



Ilma suljetussa lämmitysverkostossa

Johanna Parviainen

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2020

Talotekniikan koulutus
LVI-talotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Talotekniikan koulutus
LVI-talotekniikka

PARVIAINEN, JOHANNA:
Ilma suljetussa lämmitysverkostossa

Opinnäytetyö 58 sivua, joista liitteitä 3 sivua
Huhtikuu 2020

Tässä opinnäytetyössä tarkasteltiin ilman kertymistä suljettuun lämmitysverkostoon. Työssä selvitettiin suljetun lämmitysverkoston eri komponenttien osuutta ilman kertymisen kannalta eri käyttötilanteissa.

Ilman kertymisessä suljettuun lämmitysverkostoon suuressa roolissa on paine ja sen käyttäytyminen verkoston eri kohdissa. Työssä selvitetään, mitkä ovat suurimmat syyt, miksi ilmaa kertyy verkostoon ja kuinka tämä olisi estettävissä. Lisäksi selvitetään lämmönsiirtonesteenä toimivan veden, sekä muiden lämmönsiirtonesteseosten ominaisuuksia ja eroavaisuuksia kaasujen liukenemisen näkökulmasta.

Työssä lasketaan eri lämmönsiirtonesteiden kaasukonsentraatioita eri nesteiden lämpötiloissa ja paineissa. Lisäksi pohditaan laskennan tulosten avulla verkostossa aiheutuvia ongelmia ja mahdollisia ratkaisuita niihin.

Opinnäytetyön lopputuloksena todettiin, että lämmitysverkostojen oikeaoppisella hallinnalla ilmaongelmat voitaisiin välttää verkostossa kokonaan. Työn tuloksena saatiin myös laskennallinen vertailu lämmönsiirtonesteiden kyvystä sitoa kaasuja itseensä.

Asiasanat: ilma, paine, suljettu lämmitysverkosto

ABSTRACT

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

PARVIAINEN, JOHANNA:
Air Accumulation in Closed Heating System

Bachelor's thesis 58 pages, appendices 3 pages
April 2020

The objective of this thesis was to collect information about accumulation of air in a closed heating system. The work explains the biggest mistakes that have been done with closed heating systems. The work also explains how to correct the mistakes to prevent air accumulation in the system.

Understanding the effect of pressure was critical in this work. Pressure within the different parts of a system has a significant impact on how air accumulates in the system. Pressure is a variable in the calculations and a pressure drop at some point in a closed system can cause gas bubbles to separate from the liquid.

The thesis also investigated the physical properties of water as heat transfer fluid, as well as other heat transfer fluid mixtures, and their ability to trap gases. Gas concentrations of different heat transfer fluids are calculated.

As a result of the thesis, a report of computational comparison of the heat transfer fluids' ability to trap the gases was created. The calculation also revealed how air problems could be avoided altogether, in theory.

Key words: air accumulation, pressure, closed heating system

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	PAINE	7
	2.1 Painekäsitteet.....	7
	2.2 Paine suljetussa verkostossa	9
	2.3 Kavitaatio	12
	2.3.1 Pumppukavitaatio	12
	2.3.2 Putkistokavitaatio.....	13
	2.3.3 Venttiilikavitaatio.....	13
3	SULJETTU LÄMMITYSVERKOSTO.....	15
	3.1 Toiminta	15
	3.2 Komponentit.....	16
4	LÄMMÖNSIIRTONESTEET	22
5	ILMA VERKOSTOSSA	25
6	SYYT ILMAN KERTYMISEEN.....	27
7	ILMAN POISTAMINEN VERKOSTOSTA	32
	7.1 Vapaa kaasu	32
	7.2 Mikrokuplat.....	33
	7.3 Liuennut kaasu.....	34
	7.4 Hapeton täyttö.....	34
8	KAASUJEN LIUKENEMINEN NESTEISIIN	36
9	LASKENTA	39
	9.1 Vesijohtoveden kaasukonsentraatio.....	39
	9.2 Vesijohtoveden kaasukonsentraatio alipaineistettuna	41
	9.3 Muiden lämmönsiirtonesteseosten kaasukonsentraatio	43
	9.4 Käytännön esimerkki.....	45
10	POHDINTA	46
	10.1 Laskennan tuloksien pohdinta	46
	10.2 Käytännön pohdinta.....	48
	10.3 Suunnittelussa huomioitavat asiat	50
11	YHTEENVETO	52
	LÄHTEET.....	54
	LIITTEET	56

Liite 1. Veden saturaatioarvot ilmalle eri lämpötiloissa ja paineissa (ylipaine) (mol/m ³).....	56
Liite 2. Veden saturaatioarvot ilmalle eri lämpötiloissa ja paineissa (alipaine) (mol/m ³).....	57
Liite 3. Lasketut lämmönsiirtonesteseosten saturaatioarvot ilmalle huonelämpötilassa ja eri paineissa (mol/m ³).....	58

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön taustalla on huoli väärin käytetyistä tai toteutetuista lämmitysverkostoista. Käyttäjä huomaa lämmitysverkostossa häiritsevää ääntä tai kokee huonepatterin lämpiävän huonosti. Usein tähän on syynä lämmitysverkostoon kertynyt ilma, jonka huoltomies ilmaa ulos patterista. Pelkkä patterin ilmaaminen kuitenkin harvoin riittää ja ilmaa saattaa kertyä verkostoon jatkuvasti. Tällöin syy ilman kertymiseen tulee selvittää.

Opinnäytetyön tarkoituksena on tarkastella teoreettisesti virheitä mitä lämmitysverkoston suunnittelussa, toteutuksessa ja käytössä tehdään ja mikä on fyysikaalinen tausta näille ilmiöille. Lisäksi luodaan ehdotukset, jonka perusteella nämä virheet voitaisiin korjata ja näin ollen estää lähes kokonaan ilman kertyminen lämmitysjärjestelmään. Tavoitteena on myös tutkia lämmönsiirtonesteiden ominaisuuksia sekä niiden lämpötilan ja painetason vaikutusta nesteen kykyyn sitoa kaasuja.

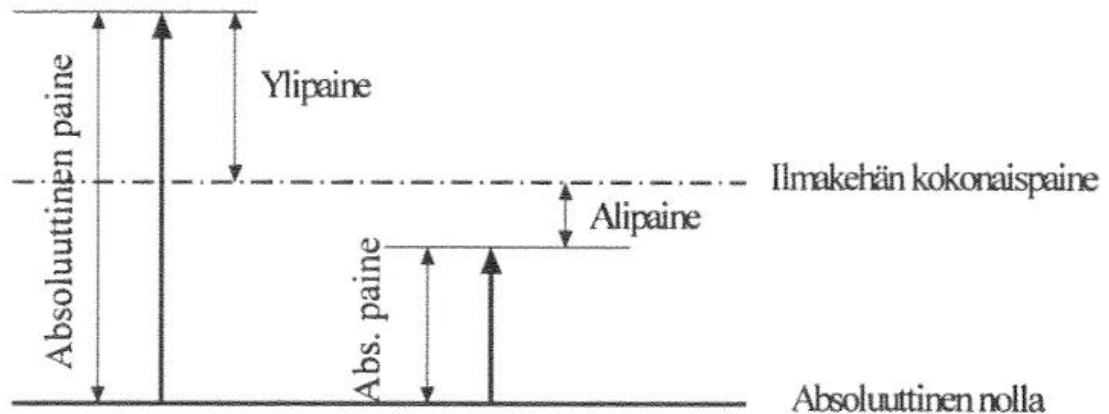
Opinnäytetyön alussa pohditaan painekäsitteitä sekä paineen käyttäytymistä suljetussa lämmitysverkostossa. Paineosiossa käsitellään myös kavitaatiota, jonka oletetaan muodostavan verkostoon huomattava määrä ilmaustarvetta vaativasta ilmasta. Tämän jälkeen käsitellään suljettua verkostoa yleisesti, tarkemmin suljetun verkoston komponentteja, joiden oletetaan olevan työn kannalta merkityksellisiä, sekä yleisesti erilaisissa järjestelmissä käytettäviä lämmönsiirtonesteitä ja niiden seoksia. Teoriaosuuden loppupuolella selvitetään mitä ilma aiheuttaa verkostossa, kuinka ilmaa sinne kertyy ja miten sitä voidaan poistaa. Lisäksi käydään läpi kaavat lämmönsiirtonesteiden kaasukonsentraatioiden laskentaan ja lasketaan niiden avulla käytännön esimerkkejä. Lopuksi pohditaan laskennan tuloksia peilaten niitä teoriaan, ja luodaan tältä pohjalta yhteenveto mitä suunnittelijoiden tulisi muistaa suunnitellessa entistä varmatomisempia lämmitysverkostoja.

Työ tehtiin Insinööritoimisto AX-LVI Oy:n toimeksiannosta ja työn valvonnasta vastasi yrityksen puolesta LVI-suunnittelija Urpo Koivula (DI). Lisäksi työhön saatiin asiantuntija-apua Markku Johanssonilta LVIS-Kulutusseuranta Oy:stä.

2 PAINE

Paine on yksi tärkeimmistä osa-alueista, kun käsitellään suljettuja lämmitysverkostoja ja vertaillaan niiden käyttöä, komponentteja ja olosuhteita ilman kertymisen kannalta. Tässä kappaleessa käydään läpi suljettua lämmitysverkostoa koskevat painekäsitteet ja määritelmät.

Painetta voidaan kuvata voimalla, joka kohdistuu tiettyyn pinta-alaan. Kaikkia paineita verrataan absoluuttiseen nollaan, joka löytyy avaruudesta. Absoluuttista painetta tarvitaan usein erilaisissa laskelmissa. Normaalii ilmamehän kokonaispaineen arvo on noin 1,0 bar.



KUVA 1. Paineen käsitteitä (Laiho 2010, 12)

2.1 Paineikäsitteet

Ylipaine, alipaine ja paine-ero

Käytännössä kaikki paineen mittaaminen on aina paine-eron mittaamista. Tämä tarkoittaa esimerkiksi linjasäätöventtiilissä paine-eroa venttiilin yli, jonka perusteella voidaan laskea virtaama venttiilin läpi. LVI-tekniikan sovelluksissa paineesta puhuttaessa tarkoitetaan usein ylipainetta, eli paine-eroa verrattuna ilmanpaineeseen. Alipaine verrataan myös ilmanpaineeseen, mutta sen arvo on pienempi kuin vallitsevan ilmanpaineen. (Laiho 2010, 11). Kuvassa 1 on havainnollistettu eri painekäsitteet ja niiden suhde toisiinsa.

Absoluuttinen paine

Absoluuttinen nolla on niin kutsuttu referenssitaso, joka löytyy avaruudesta. Absoluuttinen paine tarkoittaa painetta, mitä voidaan mitata suhteessa absoluuttiseen nollassoon eli tyhjiöön. LVI-tekniikan sovelluksissa absoluuttista painetta merkitään indeksillä *a* tai *abs*. (Wika n.d).

Staattinen paine

Staattisella paineella tarkoitetaan liikkumattomassa fluidissa nesteen sisäistä painetta, joka vaikuttaa putkessa joka suuntaan yhtä suurella voimalla (Laiho 2010, 12).

Dynaaminen paine

Dynaaminen paine kuvaa liike-energiaa liikkuvassa fluidissa. Sen suuruus on yhtä suuri kuin se paine, joka tarvitaan, jotta saadaan levossa oleva fluidi kyseiseen virtausnopeuteen. Dynaamiselle paineelle pätee perusyhtälö

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

jossa P_d on dynaaminen paine (Pa), ρ on virtaavan fluidin tiheys (kg/m^3) ja v on virtaavan fluidin keskimääräinen virtausnopeus (m/s) (Laiho 2010, 13).

Ilmanpaine

Ilmanpaine on ympäröivän maailman kannalta tärkein paine ja myös sitä mitataan suhteessa absoluuttiseen nollassoon. Ilmanpaine kuvaa ympäröivän ilman massaa, joten ilmanpaine on sitä pienempi mitä korkeammalle ja näin ollen lähemmäs mennään kohti absoluuttista nollassoa. Ilmanpaine on koko ajan muuttuva ja siihen vaikuttavat esimerkiksi maapallon sääolosuhteet. Merenpinnan tasossa ilmanpaineen keskiarvo on noin 1,013.25 mbar. Matala- ja korkeapaineiden aiheuttama vaihtelu ilmanpaineessa on noin 5%. (Wika n.d).

Painehäviö

Painehäviöitä aiheuttavat kaikki virtausta hidastavat osat. Näitä ovat esimerkiksi lämmitysverkoston laitteistot ja putkiston kitka- ja kertavastukset. Keinotekoista

painehäviötä aiheutetaan verkostoon linjasäätöventtiileitä kiristämällä, jolla saadaan luotua verkostoon tasapaino. Mitä suurempi on verkoston painehäviö, sitä enemmän joudutaan tekemään pumpulla työtä.

2.2 Paine suljetussa verkostossa

Bernoulin yhtälö pätee kokoon puristumattomalle ja kitkattomalle virtaukselle, ja se sitoo toisiinsa paineen, virtausnopeuden ja korkeuseron. Häviämättömässä virtauksessa kokonaisenergia säilyy eli paine-energian, kineettisen energian ja potentiaalienergian summa on vakio. (Laiho 2010, 16). Matemaattisesti tämä voidaan esittää

$$P_s + P_d + P_h = \text{vakio} \quad (2)$$

jossa P_s on staattinen paine (Pa), P_d on dynaaminen paine (Pa) ja P_h on hydrostaattinen paine (Pa).

Potentiaalienergiaa vastaava hydrostaattinen paine voidaan määritellä kaavalla

$$P_h = \rho g h \quad (3)$$

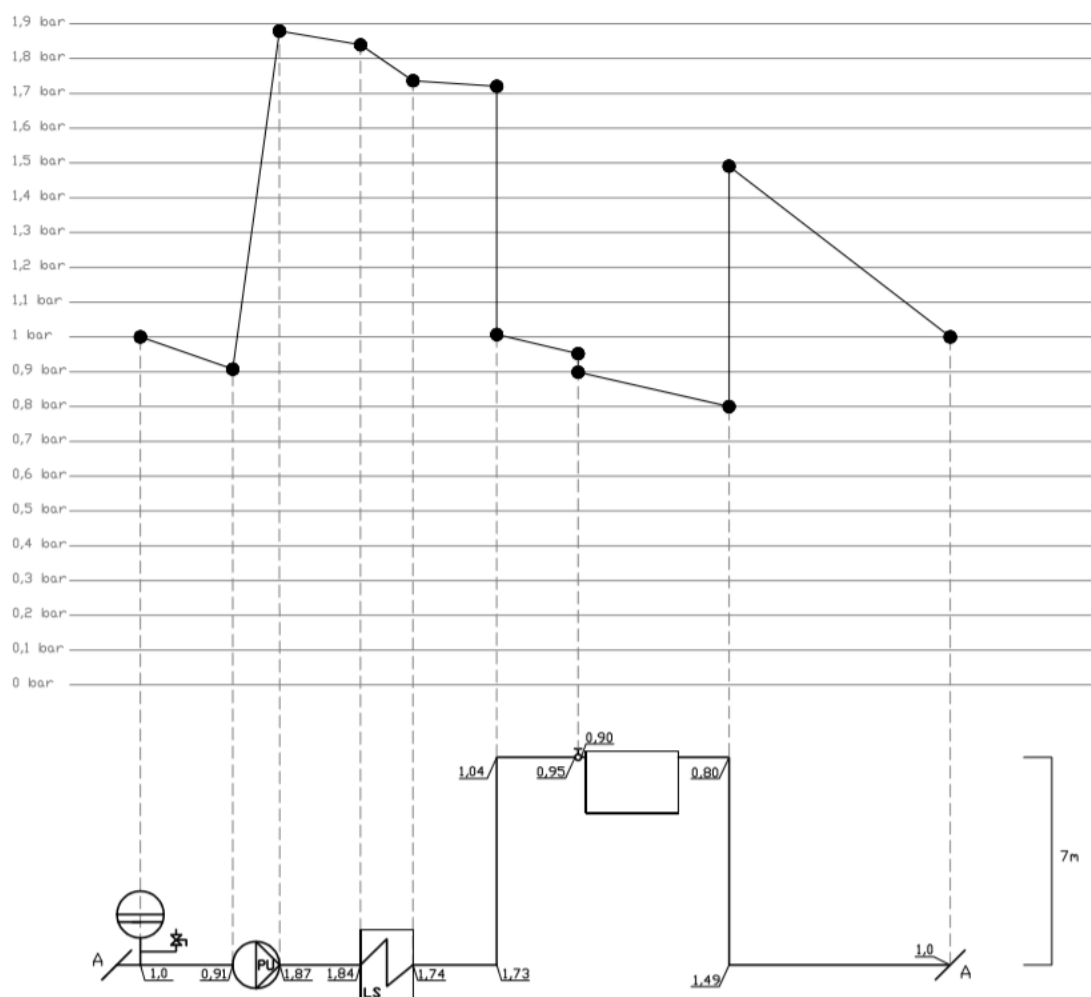
jossa ρ on virtaavan fluidin tiheys (kg/m^3), g on painovoiman kiihtyvyys $9,81 \text{ m/s}^2$, ja h on korkeusasema (m).

Suljetussa verkostossa paine esiintyy staattisena ja dynaamisena paineena ja virtauksen kokonaispaine on näiden kahden paineen summa. Paine suljetussa verkostossa vaihtelee huomattavasti riippuen verkoston painehäviöistä ja korkeusasemasta. Kokonaispainetta pienentäviä häviöitä ovat kitka- ja kertavastusten aiheuttamat painehäviöt. (Laiho 2010, 30-34).

Kuvassa 2 on havainnollistettu paineen käyttäytymistä verkoston eri osissa. Kuvan alaosassa on ilmaistu suljetun lämmitysverkoston pääkomponentit sekä ilmaistu verkoston kuvitteellinen korkeus, joka tässä esimerkissä on 7 m. Verkoston alku ja loppupään voidaan kuvitella yhtyvän, eli kyseessä on suljettu kierto. Kuvan yläosassa on ilmaistu vallitseva paine kussakin verkoston kohdassa painekäyränä. Esitystavassa on huomioitu staattisen paineen vaikutus, eli ylempänä verkostossa painetaso on 70 kPa (7 m) matalampi, kuin vastaava piste olisi paisunta-astian tasalla.

Paisunta-astia on sijoitettu pumpun imupuolelle ja sen esipaine on asetettu arvoon 1 bar. Putkistoissa tapahtuu painehäviöitä johtuen kitka- ja kertavastuksista. Kuvassa 2 on kuitenkin liioiteltu kitka- ja kertavastusten vaikutus painehäviöihin, koska kuvassa esitetty periaatekaavio ei ota kantaa verkoston monimutkaisuuteen tai sen putkiston pituuteen. Hyvänä mitoitussääntönä jatkuvasti toiminnassa olevalle lämpöverkoston putkistolle voidaan pitää painehäviötä 50 pa/m (Seppänen 2001, 147).

Suljetussa verkostossa ei tapahdu staattisesta, eli korkeudesta johtuvia painehäviöitä, vaikka verkostossa olisikin korkeuseroja. Tämä selittyy imulla, joka aiheutuu virtaavan nesteen virratessa alaspäin. Alaspäin virtaavan nesteen imu on yhtä suuri kuin hydrostaattinen painehäviö, jolloin alaspäin virtaava neste imee ylöspäin virtaavaa nestettä. (ITT Water & Wastewater Suomi Oy n.d). Tämän takia verkoston nousu- ja laskukohdissa painepalkit ovat yhtä suuret.



KUVA 2. Paine suljetussa lämmitysverkostossa. Periaatepiirros.

Paine verkostossa ei kuitenkaan ole vakio, vaan muuttuu verkoston lämpötilanmuutoksen myötä. Paine on suurimmillaan kovilla pakkasilla, jolloin verkoston menoveden lämpötila säädetään säätökäyrän mukaisesti kuumemmaksi. Verkoston lämpötila on alimmillaan silloin kun lämmitystarvetta ei ole ja silloin verkoston paineen tulee olla suunnitellun esipaineen tasolla. (LVI 19-10399 2006, 8).

Verkostot tulee aina varustaa varolaitteilla, mikäli on mahdollista, että verkoston paine ylittää määritellyn käyttöpaineen. Käytännössä nämä varolaitteet ovat erilaisia varoventtiileitä. Varoventtiilit mitoitetaan kuhunkin verkostoon ja sen painetasoihin sopivaksi. Varoventtiili ja siitä johdettu ylivuotoputki johdetaan siten, että varoventtiilin laukeamisesta ei aiheudu haittaa ihmisille tai ympäristölle. Esimerkiksi ympäristölle haitallisten lämmönsiirtonesteseosten purkaukset johdetaan verkoston täyttöastiaan talteen. (LVI 11-10472 2011, 8-9).

2.3 Kavitaatio

Kavitaatio on tilanne, jossa nesteen paine alittaa höyrystymispaineen. Tämä aiheuttaa sen, että nesteestä alkaa erottua höyrykuplia, jotka jälleen joutuessaan tilaan, jossa paine ylittää höyrystymispaineen, romahtavat kasaan aiheuttaen paikallisen paineiskun. Kavitaatiota voi esiintyä pumpuissa, putkistoissa ja venttiileissä. Kavitaatio on haitallinen ilmiö, koska se esimerkiksi aiheuttaa melua, huonontaa pumppauksen hyötysuhdetta, aiheuttaa materiaalien väsymistä ja kulumista sekä voi aiheuttaa merkittäviä lisävastuksia virtaukselle, veden tilavuuden kasvaessa sen höyrystyttyä. (Pulli 2009, 25).

Varsinaista nesteen kavitaatiota tapahtuu yleensä laitoksissa, joissa veden lämpötilat ja paineet ovat erittäin korkeita. Kavitaatiosta voidaan puhua myös tilanteessa, jossa kaasukuplat erkanevat nesteestä. Kavitaatio on tuolloin tilanne, jossa nesteen paine alentuessaan, ja / tai nesteen lämpötila kohotessaan, kohtaavat nesteeseen liuenneiden kaasujen kyllästymispisteen. Tämä aiheuttaa sen, että nesteestä alkaa erottua kaasukuplia, jotka jälleen palatessaan tilaan, jossa paine- ja / tai lämpötilaraja saavuttaa kaasujen lauhtumispisteen, romahtavat kasaan. Jos osa tuosta kaasusta jää lauhtumatta, se voi kertyä verkoston osiin, aiheuttaen jatkuvaa ilmaustarvetta. (Johansson 2020).

2.3.1 Pumppukavitaatio

Pumppukavitaation on jopa todettu aiheuttavan pumppurikkoja, joten kyseessä on ilmiö, joka on huomioitava suunnittelussa ja verkoston mitoituksessa. Pumpuissa juoksupyörän tulopaineen alittaessa höyrynpaineen alkaa syntyä höyrykuplia, jotka iskeytyvät kovalla voimalla kasaan, kun kupla siirtyy juoksupyörässä alueelle, jossa paine ylittää höyrynpaineen (Pulli 2009, 30).

Pumppujen kavitaatioanalyysissä käytetään käsitettä NPSH, joka johdetaan sanoista Net Positive Suction Head. NPSH-käsitteitä on kaksi: NPSHr ja NPSHa. NPSHr on vaadittu NPSH-arvo ja sen määrittelee pumpun valmistaja. NPSHa-

arvo taas kuvaa verkoston ominaisuuksia ja sen painehäviöitä. Pumpun valinnassa tulee ottaa huomioon, että NPSHa-arvon tulee olla suurempi kuin NPSHr-arvon pumpun toimintapisteessä, jottei kavitaatiota tapahdu (Pulli 2009, 30).

2.3.2 Putkistokavitaatio

Virtaamassa tapahtuva äkillinen muutos voi aiheuttaa paineen aleneman veden höyrystymispaineen tasolle. Paineen aleneminen aiheuttaa veden kiehumista ja siihen liuenneiden kaasujen erkanemista nesteestä. Kun paine alenee höyrystymispaineen tasolle, se ei voi laskea enää alemmas ja putkeen muodostuu suuria kaasu- ja höyryonteloita. Kun vesimassat kohtaavat esimerkiksi paluuvirtauksen yhteydessä, nämä höyryonkalot iskeytyvät kasaan aiheuttaen paineiskun. Paineisku voi olla erityisen voimakas, jos verkoston veden happipitoisuus on hyvin pieni, eikä näin ollen sisällä kokoonpuristuvia kaasuja, jotka ottaisivat iskut vastaan. (Pulli 2009, 27).

2.3.3 Venttiilikavitaatio

Venttiilikavitaatio muodostuu riskitekijäksi, kun venttiin yli vallitsee suuri paineero. Venttiilissä tapahtuvaa kavitaatiota voidaan arvioida ns. kavitaatioluvun ja venttiin valmistajien laatimien mitoitusohjeiden avulla. Kavitaatioluku voidaan määrittää kaavalla

$$\sigma = \frac{P_{da} - P_v}{\Delta P}, \quad (4)$$

jossa σ on kavitaatioluku, P_{da} on venttiin alavirtapuolen absoluuttinen paine (N/m^2), P_v on nesteen höyrönpaine (N/m^2) ja ΔP on paine-ero venttiin yli (N/m^2) (Pulli 2009, 27).

Kaavan perusteella voidaan todeta, että venttiilikavitaation riskiä voidaan pienentää tai se voidaan jopa kokonaan estää kasvattamalla alavirtapuolen painetta tai

vähentämällä paine-eroa venttiilin yli. Paine-eron vähentäminen voidaan toteuttaa esimerkiksi käyttämällä montaa venttiiliä sarjassa tai käyttämällä suurille paine-eroille suunniteltuja venttiileitä (Pulli 2009, 27-28).

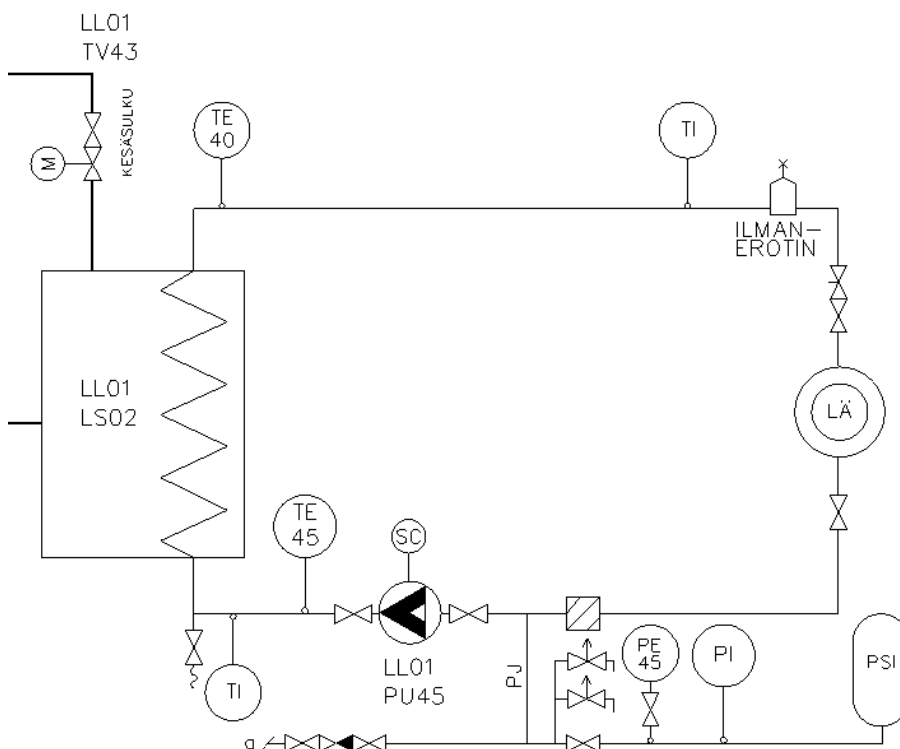
Suljetussa lämmitysverkostossa venttiilikavitaatiota voi syntyä, jos verkostossa käytetään liian suuritehoista pumppua, ja verkoston eri säätöpisteistä joudutaan verkostoa huomattavasti kuristamaan verkoston tasapainoon saattamiseksi.

3 SULJETTU LÄMMITYSVERKOSTO

Suljettu lämmitysverkosto on nimensä mukaisesti suljettu, eli verkostossa kiertävä lämmönsiirtoneste ei ole yhteydessä verkostoa ympäröivään ilmaan eikä esimerkiksi muihin lämmönsiirtonesteisiin.

3.1 Toiminta

Kuva 3 havainnollistaa suljetun lämmitysjärjestelmän toimintaa. Lämpö siirretään verkostoon lämmönsiirtimellä ja kiertovesipumppu huolehtii nesteen kiertämisestä verkostossa. Lämpö voidaan luovuttaa verkostosta huonetiloihin esimerkiksi pattereilla tai lattialämmityksen avulla. Verkoston säätö tapahtuu usein menoveden lämpötilaa muuttamalla ulkolämpötilan mukaan.



KUVA 3. Suljetun lämmitysverkoston periaate.

Lämmitysverkostoissa kiertää useimmiten vesi, joka täytetään verkostoon kylmästä käyttövesiverkostosta. Uusi lämmitysverkosto täytyy aina huolellisesti

huuhdella ennen käyttöönottoa, jolloin asennusvaiheessa verkostoon jäänyt lika ja karsta saadaan poistettua verkostosta tehokkaasti.

3.2 Komponentit

Suljettu lämmitysverkosto sisältää paljon erilaisia komponentteja ja niillä kaikilla on merkityksensä osana oikein toimivaa ja hyvin säädettävää verkostoa. Tässä kappaleessa kuitenkin käsitellään ainoastaan suljetun lämmitysjärjestelmän komponentteja, joiden oletetaan olevan työn aiheen kannalta oleellisia.

Paisuntalaitteisto

Lämmönsiirtonesteen lämpötilanmuutoksista aiheutuvat tilavuuden muutokset otetaan vastaan kutakin verkostoa varten suunnitellulla suljetulla paisuntalaitteistolla. Paisunta-astiana käytetään pienemmissä verkostoissa kalvopaisunta-astiaa mutta suuremmissa verkostoissa voidaan myös käyttää erilaisia paisunta-automaatteja. Paisuntalaitteisto sijoitetaan suljetussa lämmitysverkostossa pumpun imupuolelle, jolloin paisunta-astian hyötytilavuus on suurimmillaan. (LVI 11-10472 2011, 1-2).

Kalvopaisunta-astia on säiliö, joka on jaettu joustavalla kalvolla kahteen osaan: oma osansa verkoston nesteelle ja oma paineistetulle kaasulle. Joustava kalvo ja sen takana oleva paineistettu kaasu ottavat lämmönsiirtonesteen tilavuuden muutokset vastaan hallitusti (Korkala 2018, 98).

Paisuntalaitteiston mitoitus aloitetaan määrittelemällä verkoston korkeus, ja sitä kautta verkostossa vallitseva staattinen paine. Staattinen paine määritetään korkeuserolla laitoksen ylimmän laitteen ja paisunta-astian alareunan välillä, jossa 1m korkeutta vastaa 10 kPa painetta. Paisunta-astian esipaine valitaan tätä staattista korkeutta 1-10 kPa suuremmaksi, pyöristäen seuraavaan tasakymmeeneen. (LVI 11-10472 2011, 2).

Usein lämmitysverkoston vähimmäiskäyttöpaineeksi suositellaan vähintään 50 kPa yli verkoston staattisen paineen. Tällä varmistetaan automaattisten ilmanpoistimien toiminta ja varmistetaan siitä, että verkostoon ei pääse muodostumaan

alipainetilaa. Alipaine aiheuttaa lämmönsiirtonesteeseen liuenneiden kaasujen kiehumista ja näin ollen kaasukuplien erkaantumisen nesteestä. (LVI 11-10472 2011, 3). Alipaine verkostossa aiheuttaa myös kaasujen siirtymisen ympäröivästä ilmasta verkostoon.

Verkoston enimmäiskäyttöpaineena pidetään 50 kPa alle varoventtiilin laukaisupaineen. Useassa lähteessä on kuitenkin määritetty, että enimmäiskäyttöpaine olisi varoventtiilin laukaisupaine vähennettynä kymmenellä prosentilla varoventtiilin laukaisupaineesta. Enimmäiskäyttöpaineen ja varoventtiilin laukaisupaineen väliin tulee jättää riittävä vara, jotta saadaan asetettua yläpainehälytyksen raja sopivaksi. (LVI 11-10472 2011, 3).

Paisuntalaitteiston alimitoittaminen tai paisunta-astian liian korkea täyttöpaine aiheuttaa verkostoon lämmönsiirtonesteen häviöitä varoventtiilin kautta lämpötilan noustessa. Samaan tilanteeseen joudutaan, jos säiliön esipaine on liian korkea, jolloin säiliön tehollinen tilavuus pienenee. (Seppänen 2001, 204).

Paisunta-astian kaasuosan tulee olla täytetty oikeanlaisella kaasulla, yleensä tyypellä, eikä sen täytössä saa käyttää esimerkiksi paineilmaa. Paineastian kumikalvon läpi tapahtuu diffuusiota lämmönsiirtonesteen ja täyttökaasun välillä. Typpi ei läpäise tätä kalvoa yhtä hyvin kuin ilma. Kun kaasua diffusoituu kalvon läpi lämmönsiirtonesteeseen, paisunta-astian esipaine laskee. (Reflex tuoteluettelo 2002-2003 n.d).

Varolaitteisto

Varolaitteistolla tarkoitetaan yleensä paisuntalaitteiston yhteydessä varoventtiiliä. Varoventtiilin tehtävänä on suojata laitteistoa ja ihmisiä paineen nousun aiheuttamilta vahingoilta. Kaikki verkostot, jossa on mahdollisuus paineen noususta aiheutuville vahingoille, varustetaan varoventtiileillä. Varoventtiilit ovat yleisemmin jousikuormitteisia istukkaventtiileitä, joissa jousen aiheuttama vastavoima määrittää varoventtiilin avautumispaineen. (Seppänen 2001, 132).

Suljetussa lämmitysverkostossa varolaitteisto asennetaan paisunta-astian yhteyteen, pumpun imupuolelle (LVI 11-10472 2011, 2).

Pumppu

Pumpun tehtävänä on saada neste liikkumaan lämmitysverkostossa. Pumppu mitoitetaan verkostossa tarvittavalle virtaukselle ja verkostossa aiheutuvien painehäviöiden perusteella. Koska suljetuissa järjestelmissä laitoksen korkeus ei vaikuta pumpun nostokorkeuteen, pumppu mitoitetaan tällöin verkoston vaikeimman reitin putkiston osien kerta- ja kitkavastuksien perusteella. Tarvittava virtaus verkostoon voidaan määrittää tarvittavan lämmitystehon ja lämmönsiirtonesteen lämpötilaeron perusteella (Haapalainen & Vepsäläinen 1994, 62).

Lämmitysverkostoissa yleisin käytetty pumpputyyppejä on keskipakopumppu, jossa paine syntyy keskipakovoiman avulla. Lämmitysverkostojen kiertovesipumppu voidaan sammuttaa lämmityskauden ulkopuolella, mutta kiinnijuuttumisen estämiseksi sitä tulisi käyttää muutama minuutti viikoittain (LVI 19-10399 2006, 6).

Lämmitysverkostoihin tarkoitettuja kiertovesipumppuja on markkinoilla paljon, ja eri valmistajia on useita. Myös pumppujen säätötavoissa on paljon valinnanvaraa.

Vakionopeuspumppu käy vain yhdellä nopeudella. Vakionopeussäädöllä tarkoitetaan sitä, että pumppuun on määritetty useampi eri vakionopeusasetus, joista haluttu nopeus verkostoon voidaan valita. Suhteellisella painesäädöllä tarkoitetaan pumpun paineen kasvattamista silloin, kun virtaamaa tarvitaan enemmän, ja vastaavasti paineen alentamista silloin kun virtaamaa ei tarvita niin paljon. Suhteellinen painesäätö sopii kohteisiin, jossa virtausvaihtelut verkostossa ovat suuria. Vakionopeussäädöllä pumppu ylläpitää haluttua paineenkorotusta, riippumatta virtaamasta. Vakionopeussäätö sopii hyvin kohteisiin, joissa verkostossa tapahtuvat virtausvaihtelut ovat pieniä. (Grundfos n.d.).

Pumpun valinta tulee tehdä huolella, jotta verkostossa vältetään pumpun kavitaatiolta. Tämän takia pumppua ei saa koskaan ylittää. Kavitaatiota käsitellään erikseen kappaleessa 2.3.

Kertasäätöventtiilit

Verkoston erilaiset säätävät venttiilit ovat tärkeässä roolissa verkoston tasapainon saattamista ajatellen. Kertasäätöventtiilien tehtävänä on rajoittaa putkiston

nestevirtaa ja luoda keinotekoista painehäviötä verkostoon. Verkostossa käytettävät säätöventtiilit ovat usein varustettu mittausyhteillä, jolloin säätöventtiilistä voidaan mitata sen läpi kulkeva nestevirta paine-eron avulla. (Seppänen 2001, 132).

Työn kannalta merkityksellistä on, jos verkostossa muodostuu tilanne, jossa kertasäätöventtileillä joudutaan kuristamaan painetta kohtuuttomasti. Näin ollen paine-ero venttiilin yli nousee korkeaksi ja muodostuu riski venttiilikavitaatioon. Venttiilikavitaatiosta on kerrottu enemmän kappaleessa 2.3.3.

Ilmanpoistimet

Lämmitysverkoston ilman poistamiseen tarvitaan erilaisia käyttötarkoitukseen soveltuvia laitteita. Laitteen tyyppi valitaan sen mukaan, millaisessa muodossa olevaa kaasua halutaan poistaa ja mihin kohtaan verkostoa ilmanpoistin halutaan asentaa. Nykyvaatimukset putkistojen ilmanpoistosta on esitetty LVI-kortissa (LVI 20-10348 2004, 7). Ilmanpoistimista ja niiden soveltuvuudesta kuhunkin verkoston kohtaan on kerrottu enemmän kappaleessa 7.

Lämmönsiirrin

Lämmönsiirtimen tehtävänä on siirtää energiaa nestevirtojen välillä, ilman että nesteillä on vaaraa sekoittua toisiinsa. Lämmitystekniikan sovelluksissa lämmönsiirtimet ovat pääasiassa rekuperatiivisiä lämmönsiirtimiä, jolloin ainevirrat kulkevat seinämän molemmin puolin luovuttaen lämpöä korkeamman lämpötilatason ainevirrasta matalampaan (Seppänen 2001, 223). Lämmönsiirtimet mitoitetaan lämmitykseen tarvittavan hetkellisen huipputehon mukaan ja kaukolämpökoh-teissa mitoituksessa pyritään saamaan kaukolämpöveteen mahdollisimman suuri jäähtymä kaikissa käyttötilanteissa (K1/2013, 12).

Lämmönsiirtimen merkitys työn aiheen kannalta on se, tapahtuuko lämmönsiirtimen pinnalla kaasukuplien erkaantumista nesteestä, kun viileä paluuvesi lämmitetään lämmönsiirtimessä nopeasti lämpimäksi menovedeksi. Tapahtumaa voi verrata esimerkiksi veden lämmittämiseen kattilassa, jolloin ilmakuplat alkavat nousta veden pinnalle lämpötilan noustessa.

Lämmönluovuttimet

Suljetusta lämmitysverkostosta lämpö voidaan luovuttaa huonetilaan erilaisten lämmönluovuttimien avulla. Yleisesti käytetyin on patteri, joka sijoitetaan huonetilaan yleisimmin ulkoseinälle ikkunan alle estämään ikkunan kylmän pinnan aiheuttamaa vedontunnetta. Pattereiden lisäksi varsinkin asuinrakennuksissa suositetaan paljon lattiaan asennettavaa putkikierukkaa, eli lattialämmitystä (LVI 19-10399 2006, 7). Lattialämmityksen etuja on tekniikan huomaamattomuus, lattian tasainen lämmönluovutus ja hyvä huonekohtainen säädettävyys. Myös tilojen mukavuuslämmitys toteutetaan usein lattialämmityksen avulla.

Patteriverkostot suositellaan asennettavan alajakaisiksi, jolloin mahdollinen verkostoon kertynyt ilma pystytään poistamaan patterin kautta. Yläjakoisessa putkituksessa on ongelmana ilman kertyminen verkoston korkeimpiin kohtiin, eli yläjakoisessa järjestelmässä patterin yläpuolella sijaitsevaan lämpöjohtoon, ei itse patteriin, mistä ilman poistaminen olisi huomattavasti tehokkaampaa.

Tässä työssä käsitellään suljettua lämmitysverkostoa, jossa lämmönluovutus tapahtuu pattereiden avulla. Patterit ovat ne verkoston osat, mistä käyttäjä usein ensimmäisenä havainnoi verkoston mahdolliset häiriöt. Häiriöitä voidaan kuvitella olevan, jos esimerkiksi patteri lämpiää epätasaisesti tai ei lämpiä ollenkaan, tai patterista kuuluu häiritseviä ääniä.

Putkimateriaalit

Suljetun lämmitysverkoston putkimateriaalina käytetään usein terästä. Teräksen käyttö materiaalina on perusteltua, koska vesi ei vaihdu verkostossa, eikä verkostoon näin ollen pääse vaihtuvan veden mukana happea. Korroosion voidaan olettaa näin ollen olevan vähäistä. Suljetun lämmitysverkoston materiaalina voidaan käyttää myös kuparia joko pääasiallisena materiaalina, tai pienissä määrin yhdistettynä esimerkiksi käytettäväksi osana teräksistä verkostoa. (Seppänen 2001, 124-125).

Teräksen lisäksi esimerkiksi komposiittiputkijärjestelmät ovat yhä enemmän käytettyjä, varsinkin saneerauskohteissa. Komposiittiputki sopii käytettäväksi pintasennuksiin ilman pintakäsittelyä. Lisäksi komposiittiputkiston etuja on putken muovinen sisäpinta, joka tekee putkesta korroosiota kestävä ja hygieenisen.

Komposiittiputken monikerrosrakenne ja elastisuus antaa putkelle hyvän vaimennuskyvyn veden virtauksista aiheutuville ja patterista kantautuville äänille. Lisäksi putken alumiinikerros antaa putkelle lämmitysverkostoissa tarvittavan happitiiveyden. Komposiittiputken työstäminen ja liitosten teko vaatii kuitenkin erikoisosia ja työkaluja. (Uponor n.d).

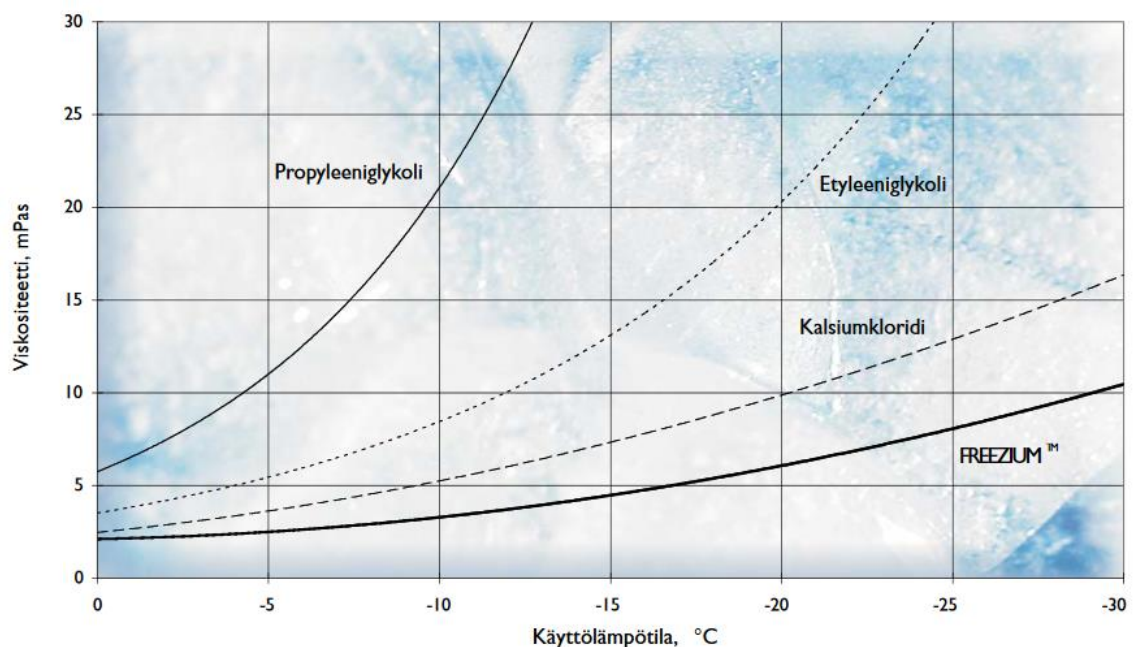
Diffuusiosuojaamattomat putkiston osat

Teräs on materiaalina käytännössä happitiivis. Riskitekijän happidiffuusion kannalta verkostoon aiheuttaa liitokset teräsputkissa. Lisäksi suljetussa lämmitysjärjestelmässä happidiffuusiota voi tapahtua esimerkiksi diffuusiosuojaamattomien muovisten järjestelmän osien läpi. Vuorenmaan (2015, 31) mukaan SABIC innovative Plastics (2013) kertoo, että muoviputkessa happidiffuusio lisääntyy lämpötilan noustessa, jolloin muoviputki lämpölaajenee. Lämpölaajenemisen yhteydessä putkimateriaalin sisältämien molekyylien etäisyys toisiinsa kasvaa, joka tekee putkimateriaalista huokoisempaa ja näin ollen mahdollistaa tehokkaamman happidiffuusion.

4 LÄMMÖNSIIRTONESTEET

Lämmönsiirtonesteellä tarkoitetaan putkistossa kiertävää nestettä, jolla energiaa halutaan siirtää kahden eri lämpötilatason välillä. Käytettävä lämmönsiirtoneste valitaan aina käyttötarkoitukseen ja kohteeseen sopivaksi. Tällä on suuri merkitys, sillä väärä tuote voi pahimmillaan vaurioittaa järjestelmää ja johtaa laajoihin korjaustöihin. (Suomen kylmäyhdistys ry. 2019, 11).

Lämmönsiirtonesteenä voidaan käyttää vettä tai erilaisia seoksia, joita tässä työssä jatkossa kutsutaan lämmönsiirtonesteseoksiksi. Nämä erilaiset lämmönsiirtonesteseokset poikkeavat ominaisuuksiltaan veden ominaisuuksista. Veden viskositeetti pysyy hyvin lähellä samaa arvoa lämpötilan vaihdellessa sen eri käyttölämpötiloissa (0-100 °C) mutta lämmönsiirtonesteseoksilla tilanne on toinen. Näillä nesteiden viskositeetti voi muuttua oleellisestikin sen eri käyttölämpötila-alueilla. Kuviosta 1 voidaan nähdä yleisesti käytettyjen lämmönsiirtonesteseosten viskositeettien muutos lämpötilan laskiessa.



KUVIO 1. Lämmönsiirtonesteseosten viskositeetit eri käyttölämpötiloissa (Freezium opas n.d).

Jotta lämmönsiirto kahden eri lämpötilatason välillä saataisiin mahdollisimman tehokkaaksi ja taloudelliseksi, lämmönsiirtonesteeltä vaaditaan monenlaisia

ominaisuuksia. Koska jokainen verkosto on yksilöllinen, painotus eri ominaisuuksien tärkeydestä voi vaihdella paljonkin riippuen suunniteltavasta verkostosta. Lämmönsiirtonesteille voidaan asettaa esimerkiksi seuraavanlaisia ominaisuuksia (Suomen kylmäyhdistys ry. 2019, 11):

- Alhainen jäätymispiste
- Alhainen viskositeetti
- Hyvä lämmönjohtavuus
- Korkea ominaislämpökapasiteetti
- Korkea pintajännitys ja alhainen vaahtoamistaipumus
- Alhainen diffuusiotaipumus
- Hyvä korroosion kesto
- Yhteensopiva useiden materiaalien kanssa
- Alhainen erottumiskyky, esim. jäätymistilanteissa
- Kemiallisesti stabiili ja palamaton
- Myrkytön ja biologisesti hajoava
- Edullinen

Vesi

Vesi on yleisimmin käytetty lämmönsiirtoneste. Sen käyttö on ymmärrettävää, sillä vedellä on korkea ominaislämpökapasiteetti ja alhainen viskositeetti. Lisäksi sen saatavuus on helppoa ja edullista. Vettä ei kuitenkaan voida käyttää sellaisenaan sovelluksissa, joissa ilmenee jäätymisvaaraa. Tällöin veden sekaan täytyy lisätä jotain jäätymispistettä alentavaa ainetta. (Suomen kylmäyhdistys ry. 2019, 11, 19).

Etyleeni- ja propyleeniglykoli

Etyleeni- ja propyleeniglykoli laskevat tehokkaasti veden jäätymispistettä, mutta nostavat samaan aikaan lämmönsiirtonesteseoksen kiehumispistettä. Propyleeniglykoli on näistä helppokäyttöinen, turvallinen ja myrkytön, ja sitä käytetäänkin paljon elintarviketeollisuudessa. Se on kuitenkin etyleeniglykolia huomattavasti kalliimpaa ja sen lämmönsiirtokyky on etyleeniglykolia huonompaa. (Algol Chemicals n.d).

Etyleeniglykolin käyttökohteet ovat laajat, ja sitä käytetään usein esimerkiksi jäähdytys- ja LTO-järjestelmissä. Liuoksen pitoisuus määritetään käyttökohteen vaatimusten mukaan.

Etyylialkoholi

Etyylialkoholia käytetään myös veden jäätymispistettä alentavana aineena. Se on edullista ja se sopii käytettäväksi monien eri putkistomateriaalien kanssa. Vaikka etyylialkoholi on edullista, sen käyttöä rajoittaa sen matala kiehumispiste ja huonohko energiatalous. (Algol Chemicals n.d). Etyylialkoholin käyttökohteita ovat esimerkiksi maalämpöpumppujen keruupiirit.

Kaliumformiaatti

Kaliumformiaatti on kaliumsuolapohjainen lämmönsiirtoneste, jota voi käyttää hyvin kylmissäkin olosuhteissa. Sen vahvuuksia ovat hyvät lämmönsiirtokyky, korkea ominaislämpökapasiteetti ja myrkyttömyys. Lisäksi kaliumformiaatin pumppauskustannukset ovat alhaiset. Vaikka sen ominaisuudet ja käyttölämpötila-alue ovat lämmönsiirtonesteeksi hyvät, sen käyttöä rajoittaa voimakas korrosoivuus, joka tulee ottaa huomioon verkoston materiaalivalinnoissa. Kaliumformiaatti on myös hankintahinnalta kallista. (Algol Chemicals n.d).

Ammoniakki

Ammoniakki on luonnollinen kylmäaine, joka ei sisällä lainkaan halogeenimolekyylejä. Näin ollen ammoniakki on haitaton otsonikerrokselle. Ammoniakin haittapuolina ovat sen myrkyllisyys, ja lämpötilasta ja pitoisuudesta riippuen myös sen räjähdysominaisuudet suljetussa tilassa. Muissa olosuhteissa ammoniakki ei kuitenkaan ole helposti syttyvää. Näiden ominaisuuksien vuoksi, sen käyttö edellyttääkin erikoiskonehuonetiloja. (Algol Chemicals n.d). Ammoniakkivesi-seoksen käyttökohteita ovat esimerkiksi suuret lämpöpumput ja vedenjäähdytyskoneistot sekä jääratokoneistot.

5 ILMA VERKOSTOSSA

Ideaalitilanteessa suljetussa lämmitysverkostossa ilmaa ei kerry verkostoon eikä happirikasta lämmönsiirtonestettä jouduta sinne lisäämään. Verkoston nesteen lisäästarvetta aiheuttaa kuitenkin mahdolliset verkoston vuodot, sekä korjaus- ja huoltotöissä aiheutuneet nesteen vajaukset. Jatkuva verkoston täyttämisen tarve lyhentää putkiston käyttöikää ja sen syy tulee aina selvittää. (LVI 19-10399 2006, 7). Käytännön kohteissa on kuitenkin huomattu, että verkostoon on mahdollista kertyä ilmaa, vaikka vettä ei verkostoon lisättäisikään (Johansson 2020).

Oleellista on, että lämmönsiirtonesteessä liuenneena oleva kaasu pysyy nesteseen liuenneena, eikä verkostossa ole sellaisia olosuhteita, jotka saisivat kaasua erkanemaan nesteestä. Kun kuplan koko kasvaa riittävän suureksi, ja kuplan noste voittaa verkoston paluupuoleisissa pystysuorissa putkenosissa nesteen virtausnopeuden, kupla alkaa estää veden virtaamista. Tästä syystä on tärkeää, että verkostot mitoitettaisiin väljiksi, jolloin estettäisiin kuplakoon kasvu. Tällöin ilmakuplilla olisi mahdollisuus kulkea verkostossa eteenpäin eivätkä kuplat pääsisi kasvamaan suuriksi ja jumiutuisi pattereihin. (Johansson & Koivula 2019).

Ilma aiheuttaa verkostossa monenlaisia ongelmia. Loriseva ääni pattereissa on selvä merkki ilmaongelmista. Ilma pattereissa aiheuttaa häiritsevän äänen lisäksi häiriötä lämmitysveden kiertoon, ja näin ollen huonetilan epätasaista lämpenemistä.

Lämmönsiirtonesteestä erottuneet ilmakuplat aiheuttavat myös verkoston lämmönsiirtokyvyn heikkenemistä ja pumppauskustannusten nousua. Ilmakuplat koostuvat pääasiassa hapesta ja typestä. Näiden kaasujen ominaislämpökapasiteetti on monin kerroin veden vastaavaa arvoa matalampi, joten ilman voidaan todeta toimivan eristeenä. Tämä heikentää järjestelmän lämmönsiirtokykyä.

Yleisesti lämmitysverkoston putkistomateriaalina on käytetty teräsputkea. Rauta on epäjalokauppi, joten se pyrkii luovuttamaan veteen positiivisesti varautuneita rautaioneja, joka aiheuttaa korroosiota. Jatkuva veden lisäys verkostoon aiheuttaa putkiston sisäpuolista korroosiota. Lisätyn veden sisältämät happimolekyylit

reagoivat putkimateriaalin sisältämän raudan kanssa, joka aiheuttaa hapen palamisen pois. Hapen reagointi raudan kanssa synnyttää putkistoon magnetiittia. (Lämmönhuolto n.d.).

Verkoston käyttöönottovaiheessa, ensimmäisen täytön yhteydessä, hapen palaminen pois täyttövedestä aiheuttaa magnetiittia, joka muodostaa putken pinnalle suojaavan kerroksen ja putken pinta passivoituu. Tämä hidastaa putkiston korroosiota ja pitkittää putkiston käyttöikää. Magnetiittikerros on kuitenkin mekaaniselta rasituskyvyltä heikkoa, jolloin siitä hilseilee kappaleita kiertävän lämmönsiirtonesteen sekaan. Nämä partikkelit voivat jumittua epäedullisiin paikkoihin ja näin ollen haitata verkoston virtausta, venttiilien ja pumppujen toimintaa, sekä heikentää lämmönsiirtoa. (Lämmönhuolto n.d.).

6 SYYT ILMAN KERTYMISEEN

Suurin osa syistä, jotka aiheuttavat ilman kertymistä verkostoon, on käytöstä johtuvia virheitä. Oikeilla toimenpiteillä ja oikeaoppisella käytöllä voidaan ilmankertymisongelmat poistaa lähes täysin (Johansson 2020). Alla on lueteltu muutamia yleisiä verkoston käyttövirheitä, ja esitetty ratkaisu, kuinka ongelma voitaisiin ratkaista.

Liian korkea verkoston lämpötila

Kaukolämmitystä koskevissa määräyksissä ja ohjeissa (K1/2013, 8) määritetään esimerkiksi uudisrakennusten radiaattorilämmitykselle toisiopuolelle mitoituslämpötiloiksi 45/30 °C. Matalilla lämpötilatasoilla saavutetaan verkostoon hyvä säädettävyys ja verkoston hyvä energiatehokkuus. Käytännössä kuitenkin näin matalia lämpötilatasoja harvoin käytetään, koska pieni lämpötilaero kasvattaa verkoston kokoa oleellisesti.

Verkoston lämpötila on usein alun alkaenkin asetettu liian korkeaksi, tai sitä on kylmävalitusten takia korotettu mitoitusarvosta, varsinaista syytä tutkimatta. Tästä johtuu, että suuri osa toimivista termostaattiventtiileistä sulkeutuu huonelämpötilan noustessa. Varsinkin keväisin voidaan päätyä tähän tilanteeseen, kun aurinko lämmittää voimakkaasti huonetiloja ikkunoiden kautta, vaikka muutoin ulkolämpötila olisikin vielä matala. Lisäksi jatkuva liian korkea verkoston lämpötila voi jumittaa termostaattiventtiilit kiinni- asentoon, jolloin niiden avautuminen ei enää automaattisesti onnistu vaan niiden uudelleen toimintaan saattaminen vaatii mekaanisia toimenpiteitä. Myös ilmakuplien liikkuminen verkostossa vaikeutuu, kun virtausta kuristetaan pienemmäksi. (Johansson 2020).

Hyvällekin pumpulle tällainen säätötarve on vaikea hallittava. Kuumassa verkostovedessä voi olla liuenneena huomattavasti vähemmän ilmaa kuin viileämmässä verkostovedessä (kuvio 2), ja kuuma verkostovesi on paljon alttiimpi painemuutoksien aiheuttamalle kaasujen irti kiehumiselle. Tämä aiheuttaa sen, että kuumalla verkostovedellä pumpussa tapahtuu kuplien erkaantumista nesteestä huomattavasti runsaammin paineen alenemisen takia.

Lisäksi kuplanmuodostusta voidaan todeta tapahtuvan myös lämmönsiirtimen pinnalla, jossa verkoston viileä paluuvesi kohtaa kuumen siirtimen pinnan. Myös tämä kuplamuodostus on huomattavasti runsaampaa näillä tarpeettoman kuumilla siirrinpinnoilla. Kuplat lähtevät liikkeelle nesteeseen virtauksen mukana, yhdistyen ja kasvattaen kokoaan. Kun kuplan koko on kasvanut riittäväksi, jumittuu se patteriin.

Kuplien, ja näin ollen kaasun, todetaan erkaantuvan nesteestä jo verkostokierron alkuvaiheessa. Kun kaasu sitten poistetaan pattereista, niin paluuverkostossa virtaava viileämpi vesi pumpun imupuolelle lämmönsiirtimelle asti on muodostunut alikylläiseksi kaasuihin nähden. Kaasuista alikylläinen verkostovesi pyrkii sitomaan itseensä niin paljon kaasuja kuin se on mahdollista, jotta saavutetaan taas nesteen paineelle ja lämpötilalle ominainen kylläinen kaasutasapaino. Näin ollen paluulinjan jokainen epätiivis kohta vuotaa diffuusion vaikutuksesta ilmaa verkostoveteen. Pumpulle päästyään sama kierto alkaa alusta. (Johansson 2020).

Tämä sama ilmiö tapahtuu kaikilla verkoston lämpötiloilla, mutta se on voimakkaampaa mitä kuumempaa lämpötilaa verkostossa käytetään.

Virhe voidaan korjata laskemalla verkoston menoveden lämpötiloja mahdollisimman alhaisiksi, kuitenkin niin, että kriittisten huonetilojen lämpötilat pysyvät riittävinä. Viileämpi vesi voi pitää sisällään enemmän liuenneita kaasuja (kuvio 2) joten veden alikylläisyys paluujohdossa ei ole niin suurta. Lisäksi termostaattiset venttiilit pysyvät viileämmällä vedellä säätyneenä enemmän auki-asentoon. Matalammalla lämpötilalla saadaan näin ollen verkostoon mahdollisemman estoton kierto, jolloin mikrokuplat liikkuvat virtauksen mukana, eivätkä niin helposti kasvata kokoa ja jumiutu pattereihin. (Johansson 2020).

Liian suuritehoinen pumppu

Matalaksi säädetty verkoston lämpötila ei yksinään aina poista ilman tarpeetonta kertymistä verkostoon. Myös verkostoon asennettu, liian suuritehoiseksi suunniteltu tai säädetty pumppu, voi aiheuttaa saman ilmiön kuin liian kuuma verkoston lämpötilakin, vaikka lämpötilataso tässä skenaariossa olisikin optimi. Usein pumpun tehoa pyritään huoltotoimenpiteenä virheellisesti suurentamaan tilanteissa, joissa jokin verkoston patteri ei lämpeä riittävästi.

Liian tehokkaaksi säädetty pumppu lisää kiinteistön energiankulutusta ja se voi lisäksi aiheuttaa verkostoon ilmanmuodostusta aiemmin kuvatulla tavalla. Yli-suuri pumppu aiheuttaa verkostoon kohtuuttoman suuren paineenkorotuksen, jota pyritään kuristamaan erilaisilla verkostoa säätävillä komponenteilla. Voimakas paine-ero esimerkiksi linjasäätöventtiilin yli voi aiheuttaa haitallisen äänen lisäksi ilmakehien muodostumista. (Johansson 2020).

Kaasujen vapautumista tapahtuu liian suuritehoisen pumpun juoksupyörässä siis myös tilanteissa, jossa verkoston lämpötilat eivät ole ylikorkeita. Jos pumppu mitoitetaan liian suureksi verkostoon nähden ja verkostoa joudutaan tämän takia tarpeettoman paljon kertosäädöillä kuristamaan, käy varmuudella niin, että pumppu alkaa kavitoida verkostosta kaasuja. Pumppukavitaatiota on käsitelty enemmän kappaleessa 2.3.1.

Virhe voidaan korjata jo suunnitteluvaiheessa välttämällä ylimitoitus, sekä ilmoittamalla pumpun oleelliset ominaisuudet hankintaa varten riittävän tarkasti. Olemassa olevissa kohteissa pumppu voidaan mitoitaa uudelleen ja vaihtaa oikean kokoiseksi, jonka jälkeen verkosto tasapainotetaan uudelleen. Kohteissa, jossa pumpun virtausta voidaan säätää portaattomasti, voidaan säätö tehdä suoraan pumpusta. Lisäksi voidaan mahdollisuuksien mukaan valita pumpulle joku muu, verkostoon paremmin soveltuva säätötapa.

Liian matala verkoston paine

Jos verkoston paine on asetettu alun perin riittävälle tasolle, verkoston paineen laskeminen on selvä merkki epätiiviestä verkostosta. Jos vuotoa ei verkostossa ole silmämääräisesti tarkasteltuna, voi ongelma johtua paisunnan toimimattomuudesta. Paisunta-astia voi olla alimitoitettu, jolloin lämmönsiirtonestettä purkaantuu varoventtiilin kautta ulos verkostosta lämpötilan noustessa.

Toinen syy voi olla rikkoutunut paisunta-astian kalvo, joka päästää ilmaa verkostoon ja lämmönsiirtonestettä paisunta-astian kaasuosaan. Tämä aiheuttaa verkoston paineen laskua, jota usein korjataan lisäämällä verkostoon vettä. Rikkoutuneen paisunta-astian kalvon tapauksessa tämä lisätty vesi siirtyy paisunta-astian kaasutilavuuteen eikä paisunta-astia näin ollen ota enää verkoston nesteen

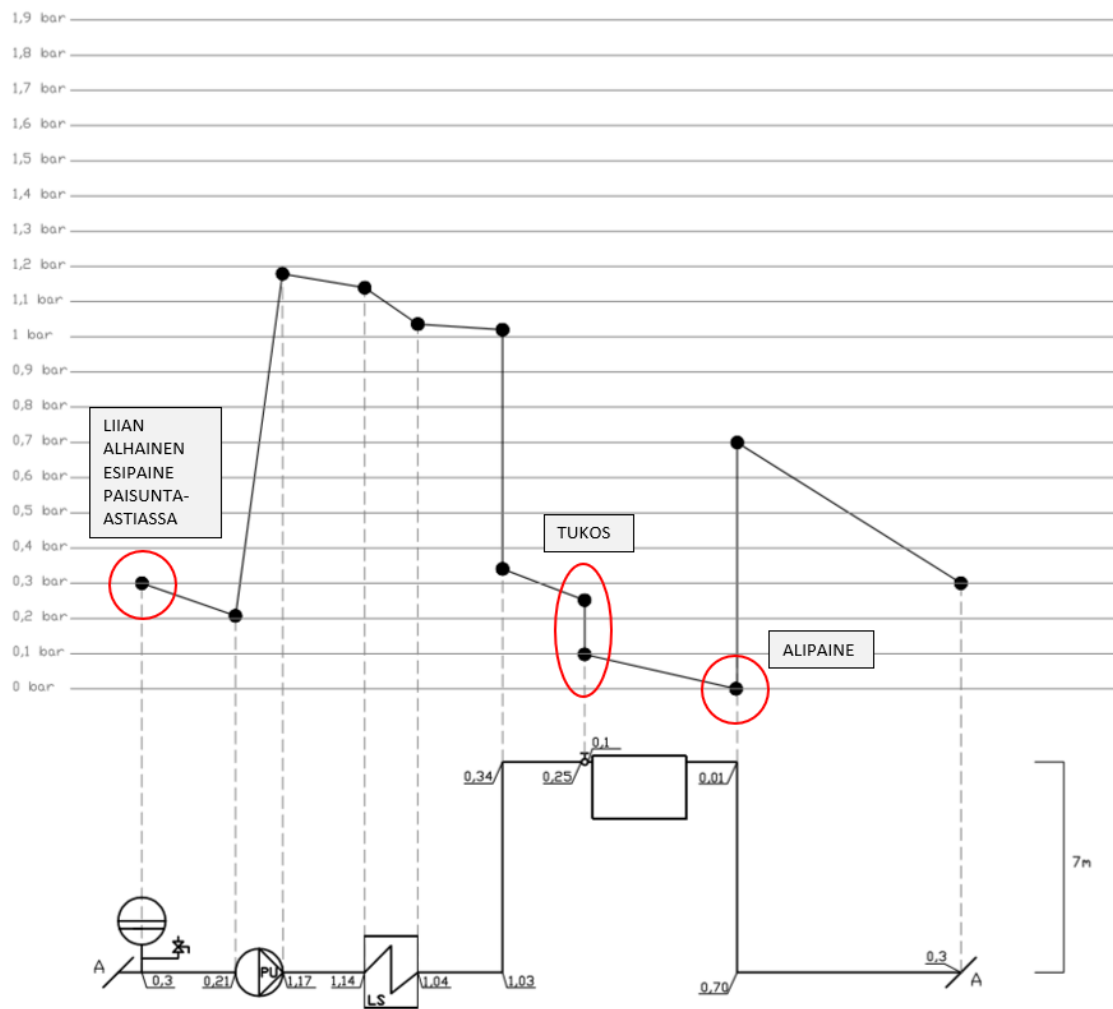
tilavuuden muutoksia vastaan, vaan tämä tapahtuu suoraan varoventtiin kautta (Reflex tuoteluettelo 2002-2003. n.d, 4).

Kappaleessa 2.2 käsiteltiin painetta suljetussa verkostossa. Kuvassa 2 on nähtävissä verkoston periaatteelliset painetasot eri osissa toimivaa verkostoa. Jos verkoston paisunta-astian esipaine on asetettu liian alhaiseksi, on mahdollista, että jossain kohdassa verkostoa verkostoon muodostuu alipainetilanne, joka pahimmassa tapauksessa voi imeä verkostoon ilmaa epätiiviestä verkoston liitoksesta tai suoraan verkoston ylimpiin kohtiin asennetuista automaattisesta ilmanpoistimesta. Tämän takia verkostossa pitää olla riittävä paine myös lämmityskauden ulkopuolisina aikoina.

Kuvassa 4 on demonstroitu tällaista virheellistä tilannetta. Jos esimerkiksi paisunta-astian esipaine on asetettu 0,3 bar ja termostaattisessa patteriventtiilissä havaitaan tukos, joka kasvattaa kyseessä olevan osan painehäviötä, on todennäköistä että verkosto on alipaineinen verkoston ylimmistä ja/tai kauimmaisista pisteistä.

Käytännön havainnot ovat tuoneet esiin tapauksia, jossa ilmaa joudutaan poistamaan verkostosta jatkuvasti, joskus lähes päivittäin ja vuodesta toiseen. Näissä tapauksissa on poikkeuksetta ollut kyse aiemmin kuvatun kavitaation kautta syntyvästä ilmankertymisongelmasta. Tälle ilmiölle on ominaista myös se, että vettä ei tarvitse lisätä verkostoon, vaikka ilmaa poistetaan jatkuvasti. Tämän veden ”häviämättömyyden” selittää tuo verkostossa tapahtuva jatkuva virheellisellä käytettävällä aikaansaatu prosessi: Ensin aiheutetaan kaasujen höyrystyminen, sitten ne poistetaan pattereista ja lopuksi diffuusio palauttaa kaasut takaisin yhden verkostossa tapahtuvan kierron aikana. (Johansson 2020).

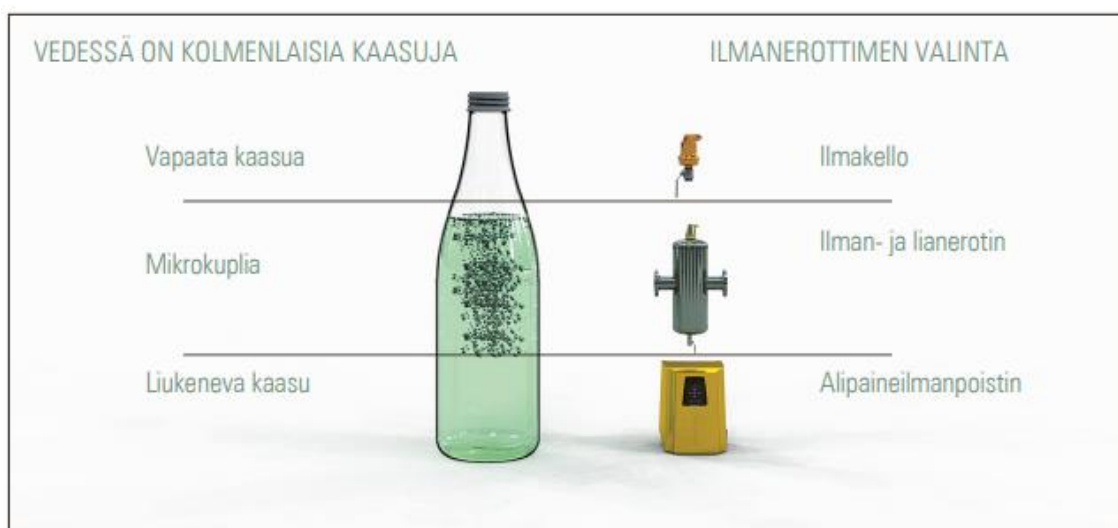
Virhe voidaan korjata säätämällä verkoston paine oikealle tasolle niin, että alipainetilannetta ei pääse verkostoon muodostumaan missään verkoston käyttölämpötilassa.



KUVA 4. Paine suljetussa lämmitysverkostossa. Periaatepiirros virheellisestä painetasosta.

7 ILMAN POISTAMINEN VERKOSTOSTA

Ilma lämmitysverkostossa voi olla vapaana kaasuna, mikrokuplina tai nesteeseen liuenneena kaasuna. Kaasun erotus ja poistaminen tulee suunnitella sen perusteella, missä muodossa olevaa kaasua halutaan poistaa. Kuvassa 5 on havainnollistettu millaisia kaasuja lämmönsiirtoneste voi sisältää ja millaisin keinoin kyseistä kaasumuotoa voidaan verkostosta poistaa.



KUVA 5. Ilmanerottimien valinta (Armatec n.d, 3).

7.1 Vapaa kaasu

Vapaan kaasun poistamiseen verkostosta käytetään automaattisia ja manuaalisia ilmanpoistimia. Automaattiset ilmanpoistimet asennetaan verkostojen ylimpiin kohtiin, sekä kohtiin, johon epäillään ilmaa kertyvän. Automaattisten ilmanpoistimien toimintaperiaate on yksinkertainen: Kun poistimeen kertyy ilmaa, alenee nestepinta uimurin ympärillä. Uimurin laskiessa nestepinnan mukana avautuu tyhjennysventtiili, josta kertynyt ilma pääsee ulos verkostosta. Ilman poistuessa nestepinta pääsee jälleen nousemaan, joka jälleen sulkee tyhjennysventtiilin (Korkala 2018, 107).

Automaattinen ilmanpoistin on herkkä verkoston epäpuhtauksille ja korroosiolle, jonka takia laitteen toimintavarmuus tulisi olla yksi määrittelevä tekijä laitetta kyseiseen verkostoon valittaessa. Näitä ei kuitenkaan suositella käytettäväksi huoneiloissa sijaitsevien patteriverkostojen ylimmissä pisteissä. Niistä koituu helposti vesivahinkoja ja siitä syystä, että ne ovat rakenteeltaan sellaisia, että ilma pääsee vapaasti virtaamaan niiden kautta patteriverkoston alipainetilanteissa. Verkoston ilman kertymistä voidaan myös kohdentaa haluttuun kohtaan ns. ilma-taskujen avulla.

Manuaaliset ilmanpoistimet ja niistä johtavat putkitukset asennetaan yleisesti nousujohtojen yläpäihin, ja paikkoihin, joihin voidaan olettaa ilmaa kertyvän. Niiden pääasiallinen käyttötarkoitus on verkoston täyttötilanteessa huolehtia siitä, että verkostoon ei jää vapaata ilmaa. Manuaalisia ilmanpoistimia käytetään lisäksi silloin, kun automaattiset ilmanpoistimet eivät riitä poistamaan verkostosta ilmaa, tai niiden toiminnassa on ilmennyt häiriöitä.

7.2 Mikrokuplat

Mikrokuplat ovat pieniä veteen sekoittuneita kaasukuplia. Parhaiten mikrokuplia voi havainnoida laskemalla hanasta kuumaa vettä lasiin. Ilma näyttäytyy kuumassa vedessä veden harmautena.

Mikrokuplien poistamiseen voidaan käyttää esimerkiksi ilmanerottimia. Ilmanerotin asennetaan runkoputkistoon menolinjaan, kiertovesipumpun imupuolelle. Ilmanerotin toimintaperiaate perustuu erottimeen suureen tilavuuteen, jolloin nesteen virtausnopeus hidastuu. Erottimeen sisällä on teräsverkko, joka aiheuttaa virtaukseen turbulenssia, jonka johdosta kaasukuplat nousevat ylös hakeutuen erottimeen asennettuun automaattiseen ilmanpoistimeen. (Armatec n.d, 5).

7.3 Liuennut kaasu

Liuenneella kaasulla tarkoitetaan nesteeseen liuennutta kaasua, jota emme voi nähdä. Nesteen sisältämään liuenneen kaasun määrään vaikuttaa nesteen lämpötila sekä paine, jossa neste on tarkasteluhetkellä. Laskentaosuudessa kappalessa 9 on laskettu liuenneen kaasun maksimimääriä lämmönsiirtonesteissä.

Alipaineilmanpoistimien tarkoitus on poistaa lämmönsiirtonesteestä siihen liuenneita kaasuja ja mikrokuplia. Laite asennetaan paluujohtoon mahdollisimman lähelle lämmönsiirrintä, jolloin lämmönsiirtonesteen kuvitellaan sisältävän niin paljon kaasuja kuin se verkostossa on mahdollista. Alipaineilmanpoistimen pumppu imee lämmitysverkostosta sykäyksittäin lämmönsiirtonestettä. Laitteen ajastettu magneettiventtiili sulkeutuu ajoittain, jolloin pumpun aiheuttama alipaine muodostaa laitteeseen tyhjiön. Tämä erottaa liuenneet kaasut ilmakupliksi ja poistaa ne automaattisen ilmanpoistimen kautta ulos verkostosta. Kaasuista puhdistettu vesi pumpataan takaisin verkostoon. Alipaineilmanpoisto on jatkuva prosessi ja sitä jatketaan, kunnes ilmaa ei enää verkostosta poistu. (Kolmeks 2010).

Alipaineilmapoistimia käytetään lähinnä monimutkaisissa ja suurissa järjestelmissä, joiden painetaso on 1-10 bar ja järjestelmän tilavuus 25-300 m³. Alipaineilmanpoistimia käytetään yleisesti myös silloin, kun syöttö- ja paluueden lämpötilaero on vähäinen (Armatec n.d). Lisäksi alipaineilmanpoistimia käytetään verkostoissa ensimmäisen täytön yhteydessä liuenneen kaasun poistamiseen.

Alipaineilmanpoistimen käyttö verkoston jatkuvien ilmaongelmien ratkaisuna saattaa johtaa siihen, että varsinaiset ongelman syyt, esim. säätö- ja käyttötoimin korjattavissa olevat verkoston paineasetukset, jäävät korjaamatta.

7.4 Hapeton täyttö

Hapeton täyttö on verkoston täyttömenetelmä, jossa riittävän tiivis verkosto täytetään alusta alkaen vedellä, josta on lähes kokonaan poistettu siihen liuenneet kaasut. Veden käsittelyssä käytetään alipainetta, jonka ansiosta vesi saadaan kiehumaan ja näin ollen kaasut poistumaan. (Termotohtori. n.d).

Kuviossa 3 on nähtävissä vesijohtoveden kaasukonsentraatiot eri lämpötiloissa ja eri painetasoissa alipaineistettuna. Mitä kuumempaa vesijohtovettä verkoston täytössä käytetään, ja mitä kovemmalla alipaineella se käsitellään, sitä vähemmän täytössä käytettyyn vesijohtoveteen voi olla liuenneena ilmaa.

8 KAASUJEN LIUKENEMINEN NESTEISIIN

Työn aiheen kannalta on oleellista se, kuinka lämmönsiirtonesteen lämpötila ja paine verkostossa vaikuttaa siihen, kuinka paljon lämmönsiirtoneste on kykenevä ottamaan kaasua vastaan.

Lämmitysverkostojen täyttö tehdään nykyisin usein kylmällä vesijohtovedellä, joka sisältää luonnostaan paljon veteen liuennutta ilmaa. Ilma on kaasuseos, joka sisältää pääasiassa happea ja typpeä. Muita kaasuja on ilmassa ainoastaan noin yhden prosentin verran. Tämä yksi prosentti sisältää lähinnä hiilidioksidia, argonia ja jonkin verran muita kaasuja. (Kärkkäinen 2019). Tämän työn laskennoissa oletetaan, että ilma koostuu ainoastaan hapesta ja typestä, suhteessa 21 % / 79 %.

Neste- ja kaasufaasien yhdistyessä pyrkii kaasua absorboitumaan nesteeseen. Henryn laki määrittää, että kaasujen liukeneminen nesteisiin on suoraan verrannollinen nesteen kanssa kontaktissa olevan kaasun osapaineeseen. Kaasun liukeneminen kyseessä olevaan nesteeseen voidaan määrittää kaavalla (Kärkkäinen 2010, 17),

$$x = \frac{p_d}{H} \quad (5)$$

jossa x on liuenneen kaasun moolisuus, p_d on nesteen kanssa kosketuksissa olevan kaasun osapaine (Pa) ja H on Henryn vakio (Pa). Kun tarkastellaan veteen liukenevia kaasuja, voidaan Henryn laki johtaa muotoon (Kärkkäinen 2010, 19)

$$C_{eq} = 55,51 \text{ mol/kg} \cdot \frac{\rho \cdot p_d}{H} \quad (6)$$

jossa C_{eq} on kaasukonsentraatio (mol/m^3), $55,51 \text{ mol/kg}$ on veden moolimassa, ja ρ on veden tiheys (kg/m^3). Kaavassa esiintyvä kaasunosapaine p_a , taas voidaan laskea hapen ja typen pitoisuuksista ilmakehässä. Enimmäismäärä typpeä ja happea, joka voi liueta veteen voidaan laskea kaavoilla,

$$p_{N_2} = 0,79 \cdot (p_a - p_v) \quad (7)$$

$$p_{O_2} = 0,21 \cdot (p_a - p_v) \quad (8)$$

joissa p_a on kaasuseoksen kokonaispaine ja p_v on höyryn osapaine tietyssä lämpötilassa. Laskennassa käytettävät veden höyrynpaineet ja tiheydet eri lämpötiloissa on nähtävillä taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Veden tiheys (kg/m^3) ja höyrynpaine eri lämpötiloissa (kPa)
(Kärkkäinen 2010, 18)

	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
kg/m³	999,80	999,70	999,00	998,20	996,90	995,60	993,90	992,20	990,20	988,20	983,20	977,80	971,80	965,30
kPa	0,87	1,22	1,70	2,33	3,16	4,24	5,62	7,37	9,58	12,33	19,92	31,16	47,36	70,11

Henryn vakio on määritetty kokeellisesti ja se on ominainen kullekin aineelle. Henryn vakio typelle ja hapelle on nähtävissä taulukossa 2. Kyseisestä taulukosta voidaan nähdä, että Henryn vakio kasvaa lämpötilan noustessa. Näin ollen kaasujen liukoisuus veteen vähenee sitä mukaa kun veden lämpötila nousee.

TAULUKKO 2. Henryn vakiot hapelle ja typelle eri lämpötilatasoissa (GPa)
(Kärkkäinen 2010, 17).

H	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
O₂	2,91	3,27	3,64	4,01	4,38	4,75	5,07	5,35	5,63	5,88	6,29	6,63	6,85	6,99
N₂	5,97	6,68	7,38	8,04	8,65	9,24	9,85	10,40	10,90	11,30	12,00	12,50	12,60	12,60

On tutkittu, että lämpimällä $+50 \text{ °C}$ vedellä, happi palaa pois vedestä lähes kokonaan korroosion vuoksi noin 50 minuutin kuluessa verkoston täyttämistä. Kylmällä $+10 \text{ °C}$ vedellä veden happipitoisuus on jo alun alkaen lämmintä vettä kor-

keampi, ja sen pois palaminen kestää lämmintä vettä kauemmin. Kylmällä vedellä vastaava aika on noin 90 minuuttia. Tässä tutkimuksessa osoitettiin, että patteriverkostossa ilmaustarvetta aiheuttaa lähinnä liian korkea typpipitoisuus. (Kärkkäinen 2010, 29).

Kun lämmitysveden typpikonsentraatio ylittyy, alkaa lämmönsiirtonesteestä erkaantua kuplia. Yleisemmin tämä tapahtuu pumppuun nähden kauimmaisen linjan, ylimmän patterin yläosassa. Nämä vapautuvat kuplat eivät ole ainoastaan typpikaasua, vaan niihin on sekoittunut myös vesihöyryä lämmönsiirtonesteestä. Tämän vesihöyryn osapaine on lämmönsiirtonesteen menolämpötilaa vastaava höyrynpaine. (Kärkkäinen 2019).

9 LASKENTA

Tässä kappaleessa lasketaan läpi vesijohtoveden sekä eri lämmönsiirtonesteiden kaasukonsentraatiot ja tutkitaan kuinka nesteiden lämpötilat ja eri paineet vaikuttavat niiden kaasukonsentraatioon.

9.1 Vesijohtoveden kaasukonsentraatio

Kaavojen (7 ja 8) avulla voidaan laskea hapelle ja typelle osapaineet ilmakehässä. Ilmakehän paine on 1bar ja esimerkiksi 10 °C:n lämpötilassa veden höyrynpaine on 0,0122 bar. Tällöin näiden kaasujen osapaineiksi saadaan

$$p_{O_2} = 0,21 \cdot (1,00 - 0,0122) \text{ bar} = 0,208 \text{ bar}$$

$$p_{N_2} = 0,79 \cdot (1,00 - 0,0122) \text{ bar} = 0,780 \text{ bar}.$$

Kaasujen osapaineiden avulla voidaan laskea kaavan (6) mukaan osapaineita vastaavat saturaatioarvot. Näin ollen hapen ja typen saturaatioarvoiksi saadaan

$$C_{eq,10^\circ C, O_2} = 55,51 \text{ mol/kg} \cdot \frac{999,70 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,208 \text{ bar}}{32700 \text{ bar}}$$

$$= 0,35 \text{ mol/m}^3$$

$$C_{eq,10^\circ C, N_2} = 55,51 \text{ mol/kg} \cdot \frac{999,70 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,780 \text{ bar}}{66800 \text{ bar}}$$

$$= 0,65 \text{ mol/m}^3.$$

Daltonin osapainelain mukaan kaasuseoksen kokonaispaine on kaikkien sen sisältämien kaasujen osapaineiden summa. Näin ollen 10 °C:n veden kaasusaturaatioarvoksi saadaan

$$C_{eq,10^{\circ}\text{C}} = C_{eq,10^{\circ}\text{C},\text{O}_2} + C_{eq,10^{\circ}\text{C},\text{N}_2} = 0,35 \text{ mol/m}^3 + 0,65 \text{ mol/m}^3$$

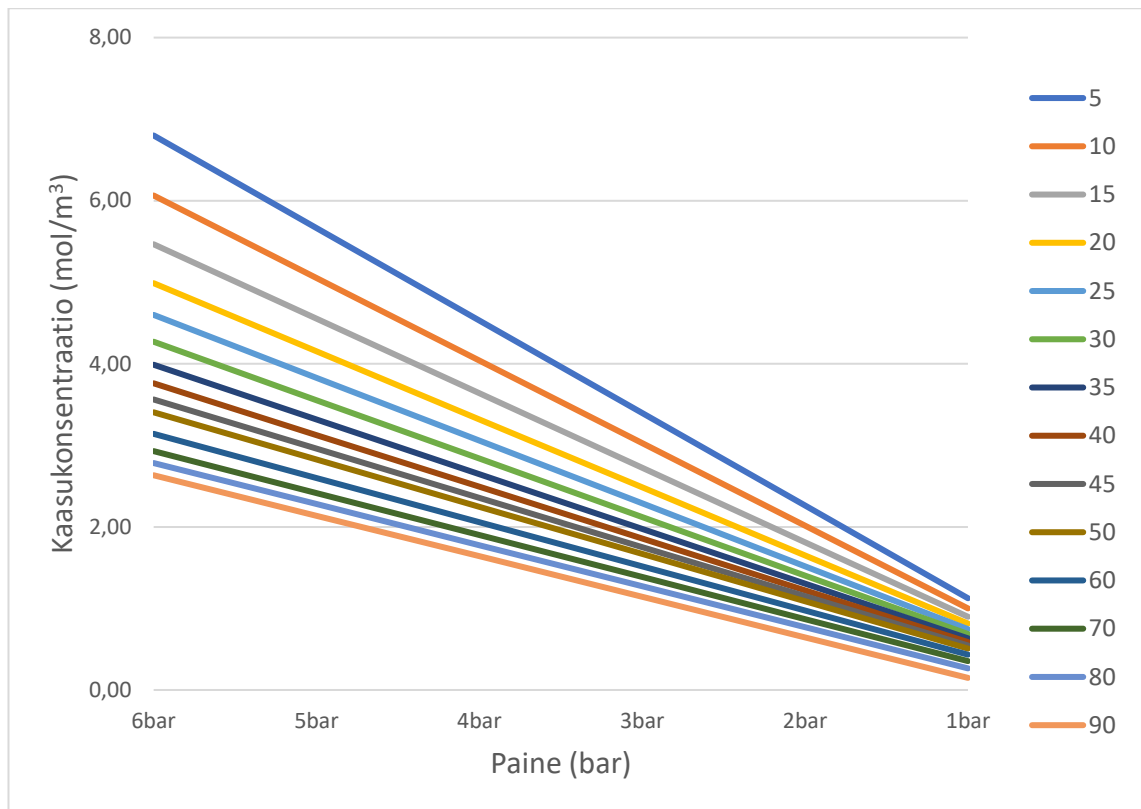
$$= 1,00 \text{ mol/m}^3.$$

Yksi kuutio 10 °C vettä voi siis sisältää maksimissaan 1,00 mol/m³ ilmaa. Muille vesijohtoveden lämpötiloille vastaavat tulokset ovat nähtävissä taulukosta 3.

TAULUKKO 3. Veden saturaatioarvot ilmalle eri lämpötiloissa ja normaalissa ilmanpaineessa.

	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
O₂ mol/m³	0,40	0,35	0,31	0,28	0,26	0,23	0,22	0,20	0,19	0,17	0,15	0,12	0,09	0,05
N₂ mol/m³	0,73	0,65	0,58	0,53	0,49	0,45	0,42	0,39	0,36	0,34	0,29	0,24	0,18	0,10
N₂+O₂ mol/m³	1,13	1,00	0,90	0,82	0,75	0,69	0,63	0,59	0,55	0,51	0,43	0,35	0,27	0,15

Koska verkoston täyttöä harvoin tehdään normaalissa ilmanpaineessa olevalla vedellä, vesijohtovedelle laskettiin veden saturaatioarvot ilmalle myös erilaisissa ylipaineisissa tilanteissa. Laskennassa käytettiin samoja kaavoja kuin normaalissa ilmanpaineessa olevalle vedellekin. Tämän laskennan tulokset ovat nähtävissä kuviossa 2, ja numeraalisena tulokset löytyvät liitteistä (liite 1).



KUVIO 2. Lasketut veden saturaatioarvot ilmalle eri lämpötiloissa ja paineissa.

9.2 Vesijohtoveden kaasukonsentraatio alipaineistettuna

Edellisessä kappaleessa laskettiin esimerkkilaskelma, kuinka lämpötila vaikuttaa kaasukonsentraatioon. Edellisen kappaleen laskentakaavoja (6, 7 ja 8) sovellettiin hieman, ja laskettiin myös, mitä eri lämpöisten vesijohtovesien alipaineistus vaikuttaa niiden kaasukonsentraatioihin. Esimerkiksi 30°C:n veden alipaineistus 0,8bar:lla saadaan

$$C_{eq,30^{\circ}C,O_2} = 55,51 \text{ mol/k} \cdot \frac{995,60 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,21 \cdot (0,8 - 0,0424) \text{ bar}}{47500 \text{ bar}}$$

$$= 0,19 \text{ mol/m}^3$$

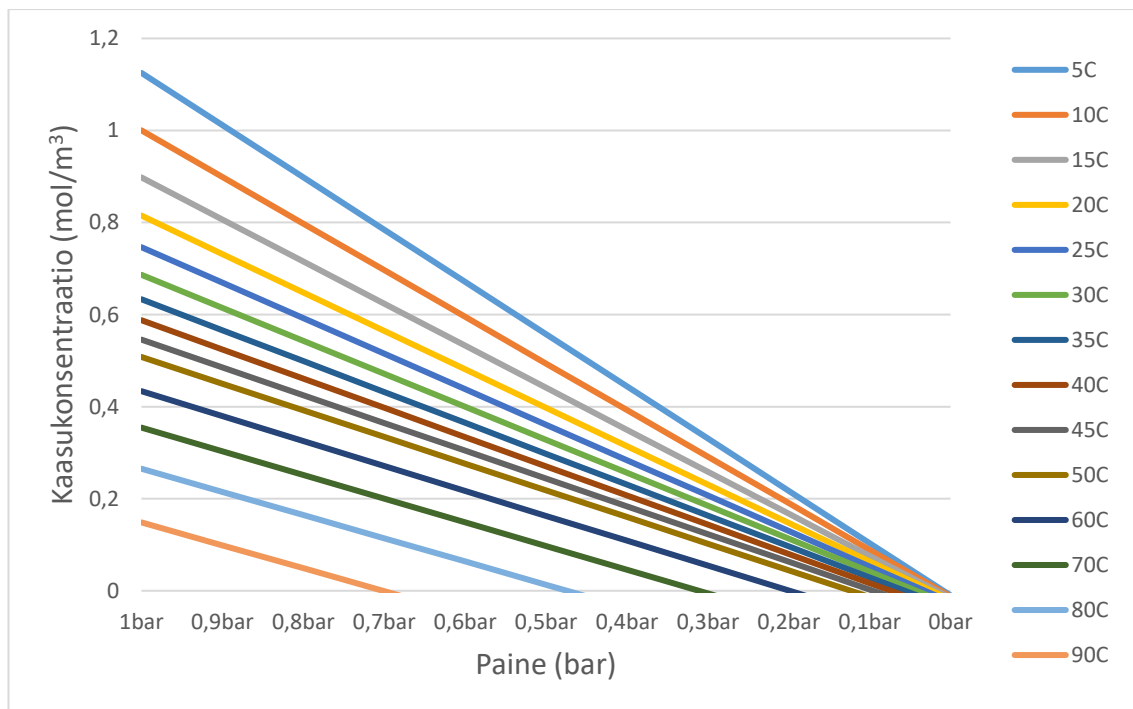
$$C_{eq,30^{\circ}C,N_2} = 55,51 \text{ mol/k} \cdot \frac{995,60 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,79 \cdot (0,8 - 0,0424) \text{ bar}}{92400 \text{ bar}}$$

$$= 0,36 \text{ mol/m}^3$$

$$C_{eq,30^{\circ}C} = C_{eq,30^{\circ}C,O_2} + C_{eq,30^{\circ}C,N_2} = 0,19 \text{ mol/m}^3 + 0,36 \text{ mol/m}^3$$

$$= 0,54 \text{ mol/m}^3.$$

Muille vesijohtoveden lämpötiloille eri painetasoissa laskennan tulokset ovat nähtävissä kuviossa 3. Laskennan kaikki tulokset numeraalisessa muodossa löytyy liitteistä (liite 2).



KUVIO 3. Lasketut veden saturaatioarvot ilmalle alipaineistettuna ja eri lämpötiloissa.

9.3 Muiden lämmönsiirtonesteseosten kaasukonsentraatio

Kaavojen (6, 7 ja 8) mukaan laskettiin kaasukonsentraatiot myös muille tässä työssä käsitellyille lämmönsiirtonesteseoksille. Lämmönsiirtonesteseosten oletettiin olevan pitoisuudeltaan 25-30 %. Laskenta suoritettiin huonelämpötilan aineominaisuuksien arvoilla. Lämmönsiirtonesteiden laskennassa käytetyt tiheydet ja höyrynpaineet on nähtävillä taulukossa 4. Lisäksi taulukossa 5 löytyvät laskennassa käytetyt lämmönsiirtonesteseosten moolimassat. Kaikki käytetyt arvot laskettiin veden ja käytetyn aineen seoksen suhteessa.

TAULUKKO 4. Laskennassa käytetyt lämmönsiirtonesteseosten tiheydet ja höyrynpaineet.

20-25°	Vesi	Propyleeni-glykoli 30%	Kaliumformiaatti 30%	Etyleeni-glykoli 30%	Etyyli-alkoholi 30%	Ammoniakki 25%
Kg/m³	996,90	1006,13	1053,58	1010,65	985,06	910,00
Kpa	3,16	2,22	2,69	2,21	3,95	44,00

TAULUKKO 5. Laskennassa käytetyt lämmönsiirtonesteseosten moolimassat.

	Vesi	Propyleeniglykoli	Freezium	Etyleeniglykoli	Etyylialkoholi	Ammoniakki
Moolimassa (g/mol)	18,01	76,09	84,12	62,07	46,07	17,03
Moolimassa (mol/kg)	55,51	13,14	11,89	16,11	21,71	58,72
Moolimassa 30% seoksella (mol/kg)		42,80	42,42	43,69	45,37	56,31

Laskenta suoritettiin normaalissa ilmanpaineessa (1 bar) sekä eri painetasoissa alipaineistettuna. Esimerkiksi 30 % etyleeniglykolin kaasukonsentraatti 0,9 bar:n alipaineistuksella lasketaan

$$C_{eq,E.g.C,O_2} = 43,69 \text{ mol/kg} \cdot \frac{1010,6 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,21 \cdot (0,9 - 0,0221) \text{ bar}}{40100 \text{ bar}}$$

$$= 0,20 \text{ mol/m}^3$$

$$C_{eq,E.g,C,N_2} = 43,69 \text{ mol/kg} \cdot \frac{1010,6 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,79 \cdot (0,9 - 0,0221) \text{ bar}}{80400 \text{ bar}}$$

$$= 0,38 \text{ mol/m}^3$$

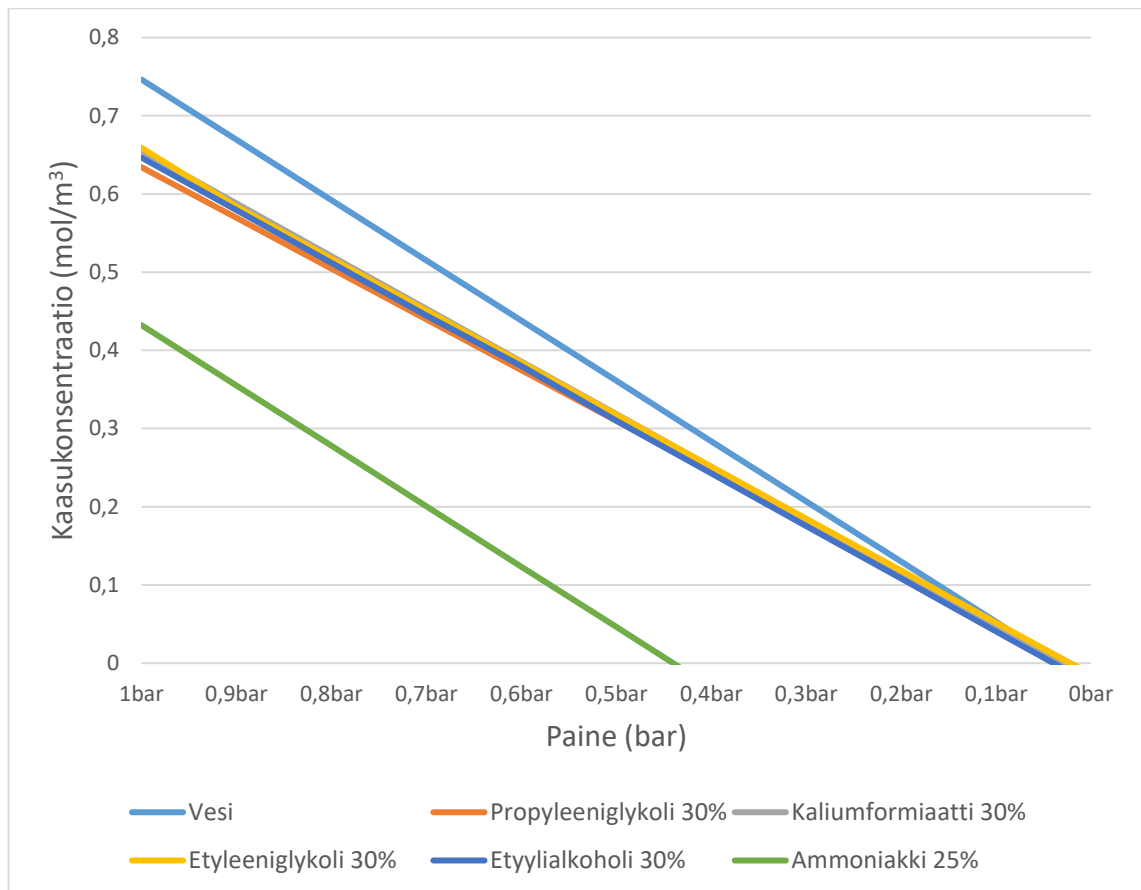
$$C_{eq,E.g} = C_{eq,E.g,O_2} + C_{eq,E.g,N_2} = 0,20 \text{ mol/m}^3 + 0,38 \text{ mol/m}^3$$

$$= 0,58 \text{ mol/m}^3.$$

Taulukossa 6 on nähtävissä lasketut eri lämmönsiirtonesteseosten saturaatioarvot huonelämpötilassa ja normaalissa ilmanpaineessa. Laskenta suoritettiin myös eri paineissa, ja tämän laskennan tulokset ovat nähtävissä kuviosta 4 ja kaikki tulokset numeraalisena löytyvät liitteistä (liite 3).

TAULUKKO 6. Lasketut lämmönsiirtonesteseosten saturaatioarvot ilmalle normaalissa ilmapaineessa ja huonelämpötilassa.

	1bar	Vesi	Propyleeni- glykoli 30%	Kaliumfor- miaatti 30%	Etyleeni- glykoli 30%	Etyylialkoholi 30%	Ammoniakki 25%
O ₂	mol/m ³	0,26	0,22	0,23	0,23	0,22	0,15
N ₂	mol/m ³	0,49	0,41	0,43	0,42	0,42	0,28
	yht.	0,75	0,63	0,66	0,66	0,65	0,43



KUVIO 4. Lasketut lämmönsiirtonesteseosten saturaatioarvot ilmalle huonelämpötilassa ja eri paineissa.

9.4 Käytännön esimerkki

Lopuksi laskettiin käytännön esimerkki tilanteesta, joka voisi tapahtua verkostossa. Laskennan kohteena oli suljettu lämmitysverkosto, jossa lämmönsiirtonesteenä kiertää vesi. Lämmitysverkoston menoveden lämpötila oli 60 °C. Laskenta suoritettiin pisteessä, jossa menovesi saapuu patteriin, mutta ei ole vielä luovuttanut lämpöä huonetilaan. Koska hapen voidaan olettaa palaneen jo pois, laskenta suoritetaan ainoastaan typpikonsentraatiolle.

Jos menoveden lämpötila on patterin yläosassa 60 °C, on vesihöyryn höyrynpaine tällöin 19,92 kPa ja veden tiheys 983,20 kg/m³. Jos paine patterissa on 190 kPa on tällöin tyypen osapaine kuplassa 170,08 kPa. Tällöin saadaan kaavan 6 mukaan laskettuna typpikonsentraatiksi vedessä 0,61 mol/m³.

10 POHDINTA

Tässä kappaleessa pohditaan laskennan tuloksia ja kuinka saatuja tuloksia voidaan soveltaa työn teoriaosuuteen sekä käytännön kokemuksiin. Lisäksi kappaleessa pohditaan, mitkä ovat ne työn osa-alueet, jotka tarvitsevat vielä jatkotutkimusta esimerkiksi testiverkoston koeajoilla.

10.1 Laskennan tuloksien pohdinta

Vesi

Laskenta suoritettiin aluksi +10 C° vesijohtovedelle normaalissa ilmanpaineessa, jolla voidaan kuvitella usein tehtävän verkostojen täyttöjä. Lisäksi laskenta tehtiin erilämpöisille vesijohtovesille, sekä lisäksi erilämpöisille vesijohtovesille alipaineistettuina. Laskennassa on hyvin nähtävissä (kuvio 3) kuinka vesijohtoveden kaasukonsentraatti laskee veden lämpötilan noustessa ja paineen las-
kiessa.

Kaasutonta täyttöä, eli lämmitysverkostojen täyttöä alipaineistetulla vedellä käytetään kuitenkin vielä vähän. Tuloksissa on hyvin nähtävissä alipaineistuksen vaikutus kaasukonsentraatiota alentavasti, mutta esimerkiksi kuumalla, yli +60 C° vesijohtovedellä verkostoja täytettäessä voitaisiin teoriassa päästä lähes yhtä hyvään lopputulokseen. Jos verkosto halutaan saada täyttövaiheessa mahdollisimman ilmattomaksi, on syytä huolehtia siitä, että verkosto tulee myös pysymään ilmattomana ja ilmaongelmia ei tule myöhemmässäkään vaiheessa. Käytännössä tämä tarkoittaa tiiviistä verkostoa, jossa on hallittu nestekierto oikeassa painetasossa.

Käytännön esimerkissä laskettiin realistinen tilanne, jollaiseen voi törmätä myös todellisissa kohteissa. Laskennalla osoitettiin, että +60 °C:lla vesijohtovedellä kaasukonsentraatti on 0,61 mol/m³, jos verkoston paine patterissa on 190kPa. Jos lämmönsiirtonesteen kaasukonsentraatti saadaan täyttövaiheessa esimerkiksi 0,5 mol/m³ (taulukko 3), kaasua ei pääse erkanemaan nesteestä, kun paine pidetään minimissään 190 kPa.

Teoriassa on siis mahdollista, että jos verkosto saadaan huolellisesti täytettyä +60 °C:lla vesijohtovedellä, ja ilma poistettua verkostosta täytön yhteydessä huolellisesti, on mahdollista, että lämmönsiirtonesteen kaasukonsentraatti jää jo täyttövaiheessa niin pieneksi, että ilmaongelmia ei synny korkeillakaan lämpötiloilla paineen kasvaessa.

Lämmitysverkostojen täyttö tehdään usein kylmällä vesijohtovedellä, ja ensimmäisen täytön yhteydessä vesi "kiehutetaan" eli lämmitetään käyttölämpötilaa huomattavasti lämpimämmäksi. Tällä saadaan kaasut erkanemaan nesteestä ja verkosto ilmattua kohtuullisen hyvin. Parempaan lopputulokseen voitaisiin päästä, jos verkosto täytettäisiin kuumalla vesijohtovedellä ja suoritettaisiin sama toimenpide. Kuumassa vesijohtovedessä kaasu on jo mikrokuplina, ja näin ollen sen poistaminen verkostosta täyttövaiheessa voisi olla tarkempaa ja nopeampaa. Sama teoria pätee verkostoveden nesteen lisäykseen esimerkiksi huoltotöistä tapahtuvien nestehäviöiden jälkeen. Jos lisäys tehdään kuumasta käyttövesiverkostosta, verkoston ilmaus ja stabiili käyttötilanne voidaan saavuttaa paljon nopeammin verrattuna nesteen lisäykseen kylmästä käyttövedestä.

Laskennan perusteella voidaan siis todeta, että suunnittelupöydällä verkostojen täyttöliitettä kannattaa suunnitella tapahtuvan lämpimästä käyttövesiverkostosta.

Muut lämmönsiirtonesteseokset

Laskenta tehtiin myös muille tässä työssä käsitellyille lämmönsiirtonesteseoksille. Tulosten perusteella kaikki muut lämmönsiirtonesteseokset asettuivat hyvin lähelle toisiaan, pois lukien ammoniakkiseos. 25 % ammoniakkiseos asettuu kuviossa (kuvio 4) huomattavasti lyhyemmäksi ja jyrkemmin kuin muut lämmönsiirtonesteseokset. Tämän kaasukonsentraatio on nollassa jo 0,5 bar alipaineistuksella ja normaalissa ilmanpaineessa huonelämpötilassa kaasukonsentraatio on huomattavasti muita lämmönsiirtonesteitä alhaisempi. Tässä työssä ei kuitenkaan käsitellä esimerkiksi ammoniakkin käytön asettamia vaatimuksia verkostolle, joten asiaan ei oteta sen enempää kantaa. Lisäksi tarkastelu tehtiin täysin teoreettisesti, joten kantaa ei oteta myöskään siihen, onko muiden lämmönsiirtonesteen alipaineistaminen nykyisillä laitteistoilla ylipäättänsä mahdollista.

Vaikka vesi asettuikin vertailussa hieman epäedullisempaan asemaan kaasukonsentraatiota ajatellen, verkostoon harvoin valitaan lämmönsiirtonestettä sillä perusteella, mikä sen liuenneiden kaasujen määrä voi olla. Monilta ominaisuuksiltaan vesi ajaa edelleen näiden muiden seosten ohi. Suurimpina syinä näistä ovat veden helppo saatavuus ja sen käytön turvallisuus.

10.2 Käytännön pohdinta

Työssä kerrottiin teoriaa kavitaatiosta ja kuplan muodostumisesta nopean lämpötilamuutoksen takia esimerkiksi lämmönsiirtimen pinnalla. Työn teoreettisen tarkastelun perusteella ei kuitenkaan voida tehdä johtopäätöksiä siitä, tapahtuuko kuplanmuodostusta lämmönsiirtimen pinnalla ja jos, niin missä mittakaavassa tätä tapahtuu. Lisäksi pumpun kavitaatio on laajasti tiedossa oleva asia, mutta esimerkiksi säätävissä venttiileissä tapahtuvaa kavitaatiota on tutkittu hyvin vähän. Kuplan muodostumista lämmönsiirtimessä, pumpussa ja säätävissä venttiileissä tulisi jatkotutkia tarkoitukseen rakennetulla testiverkostolla.

Käytännön sovelluksissa on havaittu, että usein taloyhtiössä on tietty patteri, jossa havaitaan jatkuvaa ilmaustarvetta. Usein tämän patterin on todettu olevan verkoston kauimmainen patteri, jolloin lämmönsiirtoneste ehtii jäähtyä eniten ja matkalla on eniten mahdollisia vuotokohtia, joista ilman on mahdollista verkostoon vuotaa. Ilman kertyminen aina samoihin pattereihin voi olla myös osoitus siitä, että tuon kyseisen linjan erilaisista venttiileistä, putkenosista ja putken karheuksista johtuvat painehäviöt synnyttävät jatkuvasti parhaat olosuhteet kuplakoon kasvamiseen juuri kyseisessä linjassa. Teorian perusteella ei kuitenkaan voida todeta, minkälaiset ominaisuudet kuplan reitillä ovat optimaalisia kuplakoon kasvattamiseen ja ilmakuplien patteriin jumiutumiseen.

Teoriassa on mahdollista, että jos lämmitysverkosto otetaan käyttöön alipaineilmanpoistimen kanssa ja verkosto täytetään hapettomalla vedellä, verkostoon ei pääse happea veden mukana käytännössä lainkaan. Näin ollen putken pinta ei passivoidu ja suojaavaa magneetiittikerrosta ei pääse syntymään. Alipaineilmanpoistimien käyttö jatkuvasti verkostossa voi aiheuttaa verkostonesteen alikylläi-

sen tilan, jolloin diffuusiota tapahtuu enenevässä määrin etenkin diffuusiosuojamattomissa putkenosissa. Myös paikallinen magnetiitin kertyminen näihin osiin voi olla huomattavaa.

Varsinkin automaattisten ilmanpoistimien sulkumekanismien on havaittu usein jumiutuvan ja näin ollen estävän automaattisen ilmanpoistimen tarkoituksenmukaisen toiminnan. Tämän voi aiheuttaa verkostossa olevat epäpuhtaudet tai ilmanpoistimessa tapahtuva korroosio. Sulkumekanismien jumiutuessa ilmareitti verkostoon jää auki, jolloin verkoston alipainetilanteessa verkostoon vuotaa ilmaa, ja ylipainetilanteessa lämmönsiirtonestettä vuotaa ilmanpoistimen kautta ulos verkostosta. Automaattiset ilmanpoistimet tulisikin aina asentaa paikkoihin, joissa niiden toiminnantarkistus, huolto ja laitteen vaihtaminen uuteen olisi mahdollisimman helppoa. Myös muiden ilmanpoistimien toimintaperiaate ja optimit toimintaolosuhteet täytyy ymmärtää, jotta ilmanpoistin toimisi verkostossa toivotulla tavalla.

Työn laskentaosuudessa todettiin, että verkostojen täyttölaitteisto kannattaa suunnitella liitettäväksi kylmän käyttöveden sijasta lämpimään käyttöveteen. Vaikka lämmin käyttövesi voi sisältää teoreettisesti tarkasteltuna vähemmän liuennutta kaasua, kaasu esiintyy lämpimän käyttöveden seassa mikrokuplina. Voidaan kuitenkin todeta, että vaikka mikrokuplia ajautuisikin kuumen täyttöveden mukana verkostoon, on sen ilmaus kuitenkin nopeampaa ja tehokkaampaa kuin silloin, kun täyttö tehtäisiin kylmällä vesijohtovedellä, johon kaasut ovat lähes kokonaan nesteeseen lienneena. Jatkotutkimuksena voisi tutkia, kuinka ilmanerotin toimisi verkoston täyttölaitteiston yhteydessä kuumasta käyttövedestä ja vähentäisikö se verkostoon siirtyvien mikrokuplien määrää kun verkostoa täytetään.

Lämmitysverkostojen lisäksi voidaan pohtia työn teoreettinen soveltuvuus jäähdytyssovelluksiin. Suuressa osassa jäähdytyssovelluksiakin, esimerkiksi ilmanvaihto- ja huonekohtaisissa jäähdytysverkostoissa, käytetään lämmönsiirtonesteenä vettä. Alhaisten lämpötilojen lisäksi, painetasot ovat kohtuullisen korkeita, jolloin verkostossa voi olla lämmönsiirtonesteseokseen lienneena suuri määrä ilmaa. Pienen lämpötilaeron takia jäähdytysjärjestelmien teho jää muutenkin matalaksi ja kasvattaa näin ollen laitteiston kokoa, joten ilma verkostossa pienentää

järjestelmän tehokkuutta entisestään. Näin ollen jäähdytyssovelluksissa verkoston painetasojen ymmärrys ja tätä kautta ilmaongelmien hallinta muodostuu ensiarvoisen tärkeäksi.

10.3 Suunnittelussa huomioitavat asiat

Työssä pohdittiin myös sitä, mikä nykysuunnittelussa unohtuu lämmitysverkostoja suunnitellessa ja jopa sitä, tuliko työssä ilmi jotain mikä nykyisessä tai tulevaisuuden suunnittelussa tulisi tehdä toisin tai ottaa paremmin huomioon.

Vastuuta toimivasta ja ilmaongelmattomasta verkostosta ei voi asettaa ainoastaan LVI-suunnittelijan harteille. Myös urakoitsijan ja muiden yhteistyötahojen merkitys on toteutuksessa oleellinen. Suunnitelmien yksiselitteisyys, sekä riittävän tarkkojen ominaisuuksien määrittely takaavat sen, että toteutuksesta tulee sellainen kuin on haluttu. Onnistunut ilmaongelmaton verkosto on kaikkien osien summa ja eri suunnittelu- ja toteutusalojen saumattoman yhteistyön tulos.

Eri suunnittelualojen tekniikoiden törmäystarkastelulla selvitetään suunnitteluvaiheessa ne kohdat rakennuksen talotekniikasta, joissa tekniikan törmäyksiä tapahtuu, ja sovitaan siitä, miten ja kenen toimesta törmäys voitaisiin välttää. Tekniikan väistöä ei kuitenkaan tule suorittaa kyseisen tekniikan toimivuuden kustannuksella. Lämmitysverkosto tulee suunnitella ja toteuttaa mahdollisimman yksinkertaiseksi, eikä lämmitysverkosto saa olla se tekniikka, joka väistää muuta tekniikkaa ylimääräisillä korkeudenmuutoksilla. Jokainen verkoston korkeudenmuutos tulee olla harkittu vaikutuksiltaan ilmankertymiseen.

Verkoston yksinkertaisuus ja verkoston mitoittaminen niin, että verkosto saadaan sujuvasti tasapainoon, kuuluu oleellisesti suunnittelijan työtehtäviin. Tähän kuuluu myös se, että suunnittelija tuntee virtauksen ja paineen käyttäytymisen verkoston eri kohdissa. Verkoston vaikeimman reitin tulee olla mahdollisimman painehäviötön, koska kaikki ylimääräinen painehäviö vaikeimmalla reitillä johtaa pumpun nostokorkeuden korottamiseen. Verkoston häiriöttömän toiminnan aikaansaamiseksi tulee verkoston olla mahdollisimman väljä, ilman keinotekoisia vastuksia.

Tarkempaa tarkastelua tulisikin edelleen kohdistaa asuinrakennusten ylimpien kerrosten kylmimmiksi tiedettyjen huoneiden tilanteeseen. Saatetaanko ne jälleen lämpimiksi koko talon muita pystylinjoja voimakkaasti kuristamalla, ja aiheuttamalla näin mahdollisesti esimerkiksi ilmausongelmia, vai lisäämällä patteripinta-alaa nykyistä enemmän ongelmallisiin tiloihin. Patterin lämmönluovutus ei kuitenkaan juuri lisääny virtaamaa lisäämällä ellei virtaus alkutilanteessa ole hyvin pientä. Myöskään patterin suurentaminen ei tässä tapauksessa auta jos virtausta ei ole riittävästi ja verkostossa vallitsee virheelliset painesuhteet.

Työssä olennainen tulos oli loppupäätelmä, jonka perusteella todettiin, että verkostojen täyttölaitteiston kytkentä tulisi suunnitella ja toteuttaa kylmän käyttöveden sijasta lämpimästä käyttövedestä. Asia ei ole uusi, vaan tähän suuntaan suunnittelua on ohjattu jo useissa suunnittelutoimistoissa. Lisäksi suunnittelupöydällä vaikutetaan muihinkin verkoston oleellisiin ominaisuuksiin. Verkoston lämpötilatasot tulisi pitää mahdollisimman alhaisella tasolla ja verkoston painetasot tulisi määrittää riittävän korkeaksi. Riittävän korkealla painetasolla vältetään verkoston alipainetilanteilta ja näin ollen ilmakuplien erkaantumiselta lämmönsiirtonesteestä tai pahimmassa tapauksessa ilman imemiseltä suoraan verkostoon.

Myös pumpun valinnalla verkostoon sopivaksi on suuri merkitys. Verkostojen painehäviöt lasketaan nykyisin tietokoneohjelmistoilla, mutta myös ohjelmiston käyttäjän on ajateltava sen antamia tuloksia ja ymmärrettävä mistä painehäviöt muodostuvat, ja ennen kaikkea, ovatko tulokset järkeviä.

Verkoston aiheuttaman kokonaispainehäviön lisäksi on mietittävä, miten pumpun halutaan säätyvän. Halutaanko verkoston paineen pysyvän vakiona kaikissa tilanteissa, vai voidaanko verkoston vesivirtaa säätää paineen kustannuksella? Lisäksi jatkotutkimuksissa voisi selvittää, onko eri pumppuvalmistajien pumppukäyrissä yleisestikin eroja niiden jyrkkyydessä, ja onko näin ollen jonkun pumppuvalmistajan pumppu alttiimpi pumpun kavitaatiolle kuin toinen. Lisäksi on tärkeää määritellä ominaisuudet, joiden mukaan laitteiden hankinnat tehdään ja mistä ominaisuuksista ei voida poiketa.

11 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli tarkastella teoreettisesti virheitä, mitä lämmitysverkoston suunnittelussa, toteutuksessa ja käytössä tehdään ja mikä on fysikaalinen tausta näille ilmiöille. Lisäksi tarkoituksena oli luoda ehdotukset, miten käytöstä johtuvat virheet voitaisiin korjata ja näin ollen estää ilman kertyminen suljettuihin lämmitysjärjestelmiin. Työssä vertailtiin myös eri lämmönsiirtonesteiden kykyä sitoa kaasua itseensä. Lisäksi pohdittiin saatuja tuloksia verkostojen suunnittelun näkökulmasta.

Lämmitysverkostoilta vaaditaan koko ajan tarkempaa säädettävyyttä ja energia- tehokkuutta. Rakennusten lisääntyvä talotekniikan määrä ja rakentamisen kustannustehokkuus rajoittaa talotekniikalle käytettävissä olevaa tilaa ja kustannusta. Tämä asettaa myös lämmitysverkostolle suuria teknisiä vaatimuksia, ja verkostoista tulee väistämättä monimutkaisia. Niin kauan, kun lämmönsiirtoneste sisältämä kaasu pysyy virtauksen mukana nesteeseen liuenneena, ongelmia ei synny. Verkoston hallinta, ja etenkin ymmärrys sen paineen käyttäytymisestä on ensiarvoisen tärkeää. Kaasuttomalla vedelläkin täytetyn verkoston voi pilata pitämällä verkoston esipaineen liian matalana.

Laskennalla osoitettiin, että eri lämmönsiirtonesteiden välillä on jonkin verran eroa, mikä niiden kaasukonsentraatti on huonelämpötilassa. Lämmönsiirtoneste valintaan vaikuttavia ominaisuuksia on kuitenkin paljon ja lämmönsiirtoneste on aina valittava kohteeseen sopivaksi painottaen juuri kyseiseen kohteeseen merkittäviä ominaisuuksia.

Työssä pohdittiin lämmitysverkostojen suunnittelua ilman kertymisen kannalta, ja pohdittiin mitä asioita verkostojen suunnittelussa tulisi huomioida. Työssä selitettiin myös käytännössä havaitut ongelmat verkostojen käytössä, ja kuinka nämä ongelmat voitaisiin välttää. Kokeneelle suunnittelijalle tämä tuskin tuo uutta tietoa, mutta virkistää muistia asioista, joilla on ilman kertymiseen vaikutusta.

Aihe oli opinnäytetyöksi hyvin laaja ja lähteiden löytäminen työhön oli työn laajuuteen nähden ajoittain haastavaa. Erittäin suuressa roolissa työssä olivat asiantuntijahaastattelut. Näiden haastattelujen pohjalta työhön saatiin tärkeää kokemuspohjaista käytännön näkökulmaa, jota ei kirjallisuuslähteistä löydy.

Työn tekeminen opetti paljon suljetuista lämmitysverkostoista kokonaisuutena ja lisäsi paljon ymmärrystä suljettujen lämmitysverkostojen ilmaongelmista. Tämän työn tekemisestä ja sen kautta opituista asioista on varmasti hyötyä tulevaisuuden työelämässä ja siellä odottavissa työtehtävissä.

LÄHTEET

Algol Chemicals. n.d. Kylmäaineiden ja -liuosten jaottelu. Luettu 11.4.2020. <https://www.algolchemicals.fi/blogi-vanha/kylmaaineiden-ja-liuosten/>

Armatec. n.d. Ilman- ja lianerottimet lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmissä. Luettu 15.12.2019. https://www.armatec.com/globalassets/armatec-fi/pages/konseptit-sisalto/paineenhallinta/luft_partikelavskiljning_fin_low.pdf

Freezium opas. n.d. VesiTekno Oy. Luettu 10.2.2020. https://vesitekno.fi/_files/200000219-5863258636/Freezium%20opas%20oma%20uusi%202019%20Huom%20ja%CC%88rjes- telma%CC%88n%20Pesuohje.pdf

Grundfos. n.d. ALPHA 1 tuotekortti. Luettu 4.4.2020. https://fi.grundfos.com/content/dam/finnish/products/4010308_GSF_ALPHA1_leaflet_A4_080818.pdf

Haapalainen, E. & Vepsäläinen, T. 1994. LVI Lämmitystekniikka. 4. painos. Helsinki: Painatuskeskus Oy.

ITT Water & Wastewater Suomi Oy. n.d. Pumput ja putkistot teoriassa ja käytännössä. Miellyttävän sisäilman lämpötilan kustannustehokas hallinta. Luettu 4.4.2020. <https://docplayer.fi/10831023-Pumput-ja-putkistot-teoriassa-ja-kaytanossa-miellyttavan-sisailman-lampotilan-kustannustehokas-hallinta.html>

Johansson, M. 2020. LVS-kulutus seuranta Oy. Opinnäytetyökuulumisia. Sähköpostiviesti. Luettu 28.3.2020.

Johansson, M. & Koivula, U. 2019. LVIS-Kulutus seuranta Oy ja AX-LVI Oy. Asiantuntijahaastattelu. 18.9.2019.

K1/2013. Rakennusten kaukolämmitys. Määräykset ja ohjeet. Luettu 19.3.2020. https://energia.fi/files/502/JulkaisuK1_2013_20140509.pdf

Kolmeks. 2010. Spirovent tuote-esite. Luettu 15.12.2019. <https://www.kolmeks.fi/ajankohtaista/2010/10/20/uutuustuote-spirolta-spirovent-superior-s3-on-uudistunut>

Korkala, T. 2018. Lämmitys – Hoito ja huolto. 1. painos. Helsinki: Tapio Korkala ja Kiinteistöalan Kustannus Oy.

Kärkkäinen, A. 2010. Gasfri påfyllning av värme- och kylsystem samt injustering av radiatorsystem. Institutionen för energiteknik. Aalto-yliopisto. Väitöskirja.

Kärkkäinen, A. tekniikan tohtori. 2019. Opinnäytetyö TAMK/Kaasun erottuminen patteriverkostossa. Sähköpostiviesti. Luettu 29.9.2019.

Laiho, E. 2010. Putkijohtojen virtausteknisen mitoituksen perusteita. Opetusmateriaali. MAMK.

LVI 11-10472. 2011. Paisuntajärjestelmän valinta ja mitoitus. Helsinki: Rakennustieto Oy. Vaatii käyttöoikeuden. Luettu 6.3.2020. https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/LVI%2011-10472?external_system=Juha&page=1

LVI 20-10348. 2004. Putkistojen asennus. Helsinki: Rakennustieto Oy. Vaatii käyttöoikeuden. Luettu 19.3.2020. <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/LVI%2020-10348>

LVI 19-10399. 2006. Lämmitä oikein, Vesikeskuslämmitysjärjestelmän käyttäjän ohje. Helsinki: Rakennustieto Oy. Vaatii käyttöoikeuden. Luettu 19.3.2020. <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/LVI%2019-10399>

Lämmönhuolto. n.d. Korroosio lämmitysverkostossa. Luettu 15.11.2019. <http://www.lammonhuolto.fi/korroosio.html>

Pulli, M. 2009. Virtaustekniikka. Vedensiirtojärjestelmien toiminnallinen suunnittelu nykyaikaisin menetelmin. 1. painos. Tampere: Tammertekniikka.

Reflex tuoteluettelo 2002-2003. n.d. Luettu 20.3.2020. <http://files.ari-term.fi/Bio/Muut/reflex%20N%20KALVOPAISUNTA-ASTIA.pdf>

Seppänen, O. 2001. Rakennusten lämmitys. 2. päivitetty painos. Suomen LVI-liitto Ry.

Suomen kylmäyhdistys ry. 2019. Väliilliset jäähdytysjärjestelmät. Luettu 6.3.2020. <http://www.skll.fi/www/att.php?type=2&id=331>

Termotohtori. n.d. Hapeton vesi – Airsepex®-täyttö- ja vedenkäsittelytekniikka. Veden käsittely ja verkoston täyttö. Luettu 10.4.2020. <https://www.termotohtori.fi/index.php/hapeton-taytto/>

Uponor. n.d. Komposiittiputkijärjestelmä. Luettu 10.4.2020. <https://www.uponor.fi/tuotejarjestelmat/komposiitti>

Vuorenmaa, A. 2015. Korroosio kaukojäähdytysjärjestelmissä. Kone- ja tuotantotekniikka. Metropolia ammattikorkeakoulu. Insinööriyö.

Wika. n.d. Absoluuttinen paine, suhteellinen paine ja paine-ero. Luettu 8.4.2020. https://www.wika.fi/landingpage_differential_pressure_fi_fi.WIKA

LIITTEET

Liite 1. Veden saturaatioarvot ilmalle eri lämpötiloissa ja paineissa (ylipaine)
(mol/m³)

	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
6bar														
O ₂	mol/m ³	2,40	2,13	1,91	1,73	1,58	1,46	1,36	1,28	1,21	1,06	0,98	0,91	0,85
N ₂	mol/m ³	4,40	3,93	3,55	3,25	3,02	2,82	2,63	2,48	2,35	2,08	1,95	1,87	1,78
	yht.	6,80	6,06	5,47	4,99	4,60	4,27	3,99	3,76	3,56	3,14	2,93	2,78	2,63
5bar														
O ₂	mol/m ³	2,00	1,78	1,59	1,44	1,32	1,21	1,13	1,07	1,01	0,87	0,81	0,75	0,69
N ₂	mol/m ³	3,67	3,27	2,96	2,71	2,51	2,34	2,19	2,06	1,95	1,72	1,61	1,53	1,44
	yht.	5,66	5,05	4,55	4,15	3,83	3,55	3,32	3,13	2,96	2,60	2,41	2,28	2,14
4bar														
O ₂	mol/m ³	1,60	1,42	1,27	1,15	1,05	0,97	0,90	0,85	0,80	0,69	0,63	0,58	0,53
N ₂	mol/m ³	2,93	2,62	2,36	2,17	2,01	1,87	1,75	1,64	1,56	1,37	1,27	1,19	1,11
	yht.	4,53	4,04	3,64	3,32	3,06	2,84	2,65	2,49	2,36	2,06	1,90	1,78	1,64
3bar														
O ₂	mol/m ³	1,20	1,06	0,95	0,86	0,79	0,72	0,67	0,63	0,60	0,51	0,46	0,42	0,37
N ₂	mol/m ³	2,20	1,96	1,77	1,62	1,50	1,40	1,30	1,22	1,16	1,01	0,92	0,85	0,77
	yht.	3,39	3,03	2,73	2,48	2,29	2,12	1,98	1,86	1,75	1,52	1,38	1,27	1,14
2bar														
O ₂	mol/m ³	0,80	0,71	0,63	0,57	0,52	0,48	0,44	0,42	0,39	0,33	0,29	0,25	0,21
N ₂	mol/m ³	1,46	1,30	1,18	1,08	0,99	0,92	0,86	0,81	0,76	0,65	0,58	0,52	0,44
	yht.	2,26	2,01	1,81	1,65	1,52	1,40	1,30	1,22	1,15	0,98	0,87	0,77	0,65
1bar														
O ₂	mol/m ³	0,40	0,35	0,31	0,28	0,26	0,23	0,22	0,20	0,19	0,15	0,12	0,09	0,05
N ₂	mol/m ³	0,73	0,65	0,58	0,53	0,49	0,45	0,42	0,39	0,36	0,29	0,24	0,18	0,10
	yht.	1,13	1,00	0,90	0,82	0,75	0,69	0,63	0,59	0,55	0,43	0,35	0,27	0,15

Liite 2. Veden saturaatioarvot ilmalle eri lämpötiloissa ja paineissa (alipaine)
(mol/m³)

		1bar	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
O2	mol/m ³		0,40	0,35	0,31	0,28	0,26	0,23	0,22	0,20	0,19	0,17	0,15	0,12	0,09	0,05
N2	mol/m ³		0,73	0,65	0,58	0,53	0,49	0,45	0,42	0,39	0,36	0,34	0,29	0,24	0,18	0,10
	yht.		1,13	1,00	0,90	0,82	0,75	0,69	0,63	0,59	0,55	0,51	0,43	0,35	0,27	0,15
		0,9bar	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
O2	mol/m ³		0,36	0,32	0,28	0,25	0,23	0,21	0,19	0,18	0,16	0,15	0,13	0,10	0,07	0,03
N2	mol/m ³		0,65	0,58	0,52	0,48	0,44	0,41	0,37	0,35	0,32	0,30	0,25	0,20	0,14	0,07
	yht.		1,01	0,90	0,81	0,73	0,67	0,61	0,57	0,52	0,49	0,45	0,38	0,30	0,21	0,10
		0,8bar	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
O2	mol/m ³		0,32	0,28	0,25	0,23	0,20	0,19	0,17	0,16	0,14	0,13	0,11	0,08	0,05	0,02
N2	mol/m ³		0,58	0,52	0,46	0,42	0,39	0,36	0,33	0,30	0,28	0,26	0,22	0,17	0,11	0,03
	yht.		0,90	0,80	0,72	0,65	0,59	0,54	0,50	0,46	0,42	0,39	0,33	0,25	0,16	0,05
		0,7bar	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
O2	mol/m ³		0,28	0,25	0,22	0,20	0,18	0,16	0,15	0,14	0,12	0,11	0,09	0,07	0,04	0,00
N2	mol/m ³		0,51	0,45	0,41	0,37	0,34	0,31	0,28	0,26	0,24	0,22	0,18	0,13	0,08	0,00
	yht.		0,78	0,70	0,62	0,56	0,52	0,47	0,43	0,40	0,36	0,33	0,27	0,20	0,11	0,00
		0,6bar	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
O2	mol/m ³		0,24	0,21	0,19	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,07	0,05	0,02	-0,02
N2	mol/m ³		0,43	0,39	0,35	0,31	0,29	0,26	0,24	0,22	0,20	0,18	0,14	0,10	0,04	-0,03
	yht.		0,67	0,60	0,53	0,48	0,44	0,40	0,36	0,33	0,30	0,28	0,22	0,15	0,06	-0,05
		0,5bar	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
O2	mol/m ³		0,20	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,05	0,03	0,00	-0,03
N2	mol/m ³		0,36	0,32	0,29	0,26	0,24	0,22	0,20	0,18	0,16	0,14	0,11	0,06	0,01	-0,07
	yht.		0,56	0,49	0,44	0,40	0,36	0,33	0,30	0,27	0,24	0,22	0,16	0,10	0,01	-0,10
		0,4bar	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
O2	mol/m ³		0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,02	-0,01	-0,05
N2	mol/m ³		0,29	0,25	0,23	0,21	0,19	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	0,07	0,03	-0,02	-0,10
	yht.		0,44	0,39	0,35	0,31	0,28	0,26	0,23	0,21	0,18	0,16	0,11	0,05	-0,04	-0,15
		0,3bar	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
O2	mol/m ³		0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,00	-0,03	-0,06
N2	mol/m ³		0,21	0,19	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07	0,04	0,00	-0,06	-0,13
	yht.		0,33	0,29	0,26	0,23	0,21	0,18	0,16	0,14	0,12	0,10	0,05	-0,01	-0,09	-0,20
		0,2bar	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
O2	mol/m ³		0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,00	-0,02	-0,05	-0,08
N2	mol/m ³		0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,00	-0,04	-0,09	-0,17
	yht.		0,22	0,19	0,17	0,15	0,13	0,11	0,10	0,08	0,06	0,04	0,00	-0,06	-0,14	-0,25
		0,1bar	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
O2	mol/m ³		0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	-0,02	-0,04	-0,06	-0,10
N2	mol/m ³		0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,01	0,00	-0,01	-0,04	-0,07	-0,13	-0,20
	yht.		0,10	0,09	0,08	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,00	-0,01	-0,05	-0,11	-0,19	-0,30
		0bar	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
O2	mol/m ³		0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02	-0,04	-0,05	-0,08	-0,11
N2	mol/m ³		-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02	-0,03	-0,04	-0,05	-0,07	-0,11	-0,16	-0,24
	yht.		-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02	-0,03	-0,04	-0,05	-0,06	-0,07	-0,11	-0,16	-0,24	-0,35

Liite 3. Lasketut lämmönsiirtonesteseosten saturaatioarvot ilmalle huonelämpötilassa ja eri paineissa (mol/m³)

		Vesi	Propyleeni-glykoli 30%	Kaliumformiaatti 30%	Etyleeni-glykoli 30%	Etyylialkoholi 30%	Ammoniakki 25%
1bar							
O ₂	mol/m ³	0,26	0,22	0,23	0,23	0,22	0,15
N ₂	mol/m ³	0,49	0,41	0,43	0,42	0,42	0,28
	yht.	0,75	0,63	0,66	0,66	0,65	0,43
0,9bar							
O ₂	mol/m ³	0,23	0,20	0,20	0,20	0,20	0,12
N ₂	mol/m ³	0,44	0,37	0,38	0,38	0,38	0,23
	yht.	0,67	0,57	0,59	0,58	0,58	0,36
0,8bar							
O ₂	mol/m ³	0,20	0,18	0,18	0,18	0,18	0,10
N ₂	mol/m ³	0,39	0,33	0,34	0,34	0,33	0,18
	yht.	0,59	0,50	0,52	0,52	0,51	0,28
0,7bar							
O ₂	mol/m ³	0,18	0,15	0,16	0,16	0,15	0,07
N ₂	mol/m ³	0,34	0,29	0,30	0,29	0,29	0,13
	yht.	0,52	0,44	0,45	0,45	0,44	0,20
0,6bar							
O ₂	mol/m ³	0,15	0,13	0,13	0,13	0,13	0,04
N ₂	mol/m ³	0,29	0,24	0,25	0,25	0,25	0,08
	yht.	0,44	0,37	0,39	0,38	0,38	0,12
0,5bar							
O ₂	mol/m ³	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,02
N ₂	mol/m ³	0,24	0,20	0,21	0,21	0,20	0,03
	yht.	0,36	0,31	0,32	0,32	0,31	0,05
0,4bar							
O ₂	mol/m ³	0,10	0,09	0,09	0,09	0,08	-0,01
N ₂	mol/m ³	0,19	0,16	0,16	0,16	0,16	-0,02
	yht.	0,28	0,25	0,25	0,25	0,24	-0,03
0,3bar							
O ₂	mol/m ³	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	-0,04
N ₂	mol/m ³	0,14	0,12	0,12	0,12	0,11	-0,07
	yht.	0,21	0,18	0,18	0,18	0,18	-0,11
0,2bar							
O ₂	mol/m ³	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	-0,06
N ₂	mol/m ³	0,09	0,08	0,08	0,08	0,07	-0,12
	yht.	0,13	0,12	0,12	0,12	0,11	-0,19
0,1bar							
O ₂	mol/m ³	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	-0,09
N ₂	mol/m ³	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	-0,17
	yht.	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	-0,26
0bar							
O ₂	mol/m ³	-0,01	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,12
N ₂	mol/m ³	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	-0,02	-0,22
	yht.	-0,02	-0,01	-0,02	-0,01	-0,03	-0,34