston LV1 kiertopiiri pysyy edelleen vaikeampana reittinä eikä pisteiden p1 ja p2 välillä ole tapahtunut virtaamamuutoksia. Paine pisteessä p1 on kuitenkin kasvanut. Tämä on selvää, koska virtausvastukset putkiosuudella 4 ovat lisääntyneet. Edettäessä pisteestä p1 virtaussuuntaan painehäviöt ovat suuremmat kuin lähtötilanteessa, jolloin myös pisteen p1 paineen on oltava lähtötilannetta suurempi, jotta kyetään voittamaan reitillä vastaan tulevat virtausvastukset. Tällöin paine pisteessä p1 on putkiosuudella 4 lisääntyneen painehäviön verran suurempi.

Tässä tapauksessa lisääntynyt painehäviö on 0,8 kPa, joten paine pisteessä p1 on 27,3 kPa.

Korkeampi paine pisteessä p1 ei vaikuta verkoston LV1 sisällä mitenkään, koska verkostolla on edelleen sama paine-ero käytettävissä. Tällöin myös jokaisella verkoston sisällä olevalla kiertopiirillä on käytettävissään sama paine-ero kuin ennen muutosta, sillä paineen kunkin kiertopiirin liitoskohdassa tulee olla 0,8 kPa suurempi kuin lähtötilanteessa. Verkostoon paisuntasäiliön avulla asetetun esipaineen suuruus ei myöskään vaikuta painehäviöiden suuruuteen. [6, s. 137.]

Tarkastelu 2

Mikäli lisättävän verkoston LV2 kiertopiirin painehäviö olisi suurempi kuin verkoston LV1, olisi linjasäätöventtiiliä LSV1 kuristettava, jotta järjestelmä toimisi edelleen tasapainotilassa. Tätä voidaan selvittää tarkastelemalla painetta pisteissä p1 ja p2. Oletetaan, että verkoston LV2 aiheuttama painehäviö on 25 kPa. Verkoston LV1 aiheuttama painehäviö on edelleen 20 kPa. Tällöin pisteessä p1 on oltava lähtötilannetta enemmän painetta, jotta verkoston LV2 kiertopiirin painehäviöt voidaan voittaa. Taulukossa 3 on esitetty kyseisen tapauksen kunkin osan painehäviöt.

Taulukko 3. Putkisto-osien paineet ja virtaamat.

| Putkisto-osa | Painehäviö kPa | Virtaama l/s |
|--------------|----------------|--------------|
| PU | -53 | 0,794 |
| LS | 18,4 | 0,794 |
| LSV1 | 9,5 | 0,556 |
| LSV2 | 4 | 0,238 |
| 1 | 1,8 | 0,794 |
| 2 | 0,75 | 0,556 |
| 3 | 0,75 | 0,556 |
| 4 | 1,8 | 0,794 |
| 5 | 1 | 0,238 |
| 6 | 1 | 0,238 |

Taulukosta 3 huomataan, että kokonaispainehäviö kasvoi lähtötilanteeseen verrattuna. Tämän lisäksi edellä esitetyn mukaisesti linjasäätöventtiiliä LSV1 on kuristettu enemmän. Taulukon 3 arvoilla voidaan nyt laskea paineet pisteissä p1 ja p2.

$$p1 = 53 \text{ kPa} - 18,4 \text{ kPa} - 1,8 \text{ kPa} = 32,8 \text{ kPa}$$

$$p2 = 53 \text{ kPa} - 18,4 \text{ kPa} - 1,8 \text{ kPa} - 0,75 \text{ kPa} - 20 \text{ kPa} - 9,5 \text{ kPa} - 0,75 \text{ kPa} = 1,8 \text{ kPa}$$

$$p1 - p2 = 31 \text{ kPa}$$

Pisteiden p1 ja p2 paineista huomataan, että pisteiden välinen paine-ero kasvanut. Tämä johtuu siitä, että paineen pisteessä p1 täytyy tässä tapauksessa olla suurempi kuin tapauksessa, jossa verkoston LV1 kiertopiiri on vaikein. Nyt paineen täytyy voittaa verkoston LV2 ja putkiosuuden 4 painehäviöt. Tällöin verkoston LV1 linjasäätöventtiiliä LSV1 on kuristettava, jotta myös tämän kiertopiirin kautta paine pisteessä p2 olisi 1,8 kPa. Mikäli linjasäätöventtiiliä LSV1 ei kuristettaisi, vaan sen tuottama painehäviö olisi 4 kPa, virtaamat jakaantuisivat ei halutulla tavalla verkostojen kesken (ks. luku 3.1.1).

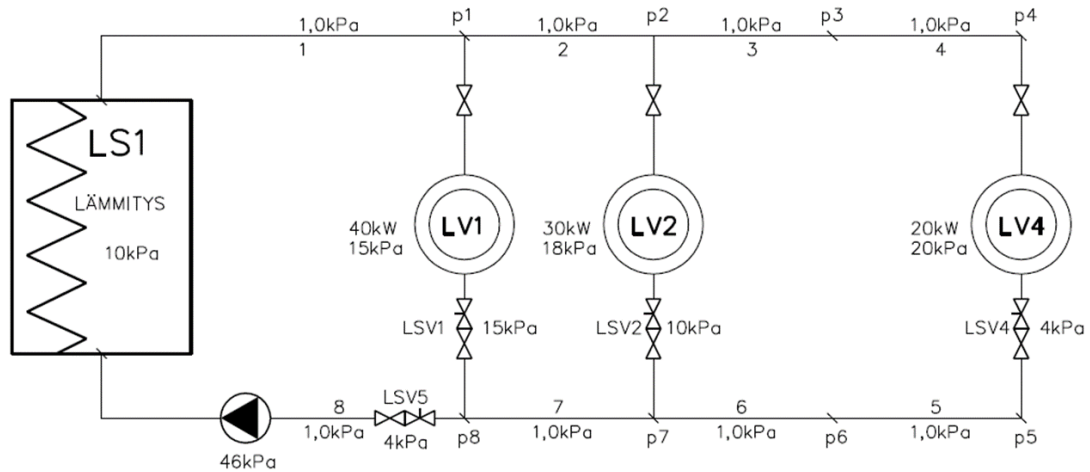
Tämän luvun perusteella voidaan tehdä tärkeä päätelmä. Mikäli olemassa olevaan järjestelmään lisätään virtausteknisesti vanhaa verkostoa väljempi verkosto ja se on virtaussuunnassa ennen vanhan verkoston ensimmäistä haaraa, ei lisätyllä haaralla ole vaikutusta vanhan verkoston virtaustekniseen toimintaan. Päätelmä sisältää oletuksen, että pumpun, lämmönsiirtimen ja ennen lisättävää haaraa olevan putkiston kapasiteetti riittää (ts. putkiston painehäviöt ja nesteen virtausnopeus eivät nouse kohtuuttomuuksiin).

4.1.2 Haaran lisääminen vanhan verkoston ensimmäisen haaran jälkeen

Tarkastelu 1

Kuvassa 9 on esitetty kuvitteellinen toimintakaavio, jossa on 3 verkostoa. Jokaista verkostoa voidaan säätää linjasäätöventtiilillä. Lisäksi järjestelmässä on pumpunsäätöventtiili, jonka aiheuttama painehäviö kaikissa tilanteissa on 4 kPa. Kuvassa on numeroitu putkiosuudet sekä esitetty verkostojen tehot ja painehäviöt. Putkiosuuksien kohdalla on esitetty kunkin putkiosuuden aiheuttama painehäviö. Verkoston painehäviön voidaan olettaa kattavan myös putkiosuus runkojohtojen (vaakaviivojen) välillä, pois lukien

linjasäätöventtiilien aiheuttama painehäviö. Linjasäätöventtiilien kohdalla on esitetty venttiilin aiheuttama painehäviö tasapainotilanteessa. Pumpun alapuolelle on merkitty pumpun tuottama nostokorkeus ja lämmönsiirtimeen sisään on merkitty lämmönsiirtimessä aiheutuva painehäviö. Pisteet p1–p8 ovat apupisteitä, joita käytetään asioiden esittämisessä. Kuvaa 9 käytetään tarkastelun 1 lähtötilanteena.



Kuva 9. Kuvitteellinen kolmen verkoston toimintakaavio.

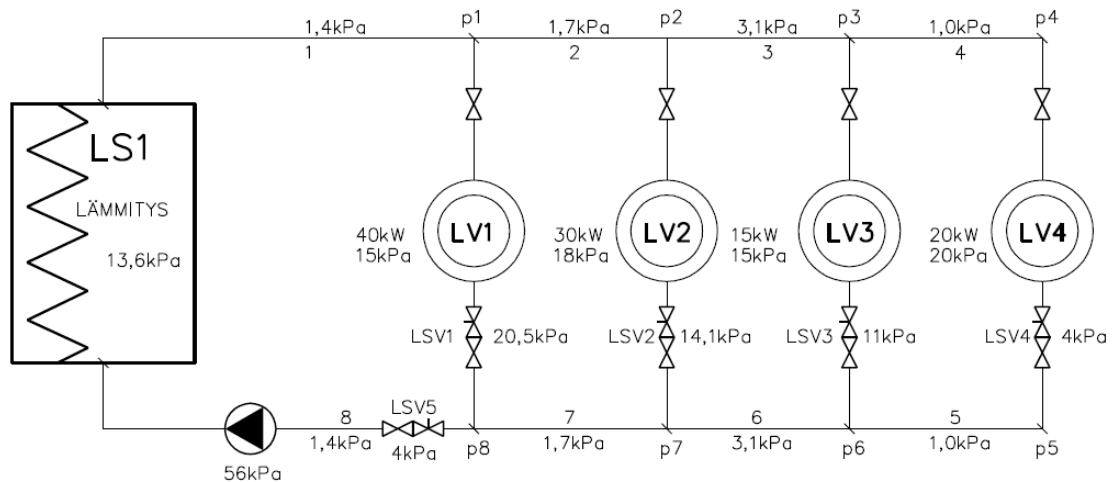
Voidaan olettaa, että verkosto toimii lähtötilanteessa tasapainossa ja asianmukaisella tavalla. Lähtötilanteen paineet pisteissä p1–p8 voidaan laskea vähentämällä pumpun nostokorkeudesta ennen tarkasteltavaa pistettä olevat virtausvastukset. Paineet kussakin pisteessä on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Paineet kuvan 9 pisteissä p1–p8.

| Piste | Paine kPa |
|-------|--------------|
| p1 | 35 |
| p2 | 34 |
| p3 | 33 |
| p4 | 32 |
| p5 | 8 |
| p6 | 7 |
| p7 | 6 |
| p8 | 5 |

Paine-erot verkostojen yli voidaan laskea vähentämällä verkostojen liityntäpisteiden paineet toisistaan. Esimerkiksi paine-ero verkoston LV1 yli saadaan vähentämällä paineesta p1 paine p8.

Lisätään tarkastelun 1 lähtötilanteen järjestelmään verkosto LV3, josta halutaan tehoa 15 kW. Verkoston painehäviö on 15 kPa. Kuvassa 10 on esitetty järjestelmän tila tasapainotettuna muutoksen jälkeen.



Kuva 10. Järjestelmän tila, kun verkosto LV3 on lisätty.

Taulukossa 5 on esitetty kuvan 10 pisteissä p1–p8 vallitsevat paineet.

Taulukko 5. Paineet kuvan 10 pisteissä p1–p8.

| Piste | Paine kPa |
|-------|--------------|
| p1 | 41 |
| p2 | 39,3 |
| p3 | 36,2 |
| p4 | 35,2 |
| p5 | 11,2 |
| p6 | 10,2 |
| p7 | 7,1 |
| p8 | 5,4 |

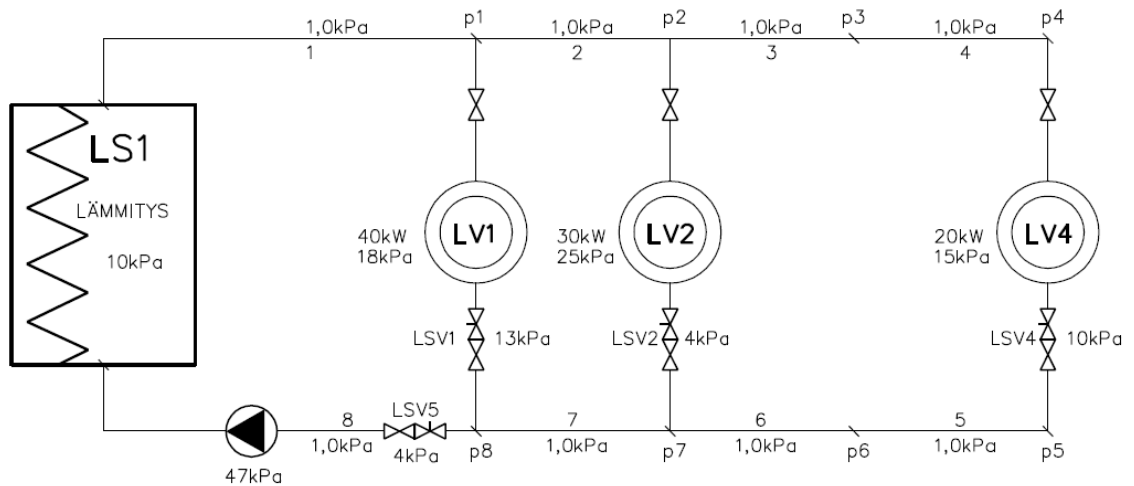
Kuvasta ja taulukosta nähdään seuraavaa. Painehäviö on kasvanut virtaaman kasvun seurauksena lämmönsiirtimessä sekä putkiosuuksilla 1, 2, 3, 6, 7 ja 8. Pumpun nostokorkeus on noussut. Linjasäätöventtiileitä LSV1 ja LSV2 on täytynyt kuristaa, jotta järjestelmä toimisi tasapainossa. Paineet ovat nousseet kaikissa tarkasteltavissa pisteissä. Paine-erot verkostojen LV1 ja LV2 yli ovat nousseet.

Tutkitaan edellä mainittujen muutosten syitä. Pumpun nostokorkeus on kasvanut, koska putkistojen painehäviöt ovat kasvaneet virtaaman kasvun seurauksena. Taulukosta 5 nähdään, että paine-erot ovat kasvaneet verkostojen LV1 ja LV2 yli. Tarkasteltavien pisteiden välinen paine-ero kasvaa aina, kun pisteiden jälkeen, vaikeimman kiertopiirin reitillä, painehäviöissä tapahtuu muutoksia. Esimerkiksi kun putkiosuuksien 2, 3, 6 ja 7 painehäviöissä tapahtuu muutoksia, kasvaa pisteiden p1 ja p8 välinen paine-ero näiden painehäviöiden kasvun verran. Tämä johtuu siitä, että tarkasteltavassa pisteessä, esimerkiksi pisteessä p1, on oltava suurempi paine, jotta se kykenee voittamaan vaikeimman kiertopiirin reitillä vastaan tulevat virtausvastukset.

Koska paine-ero kasvaa verkostojen LV1 ja LV2 sekä myös verkoston LV3 yli edellä esitetyistä syistä, on kyseisten verkostojen linjasäätöventtiileillä kompensoitava paineeron kasvu kuristamalla venttiileitä. Mikäli venttiilejä ei kuristettaisi, järjestelmä kylläkin ajautuisi tasapainotilaan, jossa jokainen kiertopiiri aiheuttaisi yhtä suuren painehäviön. Tällöin kuitenkin virtaamat poikkeaisivat halutuista arvoista.

Tarkastelu 2

Muokataan tarkastelun 1 lähtötilannetta siten, että järjestelmässä on edelleen verkostot LV1, LV2 ja LV4, mutta virtausteknisesti vaikein reitti on verkoston LV2 kiertopiiri. Tällöin järjestelmän tila tarkastelun 2 lähtötilanteessa on kuvan 11 mukainen.



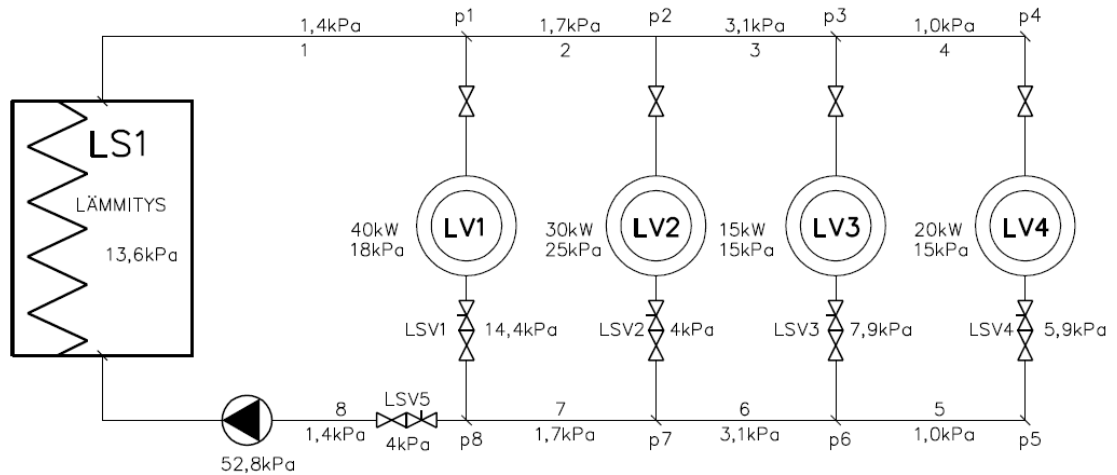
Kuva 11. Tarkastelun 2 lähtötilanne.

Paineet kuvan 11 pisteissä p1–p8 on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Paineet kuvan 11 pisteissä p1–p8.

| Piste | Paine kPa |
|-------|--------------|
| p1 | 36 |
| p2 | 35 |
| p3 | 34 |
| p4 | 33 |
| p5 | 8 |
| p6 | 7 |
| p7 | 6 |
| p8 | 5 |

Kun järjestelmään lisätään verkosto LV3, jonka teho on 15 kW ja painehäviö 15 kPa, asettuu järjestelmä kuvan 12 mukaiseen tilaan.



Kuva 12. Järjestelmän tila, kun verkosto LV3 on lisätty.

Taulukossa 7 on jälleen ilmoitettu paineet pisteissä p1–p8.

Taulukko 7. Paineet kuvan 12 pisteissä p1–p8.

| Piste | Paine kPa |
|-------|--------------|
| p1 | 37,8 |
| p2 | 36,1 |
| p3 | 33 |
| p4 | 32 |
| p5 | 11,2 |
| p6 | 10,2 |
| p7 | 7,1 |
| p8 | 5,4 |

Kuvasta ja taulukosta voidaan havaita seuraavaa. Painehäviöt ovat nousseet jälleen putkiosuuksilla 1, 2, 3, 6, 7 ja 8 sekä lämmönsiirtimessä. Pumpun nostokorkeus on kasvanut. Paine on kasvanut pisteissä p1, p2 sekä pisteissä p5–p8, mutta vähentynyt pisteissä p3 ja p4. Paine-ero on kasvanut verkostojen LV1 ja LV2 yli, mutta pienentynyt verkoston LV4 yli. Linjasäätöventtiiliä LSV1 on kuristettu ja linjasäätöventtiiliä LSV4 on avattu.

Muutokset painehäviöissä ja pumpun nostokorkeudessa aiheutuvat samoista syistä kuin tarkastelussa 1. Verkoston virtausteknisesti vaikeimpana reittinä pysyi muutoksen jälkeen edelleen verkoston LV2 kiertopiiri. Paine-ero verkoston LV2 yli on ennen verkoston

LV3 lisäystä ja lisäyksen jälkeen sama. Painehäviöt sekä ennen verkoston LV2 liityntäpistettä (putkiosuudet 1, 2, 7 ja 8), että pisteen jälkeen (putkiosuudet 3 ja 6) ovat kasvaneet lähtötilanteesta. Tämä johtaa siihen, että ennen verkoston LV2 liityntäpistettä paine-ero verkoston yli on oltava suurempi lähtötilanteeseen verrattuna (ks. tarkastelu 1).

Paine-eron pysyessä vakiona pisteiden p2 ja p7 välillä on paine-erojen verkoston LV2 liityntäpisteen jälkeen oltava pienempiä kuin lähtötilanteessa, koska putkiston painehäviöt ovat kasvaneet. Paine-erot verkoston yli kasvavat ennen järjestelmän vaikeimman kiertopiirin liitoskohtia ja pienenevät liitoskohtien jälkeen, olettaen että vaikein kiertopiiri pysyy vakiona ja painehäviöt kasvavat myös vaikeimman kiertopiirin liitoskohtien jälkeen. Näitä paine-erojen vaihteluja kompensoidaan linjasäätöventtiileillä.

Tässä alaluvussa esitettyjen kahden tarkastelun tarkoituksena oli esittää verkoston käyttämisen periaatteita, kun siihen kohdistuu jokin muutos. Luvusta voidaan johtaa kaksi tärkeää huomiota:

1. Kun olemassa olevaan järjestelmään lisätään haara (eli tehoa ja sitä kautta virtaamaa) ja järjestelmän vaikein kiertopiiri on virtaussuunnassa lisätyn haaran jälkeen, muutoksia tapahtuu ainoastaan ennen lisätyn haaran liitoskohtaa.
2. Mikäli järjestelmän vaikein kiertopiiri on virtaussuunnassa ennen lisättyä haaraa, on tällä vaikutusta koko verkostoon. Tällöin virtaussuunnassa ennen vaikeinta kiertopiiriä olevien tarkasteltavien pisteiden käytettävissä oleva paine-ero lähtötilanteeseen verrattuna kasvaa ja vastaavasti vaikeimman kiertopiirin jälkeen käytettävissä oleva paine-ero pienenee.

4.2 Simulaatiotarkastelut

Insinööriyön osana suoritettiin myös erään kohteen lämmitysverkostoon simulaatiotarkasteluja. Simulaatioiden tarkoituksena oli hahmottaa virtausteknisten muutosten vaikutuksia ja niiden suuruutta vanhan verkoston toimintaan. Tässä luvussa esitellään kohteen ja simulaatiotarkastelujen toteutusmenetelmän sekä luodaan katsaus simulaatioiden tuloksiin. Yksittäisiin tuloksiin ei paneuduta kovin tarkasti, vaan tarkoitus on esittää tuloksista ilmeneviä virtausteknisiin muutoksiin liittyviä havaintoja.

4.2.1 Kohteen esittely

Tarkastelut suoritettiin erään koulurakennuksen lämmitysverkostoon. Rakennuksessa on kaikkiaan neljä erillistä siipeä. Kaikissa siivissä on 2 kerrosta sekä IV-konehuoneet katoilla. Tarkasteltavassa siivessä lämmitettävää kerrosalaa on noin 4 700 m².

Insinööriyön tilaaja Vahanen Talotekniikka Oy on toteuttanut LVIA-suunnitelmia useisiin kiinteistön elinkaaren aikana toteutettuihin saneeraus- ja laajennushankkeisiin. Vahanen on myös tehnyt kohteeseen kaikki kiinteistön lämmitysjärjestelmät kattavan perussäätösuunnitelman.

Lämmitysmuotona kiinteistössä on kaukolämpö. Kohteessa on kaksi lämmönjakokeskusta, joista toinen palvelee yksistään tarkasteltavaa siipeä. Toinen järjestelmä tuottaa lämmön kolmelle muulle siivelle. Tarkasteltavan siiven lämmönsiirripaketin 4 lämmönsiirrintä palvelevat lämmintä käyttövettä, patteriverkostoa, lattialämmitysverkostoa sekä ilmanvaihdon lämmitysverkostoa. Tarkastelut suoritettiin patteri- ja IV-lämmitysverkoston toisiopuolelle. Taulukossa 8 on esitetty näiden verkostojen lähtötietoja.

Taulukko 8. Esimerkikohteen patteri- ja IV-lämmitysverkoston tietoja.

| | Patteriverkosto | IV-lämmitysverkosto | |
|----------------------|-----------------|---------------------|-------|
| Teho | 160 | 680 | kW |
| Mitoituslämpötilat | 60 / 30 | 60 / 30 | C / C |
| Virtaama | 1,29 | 5,48 | l/s |
| Verkoston painehäviö | 40 | 64 | kPa |

4.2.2 Tarkasteluiden toteutus

Simulaatiotarkastelut toteutettiin MagiCAD-suunnitteluohjelmistolla. Tarkasteluissa hyödynnettiin Vahanen Talotekniikka Oy:n laitteita ja ohjelmistoja sekä yrityksen tuottamia LVIA-suunnitelmia.

Simulaatioissa tarkasteltiin linjasäätöventtiilien painehäviöiden muutoksia virtausteknisen muutoksen kohdistuessa verkostoon. Linjasäätöventtiilin aiheuttamasta painehäviön

muutoksesta voidaan laskea kyseisen venttiilin läpi kulkeva virtaama, mikäli venttiiliä ei säädetä muutoksen jälkeen (esisäätöarvo pysyy ennallaan). Tarkasteluiden lähtötilanteena käytettiin kohteen lämmitysverkoston perussäätösuunnitelman mukaisia arvoja. Ennen tarkasteluita kaikki linjasäätöventtiilit numeroitiin, jotta vertailuja alkuperäisiin arvoihin voitaisiin tehdä. Liitteissä 1 ja 2 on esitetty kohteen patteri- ja IV-lämmitysverkoston verkostokaaviot. Liitteissä esitetyt verkostojen numerot toimivat myös linjasäätöventtiileiden järjestysnumeroina. Verkostojen vaikeimmat kiertopiirit lähtötilanteessa ovat patteriverkostossa linjasäätöventtiilin 2 kautta kulkeva kiertopiiri ja IV-lämmitysverkostossa linjasäätöventtiilin 7 kautta kulkeva kiertopiiri.

Simulaatiotarkasteluja toteutettiin kaikkiaan 24 laskentatapaukselle, joista 18 kohdistui patteriverkoston ja loput 6 laskentaa IV-lämmitysverkoston. Kussakin tarkastelussa verkoston lisättiin yksi haara, joka varustettiin linjasäätöventtiilillä. Lisätyn haaran virtaamaa vaihdeltiin eri tarkasteluihin. Haarat sijoitettiin laskentatapauksissa verkoston eri kohtiin. Liitteessä 3 on esitetty kaikki kohteeseen tehdyt tarkastelut.

Yksittäinen laskentatapaus eteni seuraavalla tavalla:

1. Lisättiin haluttuun verkoston kohtaan haara, varustettiin se linjasäätöventtiilillä ja asetettiin haaralle haluttu teho (virtaama) sekä haarassa aiheutuva kuvitteellinen painehäviö.
2. Tasapainotettiin verkosto MagiCAD-ohjelmiston tasapainotustyökalulla.
3. Kirjattiin muistiin jokaisen linjasäätöventtiilin aiheuttama painehäviö.
4. Verrattiin yksittäisen linjasäätöventtiilin aiheuttaman painehäviön muutosta alkuperäiseen arvoon.

4.2.3 Tulokset ja niiden analysointi

Liitteessä 4 on esitetty koontitaulukot eri tapauksien tuloksista. Lukemat on ilmoitettu muutoksina alkuperäisiin arvoihin. Seuraavaksi käsitellään tuloksista poimittuja

havaintoja. Tässä raportissa ei käsitellä laskentatapauksia kohta kohdalta läpi, vaan keskitytään vain esittämään keskeisimmät tuloksista löydetyt havainnot.

Luvussa 4.1.1 esitettiin, että jos lisättävä haara sijaitsee virtaussuunnassa ennen vanhan verkoston ensimmäistä haaraa, vanhan verkoston toiminnassa ei tapahdu muutoksia. Tämä käy ilmi myös liitteinä olevista taulukoista (ks. tapaukset 1 ja 8.1). Voidaan myös havaita, että vanhan verkoston toiminnan kannalta ei ole merkitystä sillä, onko verkostolla omaa päälinjasäätöventtiiliä, onko järjestelmässä pumppuventtiili tai otetaanko uusi haara päälinjasäätöventtiilin kummalta puolelta. Nämä asiat vaikuttavat ainoastaan lisättävän verkoston käytettävissä olevaan paine-eroon, mutta eivät vanhan verkoston toimintaan.

Paine-ero verkoston vaikeimman kiertopiirin yli on aina vakio, mikäli vaikein piiri ei muutu uuden haaran lisäyksen seurauksena. Tästä seuraa, että jos lisättävä haara on virtaussuunnassa vaikeimman kiertopiirin jälkeen, kasvaa paine-ero vaikeimman kiertopiirin haarakohtaa edeltävien verkostoiden yli. Tällöin paine-ero vaikeimman kiertopiirin liittytäpisteiden jälkeen olevien verkostoiden yli pienenee. Mitä kauempana tarkasteltava piste on vaikeimman kiertopiirin haarakohdasta, sitä suurempi on erotus lähtöarvoihin (vrt. tapaukset 2–4.3). Kun linjasäätöventtiilille käytettävissä oleva paine-ero muuttuu, heijastuu se myös venttiilin läpi kulkevaan virtamaan kaavan 32 mukaisesti.

$$q_{v2} = \sqrt{\frac{\Delta p_2}{\Delta p_1}} * q_{v1} \quad (32)$$

Δp on venttiilin aiheuttama painehäviö, Pa

Liitteen 4 taulukoissa 3 ja 6 on näytetty linjasäätöventtiileiden läpi kulkevien virtaamien prosentuaaliset muutokset tapauskohtaisesti. Vertailemalla näitä taulukoita taulukoihin, joissa on ilmoitettu venttiileiden aiheuttamien painehäviöiden prosentuaaliset muutokset, huomataan, että painehäviöiden muutokset ovat suurempia kuin virtaamien muutokset. Tämä tarkoittaa, että siirrettävän tehon muutokset ovat pienempiä kuin painehäviöiden. Tästä huomataan, että riippuen kulloinkin tehtävän tarkastelun näkökulmasta, on oleellista miettiä, onko järkevämpi tutkia painehäviöiden muutoksia vai virtaamien muutoksia.

Taulukoista nähdään myös se, että mikäli järjestelmän vaikein kiertopiiri muuttuu verkoston lisäyksen seurauksena, keskimääräiset muutokset järjestelmässä ovat huomattavasti suurempia (ks. tapaukset 5, 6, 8.5 ja 8.6). Myös IV-lämmitysverkostoa tarkasteltaessa huomataan, että keskimääräiset muutokset järjestelmässä ovat suurempia kuin patteriverkostossa, eli IV-verkosto on huomattavasti herkempi muutoksille. Tämä johtuu siitä, että IV-lämmitysverkostossa putkisto-osuudet ovat pidempiä (IV-koneet usein ka-tolla) kuin patteriverkostossa, eli verkoston kokonaispainehäviö on huomattavasti suurempi.

Tämän insinööriyön päätavoitteena oli kehittää menetelmä, jolla voitaisiin koko kiinteistön lämmitysverkostoa mallintamalla varmistua siitä, että myös vanha verkosto toimii virtausteknisesti hyvin uuden verkoston lisäämisen jälkeen. Raportissa on pyritty kuvaamaan verkoston käyttäytymistä erilaisissa muutostilanteissa. Seuraavassa luvussa tarkastellaan, kuinka edellä esitetyt asiat saadaan liittymään käytäntöön tilanteessa, jossa verkostoa ei tunneta sen virtausteknisiltä ominaisuuksiltaan.

5 Virtausteknisten lähtöarvojen selvittäminen ja järjestelmän säätäminen

Edellä on käsitelty virtaustekniikan teoriaa, verkoston tasapainotuksen merkitystä, pumppujen toimintaa verkostossa sekä verkoston käyttäytymistä muutostilanteessa. Näitä aiheita on pohdittu melko teoreettisesti, ja sen tarkoituksena on ollut johdattaa lukija tämän insinööriyön ongelman taustalla olevaan teoriaan. Tässä luvussa käsitellään insinööriyön varsinaisen ongelman ratkaisua ja siihen liittyviä menetelmiä.

5.1 Liityntäpisteen valinta ja lähtöarvojen selvitys

Kun olemassa olevaan, virtausteknisiltä ominaisuuksiltaan tuntemattomaan verkostoon lisätään haara, on varmistuttava siitä, että liityntäpisteen kapasiteetti on riittävä. Tämän lisäksi on tärkeää pohtia, onko liitoskohta sellainen, ettei muutos heijastu liian voimakkaasti jo olemassa olevaan verkostoon. Olennaista on, että nesteen virtausnopeus ja putkistojen painehäviöt eivät nouse kohtuuttomuuksiin, sillä nämä tuovat mukanaan muita haittavaikutuksia, joita käsitellään muissa insinööritöissä ja alan kirjallisuudessa (6, s. 147). Tässä alaluvussa käsitellään lisättävän haaran liityntäpisteen valintaa ja sen

virtausteknisten lähtöarvojen selvittämistä käytännössä. Oletuksena on, että verkostoa ei tunneta ja putkistokomponenttien (esim. pumppu ja lämmönsiirrin) kapasiteetti on riittävä.

5.1.1 Liityntäpisteen valinta

Luvussa 4 käsiteltiin verkoston käyttäytymistä muutostilanteessa. Tarkastelut tehtiin oletuksella, että verkoston virtaustekniset ominaisuudet tunnetaan ja että linjasäätöventtiileillä voidaan kompensoida eri kiertopiirien käytettävissä olevan paine-eron muutoksia, eli että linjasäätöventtiileitä voidaan säätää muutoksen jälkeen. Nyt tarkastellaan virtausteknisesti tuntemattoman verkoston näkökulmasta, kuinka liityntäpiste tulisi valita, jotta muutokset olemassa olevassa verkostossa eivät olisi häiritsevän suuria.

Häiritsevän suurena muutoksena voidaan pitää tilannetta, jossa jonkin linjasäätöventtiin virtaama muuttuu yli 15 % lisättävän haaran seurauksena. Tämä perustuu LVI-kortissa 014-10291 esitettyyn lukemaan lämmitysverkostossa suoritettavien mittausten tarkkuuteen. Kortin mukaan keskimääräinen mittaustarkkuus on 10–15 % riippuen mittaussuunnasta, laitteesta sekä mittausolosuhteista. [17.]

Virtausteknisesti tuntemattoman verkoston käyttäytymistä muutostilanteessa on vaikea arvioida. Muutostilanteessa vanhan verkoston käyttäytymiseen vaikuttavat ainakin seuraavat tekijät: liityntäpisteen sijainti virtaussuunnassa, verkoston vaikeimman kiertopiirin sijainti, putkikoot, putkiston avulla siirrettävät tehot sekä lisättävän haaran virtaama.

Suunniteltaessa uuden haaran lisäämistä vanhan verkoston osaksi näistä tiedetään varmasti ainoastaan lisättävän haaran vaatima virtaama. Tämän lisäksi vanhan järjestelmän kokonaistehoa voidaan arvioida lämmönsiirtimen koosta tai laitekilvestä, putkiston koosta ja järjestelmän lämpötilatasoista, tai voidaan laskea tarkahko arvo mittaamalla verkoston kokonaisvirtaama ja kertomalla se meno- ja paluujohdon lämpötilaerolla sekä siirtonesteenä käytettävän aineen ominaisuuksilla (kaava 28). Mitattaessa verkoston kokonaisvirtaamaa tulee ottaa huomioon, että kaikki verkoston termostaattiosat ja toimilaitteet ovat irti.

Kuitenkaan ilman laajempaa verkoston kartoittamista ei voida päätellä tehon jakautumista kullekin kiertopiirille. Ei myöskään mahdollisesti tiedetä verkoston rakennetta, sen vaikutusalueita eikä mahdollisten säätöelinten tarkkoja sijainteja.

Tällöin tulee arvioida muutoksen vaikutusta vanhaan verkostoon hyvin karkealla tavalla, mikäli halutaan päästä mahdollisimman pienellä työmäärällä. Luvussa 4 käsitellyistä asioista ja simulaatiotarkasteluissa ilmenneistä havainnoista huomataan, että on kaksi tekijää, jotka vaikuttavat vanhan verkoston toiminnan häiriintymisen riskiin huomattavasti: lisättävän haaran sijainti virtaussuunnassa ja lisättävän tehon (virtaaman) määrä.

Luvussa 4.1.1 esitettiin, että mikäli haara lisätään virtaussuunnassa ennen vanhan verkoston ensimmäistä haaraa, haaran lisäämisellä ei ole vaikutusta virtaussuunnassa liityntäpisteen jälkeen. Tällöin ainut vaikutus on kasvanut painehäviö liityntäpisteen ja pumpun välillä. Kaikkein järkevintä siis vanhan verkoston toiminnan varmistamisen kannalta on, mikäli mahdollista, lisätä uusi haara ennen vanhan verkoston ensimmäistä haaraa. Tämä tarkoittaa usein haaran asentamista hyvin lähelle lämmönlähdettä, joko lämmönjakohuoneeseen tai sen läheisyyteen. Toisaalta esimerkiksi IV-lämmitysverkostossa voi olla tilanne, että ensimmäinen haara on hyvinkin kaukana lämmöntuottolaitteistosta.

Se, onko ajateltu liityntäpiste järjestelmän ensimmäinen haara, voidaan selvittää kahdella tavalla. Ensimmäinen keino on seurata verkostoa silmämääräisesti lämmönjakohuoneesta liityntäpisteeseen asti. Toinen keino on mitata verkoston kokonaisvirtaama sekä liityntäpisteen virtaama ja verrata näitä. Mikäli nämä ovat yhtä suuret, liityntäpiste tulee olemaan verkoston ensimmäinen haara.

Suurissa kiinteistöissä, joissa välimatkat ovat pitkiä ja muutosalue on kaukana lämmönjakohuoneesta, ei ole todennäköisesti mahdollista tai järkevää liittää lisättävää haaraa verkoston ensimmäiseksi haaraksi. Tällöin tulee ensisijaisesti verrata lisättävää tehoa järjestelmän kokonaistehoon. Mikäli lisättävä teho on pienehkö, noin 10–15 % järjestelmän kokonaistehosta, lisättävän haaran vaikutukset vanhaan verkostoon jäävät suurella todennäköisyydellä hyvin maltillisiksi (alle 10 %:n virtaamamuutos jokaisessa linjasäätöventtiilissä) riippumatta liityntäpisteen sijainnista. On kuitenkin huomioitava, että lisättävä haara on liitettävä putkeen, jossa on kapasiteettia jäljellä, jottei virtausnopeus nouse liian suureksi.

Mikäli lisättävä teho on suurehko verrattuna järjestelmän kokonaistehoon, esimerkiksi 40–60 %, eikä lisättävää haaraa voida liittää järjestelmän ensimmäiseksi haaraksi, voidaan suorittaa seuraavanlaisia tarkasteluita arvioitaessa liityntäpisteen virtausteknisiä sijaintia verkostossa. Karkeaa arviointia voidaan suorittaa jo silmämääräisesti vertailemalla lämmönjakohuoneesta lähtevän putken kokoa liityntäpisteen putken kokoon. Mikäli koot näissä pisteissä ovat samat tai likimain yhtä suuret, voidaan päätellä, että liityntäpiste on virtausteknisesti todennäköisesti verkoston alkupäässä. Kuitenkin mentäessä suurempiin putkikokoihin yhden dimension kapasiteettialue on hyvin laaja. Tämä tarkoittaa, että samalla putkidimensiolla voidaan siirtää hyvinkin erisuuruisia tilavuusvirtoja. Tällöin ei voida luottaa siihen, että putken koko määrittelee edes karkeasti liityntäpisteen virtausteknisen sijainnin verkostossa.

Tarkempi tapa arvioida liityntäpisteen virtausteknisiä sijaintia verkostossa on mitata virtaama liityntäpisteessä sekä järjestelmän kokonaisvirtaama, esimerkiksi lämmönjakohuoneesta, ja verrata näitä keskenään. Jos nämä virtaamat ovat likimain yhtä suuret (muutos alle 10 %), on liityntäpiste virtausteknisesti verkoston alkupäässä. Hyvin suurella todennäköisyydellä tällöin myös vaikein kiertoipiiri on virtaussuunnassa tarkasteltavan pisteen jälkeen, koska ei ole oletettavaa, että verkoston alkupäästä lähdetäisiin kuljettamaan pieniä tehoja kovin kauas runkolinjasta. Tällaisessa tilanteessa voidaan liittää verkostoon jopa 50–60 % verkoston kokonaistehosta, vanhan verkoston toimintaa uhkaamatta. Oleellista on muistaa tarkastella myös, riittääkö putkessa kapasiteetti vai nouseeko virtausnopeus ja tätä myötä painehäviö liian suureksi.

Kun lisättävää tehoa kasvatetaan ja lisättävän haaran liityntäpistettä siirretään virtausteknisesti kauemmas lämmönlähteestä (ts. kokonaisvirtaaman ja tarkasteltavan liityntäpisteen virtaaman suhde alenee), kasvaa riski olemassa olevan verkoston toiminnan liiallisesta häiriintymisestä (vrt. liitteen 3 taulukot). Riski kasvaa kahdella tavalla. Ensiksikin lisättävä teho joudutaan kuljettamaan useamman haaran ohitse, jolloin näiden haarojen käytettävissä oleva paine-ero kasvaa tai pienenee, riippuen siitä kummalla puolella vaikeinta reittiä ne ovat (ks. luku 4.1.2). Tiettyjen pisteiden välinen paine-ero kasvaa virtaussuunnassa sen jälkeen olevien painehäviöiden kasvun summana (ks. luku 4.1.1). Käytettävissä oleva paine-ero heijastuu kyseisen haaran virtaamaan.

Toiseksi, jos verkoston vaikein reitti muuttuu haaran lisäämisen seurauksena, riski verkoston suurehkolle häiriintymiselle on ilmeinen. Mahdollisuus vaikeimman reitin muuttumisesta lisääntyy liityntäpisteen tehon ja etäisyyden lämmönlähteestä kasvaessa. Tämä voidaan perustella niin, että koska verkostoa ei tunneta, ei myöskään tiedetä vaikeinta reittiä. Mitä kauemmas virtaussuunnassa edetään, sitä todennäköisemmin lähestytään vaikeinta reittiä. Kun edetään tarpeeksi pitkälle, ohitetaan vaikein reitti ja tällöin riski vaikeimman kiertopiirin muuttumiselle lisättävän haaran seurauksena kasvaa. Vaikeimman reitin muutos heijastuu voimakkaasti vanhan verkoston käyttäytymiseen, jolloin myös verkoston virtaustekniset arvot muuttuvat merkittävästi (ks. liitteen 3 taulukot 3 ja 6).

Muutoinkin mitä enemmän tehoa lisätään ja mitä kauemmas se kuljetetaan, sitä enemmän verkoston kokonaispainehäviöt kasvavat. Tällöin pumppauskustannukset nousevat. Eteen voi tulla myös tilanne, että verkoston kokonaispainehäviöt nousevat arvioitua enemmän, jolloin pumpun teho ei riitä, ja pumppu tai sen juoksupyörä joudutaan vaihtamaan.

Tästä luvusta yhteenvetona voidaan todeta seuraavaa. Mikäli mahdollista, liitettävä haara on järkevää ottaa ennen olemassa olevan verkoston ensimmäistä haaraa. Tällöin voidaan olla varmoja, että vanhan verkoston toiminta ei häiriinny millään tasolla. Mikäli lisättävää haaraa ei ole mahdollista tai järkevää liittää vanhan verkoston ensimmäisen haaran ja lämmönsiirtimen väliin, on se pyrittävä asentamaan kuitenkin virtausteknisesti mahdollisimman lähelle ensimmäistä haaraa. Tällöin vähennetään riskiä vanhan verkoston häiriintymisestä, ja mahdolliset ongelmat ovat yksinkertaisempia selvittää, koska haaran lisääminen vaikuttaa vain sitä ennen olevaan verkoston osaan (mikäli vaikein reitti on lisättävän haaran jälkeen virtaussuunnassa). Pienet tehot voidaan liittää verkostoon riippumatta liityntäpisteen virtausteknisestä sijainnista, kunhan se liitetään riittävän suureen putkeen.

5.1.2 Liityntäpisteen virtausteknisten lähtöarvojen selvittäminen mittaamalla

Liityntäpisteen virtausteknisiin lähtöarvoihin voidaan ajatella kuuluvan kolme oleellista komponenttia: virtaama, virtausnopeus ja käytettävissä oleva paine-ero. Tämän lisäksi putkikoolla on merkitystä, koska putken poikkipinta-ala kasvaa säteen neliössä, jolloin putken säteen kaksinkertaistuessa putken poikkipinta-ala nelinkertaistuu. Tämä

tarkoittaa sitä, että mitä suurempi on putkidimensio, sitä laajempi kapasiteettialue sillä on, koska tilavuusvirta on putken poikkipinta-alan ja virtausnopeuden tulo (kaava 2). Tällöin sama absoluuttinen virtaamamuutos kahdessa eri putkidimensiossa tuottaa erilaisen suhteellisen muutoksen virtausnopeudessa.

Ennen mittauksia on huolehdittava, että järjestelmässä on vapaa kierto, eli kaikki pääte-laitteiden termostaatit ja toimilaitteet ovat irti. Oleellista siis on, että järjestelmään saadaan mitoitusoloja vastaavat virtaustekniset ominaisuudet, jotta lisättävälle verkostolle mitattuja lähtöarvoja voidaan soveltaa sellaisenaan. Mikäli mittaukset suoritettaisiin osakuormalla, ei järjestelmä toimisi oikein, kun vanhan verkoston kuorma vaihtuu.

Arvioitaessa liityntäpisteen kapasiteettia on oleellista tietää virtaama ja virtausnopeus sen kohdalla. Kun virtaama ja virtausnopeus ovat tiedossa, arvioidaan esimerkiksi putkistodiagrammin avulla, kuinka paljon kyseiselle putkiosuudelle voidaan lisätä tehoa, jotta virtausnopeus tai painehäviö eivät nousisi liiaksi.

Virtaama tarkasteltavassa liityntäpisteessä mitataan siihen asennetuista mittausyhteistä, esimerkiksi linjasäätöventtiilistä. Mikäli liityntäpisteessä tai sen välittömässä läheisyydessä ei ole mittausyhdettä, sellainen tulee asentaa. Kun virtaama on mitattu, voidaan laskea virtausnopeus (mikäli mittalaite ei sitä näytä) kaavan 6 mukaisesti.

Jos lisättävä haara asennetaan koko verkoston ensimmäiseksi haaraksi, riittää, että tiedetään verkoston kokonaisvirtaama. Tämä voidaan mitata esimerkiksi järjestelmän päälinjasäätöventtiilistä. Jälleen on arvioitava, nouseeko virtausnopeus liian suureksi.

Myös käytävissä oleva paine-ero tulee tietää, ennen kuin lisättävän haaran verkostoa aletaan suunnittelemaan, jotta verkosto voidaan suunnitella virtausteknisiltä ominaisuuksiltaan sopivaksi järjestelmään. Paine-ero mitataan liityntäpisteen sekä meno- että paluujohdosta. Mitattua paine-eroa hyödynnettäessä suunnittelun lähtöarvona on oleellista arvioida, onko olemassa mahdollisuus, että liityntäpiste on virtaussuunnassa verkoston vaikeimman reitin jälkeen. Mikäli mahdollisuus tähän on olemassa, tulee ottaa huomioon se, että käytävissä oleva paine-ero tulee vähenemään, kun liitos on tehty ja lisätty verkosto otettu käyttöön.

5.2 Lisättävän haaran suunnittelu

5.2.1 Lisättävän haaran mitoittaminen

Lisättävä haara on mitoittettava virtausteknisiltä ominaisuuksiltaan käytettävissä olevaa paine-eroa väljemmäksi. Tähän on kaksi syytä. Ensiksikin pumppauskustannukset nousevat, kun pumppu joutuu tuottamaan suuremman paineen verkostoon. Toiseksi, mikäli lisättävästä haarasta tulee järjestelmän vaikein kiertopiiri, kasvaa painetaso verkostossa. Tämä johtaa siihen, että mikäli vanhan verkoston kiertopiirejä ei kuristeta, lisättävään haaraan ei saada haluttua virtaamaa, olettaen, että pumppu tuottaa halutun laskennallisen virtaaman. Tällöin vanhan verkoston kiertopiireihin kulkeutuu laskennallista enemmän virtaamaa, kun taas lisättyyn haaraan haluttua vähemmän.

Tilannetta, jossa lisättävästä haarasta tulee verkoston ensimmäinen, voidaan hallita melko helposti aiheuttamalla vanhan verkoston linjasäätöventtiilillä painehäviötä verkostoon. Tällöin virtaamat saadaan jaettua halutulla tavalla verkostoihin. Jos haara kuitenkin liitetään keskelle vanhaa verkostoa, on käytännössä mahdotonta säätää tuntemattoman verkoston kaikkia säätöelimiä, minkä seurauksena verkoston virtaustekninen tasapaino-tila katoaa.

5.2.2 Lisättävän haaran tasapainottaminen ja liittäminen verkostoon

Suunnittelijan näkökulmasta lisättävän haaran tasapainottaminen ja liittäminen olemassa olevaan verkostoon on hyvin yksinkertaista. Lisättävä haara tasapainotetaan omana haaranaan ja haaraan asennettavalla päälinjasäätöventtiilillä tapetaan ylimääräinen paine kiertopiiristä, niin että lisättävä haara käyttää sille käytettävissä olevan paineen.

Linjasäätöventtiin painehäviön ja esisäätöarvon voi laskea vähentämällä käytettävissä olevasta paine-erosta lisättävän haaran kokonaispainehäviön. Mikäli lisättävästä haarasta tulee virtausteknisesti järjestelmän vaikein kiertopiiri, päälinjasäätöventtiin painehäviöksi valitaan 3–5 kPa. Tapauksessa, jossa haara lisätään olemassa olevan verkoston ensimmäisen haaran jälkeen, laskennallinen esisäätöarvo on ainoastaan viitteellinen, sillä käytettävissä olevaa paine-eroa ei voida täysin arvioida etukäteen.

5.3 Järjestelmän säätäminen haaran lisäyksen jälkeen

5.3.1 Pumpun säätäminen muutoksen jälkeen

Järjestelmään lisättävä teho kasvattaa verkoston kokonaisvirtaamaa. Uusi kokonaisvirtaama saadaan laskettua summaamalla ennen haaran lisäystä mitattuun kokonaisvirtaamaan lisättävän haaran tarvitsema virtaama. Pumpun tuottoa tulee siis lisätä uuden haaran tarvitseman virtaaman verran.

Verkoston kokonaispainehäviöiden kasvun seurauksena myös pumpun nostokorkeutta tulee nostaa. Kokonaispainehäviöiden kasvua on usein vaikea arvioida. Haastavaa se on erityisesti, mikäli haara liitetään verkoston loppuosaan. Kuitenkin, kun verkostossa on päälinjasäätöventtiili, riittää, että säädetään venttiilin läpi kulkemaan haluttu kokonaisvirtaama, jolloin pumpun nostokorkeus asettuu oikeaan pisteeseen. Aivan olennaista on, että pumppua säädettäessä verkostossa on vapaa kierto.

Mikäli pumppua ohjataan portaattomalla taajuusmuuttajalla, tulee taajuutta säätää niin, että haluttu virtaama saavutetaan. Jos pumppua ei säädetä paine-eron mukaan, vaan pumppu käy jatkuvasti vakiotajuudella, riittää pumpun pyörimisnopeuden säätäminen niin, että haluttu virtaama saadaan kulkemaan päälinjasäätöventtiilin lävitse.

Jos pumppua säädetään paine-eron mukaan, asetetaan paine-eron asetusarvoksi se arvo, jolla haluttu virtaama saadaan kulkemaan päälinjasäätöventtiilin lävitse. Tämä pätee pumppuihin, joita säädetään joko verkoston tai pumpun yli mitattavan paine-eron mukaan.

Tapauksessa, jossa pumppua säädetään verkoston yli mitatun paine-eron mukaan ja lisättävä haara liitetään ennen paine-eroa mittaavia antureita, toimitaan saman menetelmän mukaan. Paine-eron asetusarvo asetetaan sellaiseksi, että haluttu virtaama kulkee päälinjasäätöventtiilin lävitse.

Kun järjestelmässä on vakionopeuspumppu, säätötoimenpiteet riippuvat muutoksen suuruudesta sekä järjestelmässä jo olevista säätömenetelmistä. Mikäli järjestelmässä on käytetty esimerkiksi ohivirtaussäätöä tai kuristussäätöä, tulee ensisijaisesti tarkistaa,

riittääkö ohivirtauksen pienentäminen tai kuristuksen väljentäminen lisäämään riittävästi virtaamaa verkostoon. Mikäli tämä ei riitä, on juoksupyörän kokoa kasvatettava. Tällöin hienosäätö suoritetaan joko kuristamalla päälinjasäätöventtiiliä tai ohivirtauksen avulla.

5.3.2 Lisätyn haaran ja vanhan verkoston keskinäinen tasapainottaminen

Lisätyn haaran ja vanhan verkoston keskinäinen tasapainottaminen suoritetaan mittamalla molempiin osiin halutut virtaamat. Tavoitteena on saada lisättyyn verkostoon suunnittelijan laskema virtaama ja vanhaan verkostoon ennen uuden verkoston lisäämistä mitattu virtaama. Pumpun tuottaessa halutun kokonaisvirtaaman riittää, kun mitataan lisättyyn verkostoon haluttu virtaama, jolloin vanhaan verkostoon kulkeutuu väistämättä sama virtaama kuin ennen haaran lisäämistä.

Mittausta suoritettaessa on huomattava, että kun säädetään lisättävää verkostoa ja sinne kulkeutuvaa virtaamaa, saattaa myös pumpun tuottama virtaama pienentyä. Siksi pumpun ja lisätyn verkoston säädön jälkeen on tarpeellista tehdä vielä tarkistusmittaukset. Täten varmistetaan siitä, että halutut virtaamat saavutetaan.

6 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä pyrittiin laskennallisesti esittämään, kuinka lämmitysverkoston laajentaminen vaikuttaa olemassa olevan verkoston käyttäytymiseen ja tekniseen toimivuuteen. Tämän lisäksi työssä käsiteltiin käytännön näkökulmasta tietyn pisteen virtausteknisten lähtöarvojen selvittämistä sekä lisätyn ja vanhan verkoston keskinäistä tasapainottamista laajentamisen jälkeen.

Työn ensimmäisessä osassa käsiteltiin virtaustekniikan teoriaa, jonka tunteminen on olennaista verkoston toiminnan ymmärtämisessä. Toisessa osassa esitettiin verkoston toimintaan vaikuttavia tekijöitä ja pyrittiin havainnollistamaan, kuinka tärkeää on, että lämmitysverkosto toimii virtausteknisesti tasapainotilassa. Kolmannessa osassa käsiteltiin verkostoon kohdistuvan muutoksen vaikutuksia koko verkostoon sekä esitettiin työn osana suoritettujen simulaatiotarkasteluiden pohjalta tehtyjä havaintoja. Neljännessä

osassa pohdittiin, kuinka lähtöarvojen selvittäminen ja järjestelmän säätäminen voitaisiin suorittaa käytännössä.

Insinööriyön tavoitteena oli laatia ohjeistus tietyn pisteen virtausteknisten lähtöarvojen selvittämisestä sekä lisätyn ja vanhan verkoston säätämisestä. Ohjeiden avulla joko suunnittelija tai tilaaja voi teettää ohjeistuksen mukaiset toimenpiteet lämmitysjärjestelmään, jolloin voidaan varmistua siitä, että koko järjestelmä toimii asianmukaisella tavalla verkoston laajentamisen jälkeen. Selvitys- ja säätöohjeet ovat työn liitteinä 5 ja 6.

Lisätessä uutta haaraa lämmitysverkostoon on oleellista varmistua, että olemassa olevan verkoston toiminta ei merkittävästi häiriinny. Olemassa olevaan verkostoon laajentamisen seurauksena kohdistuviin muutoksiin voidaan vaikuttaa kahdella tavalla: lisättävän tehon määrällä ja liityntäpisteiden valinnalla. Mitä vähemmän tehoa lisätään, sitä pienemmät ovat vaikutukset olemassa olevaan verkostoon. Mikäli lisättävästä haarasta tulee järjestelmän ensimmäinen haara, ei olemassa olevaan verkostoon kohdistu sen toimintaa häiritseviä muutoksia. Lisätessä haara keskelle olemassa olevaa verkostoa vaikutukset olemassa olevaan verkostoon kasvavat sitä mukaa, mitä kauempana lämmöntuottolaitteistosta liityntäpiste on.

Vaikka insinööriyön aihe ja toteuttaminen osoittautui ajateltua teoreettisemmaksi, oli työ tekijän näkökulmasta mielenkiintoinen. Työtä tehdessä kävi ilmi, että on oleellista ymmärtää asioiden taustalla vaikuttavat seikat. Asioiden melko perusteellisen esittämisen seurauksena insinööriyö vahvisti kirjoittajan teknistä osaamista lämmitysverkoston toiminnan ja virtaustekniikan osalta.

Työn edetessä ilmeni useita allekirjoittaneen mielestä käyttökelpoisia jatkotutkimusaiheita. Tämän työn teorian pohjalta voisi tehdä tutkimuksen, jossa tutkittaisiin tässä työssä esiteltyjen asioiden soveltumista käytäntöön. Tutkimuksessa voitaisiin tutkia mitausten avulla, käyttäytyykö verkosto muutoksen jälkeen kuten teoriassa. Tämän lisäksi voitaisiin tarkastella, ovatko tässä työssä esitetyt selvitys- ja säätöohjeet käyttökelpoisia käytännössä.

Voitaisiin myös tehdä tutkimus, jossa suoritettaisiin useiden suurehkojen kiinteistöjen lämmitysverkostoihin keskenään samankaltaisia kuviteltuja muutoksia ja ohjelmallisesti

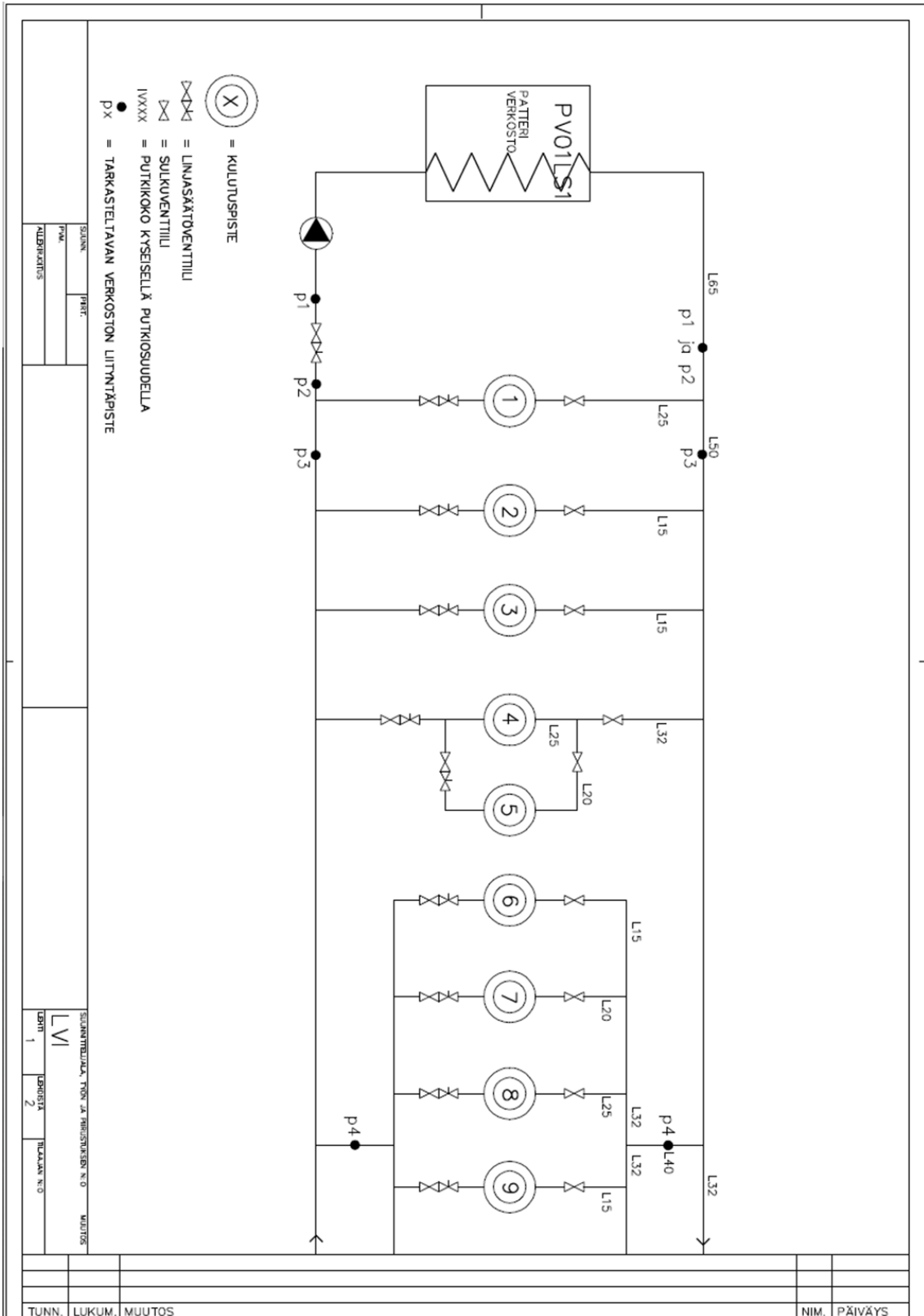
simuloitaisiin, kuinka nämä muutokset vaikuttavat olemassa olevaan verkostoon. Tutkimuksen tavoitteena olisi selvittää, onko mahdollista luoda suunnittelijalle viitteellisiä ohjearvoja sille, kuinka paljon tehoa mistäkin verkoston kohdasta on mahdollista ottaa, jotta olemassa olevan verkoston toiminta ei häiriinny merkittävästi. Tämä edellyttäisi, että ensin kehitettäisiin jokin esimerkiksi suhteellisuuteen perustuva indikaattori, jolla voitaisiin saattaa erilaiset verkostot keskenään tarkastelukelpoisiksi.

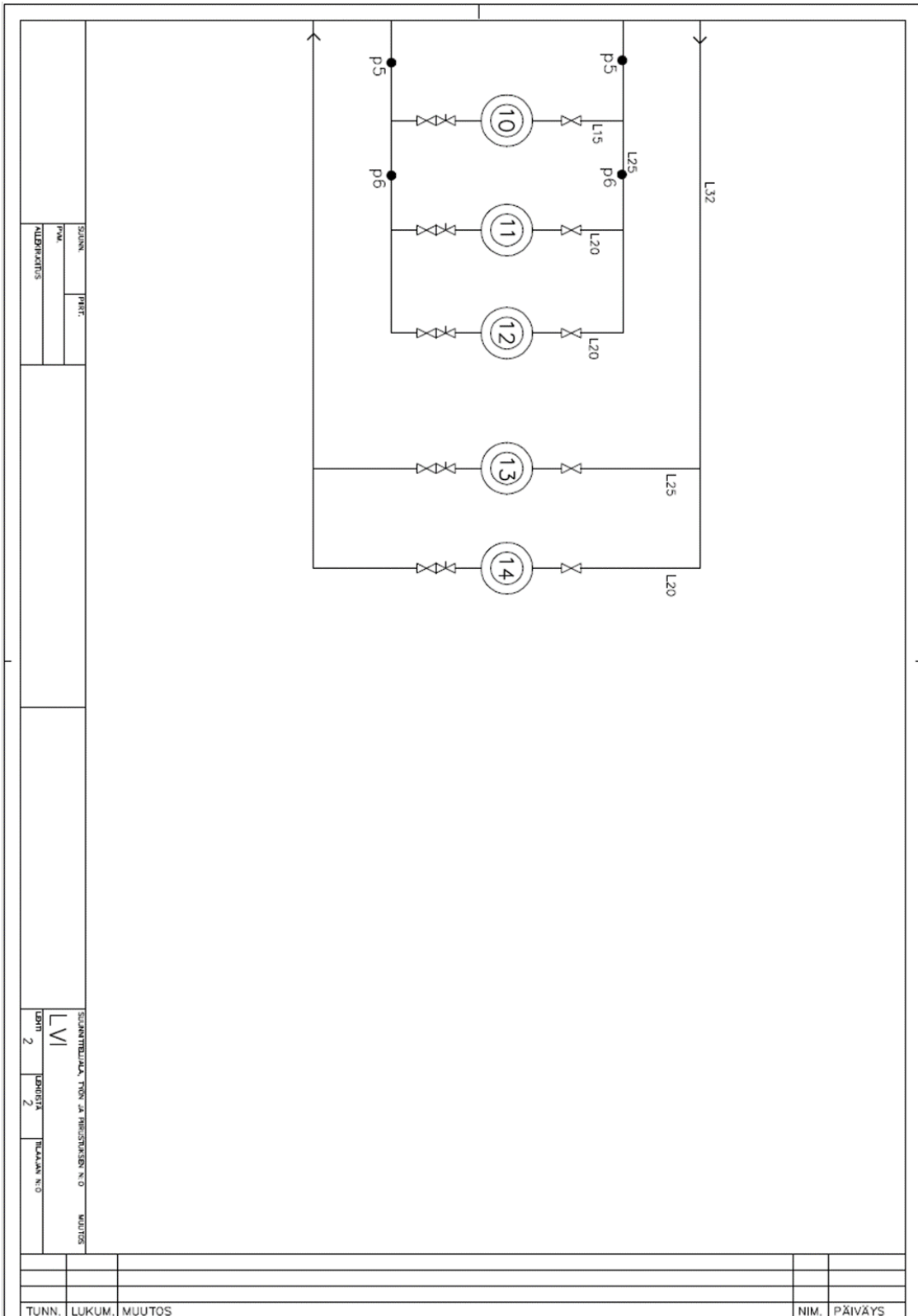
Lähteet

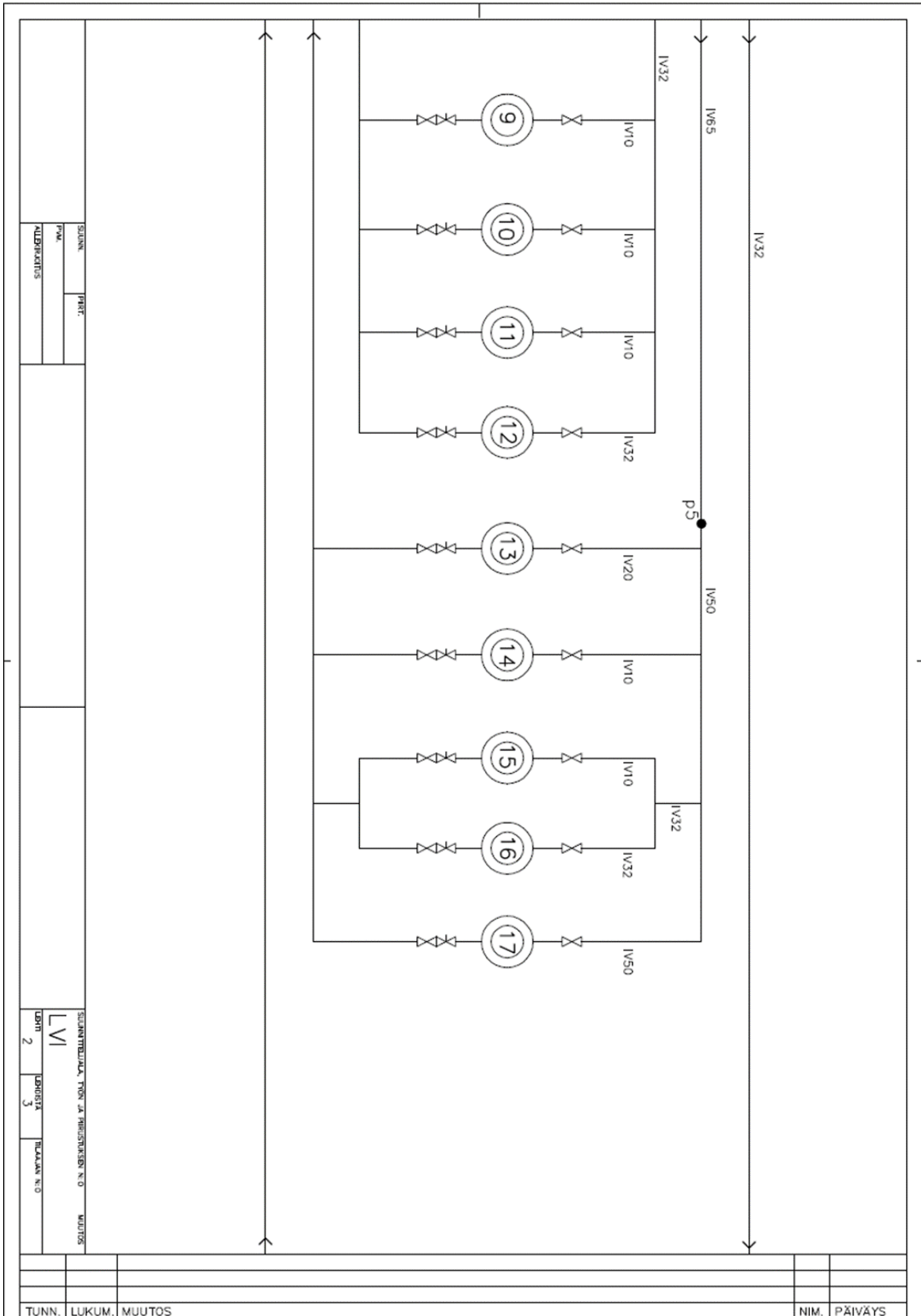
- 1 Taloteknisen suunnittelun tehtäväluettelo TATE18. 2017. LVI 03-10620. Rakennustietosäätiö.
- 2 Bohl, Willi. 1984. Teknillinen virtausoppi. Tampere. Oy Sonator Ab.
- 3 Valkeapää, Aki. 2017. Virtaustekniikan perusteet, osa 1. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 4 Virtaustekniikka ja lämmönsiirto. Luentomoniste. Aalto yliopisto.
- 5 Valkeapää, Aki. 2017. Virtaustekniikan perusteet, osa 2. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 6 Seppänen, Olli. 1995. Rakennusten lämmitys. Jyväskylä. Suomen LVI-liitto Ry.
- 7 Valkeapää, Aki. 2017. Termodynamiikan perusteita, osa 2. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 8 Valkeapää, Aki. 2017. Verkoston virtaustekninen tasapainotus. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 9 Sulamäki Hanna. 2018. Painesuhteet pumppukiertoisessa lämmitysjärjestelmässä. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 10 The Centrifugal Pump. Verkkoaineisto. Grundfos. <http://machining.grundfos.com/media/16620/the_centrifugal_pump.pdf>. Luettu 19.9.2019.
- 11 Pumput ja putkistot teoriassa ja käytännössä. ITT Water & Wastewater Suomi Oy. Luettu 19.9.2019.
- 12 Valkeapää, Aki. 2017. Keskipakopumput, osa 1. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 13 Vuorelainen, Olavi. 1983. LVI-tekniikka: lämmönjakelu. Espoo. Otakustantamo.
- 14 Pulli, Martti. 2018. Virtaustekniikka. Tampere. Tammertekniikka.
- 15 Energiatehokkaat pumput. 2011. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <https://www.motiva.fi/files/5343/Energiatehokkaat_pumput.pdf>. Luettu 23.9.2019.

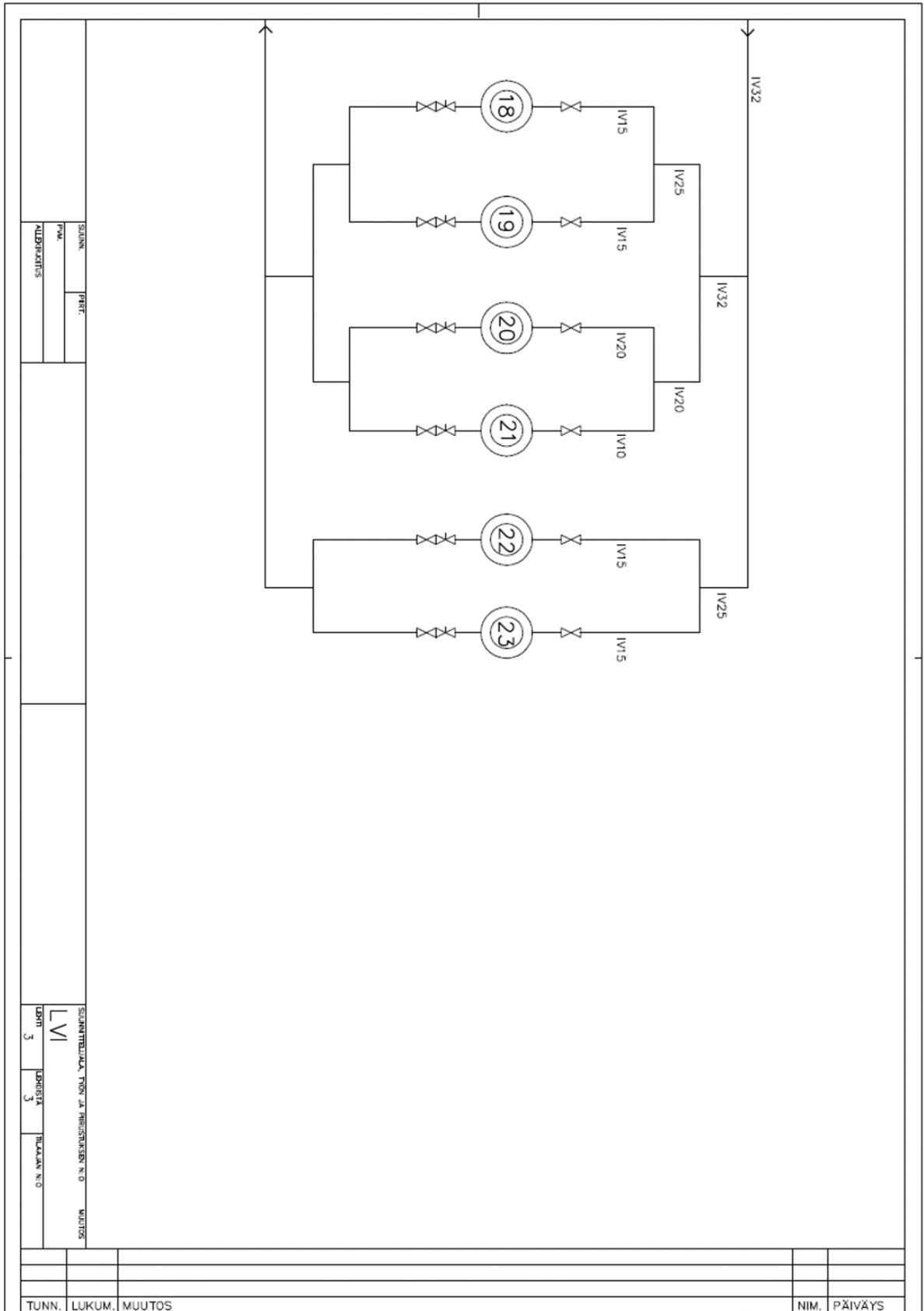
- 16 Pakarinen, Mauno. 2019. Myyntipäällikkö, Kolmeks Oy, Turku. Sähköpostikeskustelu 24.9.2019.
- 17 Lämmitysverkostojen vesivirran mittaus. 1999. LVI 014-10291. Rakennustietosäätiö.

Verkostokaavio: Patteriverkosto









Simulaatiotarkasteluiden tapaukset

Tapauksissa 1-7 katso patteriverkoston verkostokaavio, liite 1

1. Lisätään patteriverkosto ennen verkoston ensimmäistä haaraa (verkostokaavio). Lisätty teho 60 kW. Lisätyn verkoston painehäviö 10 kPa
 - 1.1. Lisätään uusi verkosto pisteeseen p1
 - 1.2. Lisätään uusi verkosto pisteeseen p2
2. Lisätään uusi patteriverkosto pisteeseen p3
 - 2.1. Lisätty teho 15 kW, painehäviö 10 kPa.
 - 2.2. Lisätty teho 30 kW, painehäviö 10 kPa.
 - 2.3. Lisätty teho 60 kW, painehäviö 10 kPa.
 - 2.4. Lisätty teho 90 kW, painehäviö 10 kPa.
3. Lisätään uusi patteriverkosto pisteeseen p4
 - 3.1. Lisätty teho 15 kW, painehäviö 10 kPa.
 - 3.2. Lisätty teho 30 kW, painehäviö 10 kPa.
 - 3.3. Lisätty teho 60 kW, painehäviö 10 kPa.
 - 3.4. Lisätty teho 90 kW, painehäviö 10 kPa.
4. Lisätään uusi patteriverkosto pisteeseen p5
 - 4.1. Lisätty teho 15 kW, painehäviö 10 kPa.
 - 4.2. Lisätty teho 30 kW, painehäviö 10 kPa.
 - 4.3. Lisätty teho 60 kW, painehäviö 10 kPa.
 - 4.4. Lisätty teho 90 kW, painehäviö 10 kPa.
5. Lisätään uusi patteriverkosto pisteeseen p6, jolloin verkoston vaikein reitti muuttuu. Vaikein reitti ei kuitenkaan ole lisättävä verkosto. Lisätty teho 60 kW. Lisätyn verkoston painehäviö 5 kPa
6. Lisätään uusi patteriverkosto pisteeseen p6, jolloin lisätyn verkoston kiertopiiri tulee olemaan virtausteknisesti vaikein. Lisätty teho 60 kW. Lisätyn verkoston painehäviö 10 kPa
7. Muokataan verkostoa siten, että vaikein kiertopiiri tulee olemaan verkoston loppupäässä.
 - 7.1. Lisätään uusi patteriverkosto pisteeseen p4. Lisätty teho 60 kW. Lisätyn verkoston painehäviö 10 kPa
 - 7.2. Lisätään uusi patteriverkosto pisteeseen p5. Lisätty teho 60 kW. Lisätyn verkoston painehäviö 10 kPa
8. Lisätään IV-lämmitysverkostoon verkosto. Lisättävän verkoston teho on 120 kW (18%) ja painehäviö 15 kPa. Katso IV-lämmitysverkoston verkostokaavio, liite 2.
 - 8.1. Lisätään uusi IV- lämmitysverkosto pisteeseen p1.
 - 8.2. Lisätään uusi IV-lämmitysverkosto pisteeseen p2.
 - 8.3. Lisätään uusi IV-lämmitysverkosto pisteeseen p3.
 - 8.4. Lisätään uusi IV-lämmitysverkosto pisteeseen p4.
 - 8.5. Lisätään uusi IV-lämmitysverkosto pisteeseen p5. Tässä tapauksessa lisättävän verkoston painehäviö 10 kPa. Tällöin koko verkoston vaikein kiertopiiri muuttuu (ei kuitenkaan lisättävä verkosto).
 - 8.6. Lisätään uusi IV-lämmitysverkosto pisteeseen p5, jolloin lisättävästä verkostosta tulee koko järjestelmän vaikein kiertopiiri.

| |
|---|
| Lisätyn tehon prosentuaalinen osuus järjestelmän lähtötehosta (lisätty teho / järjestelmän alkuteho *100) |
| 15 kW: 9% |
| 30 kW: 19% |
| 60 kW: 38% |
| 90 kW: 56% |

Simulaatiotarkasteluiden tulokset

Taulukko 1. Patteriverkoston linjasääventtilien aiheuttaman painehävien muutokset tapauksittain. Taulukossa ilmoitettu muutoksen suuruus ja suunta.

| Case | Lähtö kPa | 1.1. kPa | 1.2. kPa | 2.1. kPa | 2.2. kPa | 2.3. kPa | 2.4. kPa | 3.1. kPa | 3.2. kPa | 3.3. kPa | 3.4. kPa | 4.1. kPa | 4.2. kPa | 4.3. kPa | 4.4. kPa | 5. kPa | 6. kPa | 7.1. kPa | 7.2. kPa | |
|------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|--------|----------|----------|-----|
| LSV | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 6,4 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,4 | 0,8 | 1,4 | 0,3 | 0,7 | 1,5 | 2,4 | 0,3 | 0,7 | 1,5 | 6,0 | 8,4 | 5,0 | 4,7 | 10,5 | |
| 2 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 3,6 | 6,9 | 3,5 | 3,2 | 9,0 | |
| 3 | 21,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 3,6 | 6,9 | 3,5 | 3,2 | 9,0 | |
| 4 | 15,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -0,1 | -0,2 | -0,4 | 0,0 | 0,0 | -0,1 | -0,2 | 3,7 | 6,7 | 3,3 | 3,0 | 8,8 |
| 5 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 6 | 19,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -3,1 | 0,0 | -1,2 | -2,7 | -6,3 | -7,3 | 0,6 | -2,8 | 0,0 | 2,7 | |
| 7 | 13,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -1,4 | -2,3 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | |
| 8 | 17,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -3,2 | 0,0 | -1,2 | -2,7 | -6,3 | -7,3 | 0,6 | -2,8 | 0,0 | 2,7 | |
| 9 | 17,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -3,2 | 0,0 | -1,6 | -3,6 | -8,5 | -11,3 | -1,6 | -5,0 | 0,0 | 0,5 | |
| 10 | 18,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -3,2 | 0,0 | -1,7 | -3,8 | -9,0 | -12,2 | -2,1 | -6,0 | 0,0 | 0,0 | |
| 11 | 17,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -3,2 | 0,0 | -1,7 | -3,8 | -9,0 | -12,2 | -2,1 | -10,5 | 0,0 | 0,0 | |
| 12 | 17,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -3,2 | 0,0 | -1,7 | -3,8 | -9,0 | -12,2 | -2,1 | -0,7 | 0,0 | 0,0 | |
| 13 | 19,9 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -0,1 | -0,3 | -0,7 | -1,1 | -0,1 | -0,3 | -0,7 | 2,5 | 6,2 | 2,8 | 2,5 | 8,4 | |
| 14 | 19,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -0,1 | -0,3 | -0,7 | -1,1 | -0,1 | -0,3 | -0,7 | 2,5 | 6,2 | 2,8 | 2,5 | 8,4 | |

Taulukko 2. Patteriverkoston linjasääventtilien aiheuttamien painehävien prosentuaaliset muutokset.

| Case | 1.1. % | 1.2. % | 2.1. % | 2.2. % | 2.3. % | 2.4. % | 3.1. % | 3.2. % | 3.3. % | 3.4. % | 4.1. % | 4.2. % | 4.3. % | 4.4. % | 5. % | 6. % | 7.1. % | 7.2. % | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|------|--------|--------|--|
| LSV | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 0 | 3 | 6 | 13 | 21 | 5 | 11 | 23 | 38 | 5 | 11 | 23 | 94 | 101 | 78 | 63 | 142 | |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 72 | 100 | 70 | 53 | 151 | |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17 | 62 | 16 | 14 | 41 | |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | -1 | -2 | 0 | -1 | -1 | 24 | 134 | 22 | 19 | 55 | |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -16 | 0 | -6 | -14 | -33 | -38 | 6 | -15 | 0 | 13 | |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -10 | -17 | 7 | 0 | 0 | 0 | |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -18 | 0 | -7 | -16 | -36 | -42 | 8 | -16 | 0 | 15 | |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -18 | 0 | -9 | -20 | -48 | -64 | -21 | -28 | 0 | 3 | |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -18 | 0 | -9 | -21 | -50 | -68 | -27 | -33 | 0 | 0 | |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -19 | 0 | -10 | -22 | -53 | -71 | -30 | -61 | 0 | 0 | |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -18 | 0 | -10 | -22 | -52 | -70 | -29 | -4 | 0 | 0 | |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | -1 | -3 | -6 | -1 | -1 | -3 | 13 | 63 | 14 | 12 | 40 | |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | -2 | -3 | -6 | -1 | -2 | -3 | 13 | 66 | 14 | 12 | 41 | |

Taulukko 3. Patteriverkoston linjasäästöventtiilien läpi kulkevien virtaamien prosentuaaliset muutokset, olettaen että LSV:itä ei säädetä muutoksen jälkeen.

| Case | 1.1. | 1.2. | 2.1. | 2.2. | 2.3. | 2.4. | 3.1. | 3.2. | 3.3. | 3.4. | 4.1. | 4.2. | 4.3. | 4.4. | 5. | 6. | 7.1. | 7.2. |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|------|------|
| LSV | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 3 | 6 | 10 | 2 | 5 | 11 | 17 | 2 | 5 | 11 | 39 | 42 | 33 | 28 | 56 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 31 | 41 | 30 | 24 | 58 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 27 | 8 | 7 | 19 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 12 | 53 | 10 | 9 | 24 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -8 | -15 | -3 | -7 | -18 | -21 | 3 | -8 | 0 | 6 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2 | 0 | 0 | -5 | -9 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -10 | -17 | -4 | -8 | -20 | -24 | 4 | -9 | 0 | 7 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -9 | -17 | -5 | -11 | -28 | -40 | -11 | -15 | 0 | 1 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -9 | -17 | -5 | -11 | -29 | -43 | -14 | -18 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -10 | -17 | -5 | -12 | -31 | -46 | -16 | -38 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -10 | -17 | -5 | -11 | -31 | -45 | -16 | -2 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | -2 | -3 | 0 | -1 | -2 | 6 | 28 | 7 | 6 | 18 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | -2 | -3 | 0 | -1 | -2 | 6 | 29 | 7 | 6 | 19 |

Taulukko 6. IV-lämmitysverkoston linjasäätöventtiilien läpi kulkevien virtaamien prosentuaaliset muutokset, olettaen että LSV:itä ei säädetä muutoksen jälkeen.

| Case | 8.1. | 8.2. | 8.3. | 8.4. | 8.5. | 8.6. |
|------|------|------|------|------|------|------|
| LSV | % | % | % | % | % | % |
| 1 | 0 | 7 | 15 | -7 | 19 | 20 |
| 2 | 0 | 8 | 16 | -14 | 20 | 22 |
| 3 | 0 | 6 | 13 | -11 | 16 | 16 |
| 4 | 0 | 9 | 18 | -16 | 22 | 24 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 39 | 44 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 7 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 51 | 57 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 45 | 50 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 38 | 43 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 36 | 40 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 36 | 41 |
| 13 | 0 | 0 | 12 | 0 | 7 | 10 |
| 14 | 0 | 0 | 14 | 0 | -15 | -11 |
| 15 | 0 | 0 | 18 | 0 | -20 | -15 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 0 | 0 | 22 | 0 | -25 | -19 |
| 18 | 0 | 6 | 14 | 0 | 18 | 19 |
| 19 | 0 | 6 | 14 | 0 | 18 | 19 |
| 20 | 0 | 8 | 17 | 0 | 21 | 23 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22 | 0 | 7 | 15 | 0 | 19 | 21 |
| 23 | 0 | 7 | 13 | 0 | 0 | 21 |

Taulukko 5. IV-lämmitysverkoston linjasäätöventtiilien aiheuttamien painehäviöiden prosentuaaliset muutokset.

| Case | 8.1. | 8.2. | 8.3. | 8.4. | 8.5. | 8.6. |
|------|------|------|------|------|------|------|
| LSV | % | % | % | % | % | % |
| 1 | 0 | 15 | 32 | -13 | 41 | 44 |
| 2 | 0 | 17 | 35 | -26 | 45 | 48 |
| 3 | 0 | 13 | 27 | -20 | 34 | 34 |
| 4 | 0 | 18 | 39 | -29 | 49 | 53 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 94 | 107 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 15 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 128 | 145 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 110 | 125 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 92 | 104 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 84 | 95 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19 | 19 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 86 | 98 |
| 13 | 0 | 0 | 26 | 0 | 15 | 20 |
| 14 | 0 | 0 | 31 | 0 | -27 | -22 |
| 15 | 0 | 0 | 40 | 0 | -36 | -29 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 0 | 0 | 49 | 0 | -43 | -34 |
| 18 | 0 | 13 | 30 | 0 | 39 | 42 |
| 19 | 0 | 13 | 31 | 0 | 39 | 43 |
| 20 | 0 | 16 | 36 | 0 | 47 | 50 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22 | 0 | 14 | 33 | 0 | 43 | 46 |
| 23 | 0 | 14 | 27 | 0 | 0 | 47 |

Taulukko 4. IV-lämmitysverkoston linjasäätöventtiilien aiheuttaman painehäviön muutokset tapauksittain.

| Case | Lähtö | 8.1. | 8.2. | 8.3. | 8.4. | 8.5. | 8.6. |
|------|-------|------|------|------|------|------|------|
| LSV | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa |
| 1 | 26,5 | 0,0 | 4,0 | 8,5 | -3,5 | 10,8 | 11,6 |
| 2 | 24,1 | 0,0 | 4,0 | 8,5 | -6,3 | 10,8 | 11,6 |
| 3 | 31,6 | 0,0 | 4,0 | 8,5 | -6,3 | 10,8 | 10,6 |
| 4 | 21,9 | 0,0 | 4,0 | 8,5 | -6,3 | 10,8 | 11,6 |
| 5 | 6,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 6,4 | 7,3 |
| 6 | 15,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,3 | 2,3 |
| 7 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 6,4 | 7,3 |
| 8 | 5,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 6,4 | 7,3 |
| 9 | 7,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 6,4 | 7,3 |
| 10 | 7,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 6,4 | 7,3 |
| 11 | 14,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,9 | 2,9 |
| 12 | 7,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 6,4 | 7,3 |
| 13 | 16,8 | 0,0 | 0,0 | 4,3 | 0,0 | 2,6 | 3,4 |
| 14 | 14,1 | 0,0 | 0,0 | 4,3 | 0,0 | -3,8 | -3,0 |
| 15 | 10,6 | 0,0 | 0,0 | 4,3 | 0,0 | -3,8 | -3,0 |
| 16 | 4,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 17 | 8,8 | 0,0 | 0,0 | 4,3 | 0,0 | -3,8 | -3,0 |
| 18 | 26,2 | 0,0 | 3,4 | 8,0 | 0,0 | 10,2 | 11,1 |
| 19 | 26,1 | 0,0 | 3,4 | 8,0 | 0,0 | 10,2 | 11,1 |
| 20 | 22,0 | 0,0 | 3,4 | 8,0 | 0,0 | 10,3 | 11,1 |
| 21 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 22 | 24,0 | 0,0 | 3,4 | 8,0 | 0,0 | 10,2 | 11,1 |
| 23 | 23,8 | 0,0 | 3,4 | 6,5 | 0,0 | 0,0 | 11,1 |

Virtausteknisten lähtöarvojen selvitysohje

1. Irrotetaan verkostosta kaikki toimilaitteet ja termostaatit, jotta saadaan järjestelmään vapaa kierto.
2. Kirjataan ylös pumpun säätötiedot*.
3. Mitataan järjestelmän kokonaisvirtaama esimerkiksi pumppuventtiilistä tai päälinjasäätöventtiilistä. Mikäli järjestelmässä ei ole mittausyhdetä, josta kokonaisvirtaama voitaisiin mitata, asennetaan sellainen.
4. Asennetaan suunnittelijan osoittamiin liityntäpisteisiin haarat. Suunnittelija osoittaa myös lisättävien haarojen nimellishalkaisijat. Menojohtoon lisättyyn haaraan asennetaan sulkuventtiili sekä mittausyhde ja paluujohtoon lisättyyn haaraan asennetaan linjasäätöventtiili.
5. Mitataan paine-ero liityntäpisteiden yli.
6. Kiinnitetään toimilaitteet ja termostaatit takaisin paikoilleen.
7. Tehdään mittauspöytäkirja, joka toimitetaan suunnittelijalle. Pöytäkirjasta on käytävä ilmi seuraavat asiat: Pumpun käyntitiedot, järjestelmän kokonaisvirtaama sekä paine-ero liityntäpisteiden yli.

*Pumpun säätötiedoilla tarkoitetaan pumpun tuottoon vaikuttavien tekijöiden arvoja. Mikäli järjestelmässä on yksiportainen vakionopeuspumppu, kirjataan ylös säätöventtiilin esisäätöarvo ja säätötapa. Jos pumpussa on useampi tehoporras, kirjataan ylös mahdollisen säätöventtiilin esisäätöarvo, säätötapa ja säätöporras. Taajuusmuuttajapumpuista kirjataan ylös pumpun taajuus sekä pumpun ohjaustapa (verkoston vai pumpun yli).

Mikäli lisättävä haara liitetään olemassa olevan verkoston ensimmäisen haaran jälkeen, suoritetaan edellisten lisäksi seuraavat toimenpiteet:

- Asennetaan virtaaman mittaukseen soveltuva mittausyhde liityntäpisteen kohdalle olemassa olevaan paluujohtoon.
- Mitataan virtaama liityntäpisteessä. Virtaama kirjataan mittauspöytäkirjaan.

Järjestelmän säätöohje lisätyn haaran jälkeen

Ennen säätötyön suorittamista urakoitsijan on varmistettava, että uusi verkosto on täytetty ja ilmattu.

1. Irrotetaan verkostosta kaikki toimilaitteet ja termostaatit, jotta saadaan järjestelmään vapaa kierto.
2. Säädetään pumpun tuotto vastaamaan suunnittelijan ilmoittamaa kokonaisvirtaamaa*.
3. Säädetään lisättyyn verkostoon sinne haluttu virtaama.
4. Varmistetaan, että pumpun tuottama virtaama vastaa edelleen suunnittelijan ilmoittamaa kokonaisvirtaamaa. Mikäli pumpun tuotto on muuttunut, toistetaan vaiheet 2-4.
5. Kirjataan ylös pumpun säätötiedot**.
6. Kiinnitetään toimilaitteet ja termostaatit takaisin paikoilleen.
7. Tehdään mittaus- ja säätöpöytäkirja, joka toimitetaan suunnittelijalle. Pöytäkirjasta on käytävä ilmi seuraavat asiat: pumpun käyntitiedot, järjestelmän kokonaisvirtaama sekä lisätyn ja vanhan verkoston virtaamat.

*Yksiportaista vakionopeuspumppua säädetään päälinjasäätöventtiilillä, pumppuventtiilillä tai ohijuokutusventtiilillä, mikäli säätövaraa riittää. Jos vakionopeuspumpussa on useampi säätöporras, säädetään pumppuun sellainen tehoporras, jolla haluttu virtaama saavutetaan. Säätöventtiilillä hienosäädetään virtaama oikeaksi. Taajuusmuuttajapumpuissa säädetään pumpun taajuutta niin, että oikea virtaama saavutetaan.

** Pumpun säätötiedoilla tarkoitetaan pumpun tuottoon vaikuttavien tekijöiden arvoja. Mikäli järjestelmässä on yksiportainen vakionopeuspumppu, kirjataan ylös säätöventtiilin esisäätöarvo ja säätötapa. Jos pumpussa on useampi tehoporras, kirjataan ylös mahdollisen säätöventtiilin esisäätöarvo, säätötapa ja säätöporras. Taajuusmuuttajapumpuista kirjataan ylös pumpun taajuus sekä pumpun ohjaustapa (verkoston vai pumpun yli).