

Niko Jaakola

Poistoilman lämmöntalteenotto saneerauskohteissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

13.2.2017

Tekijä Otsikko	Niko Jaakola Poistoilman lämmöntalteenotto saneerauskohteissa
Sivumäärä Aika	75 sivua + 3 liitettä 13.2.2017
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	LVI-tekniikka, suunnittelupainotteinen
Ohjaaja	lehtori Seppo Innanen
<p>Insinööriyön tarkoituksena oli käydä läpi erilaisia suunnitteluun liittyviä asioita, joita poistoilman lämmöntalteenottolaitteiston suunnittelussa pitää huomioida. Työ rajattiin koskemaan kerrostalokiinteistöjä, joissa päälämmitysjärjestelmänä käytetään kaukolämpöä ja ilmanvaihtojärjestelmänä toimii koneellinen poistoilmanvaihto. Työssä tutkittiin hybridilämmitystä Energiateollisuus ry:n laatiman K1:n mukaisella kytkentäsuosituksella.</p> <p>Työssä huomattiin, että hybridijärjestelmän suunnittelussa on useita haasteita, joiden huomioiminen on erittäin tärkeää, että järjestelmä saadaan toimimaan parhaimmalla mahdollisella tavalla. Insinööriyössä pyrittiin esimerkitapausten avulla näyttämään, miten eri ratkaisut vaikuttavat laitteiston toimintaan.</p> <p>Koska poistoilman lämmöntalteenottolaitteisto koostuu useista eri laitekokonaisuuksista, täytyy LVI-suunnittelijan tietää, mitä on järkevää suunnitella itse ja mikä kannattaa jättää laitevalmistajien suunnitteluvastuulle. Vaikka laitetoimittajat tekevätkin osan laitteiston suunnittelusta, täytyy LVI-suunnittelijan yhteen sovittaa eri valmistajien tuotteet. Tällöin onkin tärkeää, että LVI-suunnittelija tuntee myös laitemitoitusten perusteita. Tässä työssä käytiin osittain läpi myös laitevalmistajien alueeseen kuuluvaa suunnittelua.</p>	
Avainsanat	poistoilman lämmöntalteenotto, hybridijärjestelmä, PILP

Author Title	Niko Jaakola Exhaust air recovery in renovation buildings
Number of Pages Date	75 pages + 3 appendices 13 February 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Specialisation option	HVAC Engineering, Design Orientation
Instructor	Seppo Innanen, Senior Lecturer
<p>The purpose of this final year project was to go through issues which need to be taken into consideration when planning extract air heat recovery for an old apartment building. The goal was to understand all that needs to be included when designing a heat pump system. Furthermore, an aim was to study how the other building services systems and devices should be improved during a renovation. The thesis only discussed old apartment buildings with mechanical extract ventilation and with district heating as their main heating system.</p> <p>Design challenges were reviewed through various examples. These were used to illustrate how different solutions would affect the functionality of the whole system. It was noticed that there were challenges in the designing of the extract air heat recovery. These challenges should be taken into consideration to reach the best possible result. The thesis also explains the role of the HVAC designer and what is included in the manufacturer's design.</p>	
Keywords	exhaust air, hybrid system, heat pump, heat recovery

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Poistoilman lämmöntalteenotto	2
2.1	Yleistä	2
2.2	Poistoilman lämmöntalteenoton soveltuvuus kohteeseen	3
2.2.1	Rakennustyyppi	3
2.2.2	Ilmanvaihtojärjestelmä ja ilmamäärät	4
2.2.3	Tärkeitä lähtötietoja PILP-järjestelmän suunnittelussa	5
2.3	Valmistajat ja laitteistot	5
2.4	Lämpöpumppu	7
2.4.1	Lämpökertoimet COP ja SCOP	7
2.4.2	Lämpöpumpun toimintaperiaate	8
2.4.3	Höyrystimen kytkentämahdollisuudet	12
2.5	LTO-yksikkö	14
2.5.1	Eri valmistajien LTO-laitteita	14
2.5.2	Lämmönsiirtopintojen huurtuminen	16
2.5.3	LTO-yksikön mitoitus	21
2.6	LTO-yksikön liuospiiri	25
2.6.1	Teoriaa	25
2.6.2	Liuosputkiston eristys	30
2.6.3	Liuosputkisto	33
2.6.4	Käytettävät liuospiirin nesteet	35
2.6.5	Putkireitti	40
2.6.6	Liuospiirin muut varusteet	40
3	Ilmanvaihto	40
3.1	Puhallin	40
3.2	Ilmanvaihdon nuohous ja säätö	41
3.3	Ilmanvaihdon ohjaus	42
3.3.1	Kello-ohjaus	42
3.3.2	Vakioilmamäärä painotetun ilmanvaihdon keskiarvolla	43
3.3.3	Ilmanvaihdon ohjaus ulkolämpötilan mukaan	43

3.4	Kanavointityöt	43
3.5	Korvausilmaratkaisut	44
3.5.1	Korvausilma tiivisteiden ja rakenteiden läpi	44
3.5.2	Korvausilmaventtiilit	45
3.5.3	Rakoveventtiili ja tuloilmaikkuna	45
4	Kaukolämpökeskus ja lämmitysjärjestelmä	47
4.1	Teoriaa	48
4.1.1	Sarjaan- ja rinnankytkentä	48
4.1.2	Lämmönsiirtimen konduktanssi	50
4.2	Lämmitys- käyttövesiverkoston kaukolämpösiirtimet	52
4.2.1	Lämmitysjärjestelmä	52
4.2.2	Käyttövesijärjestelmä	54
4.3	Kiinteistön olemassa oleva lämmönjakokeskus	60
4.3.1	Huomioitavat asiat	60
4.3.2	Nykyisen alajakokeskuksen lämmityksen siirrin	62
4.4	Kaukolämmön ensiöpuolen säätöventtiilit	64
4.5	Rakennuksen lämmitysverkosto	65
4.6	Varaaja	69
5	Yhteenveto	70
	Lähteet	72
	Liitteet	
Liite 1.	Eristetyn putken lämpöhäviö-, jäähtymis- ja jäätymispisteen saavuttamisaikalaskelmat	
Liite 2.	Putken painehäviölaskelmat	
Liite 3.	Pääkaupunkiseudun rakennusvalvontojen vastaukset sähköpostikyselyyn, koskien rakennuksen ulkopuolelle asennettujen putkistojen luvanvaraisuutta	

1 Johdanto

Suomen kerrostalokanta on verrattain nuorta. Suurin osa, noin 60 %, kiinteistökannastamme on rakennettu vuoden 1970 jälkeen. Suurin rakennusbuumi koettiin 70-luvun alussa ja sen huippu, noin 46 000 rakennettua kerrostaloa, saavutettiin 1974. 80-luvulla kerrostalorakentaminen alkoi hiipua, ja uusi nousukausi koettiin 90-luvulla. [1, s. 142; 210.]

Suomeen rakennetuissa kerrostaloissa oli 1960-luvulle asti käytössä painovoimainen ilmanvaihto. 60-luvulla alkoi koneellinen poistoilmanvaihto yleistyä, ja 70-luvulle mentäessä se oli pääasiallinen ilmanvaihtojärjestelmä asuinkerrostaloissa. Koneellisia tulo-poistoilmanvaihtojärjestelmiä on rakennettu jo 1970-luvun lopulta saakka, mutta pelkällä poistoilmanvaihdolla toimiva järjestelmä säilytti suosionsa vielä pitkään tämän jälkeen. Varsinaisesti tulo-poistoilmanvaihtojärjestelmä yleistyi vasta 1990-luvulle mentäessä. [2, s. 121–123.]

Koneellisessa poistoilmanvaihdossa tuloilma otetaan rakennuksen sisälle joko suoraan rakenteiden läpi, tai seiniin/ikkunoihin asennettavien venttiilien avulla. Tällöin tuloilma on yhtä kuin raitisilma ja ulkoa otettu ilma lämmitetään huoneistossa lämpöpattereista, ihmisistä ja koneista lähtevän lämmön avulla. Asuinhuoneistojen +21...+25 °C:n lämpöinen poistoilma johdetaan puhaltimien avulla ulos, ottamatta siitä lämpöä talteen mitenkään. Poistoilman lämmöntalteenottojärjestelmässä tämä ulospuhallettu energiahukka pyritään ottamaan talteen mahdollisimman hyvin.

Asuinkiinteistöjen vesi- ja viemärijärjestelmän tekninen käyttöikä on noin 50 vuotta, ja tällä hetkellä suurin osa remontti-iässä olevista kiinteistöistä onkin 1960-luvun puolivälin jälkeen rakennettuja taloja. Tosin myös 70-luvun taloihin ruvetaan vähitellen tekemään linjasaneerauksia yhä enenevässä määrin. Koko ajan tiukentuvat energiamääräykset sekä energian hinnan nousu ovat saaneet myös taloyhtiöt pohtimaan erilaisia energiansäästöratkaisuja. Viimeistään niiden ajankohtaisuus tuodaan taloyhtiöille esille isojen remonttien, kuten putkiremonttien, yhteydessä jolloin ennen toteutussuunnitteluvaihetta tehdään yleensä hankesuunnittelu. Hankesuunnittelussa taloyhtiölle käydään läpi erilaisia saneerausvaihtoehtoja sekä kerrotaan, miten eri talotekniikan järjestelmiä voitaisiin parantaa. Tällöin taloyhtiöt tulevat tietoisiksi

poistoilman talteenottojärjestelmästä. Toki taloyhtiöt pohtivat energian säästöratkaisuja myös isojen remonttien ulkopuolella.

Energiamääräykset, energian hinta sekä yleisen tietoisuuden lisääntyminen energian säästämässä tulevat vaikuttamaan saneerauksia tekevien LVI-suunnittelijoiden tehtäviin siten, että esimerkiksi poistoilman lämmöntalteenottosuunnittelusta tulee tulevaisuudessa osa suunnittelijan perusosaamisesta. Tämän työn tavoitteena on käydä läpi poistoilman lämmöntalteenoton suunnittelun vaiheita sekä asioita joihin suunnittelussa kannattaa kiinnittää huomiota. Työ rajataan koskemaan kerrostalokiinteistöjä, joissa päälämmitysjärjestelmänä on kaukolämpö ja ilmanvaihtojärjestelmänä koneellinen poistoilmanvaihto. Poistoilman lämmöntalteenottolaitteiston suunnitteluun liittyviä automaatio-, sähkö- ja rakennussuunnittelua ei käsitellä tässä insinööriyössä.

2 Poistoilman lämmöntalteenotto

2.1 Yleistä

Markkinoilla on tällä hetkellä useita eri poistoilman lämmöntalteenoton laitevalmistajia. Toimittajilla on erilaisia toimintatapoja myynnin suhteen. Osa myy suoraan tuotteitaan kuluttajille, jolloin myös suunnittelu sekä asennus kokonaisuudessaan voi kuulua tarjouksen hintaan. Osa tekee suunnittelua ja myyntiä, mutta asennustyöt tulevat kolmannen osapuolen kautta.

Suunnittelua aloitettaessa on päätettävä, halutaanko käyttää niin sanottuja valmiita ratkaisuja, joita valmistajilla on tarjota, vai suunnitellaanko järjestelmä eri toimittajien komponenteista. Kokonaistoimituksissa, jossa järjestelmän osat ovat samalta toimittajalta, on etuina mm. se, että järjestelmän eri laitteiden yhteensopivuus on yleensä varmistettu. Myös laitteiden takuut tulevat tuolloin yhdeltä taholta, ja mahdolliset komponenttien väliset urakka- ja toimitusrajat ovat usein selvempiä. Mikäli poistoilmalämpöpumppujärjestelmä, eli PILP-järjestelmä, suunnitellaan eri toimittajien tuotteilla, on suunnittelussa oltava erityisen tarkka. Tällöin työmaalle ei myöskään tule valmiita pakettiratkaisuja, vaan LVI-, SÄH- ja automaatiotyöt ovat vaativampia kuin yhden toimittajan tuotteista valittu kokonaisuus.

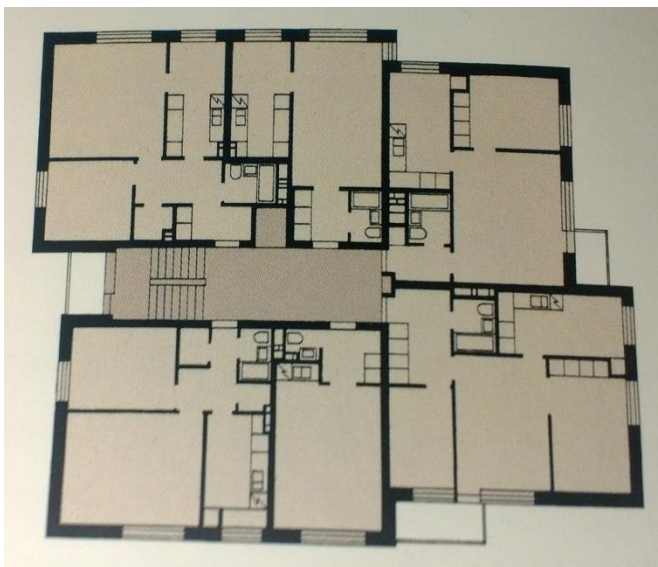
Kun LVI-suunnittelija suunnittelee PILP-laitteistoa, on hänen tiedettävä mitä on järkevää suunnitella itse ja mikä osa suunnittelusta on jätettävä laitetoimittajille. Esimerkiksi lämpöpumppua laitteistoinen ei ole järkevää alkaa suunnittelemaan tai mitoittamaan, vaan LVI-suunnittelijan kannattaa hyödyntää tässä tapauksessa valmistajien osaamista.

2.2 Poistoilman lämmöntalteenoton soveltuvuus kohteeseen

PILP-järjestelmän suunnittelussa on monta eri osiota, jotka pitää ottaa huomioon suunnittelussa. Ensimmäisenä pitää luonnollisesti selvittää rakennuksen perustiedot, jotta kohteeseen voidaan valita juuri sinne soveltuva ratkaisu.

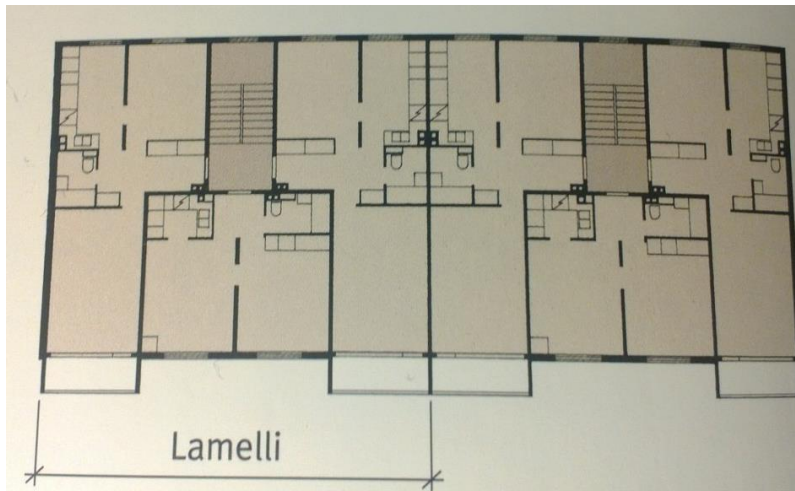
2.2.1 Rakennustyyppi

Poistoilman lämmöntalteenotossa on järjestelmän investoinnin kannalta edullisinta, että jäteilman ulospuhalluspaikkoja on mahdollisimman vähän. Silloin asennuskustannuksissa päästään mahdollisimman pieniin kustannuksiin, koska laitteiden määrät ja putkivedot pysyvät minimissä. Parhaiten PILP-järjestelmien käyttökohteiksi soveltuvat pistemäiset ja mielellään korkeat talot, joissa poistoilmanvaihto toimii yleensä keskitetysti yhdellä tai kahdella koneella. Usein puhutaankin pistetaloista, eli tornitaloista, joissa on yleensä yksi rappu. Kuvassa 1 on esitetty pistemäisen kerrostalon pohjaratkaisu.



Kuva 1. Piste- eli tornitalon pohjapiirros [1, s. 8].

PILP-järjestelmä voidaan asentaa myös lamellitaloihin. Lamellitalolla tarkoitetaan kerrostalon pohjaratkaisua, jossa rappuja voi olla useampia ja joiden pohjaratkaisut ovat toistensa kopioita. Mikäli lamellitalossa on keskitetty poistoilmanvaihto, mutta poistoilmalaitteita on useita, voi poistoilmanlämmöntalteenoton investointi kasvaa suureksi, koska tarvittavien laitteistojen sekä putkivetojen määrät kasvavat. Tällöin on myös mahdollista, että kanavoiteja yhdistetään, jolloin saadaan jäteilman ulospuhalluspisteitä keskitettyä ja näin ollen LTO-laitteiston asennus voi olla kannattavaa [3]. Kuvassa 2 on esitetty lamellitalon pohjaratkaisun periaate.



Kuva 2. Lamellitalon pohjapiirros [1, s. 8].

2.2.2 Ilmanvaihtojärjestelmä ja ilmamäärät

Yleisesti suositellaan, että rakennuksessa täytyy olla koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä, jotta kiinteistöön kannattaa rakentaa PILP-järjestelmä. Painovoimaisessa ilmanvaihdossa ongelma on se, että ilmanvaihtohormit eivät yleensä ole riittävän tiiviitä koneelliseen poistoon, jolloin LTO-järjestelmän asennus vaatisi uudet kanavoinnit rakennukseen. Tällöin takaisinmaksuaika kasvaa usein niin pitkäksi, että järjestelmän asennus ei ole kannattavaa.

PILP-järjestelmän soveltuvuutta mietittäessä tulee ottaa huomioon myös poistoilmavirtojen määrä. Koska investointina järjestelmän rakentaminen on suurehko, pitää myös ilmamäärien olla sellaiset, että se maksaa itsensä takaisin kohtuullisessa ajassa. Suomen Talokeskus Oy:n Markku Sinisalon mukaan minimi-ilmamäärä, jolla poistoilman lämmöntalteenottoa on kannattavaa lähteä miettimään, on $500 \frac{1}{s}$ [3].

Kuitenkin on selvää, että jokaista kiinteistöä on tarkasteltava yksilönä ja kannattavuuslaskelmat on tehtävä ennen investointipäätöstä.

2.2.3 Tärkeitä lähtötietoja PILP-järjestelmän suunnittelussa

Ennen PILP-järjestelmän suunnittelun aloittamista on tärkeää kerätä kiinteistöstä mahdollisimman paljon tietoa. Alla on listattu tärkeimpiä selvitettäviä asioita, joiden perusteella investoinnin kannattavuutta voidaan selvittää.

- Sähköenergian hinta.
- Kaukolämpöenergian hinta.
- Kaukolämmön perusmaksun hinta.
- Lämmitysenergian kulutus viime vuosilta.
- Lämpimän käyttöveden kulutuksen määrä, tai mikäli ei tiedossa niin kokonaiskulutuksen määrä.
- Kokonaisilmamäärät, sekä tieto onko luku mitattu vai arvioitu.
- Ilmanvaihdon haluttu ohjaustapa ja aikataulut.
- Huippuimureiden tai puhaltimien sijoituspaikat ja määrät.
- Kiinteistön lämmitystapa.
- Nykyisen lämmitysverkoston lämpötilat.
- Rakennuksen pääsulakekoko.
- Lämmitysverkoston saneeraus, onko tehty perussäätöä.
- Kattotyyppi.

2.3 Valmistajat ja laitteistot

Tässä osiossa käydään lyhyesti läpi joitain Suomessa toimivia PILP-järjestelmien valmistajia sekä heidän tuotteitaan.

HögforsGST Oy

Toimittaa valmiita PILP-järjestelmiä taloyhtiöille. Järjestelmän eri osat on tehty tehtaalla mahdollisimman pitkälle valmiiksi, jolloin asennusaika ja käyttökatkokset saadaan työmaalla minimoitua. Laitteiston automaatio on esiasennettu ja testattu jo tehtaalla. Palveluihin kuuluvat myös poistoilman lämmöntalteenoton valvontapalvelut. [4.]

Gebwell Oy

Toimittaa valmiita poistoilman lämmöntalteenottojärjestelmiä valvontapalveluineen. Lämpöpumput, varaajat ja hybridisiirtimet ovat Gebwellin omaa mallistoa. Valmiissa järjestelmäratkaisussa katolle asennettava LTO-laite on Oy Pamon Ab:n valmistama Pilpit-lämmöntalteenottolaite. [5.]

Senera Oy

Toimittaa valmiita poistoilman lämmöntalteenottokonsepteja. Tekee tarvittaessa niihin liittyvän suunnittelu- ja asennustyöt. Järjestelmiin on saatavilla etävalvonta Senera Oy:n kautta. [6.]

Oy Pamon Ab

Myy ja valmistaa mm. poistoilman lämmöntalteenottojärjestelmiin sopivaa Pilpit-mallistoa. Valikoimassa on erilaisia mahdollisuuksia LTO-laitteen sijoittamisen kannalta. Voidaan asentaa joko katolle tai sisätiloihin esimerkiksi vanhan kammiopuhaltimen paikalle. Tuote sisältää EC-poistopuhaltimen. [7.]

Retermia Oy

Myy ja valmistaa neulalämmönsiirtimiä. Ei toimita koko PILP-järjestelmää. Taloyhtiöille sopiva tuote on esimerkiksi ulospuhalluskatos neulalämmönsiirtimellä, joko huippuimurilla varustettuna tai ilman. Tuote asennetaan katolle. [8.]

2.4 Lämpöpumppu

PILP-järjestelmässä, eli poistoilmalämpöpumppujärjestelmässä, periaatteena on, että lämmöntalteenoton avulla ulospuhallettavasta jäteilmasta otetaan lämpöpumpun avulla energiaa talteen. Lämpöpumpun höyrystinosa voidaan sijoittaa joko suoraan jäteilmavirtaan, tai höyrystinosa voidaan sijoittaa erilleen ilmavirrasta. Tapauksessa jossa höyrystin on erillään ilmavirrasta, tuodaan lämpöpumpulle talteen otettua energiaa siirtoputkistoja hyväksi käyttäen. Tällöin siirtoputkistoissa ei virtaa kylmääainetta, vaan yleensä siellä virtaa glykolipohjainen lämmönsiirtoneste.

2.4.1 Lämpökertoimet COP ja SCOP

COP (Coefficient Of Performance) on lämpökerroin, joka ilmoittaa lämpöpumpun hyötysuhteen. COP-arvo kertoo, miten paljon lämpöenergiaa laite saa tuotettua, kun siihen tuodaan 1 kW energiaa ulkopuolisesta lähteestä.

SCOP (Seasonal Coefficient Of Performance) on lämpökerroin, joka ilmoittaa lämpöpumpun vuosihyötysuhteen. SCOP-arvo ottaa huomioon ilmastolliset vaikutukset hyötysuhteeseen.

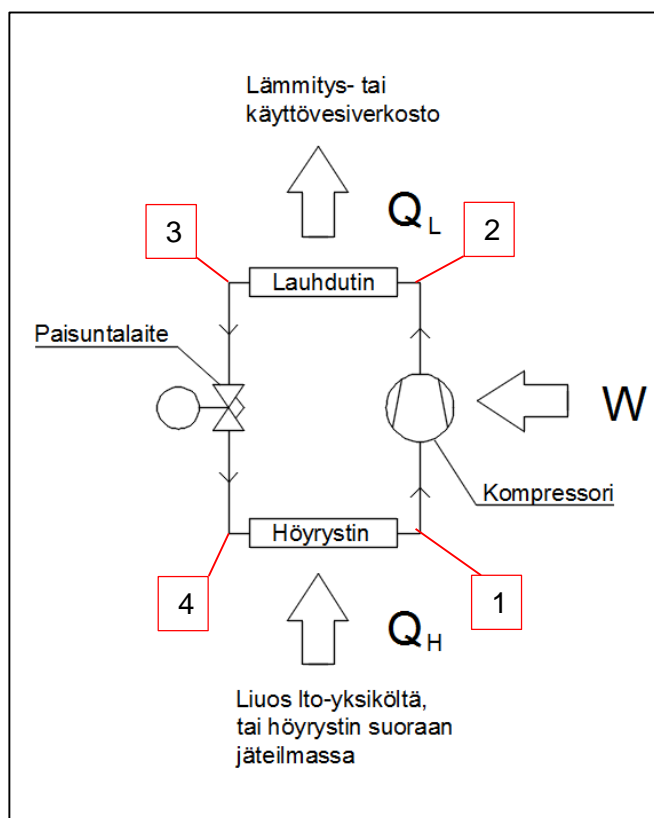
Erilaisia lämpöpumppuja vertailtaessa on tärkeää osata tehdä ero COP- ja SCOP-arvon välille. Koska COP-arvo ei ota huomioon eri maiden erilaisia ilmasto-olosuhteita, voi se antaa vääristyneen kuvan laitteen tehokkuudesta esimerkiksi Suomen olosuhteissa. SCOP-arvossa se taas otetaan huomioon siten, että Eurooppa on jaettu eri ilmastovyöhykkeisiin, joihin laskenta perustuu. Tällöin saman laitteen SCOP-arvo voi olla eri suuri eri maissa. [9.]

PILP-järjestelmissä myös COP-arvoa voidaan käyttää tuotteiden vertailuun, koska ilmasto-olosuhteet eivät erityisemmin vaikuta siihen. Jäteilman lämpötila pysyy suhteellisen tasaisena läpi vuoden. [9.]

2.4.2 Lämpöpumpun toimintaperiaate

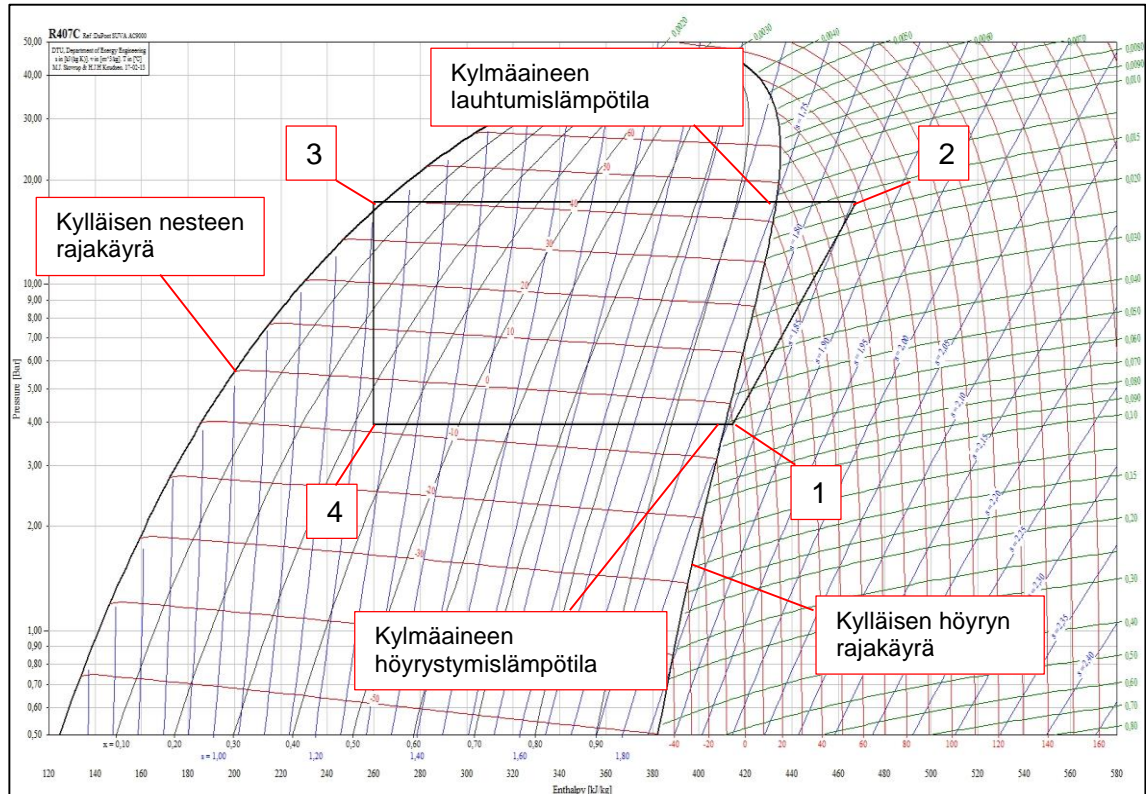
Lämpöpumpun toiminnan tarkoitus on, että tuomalla prosessiin ulkoista energiaa voidaan (sen avulla) aineen lämpötila nostaa matalammasta lämpötilasta korkeampaan lämpötilaan.

Lämpöpumppu on toiminnaltaan kylmätekninen kiertoprosessi, jossa kiertoaineena toimii kylmäaine. Kylmäainetta vuoroin höyrystetään ja lauhdutetaan eri painetasoilla, jolloin kompressorin avulla kylmäaineen lämpötila saadaan nostettua sellaiselle tasolle, että lämmön hyödyntäminen on mahdollista. Kiertoprosessissa lämpö siirtyy ympäristöstä höyrystimen avulla kylmäaineeseen, jonka matalapaineisen höyryn lämpötila ja paine nostetaan kompressorilla sellaiseen tilaan, että se voidaan lauhduttimen kautta luovuttaa ympäristöön. Lauhduttimen jälkeen korkeapaineinen höyry ajetaan paisuntaventtiilille, jolloin kylmäaine muuttuu takaisin nesteeksi ja prosessi alkaa uudelleen höyrystimeltä. [10, s. 17–18.] Kuvassa 3 on esitetty kylmäteknisen prosessin periaate ja poistoilman lämmöntalteenottolaitteiston periaatteellinen kytkeytyminen siihen.



Kuva 3. Kylmäaineprosessi ja tilapisteiden havainnollinen sijainti.

Kuvassa 4 on esitetty Coolpack-ohjelmalla tehty esimerkki log p, h -tilapiirroksesta, johon on piirretty kylmäaineen kiertokulku lämpöpumpussa sekä kuvan 3 tilapisteet. Lämpöpumpun lämpökerroin voidaan laskea kyseisistä tilapisteistä.



Kuva 4. Log p, h -tilapiirros. Kylmäaineen, R407C, kiertokulku. [11.]

Lämpöpumpun lämpökerroin lasketaan kaavalla 1.

$$\varphi = \frac{Q_L}{W} \quad (1)$$

φ on lämpöpumpun lämpökerroin

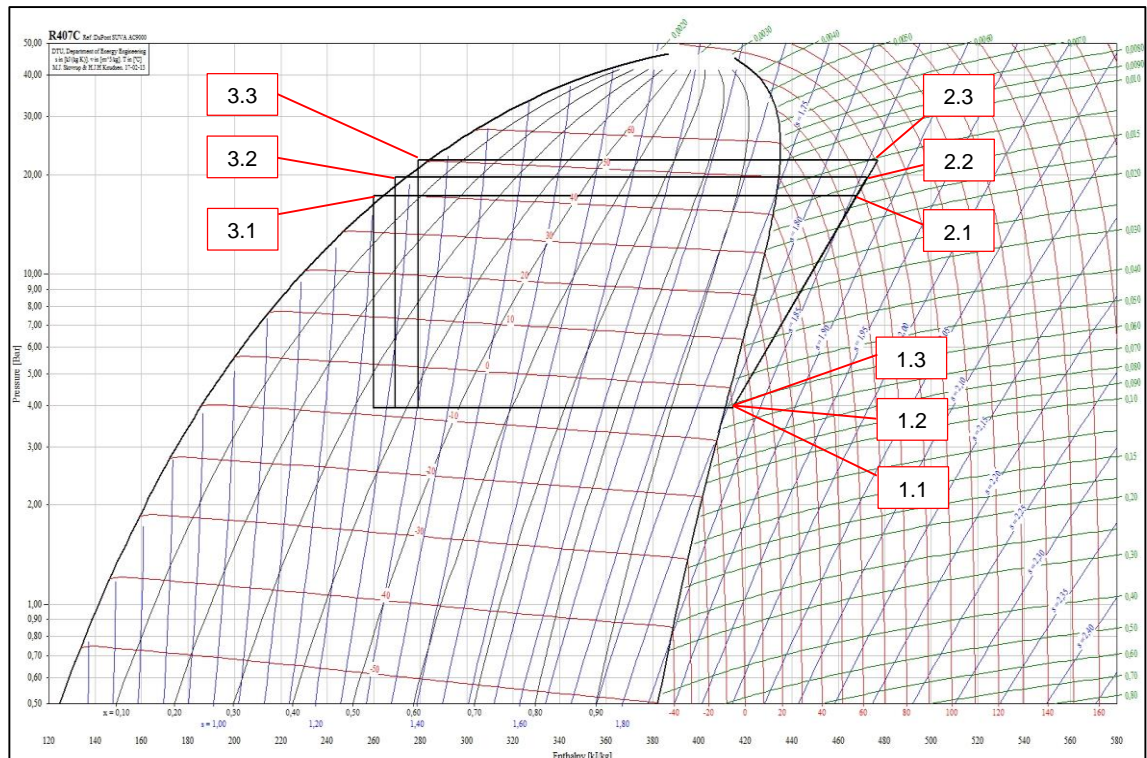
Q_L on lauhtuttimen luovuttama lämpö, $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

W on kompressorin tekemä työ, $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$.

Log p, h -diagrammista lauhduttimen luovuttama lämpö saadaan tilapisteiden 2 ja 3 entalpioiden erotuksesta ja vastaavasti kompressorin tekemä työ saadaan tilapisteiden 1 ja 2 välisestä entalpioiden erotuksesta. Näillä arvoilla voidaan laskea laitteiston lämpökerroin. Kyseisten tilapisteiden entalpiat saadaan suoraan log p, h -piirroksista, tai tarkat arvot voi katsoa esimerkiksi Coolpack-ohjelmasta.

Pisteiden 1 ja 2 välinen jana seuraa ideaalitalanteessa vakioentropiakäyrää, mutta todellisuudessa kompressorilla, höyrystimellä ja putkistoissa tapahtuu häviöitä, jolloin jana kaatuu sitä enemmän oikealle, mitä isompia häviöt ovat. Tällöin myös kompressorin tekemän työn määrä kasvaa, jolloin lämpökertoimen arvo pienenee. Höyrystymislämpötilan muuttuessa tilapiste 1 seuraa kylläisen höyryn rajakäyrää ja se voi myös ylittää sen, riippuen laitteiston tulistuksen määrästä. Samoin lauhduttimen lauhdutuslämpötilan muuttuessa tilapiste 3 seuraa kylläisen nesteen rajakäyrää, ja se voi myös ylittää sen, riippuen laitteiston alijäähdytyksen määrästä.

Log p, h -piirroksista on helppo päätellä, miten höyrystymislämpötilan tai lauhdutuslämpötilan muuttaminen vaikuttaa lämpökertoimeen. Kuvaan 5 on piirretty Coolpack-ohjelmistolla kolmen, eri lämmitysverkoston lämpötiloilla toimivan, laitteen kylmäaineen kiertoprosessi. Laskelmissa käytetyt arvot ovat muutoin samat, mutta lauhduttimen lauhdutuslämpötilaa on muutettu. Taulukosta 1 voi nähdä, miten lauhdutuslämpötilan muutos vaikuttaa lämpöpumpun lämpökertoimeen.



Kuva 5. Log p, h -tilapiirros kylmäaineen eri lauhtumislämpötiloilla. R407C. [11.]

Kuvan 5 ja taulukon 1 lämpöpumpun lähtöarvoina on käytetty seuraavia arvoja:

Lauhtumislämpötila: +45 °C / +50 °C / +55 °C

Lauhduttimen asteisuus: 5 °C

Höyrystymislämpötila: -4 °C

Kylmäaineen alijäähtyminen: 2 °C

Kylmäaineen tulistuminen: 4 °C

Kompressorin isentrooppinen hyötysuhde: 0,7

Kylmäaineen lämpöliukumaa, painehäviöitä yms. ei esimerkissä ole huomioitu. Lähtöarvot ovat esimerkin omaisia. Taulukkoon 1 on asetettu lämpöpumpun toisiopuolelle lämpötila, johon lämpöpumppu verkoston veden lämmittää eri lauhtumislämpötiloilla lauhduttimen asteisuuden ollessa 5 °C.

Taulukko 1. Lauhtumislämpötilan muutoksen vaikutus lämpökertoimeen.

Lauhtumis- lämpötila	Lämm.verkoston menevä vesi	Tilapisteen entapia ennen kompressoria	Tilapisteen entapia kompressorin jälkeen	Tilapisteen entapia lauhduttimen jälkeen	Kompressorin tekemä työ	Lauhduttimen luovuttama lämpö	Lämpökerroin
°C	°C	kJ/kg tilapiste nro	kJ/kg tilapiste nro	kJ/kg tilapiste nro	kJ/kg	kJ/kg	φ
45	40	414,4 (1.1)	467,8 (2.1)	259,9 (3.1)	53,4	208,0	3,9
50	45	414,4 (1.2)	472,5 (2.2)	269,4 (3.2)	58,0	203,1	3,5
55	50	414,4 (1.3)	476,9 (2.3)	279,3 (3.3)	62,5	197,6	3,2

Taulukosta 1 on helppo huomata miksi lämmitysverkostoon ei voida tuottaa kovinkaan korkealämpöistä vettä poistoilmalämpöpumpulla. Laitteiston lämpökerroin on riippuvainen mm. lauhtumis- ja höyrystymislämpötiloista, ja se heikkenee hyvin nopeasti, mikäli verkostoon menevän veden lämpötilaa nostetaan. Suunnittelijan onkin aina tapauskohtaisesti päätettävä, mikä on verkostoon johdettavan veden lämpötila ja sitä kautta lauhduttimen lauhtumislämpötila.

Laitteiston kylmäkerroin lasketaan samalla periaatteella kuin lämpökerroin. Höyrystimen luovuttama lämpö jaetaan kompressorin tekemällä työllä. Siksi kylmäkertoimeen vaikuttaa mm. höyrystymislämpötila, ja mikäli sitä lasketaan, huononee laitteiston kylmäkerroin.

Lämpöpumpun kannalta paras tilanne saadaan aikaan, kun laitteisto toimii mahdollisimman pienellä höyrystymis- ja lauhtumislämpötilaerolla.

2.4.3 Höyrystimen kytkentämahdollisuudet

Lämpöpumpun höyrystinosa voidaan sijoittaa joko suoraan ilmavirtaan, josta lämpöä otetaan, tai se voidaan pitää erillään siitä, jolloin ilmavirtaan asennetaan liuospariteri. Näitä laitteistoja kutsutaan nimillä suora- ja epäsuora- höyrystein laitteisto.

Suorahöyrysteininen laitteisto

Suorahöyrysteisessä laitteistossa höyrystin asennetaan suoraan ilmavirtaan. Kylmäainevalinta tehdään siten, että se saadaan höyrystymään ilmavirran eri lämpötila-alueilla. Jotta pitkiltä kylmäaineputkistoilta välttyttäisiin, lämpöpumppu lauhduttimineen asennetaan yleensä mahdollisimman lähelle höyrystintä. Kuvassa 6 on esitetty Therecon AAVA -sarjan suorahöyrysteininen laitteisto. Kyseinen laitteisto asennetaan rakennuksen katolle, josta lämmönsiirtoputkiston avulla kerätty lämpöenergia kuljetetaan lämmönjakohuoneeseen, jossa energia siirretään joko käyttöveteen tai lämmitysverkostoon.



Kuva 6. Suorahöyrysteininen poistoilmanlämmöntalteenottolaitteisto [12].

Epäsuorahöyrysteininen laitteisto

Epäsuorahöyrysteisessä laitteistossa höyrystintä ei asenneta suoraan kosketukseen jäteilmavirran kanssa, vaan ilmavirtaan asennetaan liuospatteri. Lämpö siirtyy ilmavirrasta liuospatterissa kiertävään nesteeseen, joka liuosputkistoa pitkin johdetaan lämpöpumpun höyrystimelle. Välillisessä järjestelmässä lämpöpumppu sijoitetaan yleensä lämmönjakohuoneeseen, tai sen välittömään läheisyyteen. Kuvassa 7 on Oy Pamon Ab -yrityksen valmistaman epäsuorahöyrysteinisen järjestelmän LTO-laite. Kyseinen laite on Pilpit-mallistoa, jossa on sisäänrakennettuna mm. liuospatteri sekä poistopuhallin. Laitteisto voidaan asentaa esimerkiksi vanhan huippuimurin paikalle [7].



Kuva 7. Epäsuorahöyrysteisen järjestelmän LTO-laite [5].

2.5 LTO-yksikkö

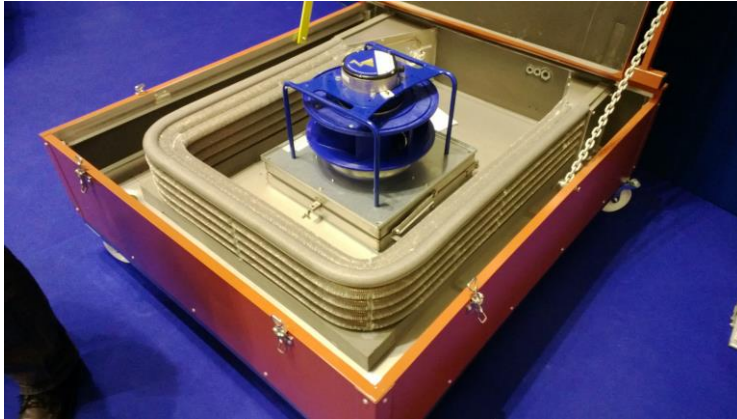
LTO-laite on yksikkö, jolla poistoilman sisältämä energia saadaan siirrettyä liuospiirissä kulkevaan lämmönsiirtoaineeseen. Yksiköitä käytetään epäsuorahöyrysteisissä järjestelmissä. Laitteessa poistoilma johdetaan LTO-patterin läpi, jolloin patterissa kulkeva neste lämpenee ja vastaavasti poistoilman lämpötila viilenee. Lämmönsiirtoaine johdetaan putkistoa pitkin lämpöpumpun höyrytimelle, joka kompressorin ja lauhduttimen avulla nostaa lämmitettävän verkostoveden lämpötilan asetettuun arvoon.

Valittaessa LTO-yksikköä, pitää luonnollisesti tietää laitteen asennussijainti. Tyypillisesti valmistajilla on omat laitetypit ulko- ja sisäkäyttöön. Eri valmistajien laitteistojen koossa ja painoissa on isoja eroja, joten LTO-yksikköä mietittäessä täytyy huomioida, että laite mahtuu sille tarkoitettuun tilaan. Kattoasennuksissa täytyy huomioida laitteen paino, koko ja huollettavuus. LTO-laitteessa voi valmistajasta riippuen olla suodattimet, tai niiden puuttuessa lämmönsiirtopinnat täytyy päästä pesemään.

2.5.1 Eri valmistajien LTO-laitteita

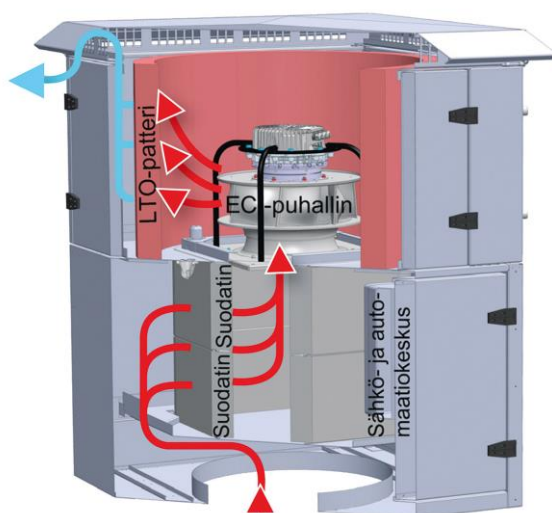
Retermia Oy valmistaa neulaputkilämmönsiirtimellä toimivaa LTO-yksikköä. Neulaputkipatterissa putki itsessään on kuparia ja neulat alumiinia tai kuparia. Ilma virtaa lämmönsiirtimen läpi, jolloin energiaa siirtyy putkessa virtaavaan lämmönsiirtonesteeseen. Neulaputkipatterissa ei käytetä suodattimia, jolloin suodattimien aiheuttamaa painehäviötä ei ole [8]. Suodattimien puuttumisen vuoksi

neulaputkipatterin pinnat täytyy pestä säännöllisesti ja tämä täytyy huomioida myös suunnittelussa, koska LTO-yksikön luokse täytyy saada vettä pesua varten. Neulaputkipatteri voidaan asentaa joko ulos, tai sisälle ilmanvaihtokammioon. Kuvassa 8 on Retermian valmistama ulos asennettava LTO-yksikkö, jossa on sisäänrakennettu huippuimuri.



Kuva 8. LTO-yksikkö puhaltimella. Retermia LTOH-malli.

Oy Pamon Ab valmistaa Pilpit-mallisarjan LTO-yksiköitä, jotka mallista riippuen voidaan asentaa katolle tai sisälle. Vakiovarusteena tuotteissa on mm. liuospatteri, EC-puhallin ja suodatinosa. Neulaputkipatterista poiketen, laitteen säännölliseen huoltoon ei tarvita vettä, koska ilman suodatus tapahtuu suodattimien avulla. Kuvassa 9 on leikkauskuva ulos asennettavasta Pilpit-laitteesta.



Kuva 9. LTO-yksikkö puhaltimella. Oy Pamon Ab Pilpit-malli. [13.]

HögforsGST:n PILP-järjestelmässä käytetään RSP LTO -sarjan laitteita, joita he itse valmistavat Suomessa. Myös RSP LTO -sarjan laitteisiin kuuluu vakiona mm. EC-puhallin, sekä mikrokanavakenno [14]. Ilmansuodatus tapahtuu suodatinyksikön kautta, joten huoltotoimenpiteisiin kuuluu suodattimien vaihto. LTO-yksikkö on moduulirakenteinen, joten se on laahauksen ajaksi purettavissa osiin. Kuvassa 10 on RSP 2000 LTO -malli, josta on huoltoluukkuja avattuina. Yksikkö voidaan mallista riippuen asentaa sisälle tai ulos.



Kuva 10. LTO-yksikkö puhaltimella. HögforsGST RSP 2000 LTO –yksikkö. [12.]

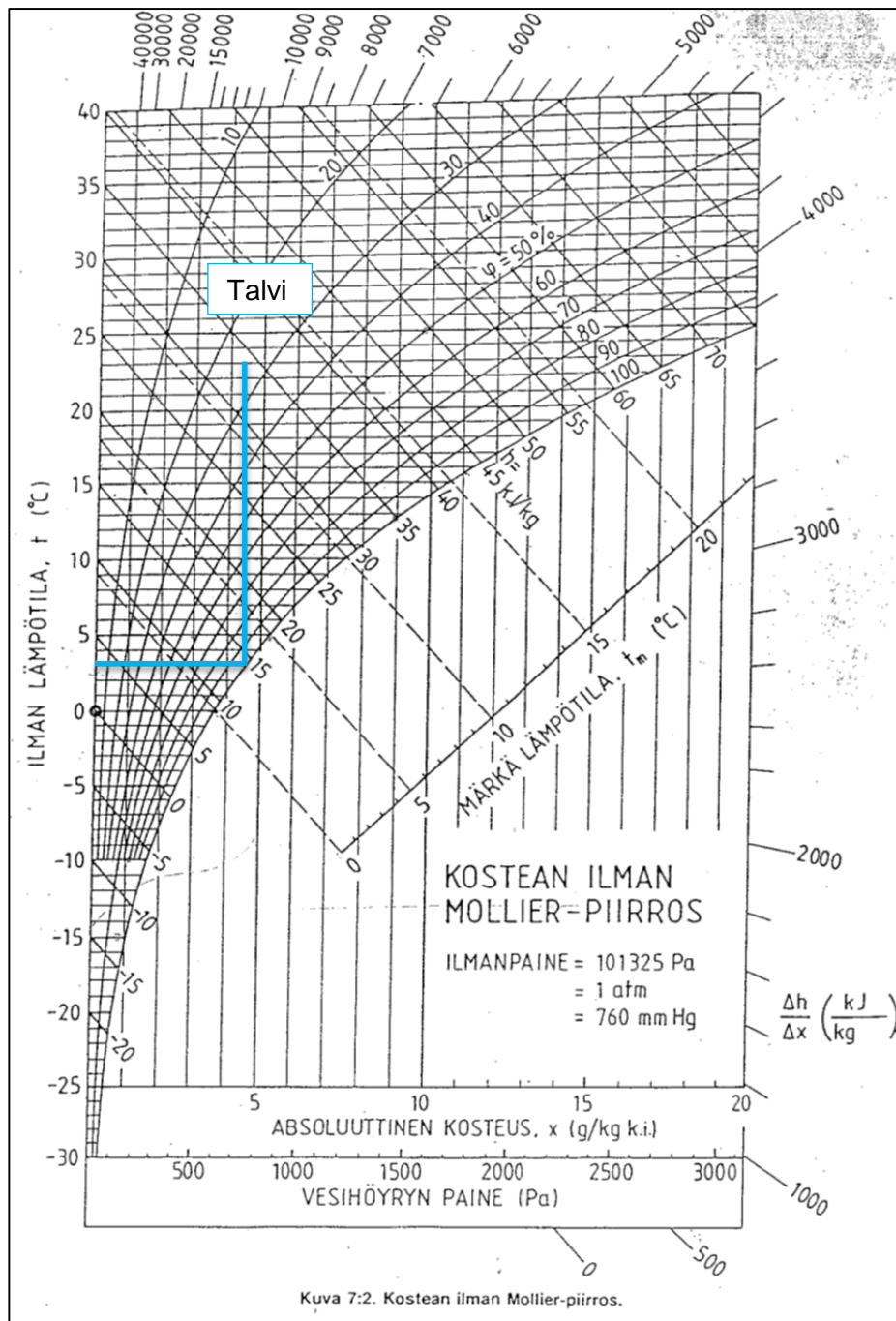
2.5.2 Lämmönsiirtopintojen huurtuminen

Sisäilma on aina kosteaa. Asunnoista poistettavan ilman kosteuspitoisuus vaihtelee vuodenajasta riippuen, ja siihen vaikuttaa myös huoneistojen käyttäjien toiminta. Tyypillisesti asuntojen suhteellinen kosteus on talvella alle 40 % ja kesällä 50 %:sta jopa 70 %:iin [15]. Tampereen teknillisen yliopiston tekemässä tutkimuksessa kerrotaan, että tutkimuksen kohteissa kerrostalohuoneistojen talviaikainen keskiarvo ilman lämpötilalle oli 22,9 °C ja suhteelliselle kosteudelle 26 %. Vastaavat kesäajan arvot olivat 24 °C ja 47 %. [16, s. 51–53.]

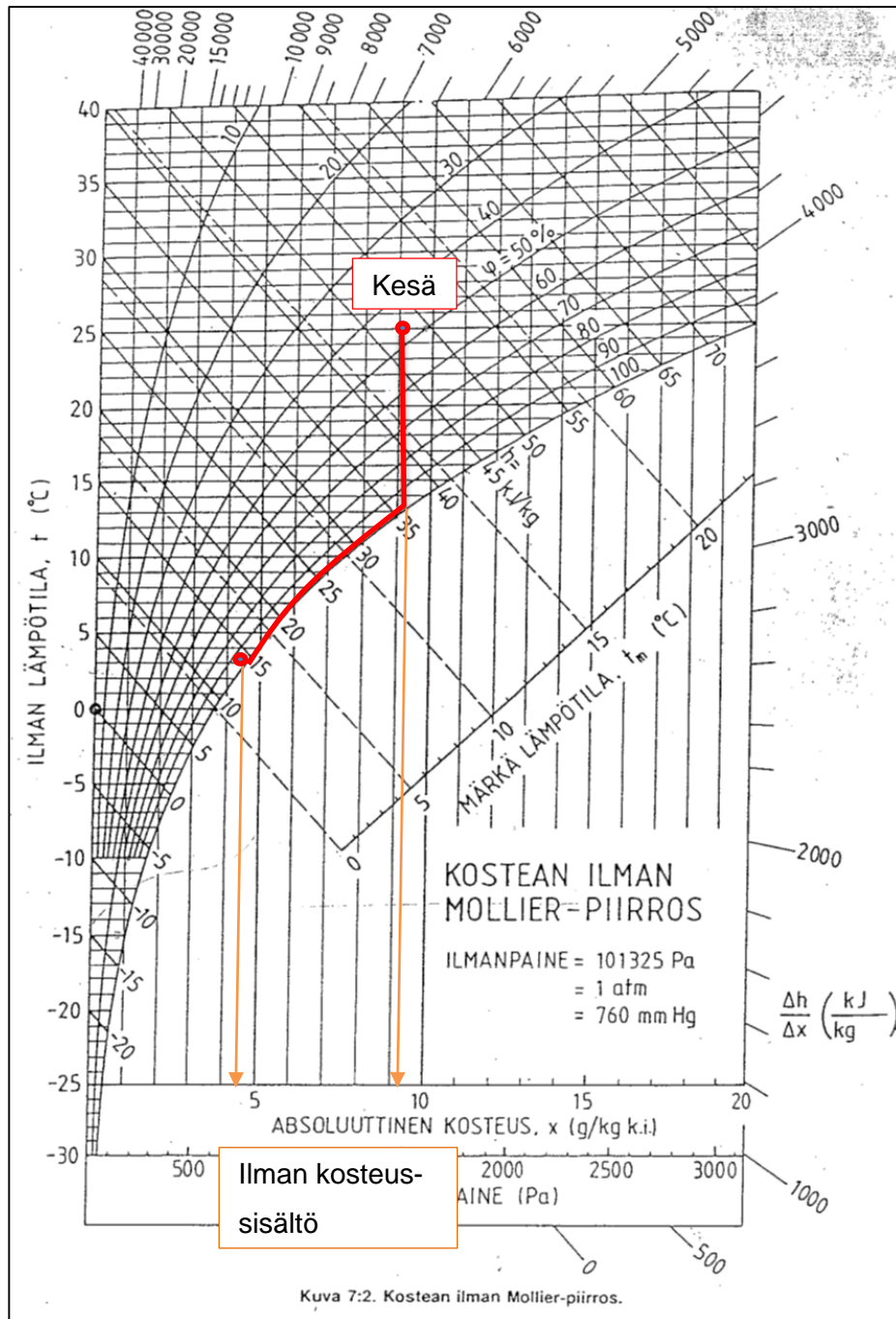
Kuvassa 11 on esitetty kostean ilman h-x-piirros, eli Mollier-diagrammi. Vaikka ilman ominaisuudet eri tilapisteissä voidaan määrittää laskemalla, niin usein Mollierista voidaan nopeasti selvittää ilman ominaisuudet riittävällä tarkkuudella [17, s. 126].

Lämpöpumpun avulla poistoilmasta voidaan lämpöä ottaa talteen niin paljon, että sen lämpötila laskee alle 0 °C:n. Käytännössä tätä ei tehdä, koska ilman lämpötilan laskiessa alle kastepisteen, rupeaa LTO-patterin lämmönsiirtopinnoille muodostumaan kosteutta. Mikäli LTO-patterin pintalämpötila on alle 0 °C, pinnoille kondensoitunut vesi jäätyy ja romahduttaa laitteen hyötysuhteen. Tästä syystä suunnittelijan kannattaakin kiinnittää huomiota lämmöntalteenottopatterille tulevan liuoksen lämpötilaan. Mikäli liuoksen lämpötila pidetään alle ilman kastepisteen, lämmönsiirtopinnoille ei pitäisi muodostua kosteutta. Erityisesti talvella on tärkeää, että kondensoituminen pidetään minimissä. Kesäaikana veden kondensoituminen ei ole kielteinen asia, vaan märkälämmönsiirron avulla ilmasta on otettavissa talteen enemmän energiaa, kuin kuivalämmönsiirrossa.

Kuvasta 11 voidaan nähdä, että talvella jäteilmän suhteellisen kosteuden ollessa 26 % ja lämpötilan +23 °C on ilman kastepiste noin +3 °C. Mikäli lämmönsiirtoaineen lämpötila pidetään yli +3 °C:n ei kondensoitumista teoriassa tapahdu. Pitää myös muistaa, että vaikka huoneistosta poistettava lämpötila olisikin +23 °C, voi se LTO-yksikölle päästyään olla jopa alle +20 °C, riippuen ilmanvaihdon kanavointien sijainneista ja eristyksistä. Tällöin kastepiste voi, ilman suhteellisesta kosteudesta riippuen, olla alle tässä esimerkissä käytetyn +3 °C:n.



Kuva 11. Kostean ilman h-x-piirros, eli Mollier. Ilman kastepiste talviaikana.



Kuva 12. Kosteaa ilmaa h-x-piirros, eli Mollier. Ilman kastepiste kesäaikaan.

Mikäli poistoilman lämpötila liuos patterin jälkeen halutaan kesäisinkin laskea +3 °C:seen, on huomattava, että tällöin lämmönsiirtopinnoille alkaa tiivistyä kosteutta talvitilannetta korkeammassa lämpötilassa. Kuvasta 12 nähdään, että kondensoituminen alkaa poistoilman lämpötilan laskiessa alle +13 °C:n, kun huoneesta poistetun ilman tila ennen patteria on +25 °C ja suhteellinen kosteus 47 %. Ilman lämpötilan pudotus +25 °C:sta +13 °C:seen tapahtuu kuivalämmönsiirtona, jolloin kosteutta ei tiivisty

lämmönsiirtopinnoille. Kun ilman lämpötilaa edelleen lasketaan +13 °C:sta haluttuun +3 °C:seen, tapahtuu lämmönsiirto tällä lämpötilavälillä märkälämmönsiirtona, jolloin patterin pinnoille tiivistyy kosteutta. Märkälämmönsiirron aikana lämmönsiirtopinnoille tiivistynyt kosteus voidaan katsoa Mollierista, kun seurataan ilman alku- ja lopputilapisteiden kohdalta vedettyjä viivoja absoluuttisen kosteuden vaaka-asteikolle. Jos patterin pintalämpötila on +1 °C ja ilma jäädytetään +3 °C:seen, ilman lopputilapiste saadaan alkutilapisteen ja patterin pintalämpötilan välille vedetyltä janalta +3 °C:n kohdalta katsottuna. Absoluuttinen kosteus ilmoittaa vesihöyryn määrän kuivaa ilmakiloa kohden. Kun tiedetään kosteuden muutos ilmavirrassa, voidaan siitä laskea myös vedeksi tiivistyneen kosteuden määrä.

Tiivistyneen veden määrä voidaan laskea kaavalla 2 [17, s. 132].

$$K_{tiivistyminen1} = \Delta x * q_v * \rho_i \quad (2)$$

$K_{tiivistyminen1}$ on tiivistyneen veden määrä, $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$

Δx on absoluuttisen kosteuden muutos, $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$

q_v on ilman tilavuusvirta, $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

ρ_i on ilman tiheys, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Kuvasta 12 nähdään, että kesäaikana ilman lämpötilan ollessa +25 °C on absoluuttinen kosteus noin $9,3 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$. Kun ilman lämpötila lasketaan +3 °C:seen, on absoluuttinen kosteus noin $4,5 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$. Ilman tilavuusvirran ollessa esimerkiksi $1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ ja tiheyden ollessa $1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ voidaan tiivistyneen veden massavirta laskea kaavalla 2.

$$K_{tiivistyminen1} = \left(0,0093 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} - 0,0045 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right) * 1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,00576 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Tiivistyvän veden määrä voidaan myös ilmoittaa tilavuusvirtana. Muunnos voidaan laskea kaavalla 3.

$$K_{tiivistyminen2} = \frac{K_{tiivistyminen1}}{\rho_{vesi}} * 1000 * 3600 \quad (3)$$

$K_{tiivistyminen2}$ on tiivistyneen veden määrä, $\frac{l}{h}$

ρ_{vesi} on 1000, veden tiheys +20 °C:n lämpötilassa, $\frac{kg}{m^3}$

1000 ja 3600 ovat yksikönmuunnoskertoimia.

Tiivistyvän veden määrä on

$$K_{tiivistyminen1} = \frac{0,00576 \frac{kg}{s}}{1000 \frac{kg}{m^3}} * 1000 * 3600 = 20,7 \frac{l}{h}$$

Kuten esimerkkilaskelmasta nähdään, on veden kondensoituminen LTO-yksikköön otettava huomioon myös veden viemäroinnin kannalta. Usein LTO-yksikön kondenssiviemäri voidaan johtaa viemäriverkoston tuuletusviemäriin. Mikäli yksikkö sijaitsee katolla, niin mahdollinen patterin huurtuminen ja sulatus otetaan huomioon asentamalla kondenssiviemäriin eristys ja lämmityskaapeli, jotta veden jäätyminen ja sitä kautta viemäriin tukkeutuminen saadaan estetyksi.

Vaikka liuoksen lämpötilat valittaisiinkin siten, että teoriassa LTO-patterin huurtumista ei pitäisi tapahtua, pitää siihen kumminkin varautua. Mikäli LTO-patteri pääsee talviaikaan jäätymään, voidaan se sulattaa esimerkiksi pienentämällä liuospiirin virtaamaa. Tällöin lämmin jäteilma sulattaa patterin. Tästä syystä patteri onkin syytä varustaa esimerkiksi paine-eromittauksilla, jolloin patterin ylitse olevan paineron kasvaessa liian suureksi, tiedetään sen olevan huurteessa.

2.5.3 LTO-yksikön mitoitus

Yleensä lämmöntalteenottolaitteen mitoittaminen on syytä jättää laitevalmistajalle, joka mitoittaa LTO-patterin koon suunnittelijan antamien lähtötietojen perusteella. LVI-suunnittelijan tulisi ilmoittaa valmistajalle ainakin laitteen läpi kulkeva ilmamäärä ja

lämpötilat. Laitetoimittaja mitoittaa patterin koon ja ilmoittaa kyseisen patterin liuospiirin virtaaman ja lämpötilat. [3.]

Huomioitavaa on, että liuksen virtaamaan ja lämpötiloihin vaikuttaa mm. patterin hyötysuhde, joten eri valmistajan tuotteita käyttämällä voivat nesteen toiminta-arvot muuttua, vaikka ilman virtaus ja lämpötila pidettäisiin samana. Keruupiirin lämpötiloissa tulee ottaa huomioon myös patterin huurtumisen välttäminen talviolosuhteissa. Nesteen lämpötilat tulisi valita siten, ettei ulkoilman ollessa pakkasella huurtumista tapahtuisi.

LTO-patterin mitoituksessa pitää tietää, halutaanko mitoitus tehdä kuivalämmön- vai märkälämmönsiirron arvoilla. Märkälämmönsiirtoa ei haluta olevan talviolosuhteissa, koska patterin pinnoille tiivistynyt vesi jäätyy ja LTO-yksikön hyötysuhde huononee. Kesäolosuhteissa märkälämmönsiirto on toivottavaa, koska tällöin ilmasta on saatavissa talteen enemmän energiaa. Jos ilmavirrasta saatava teho kesällä halutaan maksimoida, on patterin mitoituksessa syytä huomioida märkälämmönsiirron tuoma etu. Märkälämmönsiirroissa LTO-patterin teho lasketaan kaavalla 4 [2, s. 87].

$$\phi = \rho q_v \Delta h \quad (4)$$

ϕ on patterin teho, kW

ρ on ilman tiheys, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

q_v on ilman virtaama, $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

Δh on ilman alku- lopputilapisteiden välinen entalpiaero, $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$.

Entalpiat voidaan katsoa suoraan Mollier-diagrammista, tai ne voidaan laskea. Kuvassa 13 on havainnollistettu kesäolosuhteiden ilman tilapisteitä ennen ja jälkeen LTO-patterin. Patterille tulevan ilman lämpötilaksi on asetettu +25 °C ja suhteelliseksi kosteudeksi 47 %. LTO-yksikössä ilman lämpötila lasketaan +4 °C:seen ja patterin pintalämpötila on +2 °C.

Ilmavirran ollessa $1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ saadaan lämpötilojen kautta laskettuna patterin tehoksi

$$1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} * (25^\circ\text{C} - 4^\circ\text{C}) = 25,2 \text{ kW}.$$

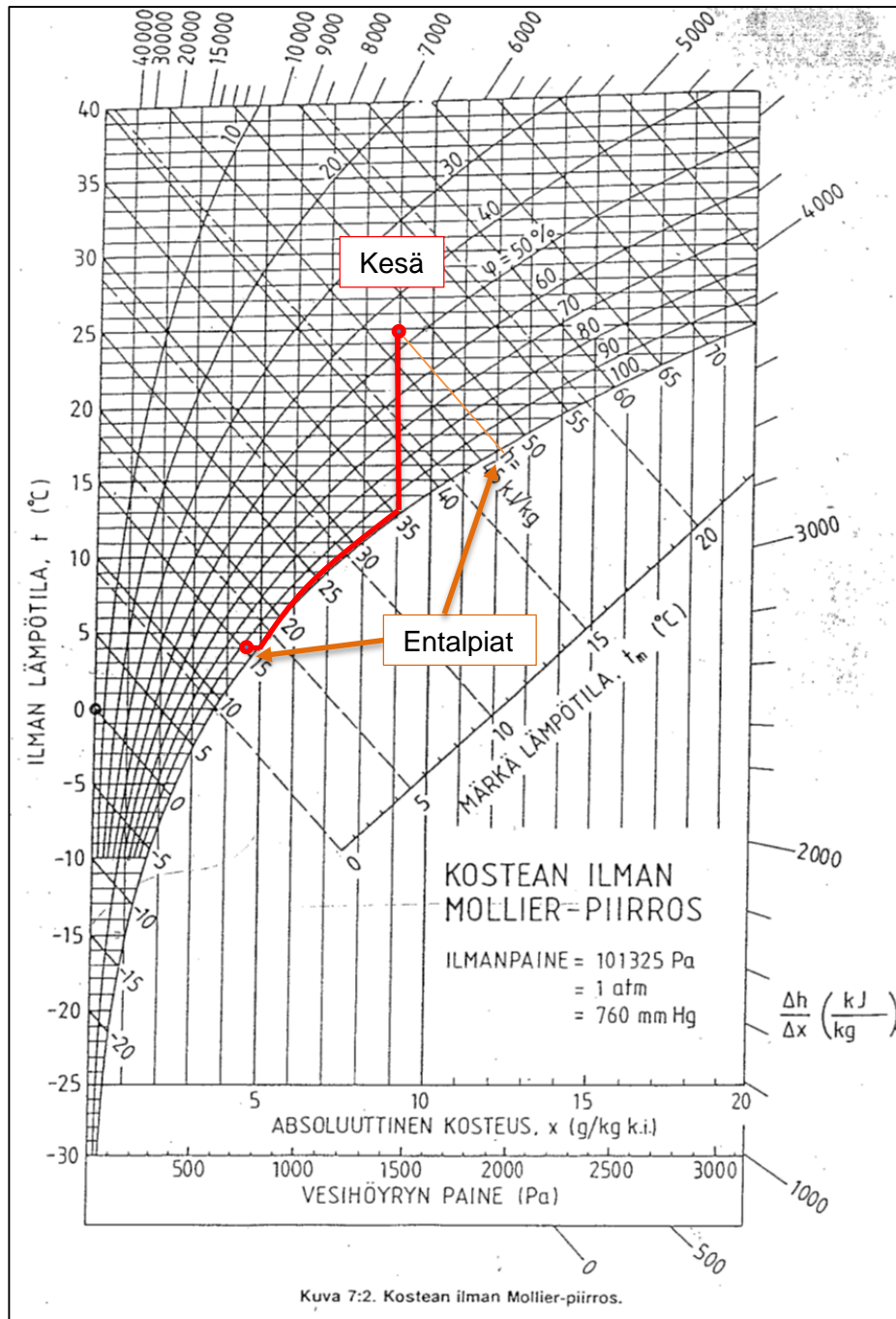
Kun kuvasta 13 katsotaan ilman tilapisteet kesätilanteessa, entalpioiksi ennen ja jälkeen patterin saadaan $47 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ ja $15 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$. Mikäli teho lasketaan entalpioiden kautta, niin tehoksi saadaan

$$1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \left(47 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 15 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 38,4 \text{ kW}.$$

Kuten laskelmat osoittavat, niin mikäli patteri mitoitettaisiin lämpötilojen kautta, oletuksena ettei märkälämmönsiirtoa tapahdu, ei ilmavirrasta saataisi kesällä kaikkea siinä olevaa energiaa talteen, koska patterin mitoitus olisi väärä. Väärin mitoitetulla patterilla ilman entalpiaero olisi

$$\frac{25,2 \text{ kW}}{1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 21 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}.$$

Sijoittamalla entalpiaero Mollieriin saataisiin ilman lämpötilaksi noin $+11^\circ\text{C}$, kun jäteilman haluttu lämpötila patterin jälkeen olisi $+4^\circ\text{C}$.



Kuva 13. Kostean ilman h-x-piirros. Ilman tilapisteeet LTO-patterilla kesätilanteessa.

LTO-patterin mitoitusta mietittäessä on myös hyvä tiedostaa, että kesätilanteessa asuinkerrostaloissa ei lämmitysjärjestelmään yleensä ohjata energiaa, joten tehokkaammasta patterista ei välttämättä ole hyötyä, koska talteen saadulle energialle ei ehkä ole käyttöä. Tehon mitoitus tapa pitääkin päättää aina tapauskohtaisesti.

2.6 LTO-yksikön liuospiiri

2.6.1 Teoriaa

Putken painehäviö

Suoran putken painehäviö voidaan laskea kaavalla 5 [18, s. 137].

$$\Delta p = \frac{\lambda L \rho v^2}{2d_s} \quad (5)$$

Δp on putken painehäviö, Pa

λ on kitkakerroin

L on putken pituus, m

ρ on nesteen tiheys, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

v on nesteen nopeus, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

d_s on putken sisähalkaisija, m.

Laminaarisen virtauksen kitkakerroin lasketaan kaavalla 6 [18, s. 138].

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (6)$$

Re on Reynoldsin luku.

Turbulenttiselle virtaukselle on olemassa useita eri laskentatapoja, ja sille on myös tehty suunnittelua helpottava Moodyn diagrammi, josta kitkakertoimen voi katsoa. Yksi tapa laskea turbulenttisen virtauksen kitkakerroin on esitetty kaavassa 7 [18, s. 139].

$$\lambda = 0,25 \left[\lg \left(\frac{k}{d_s} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2} \quad (7)$$

k on putkesta riippuva absoluuttinen karheus, mm.

K -arvona voidaan PE-putkelle käyttää 0,007 mm ja kupariputkelle 0,0015 mm [18, s. 139].

Virtauksen tyyppiä kuvataan Reynoldsin luvulla. Kun luku on alle 2 320, virtaus on laminaarista ja sen ollessa yli 3 000, virtaus on turbulenttista. Reynoldsin luvun ollessa 2 320–3 000 voi virtaus olla kumpaa tyyppiä tahansa. Reynoldsin luku lasketaan kaavalla 8 [18, s. 138].

$$Re = \frac{vd_s}{\nu_{kin}} \quad (8)$$

ν_{kin} on nesteen kinemaattinen viskositeetti, $\frac{m^2}{s}$.

Putken lämpöhäviö

Putken lämpöhäviö pituusyksikköä kohden voidaan laskea kaavalla 9 [18, s. 210].

$$\frac{\phi}{L} = U(T_s - T_u) \quad (9)$$

$\frac{\phi}{L}$ on putken lämpöhäviö pituusyksikköä kohti, $\frac{W}{m}$

L on putken pituus, m

U on eristetyn putken lämmönläpäisykerroin, $\frac{W}{Km^2}$

T_s on nesteen lämpötila, °C tai K

T_u on ympäristön lämpötila, °C tai K.

Lämmönläpäisykerroin saadaan kaavasta 10 [18, s. 210].

$$U = \frac{1}{R} \quad (10)$$

R on lämmönvastuskerroin, $\frac{\text{Km}^2}{\text{W}}$.

Lämmönvastuskerroin eristetyille putkelle lasketaan kaavalla 11 [18, s. 211].

$$R = \frac{1}{\pi d_1 \alpha_s} + \frac{1}{2\pi \lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\pi \lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_u \pi d_3} \quad (11)$$

d_1 on putken sisähalkaisija, m

d_2 on putken ulkohalkaisija, m

d_3 on eristeen ulkohalkaisija, m

λ_1 on putken lämmönjohtavuus, $\frac{\text{W}}{\text{Km}}$

λ_2 on eristeen lämmönjohtavuus, $\frac{\text{W}}{\text{Km}}$

α_s putken sisäpuolinen lämmönsiirtokerroin, $\frac{\text{W}}{\text{Km}^2}$

α_u putken ulkopuolinen lämmönsiirtokerroin, $\frac{\text{W}}{\text{Km}^2}$.

Sisäpuolisella lämmönsiirtokertoimella ei ole suurta vaikutusta laskelmiin. Sen voidaan arvioida olevan välillä 5 000–10 000 $\frac{\text{W}}{\text{Km}^2}$.

Ulkopuolinen lämmönsiirtokerroin lasketaan kaavalla 12 [18, s. 211].

$$\alpha_u = \alpha_k + \alpha_{sä} \quad (12)$$

Usein likimääräisissä laskuissa voidaan ulkopuolisena lämmönsiirtokertoimena käyttää arvoa $10 \frac{W}{Km^2}$.

Kun kaavat 10 ja 11 sijoitetaan kaavaan 9, putken lämpöhäviöksi pituusyksikköä kohden saadaan

$$\frac{\phi}{L} = \frac{(t_s - t_u)}{\left(\frac{1}{\alpha_s \pi d_1} + \frac{1}{2\pi\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_u \pi d_3} \right)}. \quad (13)$$

Virtaavan aineen lämpötilan muutos

Virtaavan aineen lämpötilan muutos voidaan laskea, kun tiedetään eristetyn putken U-arvo. Loppulämpötilaero lasketaan kaavalla 14 [18, s. 213].

$$\theta_l = e^{\frac{-UL}{c}} \theta_a \quad (14)$$

θ_l on virtaavan aineen ja ympäristön loppulämpötilaero, °C tai K

θ_a on virtaavan aineen ja ympäristön alkulämpötilaero, °C tai K

C on virtaavan aineen lämpökapasiteettivirta, $\frac{W}{K}$

L on putken pituus, m

U on eristetyn putken lämmönläpäisykerroin, $\frac{W}{Km^2}$.

Lämpökapasiteettivirta voidaan laskea kaavalla 15 [18, s. 213].

$$C = \rho v A c_p \quad (15)$$

ρ on virtaavan aineen tiheys, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

v on virtaavan aineen nopeus, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

A on putken poikkipinta-ala sisähalkaisijalla, m^2

c_p on virtaavan aineen ominaislämpökapasiteetti, $\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$.

Paikallaan olevan aineen jäähtyminen

Pysähtyneen nesteen jäätympisteeseen saavuttamiseen kuluva aika voidaan laskea kaavalla 16 [19].

$$t = \frac{(\ln\theta_l - \ln\theta_a)(C_1 + C_2)}{-U} \quad (16)$$

t on jäätympisteeseen saavuttamiseen kuluva aika, s

θ_a on nesteen alkulämpötilan ja ympäristön lämpötilan erotus, °C tai K

θ_l on nesteen jäätympisteeseen ja ympäristön lämpötilan erotus, °C tai K

C_1 on putken massa pituusyksikköä kohden ja sen ominaislämpökapasiteetin tulo, $\frac{\text{J}}{\text{Km}}$

C_2 on nesteen massa pituusyksikköä kohden ja sen ominaislämpökapasiteetin tulo, $\frac{\text{J}}{\text{Km}}$

U on eristetyn putken lämmönläpäisykerroin, $\frac{\text{W}}{\text{Km}^2}$.

2.6.2 Liuosputkiston eristys

Jäteilman lämpötila sen tullessa LTO-yksikölle on yleensä +16...+23 °C riippuen rakennuksesta ja vuodenajasta. Koska jäteilmassa on aina kosteutta joka voi tiivistyä laitteen lämmönsiirtopinnoille, niin suunnittelussa yleensä pyritään siihen, että talteenoton jälkeen ilman lämpötila on yli 0 °C. Tällä pyritään siihen, että lämmönsiirtopinnoille huurtunut kosteus ei pääsisi jäätymään. Tästä syystä myös liuospiirin lämpötila pidetään yleensä plusasteisena. Laitetoimittajista ja mitoituksista riippuen liuospiirin lämpötilat voivat olla jotain välillä +1...+10 °C.

Koska LTO-keruupiirin lämpötilat ovat alhaiset, niin putkien eristyksellä pyritään lämpöeristämisen lisäksi myös kondenssieristämiseen. Kondenssieristämisessä on tärkeää, että eristystyö tehdään erityisen huolellisesti, jotta kosteuden tunkeutuminen eristeen läpi putken pinnalle estyisi. Tästä syystä eristäminen täytyy tehdä höyrytiivistä materiaalista, jonka lisäksi myös eristyksien kaikki saumat on huolellisesti tehtävä höyrytiiviksi. [20, s. 154–155.]

Liuosputkiston eristemateriaalille ei ole olemassa vaatimuksia, mutta yleinen materiaali on solukumieriste sen höyrytiivin rakenteen vuoksi. Ohjekortissa LVI 50-10345 on lämmöntalteenottojärjestelmien putkieristeeksi ohjeistettu 19 mm:n solukumieriste [21, s. 2], mutta mikään ei estä käyttämästä myös muita materiaaleja, mikäli höyrytiiviyys saadaan kyseisellä eristeellä toteutettua. Taulukosta 2 voidaan nähdä eri materiaalien lämmönjohtavuuksia erilaisilla ympäristön lämpötiloilla.

Taulukko 2. Eristeiden lämmönjohtavuuksia eri ympäristön lämpötiloissa [20, s. 155].

Keski- lämpötila °C	Lasivilla W/Km	Vuorivilla W/Km	Poly- styreeni W/Km	Poly- uretaani W/Km	Solukumi W/Km
10	0,033	0,032	0,034	0,038	0,037
-10	0,030	0,032	0,031	0,035	0,035
-30	0,028	0,030	0,029	0,032	0,033
-50	0,026	0,029	0,027	0,029	0,029

Mikäli putkisto kulkee ulkona, on otettava huomioon, että tällöin 19 mm:n solukumieriste ei välttämättä ole riittävä eristepaksuus. LVI-ohjekortti 50-10345 ei anna ohjeita ulkona kulkevan LTO-putkiston eristämiseen, joten eristemateriaalin ja paksuuden

määrittäminen jääkin suunnittelijan tehtäväksi. Ulkona kulkevan putkiston eristyksessä on suunnittelijan huomioitava, että eristys

- kestää auringon uv-säteilyä
- kestää ulkoisia vaurioita
- toimii riittävän hyvänä lämpöeristyksenä
- toimii kondenssieristeenä
- ei haudaudu lumeen, jotta ei kasvateta eristeen kastumisriskiä
- on taloudellinen.

Mikäli ulkoasennusputkistoa ei koteloida, voidaan solukumieristeelle haitallinen uv-säteilyn haitta poistaa pinnoittamalla eriste. Eristeen materiaalista riippumatta on pinnoitus hyvä toteuttaa esimerkiksi metallipäällysteellä, jolloin eristys ei ole alttiina ympäristön rasituksille. [20, s. 155.]

Mikäli putkisto kulkee talon katolla, pitää sen korkeus kattopinnasta asettaa sellaiseksi, että se ei talviaikana haudaudu lumeen. Tällä vähennetään riskiä, että kosteus ei pääse eristeen ja putken väliin, jossa se jäätyessään voi vaurioittaa putkea. Myös eristeen eristyskyky romahtaa, mikäli se läpi kastuu. [20, s. 155.]

Mietittäessä sopivaa eristyspaksuutta ulkona sijaitsevalle putkistolle, joudutaan yleensä tekemään kompromisseja taloudellisuuden ja eristyspaksuuden väliltä. Eristepaksuutta ei ole järkevää kasvattaa loputtomasti, koska tällöin materiaali- ja asennuskustannukset kasvavat ja toisaalta putken ja eristeen fyysinen koko voi kasvaa liian suureksi. Suunnittelijan onkin päätettävä, mikä on kohtuullinen putkiston kokonaislämpöhäviö ulkona, eli toisin sanoen, mikä on hyväksyttävä lämpötilan muutos nesteessä. Myös laiterikko on otettava huomioon eristyspaksuutta mietittäessä. Mikäli kierto putkistossa pysähtyy, alkaa nesteen jäätyminen jollain aikavälillä.

Lämmönsiirtoaineen jäätyminen putkessa eri eristepaksuuksilla voidaan laskea. Myös liuospiirin kierron pysähtyessä, voidaan laskea milloin nesteen jäätyminen alkaa. Taulukoista 3 ja 4 voidaan suuntaa antavasti päätellä eristyspaksuuden vaikutusta virtausaineeseen. Laskelmien yksinkertaistamisen vuoksi laskennassa ei ole huomioitu tuulen nopeuden sekä auringon säteilyn ja metallipinnoitteen vaikutusta nesteeseen.

Taulukoista 3 ja 4 nähdään, että nesteen jäähtymisen kannalta eristepaksuuden suurilla lisäämisillä ei saada isoja hyötyjä. Virtaaman kasvaessa myös aineen jäähtymien ero toisiinsa nähden pienenee, jolloin eristepaksuuden kasvattamisen merkitys edelleen laskee.

Tärkeää eristepaksuutta ja nesteen jäätympistettä suunniteltaessa onkin miettiä, mikä on hyväksyttävä aika nesteen jäätympisteen saavuttamiselle, mikäli kierto piirissä keskeytyy. Taulukosta 3 nähdään, että 50 mm:n eristeellä jäätympiste on saavutettu kahdeksan tunnin kuluttua, mikäli nesteen jäätympiste on -17 °C . Tällaisella varoitusaajalla ei välttämättä saada järjestelmää kunnostettua. Mikäli nesteen jäätympiste asetetaan -24 °C :seen (taulukko 4), on jäätympiste saavutettu 18 tunnin kuluttua kierron pysähtymisestä, kun käytetään 50 mm:n eristepaksuutta.

Vaikka pakkasnesteidän ominaisuuksiin kuuluukin, että ne jäätympisen sijasta menevät hyhmään, voi hyhmässä olevan nesteen saaminen uudelleen virtaavaksi aineeksi tuottaa ongelmia. Suunnittelijan kannattaakin pohtia, voisiko vikatilanteita varten ulko-osuudella olevan putkiston varustaa lämmityskaapelilla, joka kytketään päälle ainoastaan kierron pysähtyessä.

Taulukko 3. Eristepaksuuden vaikutus ulkona kulkevassa liuospiirissä. Propyleeniglykolin jäätympiste -17 °C , tuulennopeus $0\frac{\text{m}}{\text{s}}$.

PE-putki 40 mm, $q_v=0,4\text{ l/s}$, $T_u=-26\text{ °C}$, $T_{jää}=-17\text{ °C}$, Eristeen lämmönjohtavuus= $0,035\text{ W/Km}$, $L_{\text{putkisto}}=30\text{ m}$				
Eristepaksuus	Lämpöhäviöteho putkimetriä kohti	Lämpöhäviöteho yhteensä	Aineen jäähtymä	Jäätympisteen saavuttamisaika kun kierto pysähtyy
mm	W/m	W	°C	h
0	33,4	1001	0,64	1,2
20	8,2	246	0,16	5
50	5,0	149	0,10	8
80	4,0	119	0,08	10
100	3,6	107	0,07	12
120	3,3	99	0,06	13
150	3,0	91	0,06	14
200	2,7	81	0,05	15

Taulukko 4. Eristyspaksuuden vaikutus ulkona kulkevassa liuospiirissä. Propyleeniglykolin jäätymispiste -24 °C , tuulennopeus $0\frac{\text{m}}{\text{s}}$.

PE-putki 40 mm, $qv=0,4\text{ l/s}$, $T_u=-26\text{ °C}$, $T_{\text{jää}}=-24\text{ °C}$, Eristeen lämmönjohtavuus= $0,035\text{ W/Km}$, $L_{\text{putkisto}}=30\text{ m}$				
Eristepaksuus	Lämpöviöteho putkimetriä kohti	Lämpöviöteho yhteensä	Aineen jäähtymä	Jäätymispisteen saavuttamisaika kun kierto pysähtyy
mm	W/m	W	°C	h
0	33,4	1001	0,66	2,7
20	8,2	246	0,16	11
50	5,0	149	0,10	18
80	4,0	119	0,08	23
100	3,6	107	0,07	25
120	3,3	99	0,07	27
150	3,0	91	0,06	30
200	2,7	81	0,05	34

Taulukoiden 3 ja 4 laskelmat on esitetty liitteessä 1 ja ne on laskettu teoriaosuuden kaavoilla.

Ulkona olevan putkiston eristysmateriaalit ja paksuudet täytyy suunnitella aina tapauskohtaisesti.

2.6.3 Liuosputkisto

LTO-piirin putkistona voidaan käyttää lähes kaikkia yleisimpiä talotekniikan putkimateriaaleja, kuten teräs-, muovi- ja kuparimateriaaleja. Tärkeää putkimateriaalin valinnassa on tiedostaa, että käytettävä LTO-piirin neste on soveltuva kyseiselle materiaalille ja sisältää kaikki tarvittavat inhibiittorit. [22, s. 11; 23.] Myös putken valmistajalla voi olla rajoituksia käytettävien aineiden suhteen, joten se pitää suunnittelussa ottaa huomioon.

Lämmönjakohuoneen ulkopuolella sisätiloissa käytetään liuosputkiston materiaalina usein polyeteeniputkea, eli PE-putkea. PE-putkea käytetään sen edullisuuden ja helpon asennettavuutensa vuoksi. Mikäli liuosputkisto kulkee rakennuksen ulkopuolella, voidaan putkistoina käyttää myös tehtaalla valmiiksi eristettyjä elementtiputkistoja.

Lämmitysputkiston mitoitusperusteena käytetään usein $50\text{--}75\frac{\text{Pa}}{\text{m}}$ [24, s. 6]. Koska poistoilman lämmöntalteenotossa on liuospiirin meno- ja paluunesteen välinen lämpötilaero huomattavasti pienempi kuin yleensä lämmitysjärjestelmissä, saattaa

mitoituskriteeri $50 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}$ tuottaa suunnittelussa ongelmia. Tällaisella mitoituksella putkikoko voi kasvaa liian suureksi käytettävissä olevan tilan suhteen. Liuospiireissä voidaankin tapauskohtaisesti käyttää mitoituskriteerinä $100 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}$, mikäli putkiston kokonaispituus ei ole niin iso, että yhteenlasketuista putkistopainehäviöistä tulee laitteiston toiminnan kannalta haitallinen [3]. Taulukosta 5 huomataan, että pienemmän viskositeetin omaavan kaliumformiaatin putkistopainehäviöt ovat hieman pienemmät kuin esimerkiksi propyleeniglykolilla, jolloin jossain tapauksissa voitaisiin kaliumformiaattia käyttämällä päästä kokoa pienempään putkikokoon. Mikäli putkien viemää tilaa halutaan pienempää, on syytä valita ohuempi seinämäisiä putkimateriaaleja. Taulukoissa 5 ja 6 on verrattu kupariputken ja PE-putken painehäviöitä erilaisilla lämmönsiirtoaineilla.

Taulukko 5. PE-putken painehäviöitä erilaisilla lämmönsiirtonesteillä. Liuoksen lämpötila on $4 \text{ }^\circ\text{C}$ ja jäätymispisteet ovat $-17 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $-24 \text{ }^\circ\text{C}$.

PE-putki		Kaliumformiaatti, $\Delta=5^\circ\text{C}$, $\Phi=20 \text{ kW}$		Etyleeniglykoli, $\Delta=5^\circ\text{C}$, $\Phi=20 \text{ kW}$		Propyleeniglykoli, $\Delta=5^\circ\text{C}$, $\Phi=20 \text{ kW}$	
Putken ulkohalkaisija	Putken seinämä	27 p-% $T_{\text{jää}}=-17^\circ\text{C}$	33 p-% $T_{\text{jää}}=-24^\circ\text{C}$	32 p-% $T_{\text{jää}}=-17^\circ\text{C}$	39 p-% $T_{\text{jää}}=-24^\circ\text{C}$	36 p-% $T_{\text{jää}}=-17^\circ\text{C}$	43 p-% $T_{\text{jää}}=-24^\circ\text{C}$
mm	mm	Pa/m	Pa/m	Pa/m	Pa/m	Pa/m	Pa/m
32	3	2124	2333	2325	2623	2653	2974
40	3,7	716	788	792	896	912	1027
50	4,6	245	270	273	310	317	359
63	5,8	82	90	92	104	107	122
75	6,8	35	39	40	45	47	33 1)
90	8,2	15	16	17	19	20	16 1)

1) Virtaus putkessa on laminaarista

Taulukko 6. Kupariputken painehäviöitä erilaisilla lämmönsiirtonesteillä. Liuoksen lämpötila on $4 \text{ }^\circ\text{C}$ ja jäätymispisteet ovat $-17 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $-24 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kupariputki		Kaliumformiaatti, $\Delta=5^\circ\text{C}$, $\Phi=20 \text{ kW}$		Etyleeniglykoli, $\Delta=5^\circ\text{C}$, $\Phi=20 \text{ kW}$		Propyleeniglykoli, $\Delta=5^\circ\text{C}$, $\Phi=20 \text{ kW}$	
Putken ulkohalkaisija	Putken seinämä	27 p-% $T_{\text{jää}}=-17^\circ\text{C}$	33 p-% $T_{\text{jää}}=-24^\circ\text{C}$	32 p-% $T_{\text{jää}}=-17^\circ\text{C}$	39 p-% $T_{\text{jää}}=-24^\circ\text{C}$	36 p-% $T_{\text{jää}}=-17^\circ\text{C}$	43 p-% $T_{\text{jää}}=-24^\circ\text{C}$
mm	mm	Pa/m	Pa/m	Pa/m	Pa/m	Pa/m	Pa/m
35	1,5	769	846	856	969	990	1115
42	1,5	300	330	336	381	391	442
54	1,5	84	92	95	108	111	126
63	2	42	46	48	54	56	39 1)
72	2	21	24	24	28	29	22 1)
88	2	8	9	9	10	7 1)	9 1)

1) Virtaus putkessa on laminaarista

Taulukoiden 5 ja 6 laskelmat on tehty teoriaosuuden kaavoilla ja ne on esitetty liitteessä 2.

2.6.4 Käytettävät liuospiirin nesteet

Epäsuorahöyrysteisessä LTO-järjestelmässä kulkee liuospiirissä lämmönsiirtoneste. Mikäli LTO-yksikkö toimii ulkona katolla, joudutaan lämmönsiirtonestettä valittaessa huomioimaan Suomen talviolosuhteet. Vaikka yksikkö olisikin sisällä, täytyy sen siitä huolimatta kestää alle 0 °C:n lämpötiloja, koska on huomioitava, että höyrystimellä kylmäaineen lämpötila voi laskea alle nollan.

Ominaisuuksiltaan paras neste olisi vesi, mutta sen jäätymispisteen ollessa 0 °C, joudutaan lämmönsiirtoaineena yleensä käyttämään pakkasen kestäviä tuotteita. Veden käyttäminenkin lämmönsiirtonesteenä on mahdollista, mutta tällöin jäätymisen estämiseen on kuitenkin kiinnitettävä erityistä huomiota [3]. Yleensä PILP-laitteiston LTO-yksiköissä käytetäänkin erilaisia liuoksia, jossa pakkasenkestävää ainetta sekoitetaan veteen jokin tietty tilavuus- tai massaprosentti. Koska sekoitettavan aineen ominaisuudet huonontavat liuoksen lämmönsiirto-ominaisuuksia, pyritään jäätymisenestoaineen määrää liuoksessa pitämään mahdollisimman alhaisena. [2, s. 185–186.]

Liuosta valittaessa pitää varmistua, että seos sisältää putkiston ja laitteistojen kestävyys kannalta tärkeät inhibiitit. LTO-järjestelmissä inhibiittien tehtävä on suojata rauta-, kupari- sekä alumiiniosia ja muita mahdollisia metalleja korroosiolta, sekä estää sakan syntymistä järjestelmässä. Inhibiiteilla voidaan myös säätää veden pH-arvoa. [25.]

Hyvällä lämmönsiirtoaineella tulisi olla seuraavia ominaisuuksia [26, s. 32]:

- mahdollisimman palamaton, jotta ei levitä tulipaloa ja helpompi käsiteltävyys
- ei aiheuta korroosiota, jolloin laitteistojen käyttöikä pysyy pitempänä
- sopii yhteen eri materiaalien kanssa
- alhainen viskositeetti, jotta pumppauskustannukset pysyvät alhaisina
- alhainen jäätymispiste

- mahdollisimman korkea ominaislämpökapasiteetti, jotta aine sitoisi mahdollisimman paljon lämpöenergiaa itseensä
- mahdollisimman myrkytön, jotta sen käsittely olisi helppoa ja vuototilanteissa myrkyllisyys ei olisi ongelma
- kemiallisesti stabiili, jolloin tuotteen käyttöikä kasvaa.

Lämmönsiirtonestettä ja sen pitoisuutta valittaessa pitää ottaa huomioon mm. seuraavia asioita.

- Mikä on LTO-yksikön sijainti ja liuosputkiston reitti?
- Asennetaanko LTO-yksikkö sisällä vai ulos?
- Mikäli putkisto kulkee ulkona, on myös otettava huomioon, että vikatilanteessa nesteen kierto voi pysähtyä.
- Valmistajilla voi olla tiettyjä aineita, joita heidän järjestelmissään saa käyttää.
- Mikä on höyrystimen höyrystymislämpötila?

Etyleeniglykoli

Etyleeniglykoli on puhtaana hajuton ja väritön neste, joka liukenee veteen hyvin. Sitä käytetään yleisesti LTO-järjestelmien lämmönsiirtonesteinä. Etyleeniglykolin huono puoli on sen myrkyllisyys yli 25 %:n vahvuisena [26, s. 33].

Suomessa tuotetta myydään LTO-järjestelmiin mm. Telko Oy:n toimesta tuotenimellä Hd Zero. Etyleeniglykolia voidaan käyttää sekä ulko- että sisätiloissa. Aineen virratessa ulkona olevassa putkistossa pitää kumminkin huomioida, että seoksen täytyy olla yli 30 %:n vahvuista, jotta se ei hytyisi [22, s. 14]. Taulukossa 7 on esitetty etyleeniglykoli-vesiseoksen jäätymispisteitä erilaisilla pitoisuuksilla.

Taulukko 7. Etyleeniglykoli-vesiseoksen jäätymispisteitä [27, s. 4].

Etyleeniglykoli-vesi

Pitoisuus (p-%)	14,0	23,6	30,5	36,2	41,1	45,4	49,3	52,8	56,1
Jäätymispiste (°C)	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45

Propyleeniglykoli

Propyleeniglykoli on myös puhtaana hajuton sekä väritön neste ja se liukenee hyvin veteen. [26, s. 32]. Kuten taulukosta 12 nähdään, propyleeniglykoli ei ole myrkyllistä. Huonoja puolia propyleeniglykoli-vesiseoksessa on korkea kinemaattinen viskositeetti, jolloin pumppauskustannukset nousevat. Suomessa tuotetta myydään LTO-järjestelmiin mm. Telko Oy:n toimesta tuotenimellä Zero Propylen sekä Korves Oy:n Ruste pakkasneste. Taulukossa 8 on esitetty propyleeniglykoli-vesiseoksen jäätymispisteitä erilaisilla pitoisuuksilla.

Taulukko 8. Propyleeniglykoli-vesiseoksen jäätymispisteitä [27, s. 4].

Propyleeniglykoli-vesi

Pitoisuus (p-%)	15,2	25,0	33,0	39,0	44,0	48,0	51,0	54,0	57,0
Jäätymispiste (°C)	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45

Kaliumformaatti

Kaliumformaatti on puhtaana melkein hajuton, ja se liukenee veteen. Hyvänä puolena voidaan todeta sen myrkyttömyys. Kaliumformaatti aiheuttaa korroosiota ollessaan kosketuksissa sinkin tai alumiinin kanssa, ja sitä käytettäessä suositellaankin, että seokseen lisätään inhibiittoreita, jotka vähentävät nesteen korroosiovaikutusta. [26, s. 32.]

Taulukosta 13 voidaan nähdä, että kaliumformaatti-vesiseoksen kinemaattinen viskositeetti on erittäin alhainen, verrattuna muihin lämmönsiirtoaineisiin, jolloin liuoksen pumppaamiseen kuluu vähemmän energiaa. Suomessa tuotetta myydään Freezium-tuotenimellä, ja sitä valmistaa VesiTekno Oy. Taulukossa 9 on esitetty kaliumformaatti-vesiseoksen jäätymispisteitä erilaisilla pitoisuuksilla.

Taulukko 9. Kaliumformaatti-vesiseoksen jäätymispisteitä [27, s. 4].

Kaliumformaatti-vesi

Pitoisuus (p-%)	19,0	24,0	29,0	34,0	37,0	40,0	43,0	45,0	47,0
Jäätymispiste (°C)	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45

Etanoli

Etanoli on puhtaana väritön ja hajuton, joka liukenee veteen. Sen huonona puolena on erittäin herkkä syttyvyys. Etanoli ei ole myrkyllinen ympäristölle. [26, s. 33.] Ympäristöystävällisyyden ja syttymisherkkyuden vuoksi etanolia käytetäänkin pääasiassa rakennusten ulkopuolisissa kohteissa, mutta myös PILP-kohteissa sen käyttöä voidaan harkita, kun putkisto kulkee talon ulkoseinällä [28]. Taulukossa 10 on esitetty etanoli-vesiseoksen jäätymispisteitä erilaisilla pitoisuuksilla.

Taulukko 10. Etanoli-vesiseoksen jäätymispisteitä [27, s. 4].

Etanoli-vesi

Pitoisuus (p-%)	11,0	18,8	24,5	29,5	34,9	40,9	46,8	53,1	60,1
Jäätymispiste (°C)	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45

Betaiini

Betaiinia esiintyy mm. sokerijuurikkaissa eläimissä ja kasveissa, joten se on luonnontuote. Betaiini liukenee veteen. Sen hyvät puolet ovat myrkyttömyys ja palamattomuus, eikä sillä ole korroosiota tuottavaa vaikutusta [26, s. 32]. Suomessa tuotetta myydään Thermera-nimisenä, ja sitä valmistaa Climalife. Taulukossa 11 on esitetty betaiini-vesiseoksen jäätymispisteitä erilaisilla pitoisuuksilla.

Taulukko 11. Betaiini-vesiseoksen jäätymispisteitä [27, s. 5].

Betaiini-vesi

Pitoisuus (p-%)	35,0	50,0
Jäätymispiste (°C)	-15	-45

Taulukko 12. Lämmönsiirtoaineiden ominaisuuksia [2, s. 186].

Ominaisuus	Etyleeniglykoli	Propyleeniglykoli	Kaliumformiaatti	Betaiini
Lämmönsiirto- ominaisuudet normaali lto- lämpötilassa	Hyvä, kun pitoisuus ei ylitä 30 %	Huono. Seoksen viskositeetti korkea ja lämmönsiirto heikko	Hyvä	Hyvä
Toiminta matalassa lämpötilassa	Kohtuullinen, viskositeetti kasvaa ja lämmön- siirto heikkenee	Huono. Seoksen viskositeetti kasvaa ja lämmönsiirto heikkenee	Hyvä	Kohtuullinen, viskositeetti kasvaa ja lämmön- siirto heikkenee
Toiminta korkeassa lämpötilassa	Hyvä	Hyvä	Lämpötekniisesti hyvä. Korrosio kasvaa. Huomioitava materiaalivalinnoissa	Hyvä
Myrkyllisyys	Myrkyllinen	Ei myrkyllinen	Ei myrkyllinen	Ei myrkyllinen
Korrosio	Ei aiheuta korrosiota	Ei aiheuta korrosiota	Aiheuttaa korrosiota. Huomioitava materiaali- valinnoissa.	Ei aiheuta korrosiota

Taulukosta 13 voi nähdä eri lämmönsiirtonesteiden ominaisuuksia, kun seoksen jäätympiste on -25 °C ja nesteen lämpötila -15 °C .

Taulukko 13. Lämmönsiirtoaineiden vesiliuosten ominaisuuksia jäätympisteen ollessa -25 °C ja nesteen lämpötila -15 °C [26, s. 33].

Ominaisuus	Betaiini 40-45 p-%	Etanoli 35 p-%	Etyleeniglykoli 41 p-%	Kaliumformiaatti 34 p-%	Propyleeniglykoli 44 p-%
Tiheys (kg/m^3)	1097	966	1068	1232	1051
Lämmönjohtavuus (W/mK)	0,37	0,37	0,39	0,51	0,37
Ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK)	2,99	4,00	3,34	2,96	3,63
Kinemaattinen viskositeetti (mm^2/s)	19,70	19,10	11,65	3,41	42,60
Sekoittuvuus veteen	täysin liukeneva	täysin liukeneva	täysin liukeneva	täysin liukeneva	täysin liukeneva

Lämmönsiirtonesteitä ja niiden pitoisuuksia suunniteltaessa on hyvä tietää, että esimerkiksi propyleeniglykolin viskositeetti on suuri. Pitoisuutta liikaa kasvattaessa voi virtaus lämmönsiirtimessä muuttua laminaariseksi, jolloin siirtimen lämmönsiirtokyky heikkenee oleellisesti.

2.6.5 Putkireitti

LTO-putkistot asennetaan rakennuksen sisällä useimmiten porrasmuotoihin, jossa ne eristyksen jälkeen koteloidaan. Mikäli PILP-järjestelmän asennuksen yhteydessä kiinteistöön tehdään myös muita saneeraustoimenpiteitä, voidaan putket asentaa vaihtoehtoisesti huoneistoissa kulkevien nousuhormien sisään. Jos putkille ei löydy rakennuksen sisältä sopivaa reititystä, voidaan putkisto asentaa myös kiinteistön ulkoseinälle.

Mikäli liuospiirin putket asennetaan ulos rakennuksen julkisivulle, on aina syytä olla yhteydessä kyseisen paikkakunnan rakennusvalvontaan. Yleensä luvanvaraisuus on riippuvainen siitä, mihin kohtaan rakennusta putkisto sijoitetaan ja onko se kaupunkikuvallisesti merkittävä. Vastaukset pääkaupunkiseudun rakennusvalvontoihin tehdystä kyselystä liuosputkiston luvanvaraisuudesta, mikäli putket asennetaan rakennuksen julkisivulle, on esitetty liitteessä 3. [29; 30; 31.]

2.6.6 Liuospiirin muut varusteet

Liuospiirin muut varusteet, kuten pumput, varolaitteet ja paisunta-astiat voidaan mitoittaa kuten normaalin lämmitysjärjestelmän vastaavat varusteet. Mitoituksissa otetaan huomioon käytettävän nesteen vedestä poikkeavat ominaisuudet.

3 Ilmanvaihto

Koska PILP-järjestelmissä talteen otettava energia otetaan rakennuksen jäteilmasta, täytyy suunnittelijan kiinnittää erityistä huomiota myös ilmanvaihtojärjestelmään ja sen toimivuuteen. Tässä osiossa käsitellään ilmanvaihtoon liittyviä asioita, joita PILP-järjestelmän suunnittelussa täytyy huomioida.

3.1 Puhallin

Poistoilman lämmöntalteenottolaitteistoa suunniteltaessa vastaan tulee usein kysymys siitä, uusitaanko vanha puhallin. Puhaltimen uusimista suunniteltaessa täytyy miettiä seuraavia asioita.

Vanhan puhaltimen jäljellä oleva käyttöikä

Puhaltimien tekninen käyttöikä riippuu sen käyttöajoista. Kerrostalojen koneellisissa poistoilmanvaihtojärjestelmissä se tarkoittaa, että puhallin on uusittava 10–30 vuoden välein [32, s. 86; 33, s. 23]. Tällöin puhaltimen uusiminen voi olla ajankohtaista jo siksi, että se on elinkaarensa loppupäässä

Vanhan puhaltimen energiatehokkuus

Vanhan puhaltimen uusimista puoltaa myös uuden puhaltimen alhaisempi energiankulutus. Nykyisten EC-puhaltimien hyötysuhteet ovat vanhoja puhaltimia huomattavasti paremmat, jolloin niiden energiankulutus suhteessa vanhoihin on huomattavan pienempi [2, s. 175].

Vanhan puhaltimen tehon riittävyys

Vanhoissa kerrostaloissa ilmanvaihto ei usein ole nykyvaatimuksien mukaisella tasolla [34, s. 9], jolloin ilmavirtoja kannattaa nostaa jo asuinviihtyvyydenkin vuoksi. Myös PILP-järjestelmä itsessään toimii paremmin suuremmilla ilmavirroilla. Koska poistoilmanlämmöntalteenottolaitteiston mukana jäteilmavirtaan asetetaan lämmöntalteenottopatteri suodattimiseen, tai suoraohyrysteisissä järjestelmissä höyrystin, täytyy puhaltimen tuottaa suurempi paineenkorotus kuin ennen PILP-järjestelmän asennusta. Suurempien ilmamäärien ja paineenkorotuksen vuoksi voi olla, että vanhaa puhallinta ei voida hyödyntää uudessa järjestelmässä.

Vanhan puhaltimen soveltuvuus uuteen järjestelmään

Usein uusissa LTO-yksiköissä on integroituna uusi puhallin, jolloin vanha puhallin jää hyödyttömäksi. Myös ilmavirtojen säätö voidaan toteuttaa paremmin nykyisillä EC-puhaltimilla, joissa on portaattoman säädön mahdollisuus.

3.2 Ilmanvaihdon nuohous ja säätö

Poistoilman lämmöntalteenottojärjestelmiä rakennetaan pääosin vanhoihin 60–90-luvun rakennuksiin. Tällöin vuosikymmeniä vanhan järjestelmän säädöt ovat ajan saatossa

voineet muuttua, eikä ilman vaihtuvuus rakennuksessa vastaa enää alkuperäistä suunnittelua. Onkin tutkittu, että koneellista poistoilmanvaihtoa käyttävissä kerrostaloissa 80 % ei täytä nykymääräysten mukaista ilmanvaihtuvuutta, jonka vähimmäisvaatimus on, että koko ilmatilavuuden on vaihdettava kerran kahdessa tunnissa. [34, s. 9.; 35, s. 10.]

Koska rakennuksen todellisesta poistoilmamäärästä ei todennäköisesti ole tietoa, on ilmamäärät hyvä mitata, jotta voidaan todeta, onko kiinteistön ilmanvaihto riittävä. Ilmavirrat ja varsinkin jäteilman lämpötila ennen puhallinta olisi hyvä mitata ennen lopullista investointipäätöstä, koska näillä on myös suuri vaikutus järjestelmän takaisinmaksuaikaan. Usein jäteilman lämpötila huoneistoissa on noin +21...+23 °C, mutta kanavien sijainneista ja eristyksistä riippuen lämpötila voi myös olla huomattavasti alle +20 °C ennen puhallinta. Tämä vaikuttaa talteen saadun energian määrään ja sitä kautta takaisinmaksuaikoihin.

Usein myös kanaviston tai hormiston nuohous voi olla ajankohtainen remontin yhteydessä. Nuohous suositellaan tehtäväksi vähintään 10 vuoden välein [32, s. 86; 33, s. 24], joten PILP-asennuksien yhteydessä on kannattavaa selvittää, tehdäänkö remontin yhteydessä myös nuohous ja mahdollisesti ilmanvaihtojärjestelmän tasapainotus, jolloin ilmanvaihtuvuus rakennuksessa saadaan entistä tilannetta paremmalla tasolle.

3.3 Ilmanvaihdon ohjaus

Ilmanvaihdon ohjauksessa suunnittelijan tulee miettiä, että halutaanko uudessa järjestelmässä pysyä vanhassa ohjaustavassa, vai onko järkevää muuttaa sitä erilaiseksi. Tätä suunniteltaessa myös kiinteistön käyttäjiltä kannattaa tiedustella heidän tyytyväisyyttään nykyiseen ilmanvaihdon toimivuuteen.

3.3.1 Kello-ohjaus

Koneellisessa poistoilmanvaihdossa kerrostalojen yleisin ilmanvaihdon ohjaustapa on ollut kello-ohjaus. Ohjaus on voitu toteuttaa siten, että ruoanlaitto- ja peseytymisaikoina ilmanvaihto käy 1/1-teholla ja muina aikoina puoliteholla. Tällä on pyritty energian säästöön [34, s. 14]. Kello-ohjattua ilmanvaihtoa aletaan nykypäivänä pitämään jo

vanhentuneena ohjaustapana, koska ihmisten elintavat poikkeavat suuresti toisistaan [34, s. 9]. Tällöin tiettyinä aikoina tapahtuva tehostus voi olla isolle osalle asukkaista hyödytön.

3.3.2 Vakioilmamäärä painotetun ilmanvaihdon keskiarvolla

Yksi tapa nostaa huoneistojen ilmanvirtojen suuruutta, vaikuttamatta kumminkaan vuorokautiseen poistoilman kokonaismäärään, on toteuttaa ilmanvaihto painotetun ilmanvaihdon keskiarvolla. Tällöin uusi korotettu ilmamäärä saadaan, kun lasketaan tehostuksen ja puolitehon vuorokautinen poistoilmamäärä yhteen ja jaetaan se vuorokauden tunneilla. Tässä ilmanvaihdon ohjaustavassa kello-ohjaus jää pois käytöstä ja huoneistojen ilmavirtoja päästään kasvattamaan ilman, että poistoilmaan käytettävän energian määrä oleellisesti kasvaa.

Esimerkiksi. Aiemmin tehostusilmavirta on kiinteistössä ollut $1\,400 \frac{1}{s}$ ja käyttöaika vuorokaudessa 6 h. Vastaavasti puolitehon ilmamäärä on ollut $700 \frac{1}{s}$, ja se on ollut päällä 18 h vuorokaudessa. Tällöin vuorokaudessa poistettu ilmamäärä on yhteensä ollut $75\,600 \frac{m^3}{vrk}$. Kun tämä jaetaan vuorokauden tunneilla, saadaan uudeksi ilmamääräksi $875 \frac{1}{s}$, jolloin ilmavirtaa on saatu kasvatettua 25 %. Tässä tapauksessa kello-ohjauksesta luovutaan ja ilmanvaihto toimii koko ajan kyseisellä ilmamäärällä.

3.3.3 Ilmanvaihdon ohjaus ulkolämpötilan mukaan

Koska koneellisissa poistoilmanvaihdossa korvausilmaa ei lämmitetä, on vedon tunne varsinkin pakkaskaudella mahdollista. Tällöin vedon tunnetta asunnoissa voidaan vähentää ohjaamalla ilmanvaihtoa ulkoilman lämpötilan mukaan, jolloin kovimpien pakkasjaksojen ajaksi ilmanvaihdon tehoa alennetaan.

3.4 Kanavointityöt

PILP-järjestelmissä yleensä kanavointitöitä joudutaan tekemään, mikäli rakennuksen ilmamäärät olisivat muuten sopivat, mutta yksittäisten puhaltimien ilmamäärät ovat liian pienet. Näissä tapauksissa voidaan kanavoiteja yhdistää, jolloin entisen kahden, tai

useamman, puhaltimen sijaan jäteilmavirrat hoidetaan esimerkiksi yhdellä puhaltimella [3]. Kanavointien yhdistäminen voidaan tapauskohtaisesti tehdä rakennuksen sisällä, tai vaihtoehtoisesti ulkona.

Mikäli kanavointien yhdistämisiä ei tarvita ja LTO-yksikkö, tai suora höyrystyslaitteisto, sijaitsee rakennuksen sisällä kammiossa, jää ainoaksi kanavointityöksi johtaa jäteilmakanava lämmöntalteenottolaitteelta ulos. Tällöin pitää huomioida, että jäteilman matalan lämmön vuoksi kanava joudutaan kondenssieristämään.

3.5 Korvausilmaratkaisut

Mikäli PILP-järjestelmän asennuksen yhteydessä päätetään nostaa ilmavirtoja, pitää asuntojen korvausilman saantiin kiinnittää huomiota, koska ilmavirran lisääntyessä myös vedon tunteen riski kasvaa. Ongelmana on kylmän korvausilman tuonti vedottomana oleskelualueella. Korvausilmareitti kannattaa pyrkiä sijoittamaan lämmönlähteen päälle, jolloin kylmä ilma sekoittuu nousevaan lämpimään ilmaan ja vähentää vedon tunnetta.

Korvausilmareittejä suunniteltaessa pitää oikosulkuvirtauksen mahdollisuutta välttää. Tällä tarkoitetaan sitä, että samaan tilaan poistoilmaventtiilin kanssa ei tuoda raitisilmaventtiiliä. Ulkoilma pyritään ottamaan sisään makuu- ja olohuoneista ja poistamaan likaisiin tiloihin, eli vaatehuoneeseen, märkätiloihin ja keittiöön.

3.5.1 Korvausilma tiivisteiden ja rakenteiden läpi

Ennen vuotta 1980 rakennetuissa koneellisella poistoilmanvaihdoilla toimivissa kerrostaloissa on yleistä, että korvausilman saanti huoneistoon on toteutettu siten, että esimerkiksi ikkunan tiivisteestä on poistettu pala, jota kautta korvausilmaa saadaan asuntoon [36, s. 16]. Osa korvausilmasta saadaan myös suoraan rakenteiden läpi vuotoilmana, jolloin ulkoilman saanti puhtaana asuntoon on sattumanvaraista [34, s. 15]. On tutkittu, että 30 cm:n pituisesta poistetun tiivisteiden raosta voidaan tuoda korvausilmaa huoneistoon noin $3 \frac{1}{s}$ [37, s. 5–6]. Ilmavirtojen kasvaessa onkin pohdittava, ovatko korvausilmareitit uudessa järjestelmässä enää riittävät ja toisaalta halutaanko korvausilman saanti huoneiston eri osiin edelleen pitää suunnittelemattomana.

3.5.2 Korvausilmaventtiilit

Tuloilman saanti huoneistoon voidaan toteuttaa korvausilmaventtiileillä. Markkinoilla on saatavilla useita erilaisia vaihtoehtoja, joissa on erilaisia ominaisuuksia. Korvausilmaventtiilit voivat olla esimerkiksi omavoimaisella termostaatilla toimivia, jolloin ne säätyvät ulkoilman lämpötilan mukaan. Myös suodattimien ja äänenvaimentimien liittäminen venttiileihin on mahdollista, jolloin ilmanlaatu asunnossa nousee ja mahdollista ulkoa päin tulevaa melua saadaan vaimennettua. Kuvassa 14 on Dir-air Oy:n valmistama korvausilmaventtiili.

Ongelmana, niin korvausilmaventtiileissä kuin muissakin vastaavissa ratkaisuissa, on ilman saanti tilaan vedottomasti. VTT:n tekemässä tutkimuksessa vuodelta 1993 todetaan, että oikein sijoitetun korvausilmaventtiilin kautta on mahdollista tuoda huoneistoon vedottomasti ilmaa $8 \frac{1}{s}$. Tällöin tuloilmavirran nopeus pitää olla $2-3 \frac{m}{s}$. [38, s. 11.] Tätä nykyä markkinoilla on useita erilaisia vaihtoehtoja korvausilmaventtiileiksi, joissa luvataan jopa yli $10 \frac{1}{s}$ virtaamia vedottomasti.

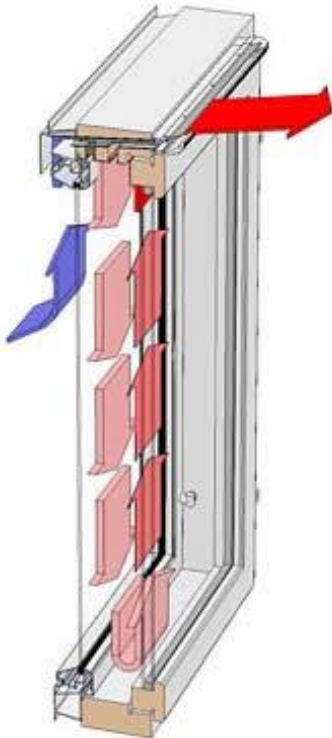


Kuva 14. Air in -tuloilmaventtiili [39].

3.5.3 Rakoventtiili ja tuloilmaikkuna

Rakoventtiileillä tarkoitetaan yleensä venttiiliä, joka asennetaan ikkunan karmin yhteyteen, josta ilma pääsee suoraan venttiiliin kautta sisälle. Vanhoissa ikkunoissa tämä tarkoittaa, että karmiin jyrsitään aukko, johon rakoventtiili asennetaan. Pitää muistaa, että kaikkiin ikkunamalleihin ei rakoventtiileitä voida asentaa. Myös rakoventtiilejä on saatavilla termostaatilla, suodattimella sekä äänenvaimentimella.

Tuloilmaikkunassa karmissa oleva venttiili ohjaa ilman ikkunan välissä sen alaosaan, jossa se lämpöhäviöiden ja auringon säteilyn vaikutuksesta lämpenee. Tämän jälkeen lämmennyt ilma ohjautuu sisälle. Kuvassa 15 on esitetty tuloilmaikkunan toimintaperiaate. Myös tuloilmaikkunaventtiili voidaan asentaa vanhaan ikkunaan, mutta sen soveltuvuus on aina tarkastettava tapauskohtaisesti. Esimerkiksi Biobe Oy:n ThermoMax-venttiilit (kuva 16) voidaan asentaa vanhoihin ikkunoihin ja niitä on saatavissa suodattimilla ja äänenvaimentimilla. Venttiilistä voidaan painerosta riippuen saada $2-8 \frac{1}{s}$ korvausilmaa. [40.]



Kuva 15. Tuloilmaikkunan toimintaperiaate [40].



Kuva 16. ThermoMax-tuloilmaikkunaventtiili [40].

4 Kaukolämpökeskus ja lämmitysjärjestelmä

Poistoilmasta saatava energia ei yksistään riitä kattamaan koko rakennuksen lämmitysenergian tarvetta. Siksi PILP-järjestelmä tarvitsee rinnalleen aina päälämmitysjärjestelmän, jolla voidaan kattaa loput kiinteistön tarvitsemasta lämmitysenergiasta. Tästä syystä hybridijärjestelmissä suuri osa suunnittelusta liittyykin myös päälämmitysjärjestelmän suunnitteluun, vaikka kohteessa käytettäisiinkin hyväksi vanhaa lämmönjakokeskusta.

Kaukolämpösuunnittelussa pyritään aina mahdollisimman suureen jäähtymään, koska tällä on merkittävää vaikutusta mm. kaukolämmön pumppauskustannuksiin, sekä myös kaukolämmön jakelusta aiheutuviin lämpöhäviöihin. Kaukolämmön paluuvesi pyritään aina saamaan mahdollisimman matalalle lämpötilatasolle, koska jo pienetkin muutokset verkoston paluueden lämpötilassa vaikuttavat energianyhtiön savukaasujen lämmöntalteenoton tehokkuuteen. Tästä syystä energialaitokset ovatkin erittäin tarkkoja siitä, miten erilaiset kytkennät vaikuttavat paluueden lämpötilaan. Mitoituksen perusteena tulee aina olla mahdollisimman hyvä jäähtymä, eikä rinnakkaiskytkennät saa vaikuttaa paluueden lämpötilaan. [41, s. 11; 42, s. 12, s. 56, s. 82.]

PILP-järjestelmä voidaan liittää kaukolämpökeskukseen usealla eri kytkentätavalla. Kytkentätavalla voidaan suuresti vaikuttaa PILP-järjestelmästä saatavaan lämmitysenergiaan ja sitä kautta sen kannattavuuteen. Koska kytkennät vaikuttavat mm. kaukolämmön jäähtymään, joudutaan se suunnittelussa ottamaan huomioon. Se mikä PILP-järjestelmän kannalta olisi paras mahdollinen kytkentä, on suurimmassa osassa tapauksia huono kytkentä kaukolämmön paluueden jäähtymisen kannalta. Siksi poistoilman lämmöntalteenoton liittämistä kaukolämpökeskukseen joudutaan suunnittelussa tekemään kompromisseja, joilla huomioidaan kummankin järjestelmän erityispiirteet. [41, s. 3, s. 27.]

Tässä insinööriyössä keskitytään energiateollisuuden laatiman K1:n mukaiseen hybridijärjestelmän rinnakkaiskytkentään ja sen suunnittelussa huomioon otettaviin asioihin.

4.1 Teoriaa

4.1.1 Sarjaan- ja rinnankytkentä

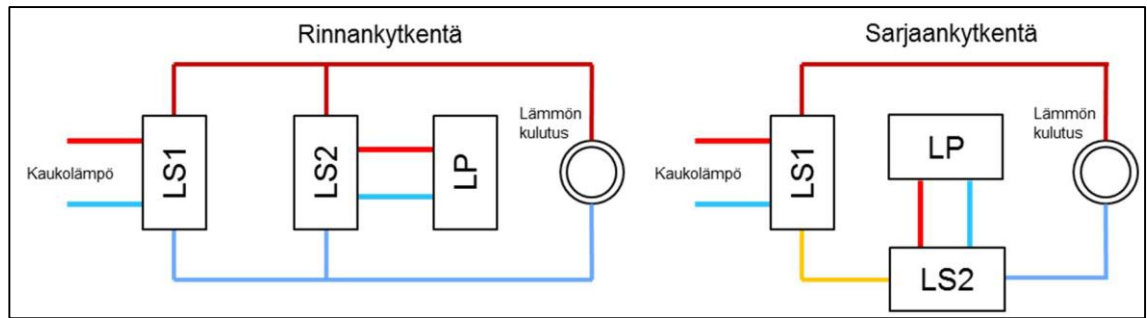
Hybridijärjestelmien kytkennät alajakokeskukseen jaetaan pääasiassa kahteen ryhmään.

Rinnakkaiskytkennässä PILP-järjestelmä liitetään alajakokeskuksen rinnalle, jolloin mahdollistetaan se, ettei paluueden lämpötila nouse. Tällöin lämpöpumpulla lämmitetty vesi johdetaan lämmitysjärjestelmän menopuolelle, ohi alajakokeskuksen lämmönsiirtimen, jolloin pattereilta tullutta paluuvettä ei lämmitetä sen mennessä kaukolämpösiirtimen läpi. Lämmitysjärjestelmän vesi kierrätetään kaukolämpösiirtimen läpi vain, jos poistoilmapumpun teho ei riitä kattamaan lämmitysverkoston energiantarvetta.

Sarjaankytkennässä taas patteriverkoston paluuvesi kierrätetään ensin PILP-järjestelmän läpi, jossa paluuvettä lämmitetään. Tämän jälkeen esilämmitetty vesi johdetaan paluuputkea pitkin alajakokeskuksen siirtimelle, jossa se tarvittaessa priimataan sillä hetkellä tarvittavaan lämpötilaan. Koska kaukolämpövesi ei voi jäähtyä alle PILP-järjestelmän lämmittämän veden, on seurauksena kaukolämmön paluueden lämpötilan nousu.

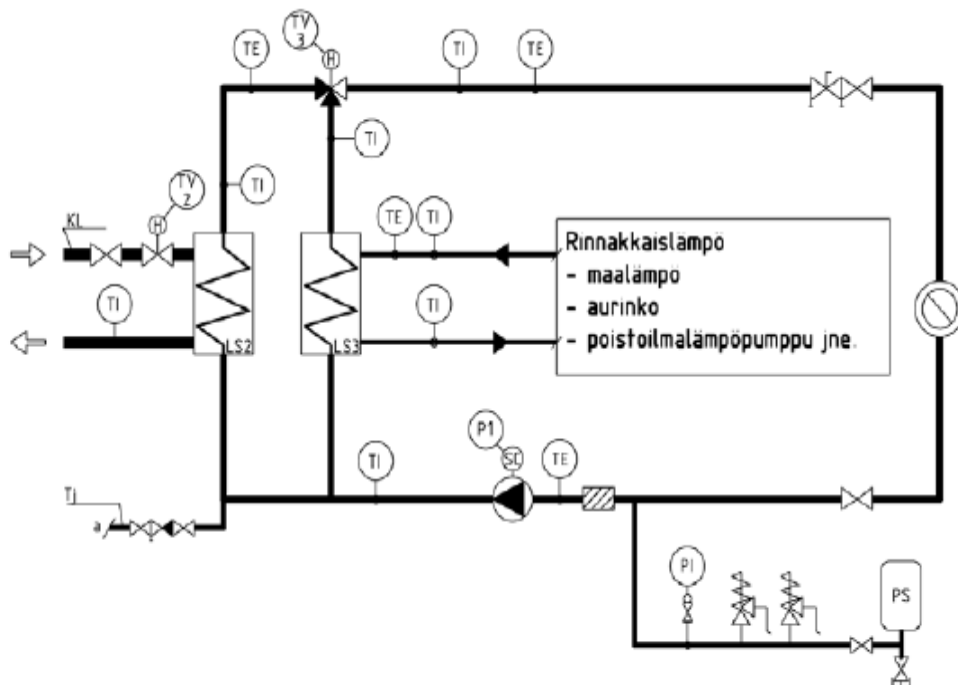
VTT teki vuonna 2015 selvityksen, jossa tutkittiin mm. hybridijärjestelmän vaikutusta paluueden lämpötilaan. Selvityksessä todetaan, että kaikissa kohteissa joissa paluueden lämpötila oli noussut, oli kyseessä lämmitysjärjestelmän sarjaankytkentä. [41. s. 27.] Tässä insinööriyössä keskitytään lämmitysjärjestelmän rinnankytkentään.

Kuvassa 17 on havainnollistettu rinnan- ja sarjaankytkennän periaatetta.



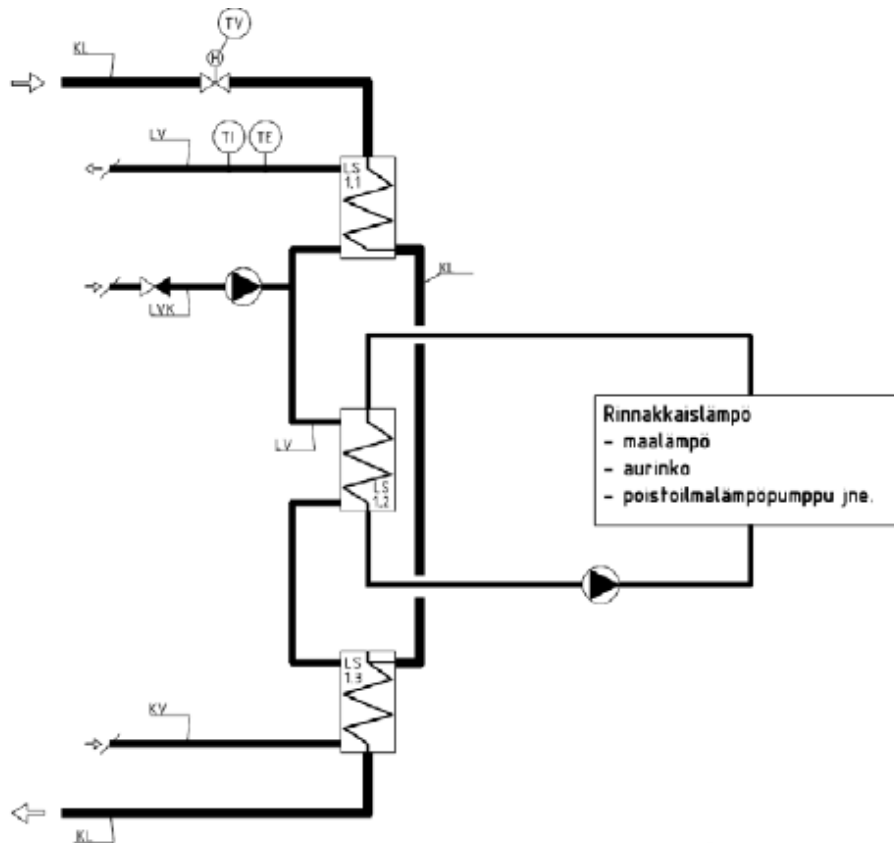
Kuva 17. Lämmitysjärjestelmän rinnan- ja sarjaankytkentä [41, s. 4].

Kuvassa 18 on esitetty Energiäteollisuus ry:n julkaiseman K1:n mukainen lämmitysjärjestelmän suositeltu kytkentä. Kyseessä on rinnakkaisytkentä. Kuten huomataan, sekoitetaan poistoilmalämpöpumpulla tuotettua lämmintä vettä tarvittaessa kaukolämpösiirtimen lämmittämän veden kanssa. Koska lämmitysjärjestelmissä verkostojen lämpötilat muuttuvat hitaasti, voidaan sekoitusta käyttää. Käyttövesijärjestelmissä taas lämpötilojen vaihtelut ovat nopeita, jolloin samalla kytkentäperiaatteella tehty kytkentä ei välttämättä kerkeä reagoida riittävän nopeasti lämpötilavaihteluihin. Tästä syystä PILP-kytkentä pyritään tekemään käyttövesipuolella sarjaankytkentänä.



Kuva 18. Lämmitysjärjestelmän rinnakkaisytkentä [42, s. 89].

Kuvassa 19 on esitetty K1:n sallima hybridikytkentä käyttövesijärjestelmään. Kuten huomataan, niin kyseessä on periaatteessa sarjaankytkentä. Kaukolämmön paluuveden lämpötilan nousu estetään siten, että lämmönsiirtimellä 3 esilämmitetään kylmävettä, jolloin paluuveden lämpötila saadaan tiputettua haluttuun tasoon. PILP-järjestelmä siis kytketään kahden kaukolämpösiirtimen väliin.



Kuva 19. Käyttövesijärjestelmän sarjaankytkentä [42, s. 89].

4.1.2 Lämmönsiirtimen konduktanssi

Lämpö siirtyy aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan lämpötilaan. Lämpötehon siirtyminen voidaan laskea kaavalla 17.

$$\phi = UA\Delta T \quad (17)$$

ϕ on siirtynyt lämpöteho, W

U on lämmönläpäisykerroin, $\frac{W}{Km^2}$

A on lämmönsiirtopinta-ala, m^2

ΔT on lämpötilaero, °C tai K.

Lämmönläpäisykerroimen ja pinta-alan tulosta käytetään myös termiä konduktanssi. Lämmönsiirtimissä lämpö ei siirry aineesta toiseen lineaarisesti, vaan lämmön siirtyminen täytyy laskea logaritmista lämpötilaeroa käyttäen. Tällöin tehon kaava voidaan ilmaista myös muodossa

$$\phi = G\theta_{ln}. \quad (18)$$

G on UA , eli lämmönsiirtimen konduktanssi, $\frac{W}{K}$

θ_{ln} on ensiö- ja toisipuolen virtaamien logaritminen lämpötilaero, °C tai K.

Koska konduktanssi on lämmönläpäisykerroimen ja pinta-alan tulo, kuvastaa se silloin lämmönsiirtimen fyysistä kokoa. Mitä isompi konduktanssi on, sitä huonompi lämmönläpäisykerroin sillä on, tai vastaavasti siinä on isompi lämmönsiirtopinta-ala. Siirtimen konduktanssi kertoo, kuinka suuren tehon siirrin pystyy siirtämään yhtä astetta kohden.

Logaritminen lämpötilaero voidaan laskea kaavalla 19.

$$\theta_{ln} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln \frac{\theta_1}{\theta_2}} \quad (19)$$

θ_1 on ensiö- ja toisiopuolen menovesien lämpötilaero, °C tai K

θ_2 on ensiö- ja toisiopuolen paluuvesien lämpötilaero, °C tai K.

4.2 Lämmitys- käyttövesiverkoston kaukolämpösiirtimet

4.2.1 Lämmitysjärjestelmä

Koska lämpöpumpun avulla tuotetaan osa lämmitysverkoston energiasta, on lämmönsiirtimeltä vaadittava laskennallinen teho PILP-järjestelmän asennuksen jälkeen pienempi kuin entisessä tilanteessa. Esimerkiksi, mikäli lämpöpumpulla tuotettu teho on 30 kW, ja lämmitysverkoston tarvitsema teho on 200 kW, jää lämmönsiirtimeltä vaadittavaksi tehoksi 170 kW. Huomioitavaa tietenkin on se, että riippuen lämmitysjärjestelmän mitoituslämpötiloista, ei kaikissa tilanteissa voida mitoituspakkasella lämpöpumpulla tuottaa lämmitettyä vettä lämmitysjärjestelmään.

PILP-järjestelmän lisäyksen jälkeen kaukolämpösiirtimen mitoituslämpötilat voivat muuttua toisiopuolen osalta. Mikäli kiinteistön lämmitysverkosto on niin sanottu 70/40-verkosto, on kaukolämpösiirtimen menoveden lämpötila mitoitusilanteessa ollut +70 °C ja paluueden lämpötila +40 °C. PILP-järjestelmän asennuksen jälkeen täytyy siirtimellä nostaa veden lämpötila yli +70 °C:n, jotta sekoituksen jälkeenkin pattereille menevä vesi olisi +70 °C. Esimerkkilaskelmasta voi huomata miten siirtimen mitoituslämpötilat muuttuvat PILP-järjestelmän asennuksen jälkeen.

Esimerkkitapauksessa lähtötietoina käytetään seuraavia arvoja:

- Lämmitysverkoston tarvitsema teho on 200 kW.
- Siirtimen asteisuus on 3 °C.
- Lämmitysverkoston mitoituslämpötilat ovat 70/40 °C.
- Kaukolämpöverkoston mitoituslämpötilat ovat 115/43 °C.
- PILP-järjestelmän lämmitysverkoston mitoituslämpötilat ovat 45/35 °C.
- PILP-järjestelmän antama teho lämmitysverkostoon on 30 kW.

Koska tässä tapauksessa lämmitysverkoston lämpötiloja ei muuteta, saadaan lämmitysverkoston halutuksi kokonaisvirtaamaksi $1,60 \frac{1}{s}$ ja lämpöpumpulta tulevaksi virtaamaksi $0,72 \frac{1}{s}$. Jotta verkostoon saadaan oikea virtaama, tulee lämmönsiirtimeltä tulla verkostoon vettä

$$1,60 \frac{1}{s} - 0,72 \frac{1}{s} = 0,88 \frac{1}{s}.$$

Koska verkostoon halutaan menevän +70-asteista vettä, niin tällöin lämpöpumpun lämmitämään +45-asteiseen veteen joudutaan sekoittamaan kaukolämpösiirtimen tuottamaa vettä, jonka lämpötila on yli +70 °C. Siirtimeltä tulevan veden lämpötila voidaan laskea, kun tiedetään, mikä siirtimeltä tarvittava uusi teho tulee olla. Siirtimeltä vaadittava teho on

$$200 \text{ kW} - 30 \text{ kW} = 170 \text{ kW}.$$

Siirtimen toisiopuolen uusi mitoituslämpötilaero on

$$\frac{170 \text{ kW}}{4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} * 0,88 \frac{1}{s} * 1 \frac{\text{kg}}{\text{l}}} = 46,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Tällöin menoveden uudeksi lämpötilaksi saadaan

$$46,2 \text{ } ^\circ\text{C} + 40 \text{ } ^\circ\text{C} = 86,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Tähän lämpötilaan lämmönsiirtimen täytyy toisiopuolen menoveden lämpötila nostaa mitoitusilanteessa. Lämmitysjärjestelmän paluueden lämpötila ei muutu PILP-järjestelmän asennuksen yhteydessä.

Tässä esimerkissä lämpöpumpun tuottamana menoveden lämpötilana on käytetty +45 °C, mikä on poistoilmalämpöpumpuille yleinen lämpötila. Mikäli lämmitysverkoston toimintalämpötilat mitoitusilanteessa ovat korkeammat, on huomattava, että lämpöpumpulla ei välttämättä voida ajaa lämmitysverkostoon vettä ollenkaan kovimmilla pakkasjaksoilla. Esimerkiksi hyvin yleisesti käytetyssä 80/60-verkostossa on paluueden lämpötila mitoitusilanteessa +60°C, joten tällöin +45-asteisesta lämpöpumpun tuottamasta vedestä ei ole hyötyä lämmityksessä.

Mikäli lämmitysverkoston meno- ja paluuesikäyrän ajatellaan muuttuvan lineaarisesti, voidaan edellisen esimerkin lämpöpumpulla tuottaa 60/80-verkostossa riittävän lämmintä vettä lämmitysverkostoon, kun ulkolämpötila on alimmillaan –8,8 °C. Todellisuudessa lämmityskäyrän muoto haetaan kohdekohtaisesti, jolloin käyrä ei ole

täysin lineaarinen. Kun lämmitysverkostoon ei ole enää kannattavaa sekoittaa PILP-järjestelmän vettä, voidaan lämpöpumpun tuottama vesi hyödyntää käyttöveden lämmityksessä.

Vaikka PILP-järjestelmän asentamisen jälkeen kaukolämpösiirtimeltä ei mitoitustilanteessa vaadittaisikaan yhtä paljon tehoa kuin ennen, suositellaan, että mitoitus tehtäisiin rakennuksen mitoitustilanteen täydelle teholle toimintavarmuuden takaamiseksi. Toisaalta useissa tapauksissa tilanne on se, että mitoituspakkasella lämpöpumpulla ei voida tuottaa energiaa lämmitysverkostoon ollenkaan, jolloin kaukolämpösiirrin pitää mitoittaa täydelle teholle jo senkin vuoksi. Myös energialaitoksilla on omia ohjeistuksiaan mitoitukseen. Esimerkiksi Helen Oy:n mukaan ympäristöministeriön asetuksessa 4/13 määritetään, että lämmitysjärjestelmän lämmönsiirrin on mitoitettava kiinteistön kokonaistehontarpeen mukaan mitoitustilanteessa [43, s. 2].

4.2.2 Käyttövesijärjestelmä

Koska PILP-järjestelmällä ajetaan talviolosuhteissa ensisijaisesti lämmintä vettä lämmitysverkostoon, mitoitetaan kaukolämpösiirtimet lämpimän veden mitoitusvirtaaman mukaisesti täysteholle. Kun PILP-järjestelmä liitetään käyttövesiverkostoon K1:n mukaisen suosituksen tavoin, tulee kylmän veden lämmitykseen käytettävien siirtimien määräksi kolme kappaletta. Energiateollisuus ry:n laatimassa kaukolämpölaitteistoja koskevista määräyksistä ja ohjeista ei ole hybridijärjestelmän eri siirtimille erikseen annettu mitoituslämpötiloja. Taulukosta 14 nähdään K1:n antamat mitoituslämpötilat käyttövesiverkostolle.

Kun käyttövesisiirtimien mitoituslämpötiloja suunnitellaan, täytyy ensimmäisenä tarkastaa mahdolliset kyseisen paikkakunnan energialaitoksen antamat ohjeistukset siirtimien mitoituksista. Esimerkiksi Helsingissä toimiva Helen Oy määrittelee, että kuvan 19 mukaisten siirtimien mitoitus tehdään siten, että käyttövesisiirtimet 1.1 ja 1.3 mitoitetaan 100 %:n täysteholle. Tehojen suhteet suunnitellaan siten, että kummallekin siirtimellä kuormitus on 50 % mitoitustehosta ja mitoitusvirtaamalla kaukolämmön paluueden täytyy jäähtyä +20 °C:seen. Mitoitusteho lasketaan taulukon 14 arvoilla sekä lämpimän veden mitoitusvirtaamalla. [43, s. 1.]

Taulukko 14. Käyttövesisiirtimien mitoituslämpötilat. Rakennusten kaukolämmitys, määräykset ja ohjeet, K1 [42, s. 8].

	Lämmönsiirtimien mitoituslämpötilat °C			
	Ensiö		Toisio	
	Tulo	Paluu	Tulo	Paluu
Käyttöveden lämmönsiirtimet	70	20 (max)	10	58

Myös Fortumilta löytyy oma ohjeistuksensa käyttövesisiirtimien mitoitukselle. Fortumilla tehojen suhteita ei ole määritelty, kuten Helenillä, mutta siirtimelle on annettu valmiit mitoituslämpötilat käytettäessä K1:n mukaista hybridikytkentää. Fortumilla rinnakkaissiirtimen tilalla voi käyttää myös muita lämmönsiirtotapoja. Taulukossa 15 on esitetty Fortumin laatima ohjeistus käyttövesisiirtimien mitoituslämpötiloista. Mitoituslämpötilat on sidottu lämmitysverkoston toimintalämpötilojen mukaan [44].

Taulukko 15. Käyttövesisiirtimien mitoituslämpötilat Fortum Oyj:n hybridikeskuksien ohjeistuksessa [44].

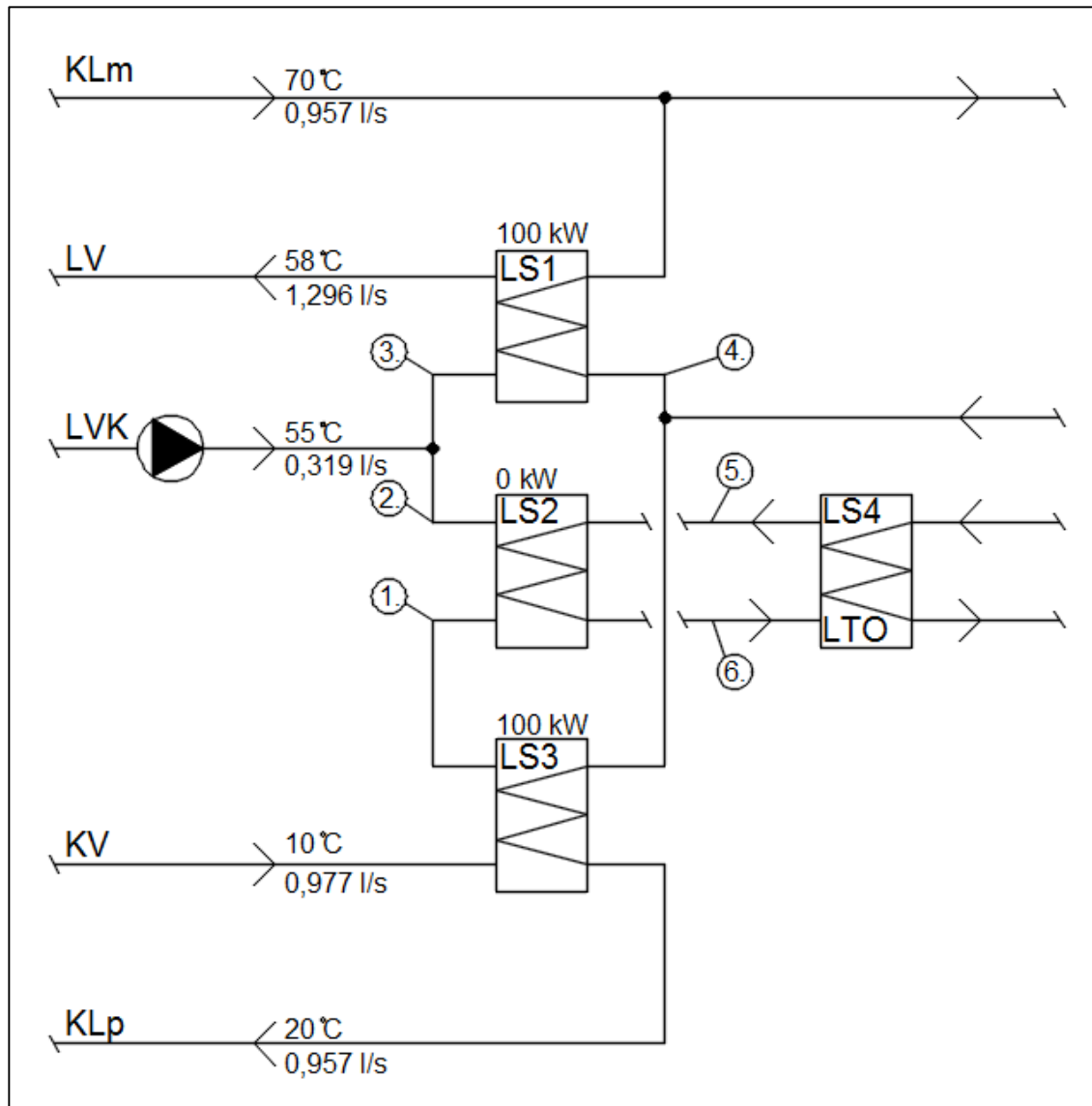
40-70 verkossa	LS 1.3. 45-20 / 10-34	LS 1.1. 70-45 / 34-58
50-80 verkossa	LS 1.3. 45-20 / 10-38	LS 1.1. 70-45 / 38-58
60-80 verkossa	LS 1.3. 45-20 / 10-43	LS 1.1. 70-45 / 43-58

Mikäli energialaitoksella on omia ohjeistuksia siirtimien mitoituksiin, kuten Fortumilla ja Helenillä, pitää hybridisiirtimen toimintalämpötilat suunnitella tarkasti, jotta ne sopivat yhteen energialaitoksen antaman ohjeistuksen kanssa. Myös siirtimien mitoittaviin tilanteisiin pitää kiinnittää huomiota. Seuraavasta esimerkistä huomataan, että siirtimien mitoittava tilanne voi poiketa toistensa osalta. Kuvassa 20 on esitetty esimerkin lähtötilanteen arvot, kun poistoilman lämmöntalteenotolla ei tuoteta energiaa käyttövesiverkoston.

Laskelmassa käytetyt lähtötiedot.

- Kesätilanne.
- LS1 ja LS3 tehajakauma 50 % 50 %.

- Lvk-kiertojohtossa tarvittava teho 4 kW.
- Lvk:n ja lv:n tehontarve yhteensä 200 kW.
- PILP:n tuottama teho 35 kW.
- Siirtimen LS2 asteisuus on 1 °C.



Kuva 20. Käyttöveden alajakokeskuksen lähtöarvot täystehomitoituksella, kun LTO-laitteelta saatavaa tehoa ei oteta huomioon.

Lasketaan pisteen 4 ja kaukolämmön menoveden lämpötilaero.

$$\frac{100\text{kW}}{4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} * 0,957 \frac{\text{l}}{\text{s}} * 1 \frac{\text{kg}}{\text{l}}} = 25^{\circ}\text{C}.$$

Tällöin pisteen 4 lämpötila on

$$70^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C} = 45^{\circ}\text{C}.$$

Samalla tavoin laskettuna pisteen 3 lämpötilaksi saadaan 39,54 °C.

Nyt voidaan laskea kaavoilla 19 ja 18 siirtimen LS1 logaritminen lämpötilaero ja konduktanssivaatimus, kun PILP ei ole käytössä.

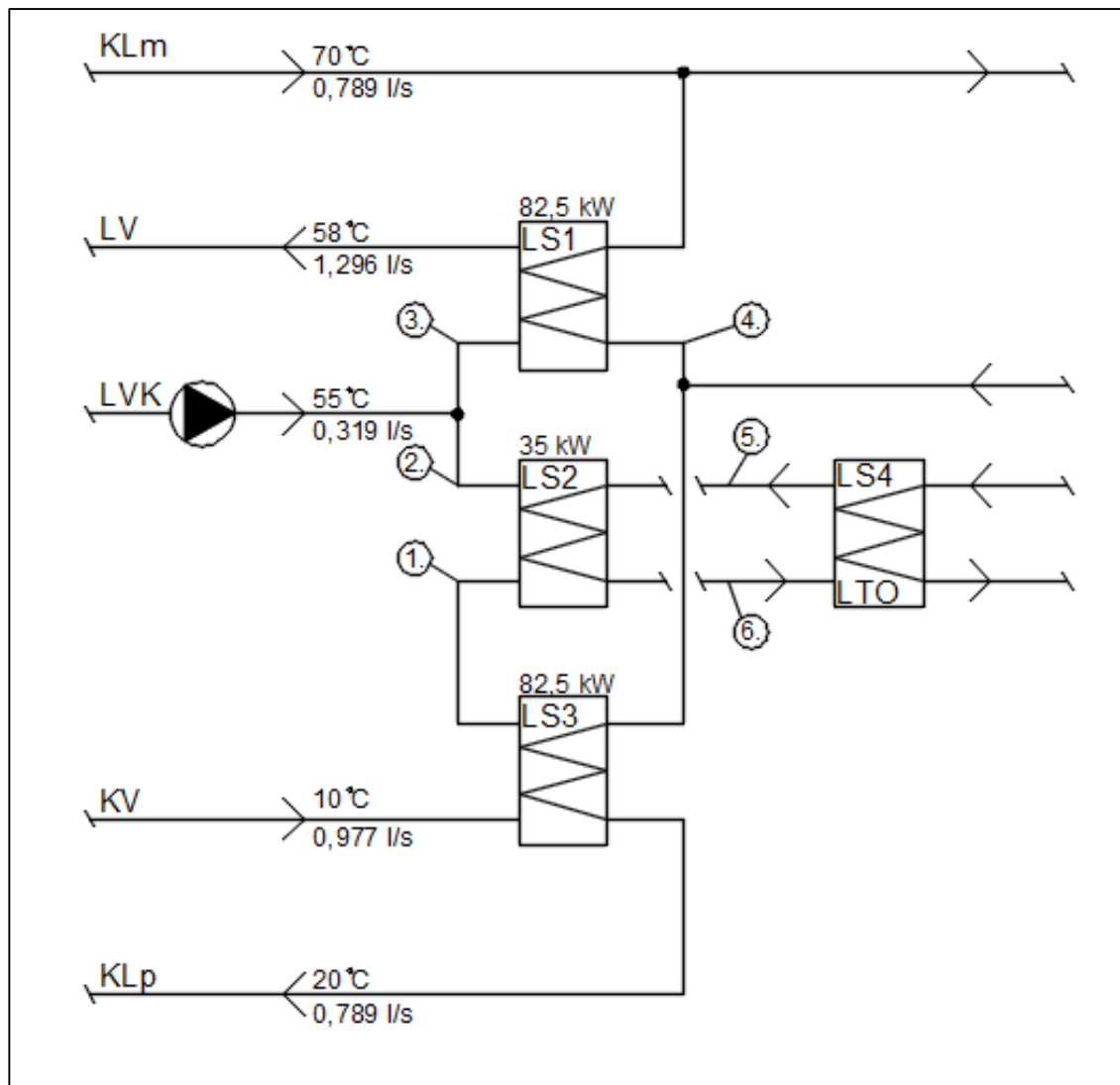
$$\theta_{ln} = \frac{(70^{\circ}\text{C} - 58^{\circ}\text{C}) - (45^{\circ}\text{C} - 39,54^{\circ}\text{C})}{\ln\left(\frac{70^{\circ}\text{C} - 58^{\circ}\text{C}}{45^{\circ}\text{C} - 39,54^{\circ}\text{C}}\right)} = 8,31^{\circ}\text{C}.$$

Kaavaa 18 hyödyntäen saadaan siirtimelle LS1 konduktanssivaatimukseksi

$$\frac{100\text{kW}}{8,31^{\circ}\text{C}} = 12,0 \frac{\text{kW}}{^{\circ}\text{C}}.$$

Koska mitoitustilanteessa ei lämmöntalteenotosta oteta energiaa on pisteen 2 lämpötila sama kuin pisteen 1. Pisteen 1 lämpötila voidaan laskea samoin kuin edellä, jolloin sen lämpötilaksi saadaan 34,49 °C, josta voidaan laskea siirtimen 3 konduktanssivaatimukseksi 9,8 $\frac{\text{kW}}{^{\circ}\text{C}}$.

Lasketaan siirtimien konduktanssivaatimukset mitoitusvirtaamalla, kun poistoilman lämmöntalteenotosta saadaan lisätehoa 35 kW. Lähtötilanteen arvot näkyvät kuvassa 21. Lämpimän veden virtaama ja kokonaistehontarve on sama kuin tilanteessa 1.



Kuva 21. Käyttöveden alajakokeskuksen lähtöarvot käyttöveden mitoitusvirtaamalla, kun LTO-laitteelta saatu teho hyödynnetään.

Lasketaan siirtimien 1 ja 3 konduktanssivaatimukset tilanteessa, jossa LTO:lta saadaan hyödyksi energiaa.

Pisteet 1, 3 ja 4 voidaan laskea samalla tavoin kuin tilanteessa 1. Tällöin pisteille saadaan tilanteessa 2 seuraavat arvot:

- Piste 1 on 30,20 °C.
- Piste 3 on 42,77°C.
- Piste 4 on 45 °C.

Logaritmiset lämpötilaerot ja konduktanssit lasketaan samalla tavoin, kuin tilanteessa 1. Logaritmisiksi lämpötilaeroiksi saadaan siirtimelle LS1 5,81 °C ja siirtimelle LS3 12,24 °C. Vastaavasti konduktanssivaatimukseksi siirtimelle LS1 saadaan $14,2 \frac{\text{kW}}{^\circ\text{C}}$ ja siirtimelle LS3 $6,7 \frac{\text{kW}}{^\circ\text{C}}$. Kuten taulukosta 16 voidaan huomata, on siirtimen 1 mitoittava tilanne silloin, kun PILP-laitteistolta hyödynnetään talteen saatua energiaa. Vastaavasti huomataan, että siirtimen 3 mitoittava tilanne on silloin, kun LTO:n energiaa ei hyödynnetä.

Kuten huomataan, siirtimen LS2 toisiopuolen lämpötiloihin ja sitä kautta ensiöpuolen lämpötiloihin vaikuttaa muun muassa se, miten tehojakaumat siirtimille 1 ja 3 jakautuvat. Mikäli siirtimen LS2 ensiöpuolelle määritettäisiin lämpötilat huomioimatta muita seikkoja, vaikuttaisi se siirtimien LS1 ja LS3 tehojakaumaan, sekä niiden lämpötiloihin huomattavasti.

Mikäli siirtimen LS2 lämpötilat halutaan selvittää, täytyy pisteessä 2 tarvittava lämpötila laskea pisteen 3 sekä lämpimän käyttöveden tilatietojen avulla. Jotta siirtimien tehojakaumavaatimukset täyttyvät, joudutaan pisteen 2 lämpötila laskemaan kaavalla 20.

$$t_2 = \frac{(t_3(qv_{lvk} + qv_{mitt.}) - qv_{lvk}t_{lvk})}{qv_{mitt.}} \quad (20)$$

t_2 on pisteen 2 lämpötila, °C

t_3 on pisteen 3 lämpötila, °C

t_{lvk} on lämpimän kiertoveden paluulämpötila, °C

qv_{lvk} on lämpimän kiertoveden virtaama, $\frac{1}{s}$

$qv_{mitt.}$ on lämpimän käyttöveden mitoitusvirtaama, $\frac{1}{s}$.

Pisteen 2 lämpötila on kaavalla 20 laskettuna

$$\frac{(42,77^{\circ}\text{C}(0,319\frac{1}{\text{s}}+0,977\frac{1}{\text{s}})-0,319\frac{1}{\text{s}}*55^{\circ}\text{C})}{0,977\frac{1}{\text{s}}} = 38,78^{\circ}\text{C}.$$

Koska lähtöarvoissa siirtimen LS2 asteisuudeksi määriteltiin 1 °C, niin ensiöpuolen paluulämpötilaksi pisteessä 6 määräytyy 31,20 °C. Ensiöpuolen menolämpötila pisteessä 5 voidaan valita vapaasti, muistaen kumminkin, että korkeampi menoveden lämpötila tarkoittaa huonompaa lämpöpumpun lämpökerrointa.

Taulukko 16. Lämmönsiirtimien LS1 ja LS3 mitoittava tilanne.

LTO:n teho hyödynnetään	Siirtimen teho kW	Piste 1 °C	Piste 2 °C	Piste 3 °C	Piste 4 °C	G _{vaatimus} LS1 kW/°C	G _{vaatimus} LS3 kW/°C
ei	100	34,49	34,49	39,54	45	12,0	9,8
kyllä	82,5	30,20	38,78	42,77	45	14,2	6,7

Mitoittava tilanne =

Mikäli LS1 mitoitettaisiin niin, että sen konduktanssi olisi $12,0 \frac{\text{kW}}{^{\circ}\text{C}}$, siitä saatava teho PILP-laitteiston ollessa käytössä olisi

$$12 \frac{\text{kW}}{^{\circ}\text{C}} * 5,81^{\circ}\text{C} = 69,7 \text{ kW},$$

kun tarve olisi 82,5 kW. Jotta lämminvesiverkostoon menevän veden lämpötila pysyy asetusarvossa, nostaa kaukolämpöveden säätöventtiili virtaamaa, jolloin tehoa saadaan siirtimestä enemmän. Tällöin haittapuolena on, että kaukolämmön paluueden lämpötila ei pysy halutussa +20 °C:ssa.

4.3 Kiinteistön olemassa oleva lämmönjakokeskus

4.3.1 Huomioitavat asiat

Kun PILP-järjestelmää suunnitellaan vanhaan rakennukseen, tulee vastaan kysymys siitä, onko järkevää asentaa järjestelmä vanhan alajakokeskuksen yhteyteen, vai

uusitaanko myös se saneerauksen aikana. Tätä asiaa joudutaan tarkastelemaan kohdekohtaisesti. Mikäli vanha keskus halutaan säilyttää, täytyy ainakin seuraaviin asioihin kiinnittää huomiota.

Keskuksen jäljellä oleva käyttöikä

Tyypillisesti alajakokeskuksen eri osien tekninen käyttöikä on noin 20 vuotta [33. s. 13–18]. PILP-järjestelmien takaisinmaksuajat ovat usein 6–10 vuoden välillä, jolloin vanhan keskuksen on kestettävä vähintään tämän ajanjakson ajan, jotta takaisinmaksuaika ei pitenisi. Toki suotavaa olisi, että alajakokeskusta ei tarvitsisi uusi koko PILP-laitteiston elinkaaren aikana.

Siirtimen muutostyöt

Vanha keskus ei todennäköisesti sellaisenaan sovi yhteen uuden järjestelmän kanssa. Vanhan lämmityssiirtimen mitoitus ei välttämättä sovellu uuteen järjestelmään, jolloin se voidaan joutua uusimaan. Mikäli PILP-järjestelmää halutaan hyödyntää käyttövesipuolella, joudutaan myös sinne lisäämään uusia siirtimiä. Koska kaukolämmön säätöventtiilien pitää pystyä toimimaan erilaisilla säätöalueilla kuin ne on alun perin mitoitettu, on niiden vaihtaminen ja uusien venttiilien lisääminen todennäköistä.

Lämmitysjärjestelmän kiertovesipumppu

Koska lämmitysjärjestelmään lisätään uusia osia, pitää kiertovesipumpun nostokorkeus tarkastaa, jotta se kykenee toimimaan myös uudessa järjestelmässä.

Automaatio

Poistoilmanlämmöntalteenottojärjestelmissä tarvitaan paljon automatiikkaa, jonka täytyy toimia alajakokeskuksen kanssa. Todennäköistä on, että vanhan keskuksen automaatio joudutaan täysin uusimaan.

Tilan tarve

Koko järjestelmän tilantarve on vanhan keskuksen kanssa isompi kuin uudella keskuksella, joka on suunniteltu hybridikäyttöön.

4.3.2 Nykyisen alajakokeskuksen lämmityksen siirrin

Mikäli vanha alajakokeskus halutaan säilyttää, tulee suunnittelijan tarkastaa, että sen mitoitus on riittävä uuteen järjestelmään, koska se voi joutua tuottamaan verkostoon vettä korkeammalla lämpötilalla kuin vanhassa tilanteessa. Alla olevassa esimerkissä havainnollistetaan, miten kaukolämmön paluueden lämpötila muuttuu, mikäli kaukolämpösiirrin on mitoitettu väärin ja sitä ei ole huomioitu uuden laitteiston säädöissä.

Esimerkkitapauksessa lähtötietoina käytetään seuraavia arvoja:

- Lämmitysverkoston tarvitsema teho on 180 kW.
- Vanhan siirtimen teho entisillä mitoitusarvoilla on 180 kW.
- Siirtimen asteisuus on 3 °C.
- Lämmitysverkoston mitoituslämpötilat ovat 70/40 °C.
- Kaukolämpöverkoston mitoituslämpötilat ovat 115/43 °C.
- PILP-järjestelmän lämmitysverkoston mitoituslämpötilat ovat 49/39 °C.
- PILP-järjestelmän antama teho lämmitysverkostoon on 30 kW.

Yllä olevista tiedoista voidaan laskea, että lämmitysverkoston tarvitsema virtamaa kyseisillä mitoituslämpötiloilla on $1,44 \frac{1}{s}$, ja lämpöpumpulta tulevaksi virtaamaksi saadaan $0,72 \frac{1}{s}$ ja näiden erotuksesta siirtimen virtaamaksi tulee $0,72 \frac{1}{s}$.

Siirtimeltä vaadittava teho saadaan lämmitysverkoston vaatiman tehon sekä PILP-järjestelmän tuottaman tehon erotuksesta, jolloin tehoksi saadaan 150 kW.

Tällöin siirtimen toisiopuolen uusi mitoituslämpötilaero on

$$\frac{150 \text{ kW}}{4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} * 0,72 \frac{1}{s} * 1 \frac{\text{kg}}{\text{l}}} = 49,8 \text{ °C.}$$

Siirtimen toisiopuolen menoveden uudeksi lämpötilaksi saadaan

$$49,8 \text{ °C} + 40 \text{ °C} = 89,8 \text{ °C.}$$

Kaavalla 19 voidaan laskea siirtimen logaritmiset lämpötilaerot uudessa ja vanhassa tilanteessa.

Vanha tilanne:

$$\theta_1 = 115 \text{ °C} - 70 \text{ °C} = 45 \text{ °C}$$

ja

$$\theta_2 = 43 \text{ °C} - 40 \text{ °C} = 3 \text{ °C}.$$

Tällöin logaritminen lämpötilaero vanhassa tilanteessa on

$$\theta_{ln} = \frac{(45 \text{ °C} - 3 \text{ °C})}{\ln \frac{45 \text{ °C}}{3 \text{ °C}}} = 15,5 \text{ °C},$$

ja vastaavasti uuden tilanteen logaritminen lämpötilaero samalla tavoin laskettuna antaa tuloksen 10,4 °C.

Nyt voidaan laskea, mikä on lämmönsiirtimen kyky siirtää lämpöä. Siirtimen konduktanssi on

$$\frac{180 \text{ kW}}{15,5 \text{ °C}} = 11,6 \frac{\text{ kW}}{\text{ °C}}.$$

Koska uudessa tilanteessa ensiö- ja toisiopuolen menolämpötilojen ero on huomattavasti pienempi, pitäisi siirtimen lämmönsiirtopinta-alaa kasvattaa, jotta siirtimen konduktanssi saataisiin uudelle halutulle tasolle.

Uudessa tilanteessa vaadittava konduktanssi olisi

$$\frac{150 \text{ kW}}{10,4 \text{ °C}} = 14,4 \frac{\text{ kW}}{\text{ °C}}.$$

Mikäli kaukolämmön ensipuolen arvoja ei muuteta vanhasta tilanteesta, voi siirrin tuottaa lämpötehoa mitoitustilanteessa

$$11,6 \frac{\text{kW}}{^{\circ}\text{C}} * 10,4 ^{\circ}\text{C} = 120,6 \text{ kW}.$$

Koska vaadittava teho on 150 kW, jää lämmönsiirtimen teho liian pieneksi. Mikäli tätä puutetta ei huomioida suunnittelussa, mitoitusulkolämpötiloilla siirtimen konduktanssi ei ole riittävällä tasolla. Tällöin on mahdollista, että ensiöpuolen paluulämpötila lähtee nousemaan, koska tehon puutetta paikatakseen kaukolämmön säätöventtiili lisää ensiöpuolen virtaamaa.

Itoimalla eri ensiöpuolen paluueden lämpötiloja siten, että uudessakin tilanteessa siirtimen konduktanssiksi saadaan entisen tilanteen $11,6 \frac{\text{kW}}{^{\circ}\text{C}}$, voidaan selvittää, miten ensiöpuolen paluueden lämpötila muuttuu. Itoinnin tuloksena saadaan, että paluueden lämpötila nousee $+45,6 ^{\circ}\text{C}$:seen. Tällöin paluueden lämpötila on noussut halutusta arvosta $2,6 ^{\circ}\text{C}$.

Esimerkin avulla nähdään, että oikeanlaisellakin kytkennällä voi kaukolämmön paluueden lämpötila nousta halutusta arvosta, mikäli sitä ei kompensoida muulla laitteistolla.

Esimerkkitalanteen laskut on tehty oletuksella, ettei vanhan siirtimen mitoituksessa ole ylimääräistä lämmönsiirtopinta-alaa. Toki tilanne voi olla todellisuudessa erilainen, mutta tämä pitää suunnittelijan tarkastaa tapauskohtaisesti.

Huomioitavaa on myös, että esimerkin tilanne voi käytännössä olla harvinainen siksi, että usein mitoitusulkolämpötiloilla poistoilmalämpöpumpulla lämmitettyä vettä ei siirretä lämmitysverkostoon tai tämä on suhteellisen vähäistä. Kun lämpöpumpun verkostoon siirtämää virtaamaa vähennetään, kaukolämpösiirtimen konduktanssivaatimus myöskin pienenee.

4.4 Kaukolämmön ensiöpuolen säätöventtiilit

Kaukolämpösiirtimien lämmitys- ja käyttövesiverkkoon tuottamaa tehoa säädellään ensiöpuolella olevilla säätöventtiileillä. Säätöventtiilien oikeanlainen mitoitus vaikuttaa suuresti toisiopuolen verkostojen toimintaan. Koko säätöjärjestelmä tulee suunnitella

siten, että K1:n mukaisiin säädön toimintavaatimuksiin päästään. Säätojärjestelmän tulee kaikissa käyttöolosuhteissa täyttää seuraavat vaatimukset [42, s. 14].

- Suurin pysyvä poikkeama asetusarvosta +/- 2 °C
Sallittu palautumisaika muutoksen alkuhetkestä siihen hetkeen, kun em. vaatimus täyttyy 2 minuuttia
- Suurin hetkellinen poikkeama asetusarvosta
lämmityksen säätöjärjestelmät +/- 5 °C
käyttöveden säätöjärjestelmät +7/-10 °C
muut säätöjärjestelmät +/-10 °C
- Sallittu jatkuva huojunta
käyttöveden säätöjärjestelmät +/-2 °C
muut säätöjärjestelmät +/- 0,5 °C

Säätoventtiileillä on suuri vaikutus edellä mainittuihin vaatimuksiin. Koska PILP-järjestelmä tuottaa lämmitys- ja käyttövesijärjestelmään osan niiden tarvitsemasta energiasta, vaihtelee säädettävä teho laajemmalla alueella kuin aiemmassa tilanteessa. Siksi voi olla tarpeen, että aiemman yhden säätöventtiilin sijaan voidaan joutua asentamaan kaksi venttiiliä. Myös energialaitoksien suhtautumien asiaan tulee tarkastaa, koska heillä on usein omia ohjeistuksia asian suhteen. Esimerkiksi Helen Oy vaatii, että lämmitys- ja käyttövesisiirtimille pitää olla kaksi säätöventtiiliä [43, s. 1–2].

Säätoventtiilit tulee mitoittaa siten, että niiden vaikutusaste säädettävään verkostoon on vähintään 0,5. Kahden säätöventtiilin tapauksessa pienempi venttiili mitoitetaan niin, että sen läpi ohjataan korkeintaan 30 % mitoitusvirtaamasta. [42, s. 15–16.]

4.5 Rakennuksen lämmitysverkosto

PILP-järjestelmän tarkoituksena on vähentää lämmitykseen kuluvaa energiaa ja saada sitä kautta säästöjä lämmityskustannuksissa. Usein kiinteistöissä on ennen perussäätöä korkeampi sisäilman lämpötila kuin olisi tarpeen. Vaikka poistoilmanlämmöntalteenoton kannalta olisikin parempi, että poistettavan ilman lämpötila olisi mahdollisimman korkea, ei huonelämpötiloja kannata pitää korkeampana kuin asumisviihtyvyyden kannalta on

tarpeen. Tästä syystä lämmitysverkoston perussäätö on hyvä pitää vaihtoehtona tehtävistä töistä, kun poistoilmanlämmöntalteenottojärjestelmän investointia mietitään. Perussäädöllä saadaan merkittäviä säästöjä energiakustannuksiin.

Lämpöpumput toimivat paremmalla lämpökertoimella silloin, kun lämmitettävä verkosto on niin sanottu matalalämpöverkosto. Käytännössä tällöin puhutaan lattialämmityksestä. Suurin osa vanhoista kerrostaloista on radiaattorilämmityksellä toimivia, ja niissä yleisimmät lämmitysverkoston toimintalämpötilat ovat:

- +80 °C /+60 °C
- +80 °C /+50 °C
- +70 °C/+40 °C.

Tavallisesti lämmitysjärjestelmien patterit ovat noin 20–30 % ylimitoitettu [45, s. 8], joten mikäli perussäätö aiotaan tehdä PILP-järjestelmän yhteydessä, kannattaisi suunnittelijan selvittää vaihtoehtoa, että verkoston mitoituslämpötiloja laskettaisiin. Rakennusvaiheessa verkoston patterit on mitoitettu siten, että ne antavat suunnitellun tehon huoneistoihin tietyillä verkoston lämpötiloilla. Mikäli patterit on mitoitettu tarkasti, eli ylimitoitusta ei ole, voi verkoston lämpötilojen muuttaminen olla mahdotonta.

Lämmityspatterit ovat yksi tapa siirtää lämpöä, eli ne ovat lämmönsiirtimiä, joten patterin antama teho lasketaan logaritmisesta lämpötilaeron mukaan. Kun tiedetään uuden ja vanhan tilanteen logaritmiset lämpötilat sekä patterin luovuttama teho entisessä tilanteessa, voidaan kaavalla 21 laskea patterin luovuttama teho uusilla mitoituslämpötiloilla.

$$\phi_2 = \frac{\phi_1 \theta_{ln2}^n}{\theta_{ln1}^n} \quad (21)$$

ϕ_1 on patterin luovuttama teho alkuperäisessä mitoituslämpötiloilla, W.

ϕ_2 on patterin luovuttama teho uusilla mitoituslämpötiloilla, W.

θ_{ln1} on logaritminen ylälämpötila alkuperäisillä mitoituslämpötiloilla, °C tai K.

θ_{ln2} on logaritminen ylälämpötila uusilla mitoituslämpötiloilla, °C tai K.

n on patterin lämmönluovutusekspONENTTI. Radiaattoreissa usein 1,3.

Taulukossa 17 on esitetty pattereiden huoneistoon luovuttaman tehon muuttumista, kun verkoston lämpötiloja muutetaan ja patterissa on ollut 20–30 %:n ylimitoitus. Taulukosta nähdään, että verkostojen muuttaminen voi olla mahdollista 80/60- ja 80/50-verkostoissa joissain tapauksissa. Taulukkoa katsoessa on hyvä huomata, että pienet, noin 50 W:n, tehovajaukset ovat usein käytännössä merkityksettömiä.

Taulukko 17. Pattereiden luovuttama teho lämpötilojen muuttuessa, 20–30 %:n ylimitoitus hyödyntäen.

Vanha verkosto, $T_{\text{sisä}}=23^{\circ}\text{C}$		Uusi verkosto 75/45, $T_{\text{sisä}}=21^{\circ}\text{C}$		Uusi verkosto 80/50, $T_{\text{sisä}}=21^{\circ}\text{C}$	
Lämpötilat, $^{\circ}\text{C}$	Patterin teho, W	20% ylimitoitus, W	30% ylimitoitus, W	20% ylimitoitus, W	30% ylimitoitus, W
80-60	500	448	486	533	577
80-50	500	539	584	-	-
80-60	1000	897	972	1066	1154
80-50	1000	1079	1169	-	-
80-60	1500	1345	1457	1589	1732
80-50	1500	1618	1753	-	-

Patterin teho riittämätön=

Mikäli lämmitysverkoston meno- ja paluuesikäyrät oletetaan lineaarisiksi, voidaan laskea, miten verkoston paluveden lämpötilan muutos vaikuttaa lämpöpumpulta tulevaan menoveteen suhteessa ulkoilman lämpötilaan. Paluveden lämpötila halutulla ulkolämpötilalla voidaan laskea suoran yhtälöstä interpoloimalla tai vaihtoehtoisesti voidaan käyttää hyväksi kolmion yhdenmukaisuutta. Suorakulmaisen kolmion yhdenmukaisuutta hyväksi käyttäen voidaan haluttu ulkolämpötila tietyllä verkoston veden lämpötilalla laskea kaavalla 22.

$$x_2 = \frac{-(x_1 - x_3)(y_2 - y_3)}{y_1 - y_3} + x_1 \quad (22)$$

x_1 on ulkolämpötila verkoston veden alimmalla lämpötilatasolla, $^{\circ}\text{C}$

x_2 on ulkolämpötila tietyllä verkoston veden lämpötilalla, $^{\circ}\text{C}$

x_3 on mitoitusulkolämpötila, $^{\circ}\text{C}$

y_1 on verkoston veden mitoituslämpötila, °C

y_2 on verkoston veden lämpötila tietyllä ulkolämpötilalla, °C

y_3 on verkoston veden alin lämpötilataso, °C.

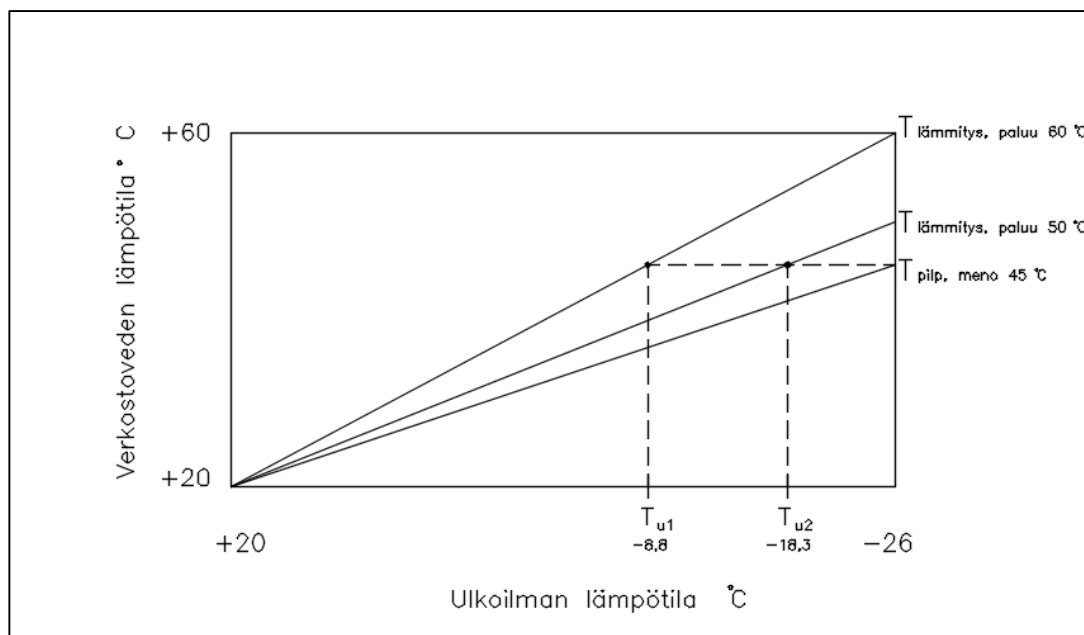
Kuvassa 22 on havainnollistettu, miten paluueden mitoituslämpötilan muutos +60 °C:sta +50 °C:seen vaikuttaa siihen, millaisella ulkolämpötilalla voidaan lämmitysjärjestelmään ajaa lämpöpumpulla lämmitettyä vettä. Ulkolämpötilat on ratkaistu kaavalla 22.

Kuvan T_{u1} ratkaistaan

$$T_{u1} = \frac{-(20^{\circ}\text{C} - (-26^{\circ}\text{C}))(45^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C})}{(60^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C})} + 20^{\circ}\text{C} = -8,8^{\circ}\text{C},$$

ja kuvan T_{u2} on samalla tavoin ratkaistuna $-18,3^{\circ}\text{C}$.

Laskujen vastauksista huomataan, että verkoston paluueden mitoituslämpötila vaikuttaa suuresti siihen, miten matalalla ulkolämpötilalla PILP-järjestelmällä lämmitettyä vettä voidaan ajaa verkostoon. 80/60-verkostossa voidaan lämpöpumpulla tuottaa lämmintä vettä lämmitysverkostoon alimmillaan $-8,8^{\circ}\text{C}$:n ulkolämpötilalla. Mikäli verkosto pystytään muuttamaan 80/50-verkostoksi, voidaan lämpöpumpulla tuottaa lämmitysenergiaa lämmitysverkostoon, kun ulkolämpötila on alimmillaan $-18,3^{\circ}\text{C}$.



Kuva 22. Lämmitysverkoston paluveden mitoituslämpötilan vaikutus PILP-laitteiston toisiopuolen menoveden lämpötilan ja ulkolämpötilan väliseen suhteeseen.

Jos 80/60- tai 80/50-verkoston lämpötiloja saataisiin tiputettua, voitaisiin lämpöpumpulla ajaa lämpöä verkostoihin matalammilla ulkolämpötiloilla kuin nykyisellään. Sillä olisi myös vaikutusta lämpöpumpun lämpökertoimeen sekä kaukolämmön paluueden alenemaan, joten se on varteenotettava vaihtoehto perussäädön yhteydessä. Toisaalta on huomattava, että esimerkin kaltainen tilanne tulee vastaan usein silloin, kun PILP-järjestelmä asennetaan olemassa olevan lämmönjakokeskuksen yhteyteen eikä käyttövesijärjestelmään haluta lisätä uusia siirtimiä, koska se vaatisi merkittävän isoja muutostöitä nykyiseen lämmönjakokeskukseen. Silloin lämpöpumpulla lämmitettyä vettä johdetaan lämmitysverkostoon mahdollisimman pitkään.

4.6 Varaaja

Poistoilmalämpöpumpujärjestelmään kuuluu yhtenä osana yleensä vesivaraaja. Varaajaa käytetään yleensä niin sanottuna puskurivaraajana, jonka tarkoitus on lisätä verkoston vesitilavuutta ja pidentää lämpöpumpun käyntijaksoja. Ilman puskurivaraajaa lämpöpumpun kompressorin toimisi lyhyitä jaksoja lyhyillä käyntiväleillä, jolloin kompressorin käyttöikä vähenisi merkittävästi. Varaajan ylimitoitusta pitäisi välttää, koska tällöin on vaarana, että varaajan lämpötilan muutos vie liian kauan, jolloin verkostoon ei saada halutun lämpöistä vettä sopivalla viiveellä [46, s. 29]. Varaajan

mitoituksessa suosituksena käytetään usein n. $20 \frac{1}{kW}$ [47], mutta tämä voi johtaa joissain kohteissa liian suureen varaajan tilavuuteen, joten mitoitus on tehtävä kohdekohtaisesti.

5 Yhteenveto

Työn tarkoituksena oli käydä läpi asioita, joihin poistoilman lämmöntalteenoton suunnittelussa tulee kiinnittää huomiota. Kuten työstä voi huomata, vaikuttaa PILP-järjestelmän asennus käytännössä koko kiinteistön talotekniikkaan, aina ilmanvaihdosta kaukolämpöön. Erilaisia suunnittelussa huomioitavia asioita on huomattava määrä, ja niiden soveltuvuus eri kohteisiin joudutaan usein miettimään tapauskohtaisesti.

Tässä insinööriyössä ei käyty PILP-järjestelmän automaatio- ja rakennussuunnitteluun liittyviä asioita läpi. Pitää kuitenkin muistaa, että varsinkin automaatiotyöt ovat erittäin tärkeä osa poistoilman lämmöntalteenottolaitteistoa. Väärin, tai huonosti, toimiva automaatiikka saattaa tehdä laitteistosta kannattamattoman, jolloin investointiin sijoitettua rahaa ei saada takaisin. PILP-järjestelmässä eri laitteisto-osia on paljon, ja näiden täytyy toimia optimaalisesti toistensa kanssa. Onkin suositeltavaa, että urakan valmistuttua laitteistoa valvotaan ja säädetään etähallintana sellaisen tahon toimesta, jolle laitteiston toiminta on tuttua. Usein PILP-laitteistoja myyvät yritykset tuottavat tämänkaltaisia palveluita.

Insinööriyössä ei otettu kantaa erilaisten ehdotuksien taloudellisesta kannattavuudesta. Olisikin mielenkiintoista tutkia, miten esimerkiksi lämmitysverkoston toimintalämpötilojen muutos vaikuttaisi laitteiston takaisinmaksuaikaan. Saataisiinko siitä niin paljon hyötyä, että tämänkaltainen muutos olisi järkevää toteuttaa. Tätä kannattaisi selvittää enemmänkin.

Koska PILP-ratkaisuissa päälämmitysjärjestelmänä toimii edelleenkin kaukolämpökeskus, joudutaan sen hyvän toiminnan takaamiseksi tekemään kompromisseja rinnakkaiskytkentöjen suhteen. Työssä huomattiin, että myös suositetuilla kytkentäratkaisuilla voidaan laitteisto saada toimimaan epäedullisella tavalla kaukolämmöntuottajan näkökulmasta katsottuna.

Poistoilman lämmöntalteenottolaitteiston suunnittelussa sekä asennuksissa on haasteita, jotka pitää saada ratkaistua siten, että kokonaisuus toimii mahdollisimman

hyvin ja kustannustehokkaasti. Tämän työn yksi tarkoitus olikin tuottaa tietoa näiden haasteiden ratkaisujen tueksi.

Lähteet

- 1 Neuvonen, Petri. 2006. Kerrostalot 1880–2000. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- 2 Sanberg, Esa. 2014. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.
- 3 Sinisalo Markku, yksikön päällikkö. Westman Mindi, LVI-suunnittelija. Suomen Talokeskus Oy, toimitila- ja uudissuunnittelupalvelut. Suulliset kommentit. Haastattelu 12.1.2017.
- 4 HybridiLTO. 2016 Verkkodokumentti. HögforsGST Oy. <<http://www.hybridilto.fi/>>. Luettu 15.1.2017.
- 5 Gebwell Combi -laitteisto. 2016. Verkkodokumentti. Gebwell Oy. <<http://www.gebwell.fi/gebwell-combi>>. Luettu 21.12.2016.
- 6 Energiansäästö- ja lämmitysratkaisut. 2016. Verkkodokumentti. Senera Oy. <<http://www.senera.fi/index.php>>. Luettu 15.1.2017.
- 7 PILPIT-laitteisto. 2016. Verkkodokumentti. Oy Pamon Ab. <<http://www.pilpit.fi/fi/pilpit>>. Luettu 21.12.2016.
- 8 LTO-huippuimuri. 2016. Verkkodokumentti. Retermia Oy. <<http://www.retermia.fi/wp-content/uploads/2016/10/LTO-Huippuimuri.pdf>>. Luettu 22.12.2016.
- 9 COP ja SCOP. 2016. Verkkodokumentti. Nilan Suomi Oy. <<http://www.nilan.fi/cop-vs-scop-hyotysuhteiden-erot>>. Luettu 21.12.2016.
- 10 Kaappola Esko, Hirvelä Aulis, Jokela Matti, Kianta Jani. 2014. Kylmätekniiikan perusteet. 3. painos. Helsinki: Opetushallitus.
- 11 Coolpack, versio 1.46. 2001. Simulointiohjelma. Department of Engineering Technical University of Denmark.
- 12 LTO-laitteistot. 2016. Verkkodokumentti. RS partners Oy. <<http://www.rspartners.fi/laitteistot>>. Luettu 21.12.2016.
- 13 Pilpit lämmöntalteenottojärjestelmä. 2016. Verkkodokumentti. Oy Pamon Ab. <http://www.wrt.fi/media/sivusto/pilpit_tekninenesite.pdf>. Luettu 22.12.2016.

- 14 Tekninen esite RSP LTO-U-sarja. 2016. Verkkodokumentti. HögforsGST Oy. <<http://www.hybridilto.fi/download/tekninen-esite-rsp-lto-u-sarja/>>. Luettu 22.12.2016.
- 15 Kuiva ja kostea ilma. 2016. Verkkodokumentti. Hengitysliitto ry. <<http://www.hengitysliitto.fi/fi/sisailma/hiukkasmaiset-ja-kaasumaiset-epapuhtaudet/kuiva-ja-kostea-ilma>> Luettu 1.1.2017.
- 16 Vinha Juha, Korpi Minna, Kalamees Targo, Jokisalo Juha, Eskola Lari, Palonen Jari, Kumitski Jarek, Aho Hanna, Salminen Mikko, Salminen Kati, Keto Matias. 2009. Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous. Tutkimusraportti. Tampereen teknillinen yliopisto.
- 17 Sanberg, Esa. 2014. Ilmastointilaitoksen mitoitus. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.
- 18 Seppänen, Olli. 1995. Rakennusten lämmitys. Helsinki: Suomen LVI-yhdistysten liitto ry.
- 19 Yrjölä, Jukka. 2015. Luentomateriaali. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 20 Hakala Pertti, Kaappola Esko. 2013. Kylmälaitoksen suunnittelu. 3. painos. Helsinki: Opetushallitus.
- 21 Taloteknisten eristysten mitoitus ja käyttö. 2002. Ohjetiedosto. LVI 50-10345. Helsinki: Rakennustietosäätiö.
- 22 Keinänen, Mikko. 2016. Poistoilmalämpöpumppu asuinkerrostaloissa. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 23 System materials. 2016. Verkkodokumentti. The Dow Chemical Company. <<http://www.dow.com/heattrans/support/selection/system-materials.htm>>. Luettu 28.12.2016.
- 24 Vesikiertoinen patterilämmitys. 2002. Ohjetiedosto. LVI 12-10343. Helsinki: Rakennustietosäätiö.
- 25 Ruste P20, korroosionestokemikaali. Verkkodokumentti. Korves Oy. <http://www.korves.fi/files/upload_pdf/20499/Ruste-P-20.pdf>. Luettu 28.12.2016.
- 26 Juvonen, Janne. 2009. Lämpökaivo: Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Verkkodokumentti. Ympäristöopas. <<http://www.suomenporakaivo.fi/pdf/ymparisto-opas-lampokaivo.pdf>>. Luettu 23.12.2016.

- 27 Kianta, Jani. 2013. Kylmätekniiikan käsikirja. 1. painos. Tampere: JM Kianta Tmi.
- 28 Castrén, Markus. 2014. Retermia News. Verkkodokumentti. Retermia Oy. <<http://www.retermia.fi/esitteet-ja-materiaalit/retermia-news>>. Luettu 22.12.2016.
- 29 Helsingin rakennusvalvonta, palautepalvelu. Sähköpostikysely. 9.1.2017
- 30 Espoon rakennusvalvonta, palautepalvelu. Sähköpostikysely. 9.1.2017
- 31 Vantaan rakennusvalvonta. Sähköpostikysely. 9.1.2017
- 32 Virta Jari, Pylsy Petri. 2011. Taloyhtiön energiakirja. 1. painos. Helsinki: Kiinteistöalan kustannus Oy.
- 33 Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitojaksot. 2008. Ohjetiedosto. LVI 01-10424. Helsinki: Rakennustietosäätiö.
- 34 Säteri Jorma, Kovanen Keijo, Pallari Marja-Liisa. 1999. Kerrostalojen sisäilmaston ja energiatalouden parantaminen. Verkkodokumentti. VTT. <<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1999/T1945.pdf>>. Luettu 4.1.2017.
- 35 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Määräykset ja ohjeet. 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D2. Ympäristöministeriön asetus rakennusten sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. Helsinki: ympäristöministeriö.
- 36 Pallari Marja-Liisa, Heikkinen Jorma, Gabrielsson Juha, Matilainen Veijo, Reisbacka Anneli. 1995. Kerrostalojen ilmanvaihdon korjausratkaisut. Verkkodokumentti. VTT. <<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1995/T1654.pdf>>. Luettu 5.1.2017.
- 37 Ikäheimo, M. 2003. Helsingiläisten asuntojen ilmanvaihto-ongelmista. Verkkodokumentti. Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen julkaisuja. Helsingin kaupunki. <<http://www.hel.fi/static/ymk/julkaisut/julkaisu-06-03.pdf>>. Luettu 5.1.2017.
- 38 Heikkinen Jorma, Kovanen Keijo, Ojanen Tuomo, Pallari Marja-Liisa, Piira Kalevi, Siitonen Veijo. 1993. Vedottomien ulkoilmaventtiilien kehittämisperusteet. Verkkodokumentti. VTT. <<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1993/T1468.pdf>>. Luettu 5.1.2017.
- 39 Air in -seinäventtiili. 2016. Verkkodokumentti. Dir-air Oy. <<http://www.dirair.fi/fi/tuotteet/muut/seinaventtiilit>>. Luettu 5.1.2017.
- 40 Biobe ThermoMax A -tuloilmaikkunaventtiili. 2016. Verkkodokumentti. Biobe Oy. <http://www.biobe.fi/tuotteet/venttiilit/thermomax_a.htm>. Luettu 5.1.2017.

- 41 Rämä Miika, Niemi Rami, Similä Lassi. 2015. Poistoilmalämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä. Verkkodokumentti. VTT. <<http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2015/VTT-CR-00564-15.pdf>>. Luettu 5.1.2017.
- 42 Rakennusten kaukolämmitys. 2013. Verkkodokumentti. Määräykset ja ohjeet, julkaisu K1/2013. Helsinki: Energiateollisuus ry. <http://energia.fi/files/502/JulkaisuK1_2013_20140509.pdf>. Luettu 5.1.2017.
- 43 Helenin ohje hybridikytkennästä asiakkaan kaukolämpölaitteiston rinnalle. 2015. Verkkodokumentti. Helen Oy. <https://www.helen.fi/globalassets/lampo/ammattilaiset/kaukolampo/kaukolampoon_hybridikytkenta_kaukolampolaitteiston_rinnallepdf>. Luettu 5.1.2017.
- 44 Lämmöntalteenotto kaukolämpökiinteistöissä. 2016. Verkkodokumentti. Fortum Oyj. <<http://www.fortum.com/countries/fi/SiteCollectionDocuments/Kaukolampo/Lämmön%20talteenotto%20kaukolämpökiinteistöissä2.pdf>>. Luettu 7.1.2017.
- 45 Kaukolämmön lämmönjakokeskusten kytkennät ja lämmönsiirtimien mitoituslämpötilat. 2011. Verkkodokumentti. Pöyry Finland Oy. <http://energia.fi/sites/default/files/ljk-kytkennat_mitoituslampotilat_poyry_2011.pdf>. Luettu 5.1.2017.
- 46 Rantanen, Mikko. 2015. Lämpöpumppujärjestelmän mitoitus ja laitevalinnat. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 47 Nibe varaajat. 2016. Verkkodokumentti. NIBE Energy Systems Oy. <<http://www.nibe.fi/tuotteet/lampopumppuvaraajat/nibe-ukv/#info>>. Luettu 30.12.2016.

Eristetyn putken lämpöhäviö-, jäähtymis- ja jäätymispisteen saavuttamisaikalaskelmat

Tässä liitteessä esitetään taulukkoon 7 ja 8 saatujen arvojen laskentatapa. Laskelma on esitetty PE-putkelle, kun ulkohalkaisija on 40 mm, eristeen paksuus on 20 mm ja nesteen jäätymispiste on -17 °C . Kaikki taulukoissa olevat arvot on laskettu samalla tavoin.

Laskelmissa käytetyt lähtöarvot.

Putkimateriaali:	PE-putki
Putken ulkohalkaisija:	40 mm
Putken seinämävahvuus:	3,7 mm
Putken sisähalkaisija:	32,6 mm
Putken tiheys:	$920 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Putken ominaislämpökapasiteetti:	$2\,300 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$
Putken lämmönjohtavuus:	$0,32 \frac{\text{W}}{\text{Km}}$
Putkiston pituus ulkona:	30 m
Eristeen paksuus:	20 mm
Eristetyn putken ulkohalkaisija:	80 mm
Eristeen lämmönjohtavuus:	$0,035 \frac{\text{W}}{\text{Km}}$
Virtausaine:	Propyleeniglykoli, 35,5 p-%

Virtausaineen tiheys:	$1\,039 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Virtausaineen ominaislämpökapasiteetti:	$3\,728 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$
Virtausaineen virtaama:	$0,4 \frac{\text{l}}{\text{s}}$
Virtausaineen keskilämpötila:	$+4 \text{ }^\circ\text{C}$
Virtausaineen jäätymispiste:	$-17 \text{ }^\circ\text{C}$
Ulkolämpötila:	$-26 \text{ }^\circ\text{C}$
Sisäpuolinen lämmönsiirtokerroin:	$5\,000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$
Ulkopuolinen lämmönsiirtokerroin:	$10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$

Lämpöhäviö- ja jäätymislaskelma

Eristetyn putken lämpöhäviö putkimetriä kohden lasketaan kaavalla 13.

$$\frac{(4^\circ\text{C} - (-26^\circ\text{C}))}{\left(\frac{1}{5000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} * \pi * 0,0326\text{m}} + \frac{1}{2 * \pi * 0,32 \frac{\text{W}}{\text{Km}}} * \ln \frac{0,04\text{m}}{0,0326\text{m}} + \frac{1}{2 * \pi * 0,035 \frac{\text{W}}{\text{Km}}} * \ln \frac{0,08\text{m}}{0,04\text{m}} + \frac{1}{10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} * \pi * 0,08\text{m}} \right)} = 8,2 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

Ulkona olevan putkiston kokonaislämpöhäviö on

$$8,2 \frac{\text{W}}{\text{m}} * 30\text{m} = 246 \text{ W}.$$

Eristetyn putken R-arvo lasketaan kaavalla 11.

$$\left(\frac{1}{5000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} * \pi * 0,0326\text{m}} + \frac{1}{2 * \pi * 0,32 \frac{\text{W}}{\text{Km}}} * \ln \frac{0,04\text{m}}{0,0326\text{m}} + \frac{1}{2 * \pi * 0,035 \frac{\text{W}}{\text{Km}}} * \ln \frac{0,08\text{m}}{0,04\text{m}} + \frac{1}{10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} * \pi * 0,08\text{m}} \right) = 3,653521 \frac{\text{Km}}{\text{W}}$$

U-arvo lasketaan kaavalla 10.

$$\frac{1}{3,653521 \frac{\text{Km}}{\text{W}}} = 0,27370859 \frac{\text{W}}{\text{Km}}$$

Virtaavan aineen lämpökapasiteettivirta lasketaan kaavalla 15.

$$1039 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,0004 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 3728 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} = 1549,3568 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Virtaavan aineen loppulämpötilaero lasketaan kaavalla 14.

$$e - \frac{0,273709 \frac{\text{W}}{\text{Km}} * 30\text{m}}{1549,3568 \frac{\text{W}}{\text{K}}} * (4^\circ\text{C} - (-26^\circ\text{C})) = 29,8414^\circ\text{C}$$

Kun tiedetään loppulämpötilaero, niin voidaan laskea paljonko virtausaineen loppulämpötila ja jäähtymä on.

Aineen loppulämpötila on

$$29,8414^\circ\text{C} + (-26^\circ\text{C}) = 3,8313^\circ\text{C},$$

jolloin jäähtymäksi saadaan

$$4^\circ\text{C} - 3,8313^\circ\text{C} = 0,1586^\circ\text{C}.$$

Jäätymispisteen saavuttamisaikalaskelma

Putken seinämän poikkipinta-ala on

$$\frac{\pi * (0,04^2\text{m} - 0,0326^2\text{m})}{4} = 0,000421947 \text{ m}^2.$$

Putken massaksi pituusyksikköä kohden saadaan

$$920 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,000421947 \text{ m}^2 = 0,388191524 \frac{\text{kg}}{\text{m}}.$$

Putken sisäpoikkipinta-ala on

$$\frac{\pi * 0,0326^2 m}{4} = 0,000834689 m^2 ,$$

jolloin nesteen massaksi pituusyksikköä kohden saadaan

$$1039 \frac{kg}{m^3} * 0,000834689 m^2 = 0,867241871 \frac{kg}{m}.$$

Kaavan 16 C_1 on

$$0,388191524 \frac{kg}{m} * 2300 \frac{J}{kgK} = 892,8405052 \frac{J}{Km}$$

ja C_2 on

$$0,867241871 \frac{kg}{m} * 3728 \frac{J}{kgK} = 3233,077695 \frac{J}{Km}.$$

Nesteen loppulämpötilaero on

$$(-17^{\circ}C) - (-26^{\circ}C) = 9^{\circ}C$$

ja alkulämpötilaero on

$$4^{\circ}C - (-26^{\circ}C) = 30^{\circ}C.$$

Kaavalla 16 voidaan laskea jäätyispisteen saavuttamisaika, kun kierto liuospiirissä pysähtyy.

$$\frac{(\ln 9^{\circ}C - \ln 30^{\circ}C) * \left(892,8405052 \frac{J}{Km} + 3233,077695 \frac{J}{Km}\right)}{-0,27370859 \frac{W}{Km}} = 18148,84 s.$$

Jäätyispisteen saavuttaminen tunneissa on

$$\frac{18148,84s}{3600s} = 5,04 h.$$

Putken painehäviölaskelmat

Tässä liitteessä esitetään taulukkoon 9 ja 10 saatujen arvojen laskentatapa. Laskelma on esitetty PE-putkelle, kun ulkohalkaisija on 63–75 mm ja nesteenä propyleeniglykoli 35,5 p-%. Kaikki taulukoissa olevat arvot on laskettu samalla tavoin.

PE-63 putken painehäviölaskelma

Laskelmissa käytetyt lähtöarvot.

Putkimateriaali:	PE-putki
Sisähalkaisija, PE-63:	51,4 mm
Virtausaine:	Propyleeniglykoli, 35,5 p-%
Virtausaineen tiheys:	1 039 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Virtausaineen ominaislämpökapasiteetti:	3 728 $\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$
Virtausaineen kinemaattinen viskositeetti:	7,563 $\frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$
LTO-laitteesta saatu teho:	20 kW
Liuospiirin lämpötilaero:	5 °C

Putken virtaama on

$$\frac{20\text{kW}}{3,728 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} * 1039 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 5 \text{ } ^\circ\text{C}} = 0,001032687 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Virtausnopeus putkessa on

$$\frac{4 \cdot 0,001032687 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\pi \cdot 0,0514^2 \text{m}} = 0,497683 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Reynoldsin luku lasketaan kaavalla 8.

$$\frac{0,497683 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,0514 \text{m}}{0,000007563 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 3382,3755.$$

Turbulenttisen virtauksen kitkavastuskerroin lasketaan kaavalla 7.

$$\lambda = 0,25 \left[\lg \left(\frac{0,007 \text{mm}}{3,7} + \frac{5,74}{3382,3755^{0,9}} \right) \right]^{-2} = 0,0429282$$

Putken painehäviö lasketaan kaavalla 5.

$$\frac{0,0429282 \cdot 1039 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,497683^2 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 \cdot 0,0514 \text{m}} = 107,47 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}$$

PE-75 putken painehäviölaskelma

Laskelmissa käytetyt lähtöarvot.

Putkimateriaali:	PE-putki
Sisähalkaisija, PE-75:	61,4 mm
Virtausaine:	Propyleeniglykoli, 42,5 p-%
Virtausaineen tiheys:	1 082 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Virtausaineen ominaislämpökapasiteetti:	3 618 $\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$

Virtausaineen kinemaattinen viskositeetti:	$10,360 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$
LTO-laitteesta saatu teho:	20 kW
Liuospiirin lämpötilaero:	5 °C

Putken virtaama on

$$\frac{20\text{kW}}{3,618 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} * 1082 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 5 \text{ °C}} = 0,001021796 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Virtausnopeus putkessa on

$$\frac{4 * 0,001021796 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\pi * 0,0614^2 \text{m}} = 0,345094 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reynoldsin luku lasketaan kaavalla 8.

$$\frac{0,345094 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,0614 \text{m}}{0,00001036 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 2045,2482$$

Laminaarisen virtauksen kitkavastuskerroin lasketaan kaavalla 6.

$$\frac{64}{2045,2482} = 0,0312920$$

Putken painehäviö lasketaan kaavalla 5.

$$\frac{0,0312920 * 1082 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,345094^2 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 * 0,0614 \text{m}} = 32,84 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}$$

Pääkaupunkiseudun rakennusvalvontojen vastaukset sähköpostikyselyyn, koskien rakennuksen ulkopuolelle asennettujen putkistojen luvanvaraisuutta

Kysymys.

Hei,

kysymys koskee vanhojen kerrostalojen poistoilman lämmöntalteenottolaitteistojen (PILP) liuospiirin putkia. Mikäli liuosputkiston pystyosuutta ei voida asentaa kiinteistön sisälle jolloin se joudutaan asentamaan rakennuksen ulkoseinälle, niin tarvitseeko tällaisessa tapauksessa hankkia toimenpiteelle jokin lupa tms. rakennusvalvonnasta?

Vastaukset.

Espoon rakennusvalvonta

Hei,

Rakennusvalvonnan luvan tarpeellisuus on tapauskohtainen näissä tapauksissa (riippuen siitä minne putket sijoitetaan rakennuksen julkisivussa). Rakennusvalvonnan kaupunkikuva-arkkitehti ratkaisee luvan tarpeellisuuden.

Vantaan rakennusvalvonta

Hei,

Ensimmäisessä vaiheessa on syytä jättää neuvontapyyntö Lupapisteeseen. Mukaan liitettävä esim. valokuva tai julkisivupiirustus ja asemapiirustus, jonka perusteella selvitetään onko putkien sijainti kaupunkikuvallisesti merkittävä.

Helsingin rakennusvalvonta

Hei,

Suojelluissa rakennuksissa tai kaupunkikuvallisesti näkyvälle paikalle asia harkitaan Kaupunkikuvallisella lausunnolla, muissa rakennuksissa lupaa ei tarvita kun laite asennetaan rakentamistapaohjeemme mukaisesti.

http://www.hel.fi/static/rakvv/ohjeet/Ilmalampopumpun_ja_jaahdytyslaitteen_asennus.pdf

Kauniaisten rakennusvalvonta

Kauniaisten rakennusvalvonta ei vastannut kyselyyn.