



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Toni Koskimäki

# Ilmanvaihdon nestekiertoiset lämmön- talteenottoratkaisut korjauskohteissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu  
Insinööri (AMK)  
Talotekniikka  
Insinöörityö  
23.12.2019

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Toni Koskimäki Ilmanvaihdon nestekiertoiset lämmöntalteenottoratkaisut korjauskohteissa 21 sivua 23.12.2019
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Ammatillinen pääaine	LVI-suunnittelu
Ohjaajat	yliopettaja Jukka Yrjölä projektipäällikkö Kalle Nurmi
<p>Insinööritöyssä selvitetään IV-saneerauksen toteutettavuutta 70-luvulla rakennettuun toimitalakiinteistöön. Tilarajoitteet ja kanavistojen nykysijainti eivät mahdollista muita lämmöntalteenottoratkaisuja kuin nestekiertoisen lämmöntalteenoton. Työn painopiste on nestekiertoisen lämmöntalteenottojärjestelmän mitoittaminen, kun kaikkia nestekiertoisella lämmöntalteenotolla varustettuja IV-koneita palvelee yksi yhteinen glykoli-vesi-liuosverkosto.</p> <p>Ekosuunnitteludirektiivin 2009/125 EY [1] mukainen tuloilman lämpötilahyötysuhdevaati- mus 68 % on nestekiertoiselle lämmöntalteenottojärjestelmälle haaste, ja niin tehokkaassa järjestelmässä voi aiheutua ongelmia kylmissä ulkolämpötiloissa. Järjestelmät on kuitenkin suunniteltava toimimaan kaikissa olosuhteissa.</p> <p>Työtä varten on perehdytty alan kirjallisuuteen ja nestekiertoisen lämmöntalteenoton mitoi- tuslaskelmiin. Kirjallisuudesta on myös selvitetty erilaisia toteutusvaihtoehtoja nestekierto- selle lämmöntalteenotolle.</p> <p>Insinööritöyn tuloksena syntyi taulukkolaskentatyökalu, jolla voidaan mitoittaa nestekierto- isia lämmöntalteenottojärjestelmiä laskennallisesti. Taulukkolaskentatyökalua voi myös käyttää järjestelmän toiminnan arvioimiseen eri olosuhteissa, jolloin voidaan arvioida huur- teenpoistotilanteiden esiintyvyyttä järjestelmässä ja suunnitella luotettavammin toimiva jär- jestelmä.</p> <p>Lisäksi insinööritöyssä laadittiin suunnitteluohje, jonka tarkoitus on helpottaa suunnittelua vastaavissa projekteissa. Työssä esitellään uutena ideana nestekiertoisen lämmöntalteen- ottoverkon toimintaa tasapainottava varaajasäiliökytkentä. Kytkennässä verkostoa pal- velee kaksi pyörimisnopeusohjattua kiertopumppua, jolloin sekä tulo- että poistupuolen nestevirtoja voidaan säätää toisistaan riippumatta ja tasata verkoston hetkellisiä kuormitus- muutoksia säiliön toimiessa energiavaraajana.</p> <p>Jatkotutkimustarpeet keskittyvät taulukkolaskentatyökalun kehitykseen ja kytkentöjen mi- toitusten yksityiskohtiin.</p>	
Avainsanat	nestekiertoinen lämmöntalteenotto, ilmanvaihto, huurtumisen esto

Author Title Number of Pages Date	Toni Koskimäki Liquid circulation heat recovery solutions for ventilation systems in building renovations 21 pages 23 December 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Professional Major	HVAC Design
Instructors	Jukka Yrjölä, Principal Lecturer Kalle Nurmi, Project Manager
<p>This bachelor's thesis studied the feasibility of the renovation of the ventilation system in a building from the 1970's with a liquid circulation heat recovery system, which was the only possible solution due to the ever stricter heat recovery efficiency requirements that, actually, result in a risk of frosting and freezing in the system in cold climates. The aim of the thesis was, thus, to define how to design energy efficient and safe liquid circulation heat recovery systems for ventilation machines in all possible scenarios.</p> <p>Literature about liquid circulation heat recovery systems was examined for this thesis, and various ways to design these systems were explored.</p> <p>The result of this thesis was a spreadsheet application that was developed to assist in the calculation and dimensioning of liquid circulation heat recovery systems. With the help of this application, it is easy to evaluate the operation of the system in various circumstances. Another outcome of this thesis is a design guide that can be used to streamline similar design projects in the future.</p>	
Keywords	liquid circulation heat recovery system, ventilation, defrost

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Nestekiertoinen lämmöntalteenottojärjestelmä	2
2.1	Nestekiertoisen lämmöntalteenottojärjestelmän toiminta	2
2.2	Nestekiertoisen LTO:n käyttökohteet	3
2.3	Nestekiertoisen LTO:n ongelmat	3
2.4	Kehittyneet ratkaisut nestekiertoiselle LTO:lle	5
2.5	Nestekiertoisen lämmöntalteenoton laskentaan tarvittavat kaavat	6
2.6	Nestekiertoisen lämmöntalteenoton laskenta	8
3	Kohteen esittely	9
3.1	Lähtötiedot	9
3.2	Ilmanvaihtokoneet nykytilanteessa	10
4	Tulokset	10
5	Suunnitteluohje	13
5.1	LTO-pattereiden mitoittaminen taulukkolaskentatyökalun avulla	13
5.2	LTO-verkoston lämmönsiirtimien mitoittaminen kohteeseen	15
5.3	LTO-verkoston suunnittelu kohteeseen	15
5.4	Toimintaselostus	18
6	Pohdinta	19
7	Yhteenveto	20
	Lähteet	21

## Lyhenteet

IV	Ilmanvaihto
LTO	Lämmöntalteenotto
PK	Poistokone
TK	Tulokone

## 1 Johdanto

Tämän insinööri työn tarkoituksena on tutkia olemassa olevan kiinteistön IV-saneerauksen toteutettavuutta ja helpottaa sen suunnitteluprosessia. Kohde on 1. säävyöhykkeellä sijaitseva noin 7 000 m<sup>2</sup>:n toimitilakiinteistö, joka on rakennettu 1970-luvulla. Nykystandardeja ajatellen kohteesta tekevät haastavan ahtaat tilat sekä nykyisten IV-koneiden ja kanavistojen sijainti. Kanaviston uusinta ei kuulu toimeksiannon piiriin, ja saneeraus tulisi tehdä mahdollisimman vähäisillä muutoksilla olemassa olevaan kanavistoon.

Insinööri työ tehdään Granlund Consulting Oy:lle, joka on suomalainen konsultointipalveluita tarjoava yritys. Erityisesti tämä työ on suunnattu auttamaan Energiatehokkuushankkeet-ryhmää, jonka päivittäiseen projektityöhön kuuluvat erilaiset energiatehokkuushankkeet hankeselvityksistä toteutussuunnitteluun sekä rakennuttamiseen ja valvontaan.

Toimeksiannon piiriin kuuluu kuusi IV-koneparia, joissa on erilliset tulo- ja poistokoneet sekä kaksi erillispoistoa. Vain yhdessä nykyisistä koneista on lämmöntalteenottojärjestelmä, jonka hyötysuhde on nykystandardeihin nähden alhainen. Tilojen ahtauden ja vaikean kanaviston takia pyörivällä lämmönsiirtimellä varustettuja IV-koneita ei voida toteuttaa kohteeseen yhtä IV-konetta lukuun ottamatta. Vaikean kanavistosta tekee se, että tulo- ja poistoilmakoneet sijaitsevat eri puolilla rakennusta. Näistä syistä kohteeseen suunnitellaan nestekiertoisella lämmöntalteenotolla varustettuja IV-koneita, joita palvelee yhteinen nesteverkosto. Työssä tutkitaan ekosuunnitteludirektiivin 2009/125 EY [1] myötä kiristyneiden lämmöntalteenoton lämpötilahyötysuhteiden vaikutuksia nestekiertoisen lämmöntalteenottojärjestelmän toimivuuteen eri olosuhteissa.

Työn tavoite on laatia taulukkolaskentatyökalu nestekiertoisen lämmöntalteenoton mitoittamiseen ja kehittää suunnitteluohje helpottamaan vastaavanlaisten toimeksiantojen suorittamista tulevaisuudessa.

Työtä varten on tutkittu alan kirjallisuutta ja selvitetty tällä hetkellä parhaat tiedossa olevat tavat toteuttaa toimivia, korkean hyötysuhteen omaavia nestekiertoisia lämmöntalteenottojärjestelmiä. Lisäksi on myös laskentatyökalun avulla mallinnettu nestekiertoisen lämmöntalteenottojärjestelmän toiminta eri mitoitusarvoilla eri tilanteissa.

Työssä ei esitetä lopullisia suunnitelmia eikä oteta kantaa muihin ilmanvaihdon lämmöntalteenottojärjestelmiin.

## 2 Nestekiertoinen lämmöntalteenottojärjestelmä

### 2.1 Nestekiertoisen lämmöntalteenottojärjestelmän toiminta

Nestekiertoinen LTO ilmanvaihdossa ei ole uusi keksintö. Tämän insinööriyön kohteen kiinteistön alkuperäiset LVI-suunnitelmat on tehty vuonna 1973 ja silloinkin on kohteeseen suunniteltu yhdelle ilmanvaihtokoneelle vesi-glykoliliuoksella toimiva nestekiertoinen LTO. Vuosien varrella erilaiset määräykset ja direktiivit ovat ilmanvaihdon lämmöntalteenoton osalta kuitenkin kiristyneet. [1] Tästä syystä myös nestekiertoiset LTO-järjestelmät ovat kehittyneet entistä energiatehokkaammiksi, ja nykyvaatimusten mukaiset järjestelmät aiheuttavat haasteita järjestelmien suunnittelulle.

Nestekiertoinen LTO on yksinkertaistettuna tuloilman esilämmitystä poistoilmasta saadulla lämpöenergialla. Pääkomponentteja on kolme:

- lämmönsiirrin esilämmitystä varten tuloilmanvaihtokoneessa
- lämmönsiirrin energiantalteenottoa varten poistoilmanvaihtokoneessa
- kiertopumppu, joka kierrättää nestettä lämmönsiirtimien välillä.

Nestekiertoisessa LTO:ssa on huonommat lämmöntalteenoton hyötysuhteet verrattuna muihin lämmöntalteenottojärjestelmiin, koska siinä tapahtuu lämmönsiirtyminen kaksi kertaa. Nestekiertoisessa LTO:ssa lämpö siirtyy ensiksi poistoilmanvaihtokoneen lämmönsiirtopinnan läpi ilmavirrasta nestevirtaan ja tämän jälkeen tuloilmanvaihtokoneessa nestevirrasta lämmönsiirtopinnan läpi tuloilmavirtaan. Muissa ilmanvaihdon lämmöntalteenottojärjestelmissä lämpö siirtyy suoraan poistoilmasta lämmönsiirtopinnan kautta tuloilmaan. Ekosuunnitteludirektiivissä on määritelty nestekiertoiselle lämmöntalteenotolle muita lämmöntalteenottojärjestelmiä alaisempi alaraja hyötysuhteelle. [1]

## 2.2 Nestekiertoisen LTO:n käyttökohteet

Nestekiertoista LTO:ta ei lähtökohtaisesti kannata energiatehokkuuden kannalta käyttää, ellei ole syitä, jotka johtavat sen valintaan.

Nestekiertoisen LTO:n kaksi tärkeintä etua muihin lämmöntalteenottojärjestelmiin verrattuna ovat seuraavat [2]:

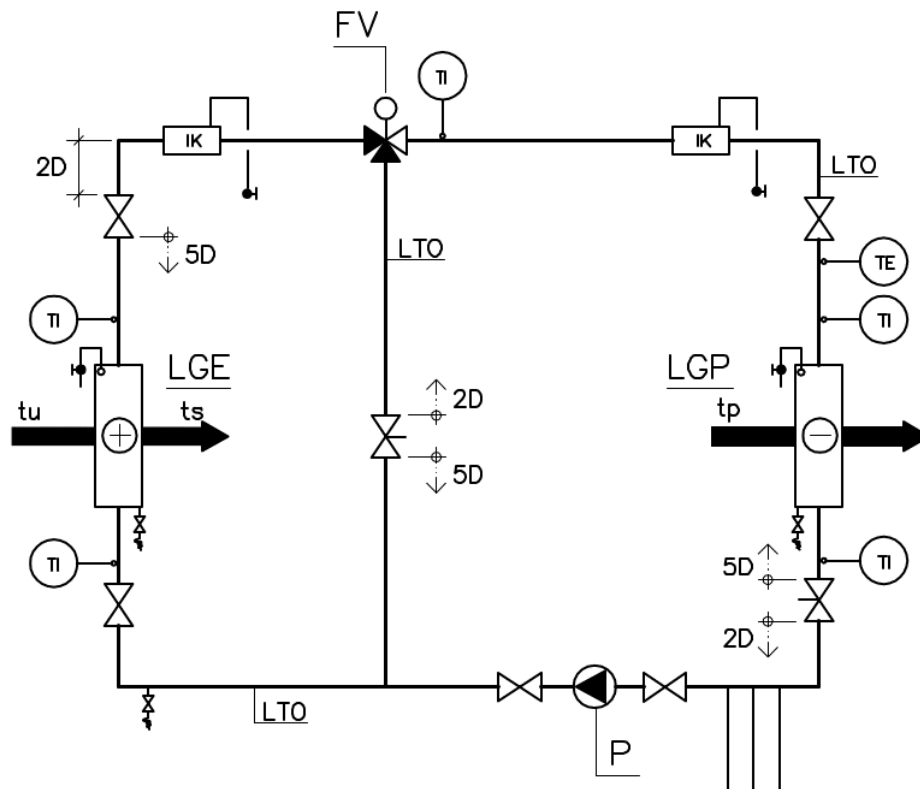
- Tulo- ja poistoilmakoneet voivat sijaita etäällä toisistaan.
- Tulo- ja poistoilma eivät sekoitu lainkaan nestekiertoisessa LTO:ssa.

## 2.3 Nestekiertoisen LTO:n ongelmat

Nestekiertoisen lämmöntalteenoton toiminnan riskeihin voidaan lukea vuodot, poistoilman lämmönsiirtimen huurtuminen tai jäätyminen sekä vesi-glykoli-liuoksen jäätyminen tuloilman lämmönsiirtimessä. Suunnittelussa on tärkeää varmistaa järjestelmän toiminta ääriolosuhteissa.

Poistoilman lämmönsiirtimen huurtuminen alkaa, jos siirtimelle tulevan nesteen lämpötila on reilusti pakkasella ja poistoilmasta otetaan lämpöä nestevirtaan niin paljon, että poistoilman lämpötila laskee lähelle lämmönsiirtimen pintalämpötilaa. Tällöin poistoilman suhteellinen kosteus nousee korkeaksi, ja poistoilmasta erottuva vesihöyry huurtuu kylmille lämmönsiirtopinnoille. Huurre nostaa ilmapuolen painehäviötä lämmönsiirtimessä, mikä vuorostaan pienentää ilmavirtaa lämmönsiirtimen läpi. Lämmönsiirtyminen ilmasta nesteeseen heikentyy ja nestekierron keskimääräinen lämpötila laskee. Nyky menetelmä huurtumisen estämiseksi on mitata paine-eroa poistoilman lämmönsiirtimen yli ilmapuolella. Jos paine-ero kasvaa, ilmasta otetaan liikaa lämpöä nesteeseen ja huurtumista alkaa tapahtua. Tällöin rajoitetaan nestevirtaa lämmönsiirtimessä 3-tieventtiilin avulla tarvittava määrä, jotta poistoilman lämpö sulattaa huurteen ja paine-ero normalisoituu. Kyt-kentäesimerkki tästä järjestelmästä on esitetty kuvassa 1.





Kuva 1. Nestekiertoinen LTO 3-tieventtiilikytkenällä

Huurtumisen esto aiheuttaa nestekiertoiselle lämmöntalteenotolle toisen ongelman. Nestekiertoisessa lämmöntalteenottojärjestelmässä nesteeseen tuodaan lämpöä ainoastaan poistoilmapattereista. Rajoittamalla nestevirtaa poistoilman lämmönsiirtimen läpi rajoitetaan samalla myös nesteeseen tulevan lämpöenergian määrää. Tuloilmalämmönsiirtimessä, jossa tätä lämpöenergiaa käytetään talviolosuhteissa kylmän ulkoilman lämmittämiseen, tilanne heikkenee huurteeneston myötä. Nestevirtaan tulevan lämmön vähenemisen myötä nesteen lämpötila laskee siihen pisteeseen, että riski vesi-glykoli-liuoksen jäätyminen voi tapahtua. Vesi-glykoli-liuosta ei tulisi päästää lähelle jäätymislämpötilaa, koska siinä voi esiintyä sohjoontumista jo hieman korkeammassa lämpötilassa. [10]

Edellä mainitut ongelmat ovat tulleet ajankohtaisiksi nykyisten korkeiden hyötysuhdevaatimusten johdosta. Pattereiden kasvanut lämmönsiirtopinta-ala ja äärimmilleen viety energiatehokkuuden tavoittelu on ajanut järjestelmät riskirajoille. [3]

## 2.4 Kehittyneet ratkaisut nestekiertoiselle LTO:lle

Keijo Pelkonen on oppaassa ”LTO-järjestelmien LVI-suunnittelun osaamisen vaatimuksia” [4] listannut tällä hetkellä käytössä olevat tavat kytkeä LTO-pattereita:

- 3-tieventtiilikytkentä. Paljon käytetty menetelmä, jossa huurteenpoisto tilanteessa kolmitieventtiiliä ohjaamalla osa nesteestä ohittaa tuloilman lämmönsiirtimen ja estetään huurteen kertyminen poistoilman lämmönsiirtimeen. Aiheuttaa kuitenkin jäätymisvaaran tuloilman lämmönsiirtimessä alhaisilla lämpötiloilla.
- 2- tai 3-tieventtiilikytkentä yhdistettynä kierroslukusääteisellä pumpulla. Tämä järjestelmä toimii kuin edellä mainittu, mutta pumpun ohjaamalla voidaan vähentää tuloilman lämmönsiirtimen tehoa ja siten pienentää lämmönsiirtimen jäätymisriskiä.
- Kojan Netto-kytkentä. Kehittynyt versio edellisestä, jossa 3-tieventtiili on korvattu kahdella 2-tieventtiilillä. Hallitsee paremmin nestevirtojen ohjauksen, mikä parantaa hyötysuhdetta.
- Jukka Yrjölän esittämä tapa, jossa ulkoilman lämpötilan alittaessa vesi-glykoliliuoksen jäätymislämpötilan nestevirta käännetään vaihtoeventtiilin avulla myötävirtaiseksi tuloilman lämmönsiirtimessä. Tällä kytkentätavalla nestevirta ei pääse jäätymään tuloilman lämmönsiirtimessä, vaikka ulkoilmaolosuhteet olisivat todella kylmät (erityisesti säävyöhykkeet 3 ja 4).
- Taniplan Oy:n esittämä kytkentätapa, jossa tuloilmapattereita on kaksi. Ulkoilman ollessa kylmä toinen tuloilmapattereista ohitetaan, jolloin pystytään laskemaan tuloilman nestevirrasta viemää lämpöenergian määrää tehokkaasti. Tämä ratkaisu on energiatehokkuudeltaan nykyjärjestelmistä paras.
- FläktGroupin Econet Premium -kytkennässä tuloilman lämmönsiirrin ja poistoilman lämmönsiirrin ovat yhdistettyjä lämmitys- ja jäähdytys- sekä lämmöntalteenottoinsiirtimiä. Tässä kytkennässä lämmönsiirtimeen voidaan syöttää suoraan lämmitysverkostosta lämmintä vettä, jolloin jäätymistä ei pääse tapahtumaan. Tässä tilanteessa järjestelmän hyötysuhde kuitenkin laskee merkittävästi.

## 2.5 Nestekiertoisen lämmöntalteenoton laskentaan tarvittavat kaavat

Nestekiertoisen LTO-järjestelmän komponentteja mitoittaessa voi käyttää lämmönsiir-  
rosta tuttuja kaavoja [5, s. 17]. Lämpökapasiteettivirta lasketaan aineen massavirrasta ja  
ominaislämpökapasiteetista.

$$\dot{C} = \dot{m} * c_p \quad (1)$$

$\dot{C}$	lämpökapasiteettivirta, W/K
$\dot{m}$	massavirta, kg/s
$c_p$	aineen ominaislämpökapasiteetti J/kgK.

Kun tiedetään lämpökapasiteettivirta, sen avulla voidaan laskea lämmönsiirtimessä siir-  
tyvä teho kertomalla lämpökapasiteettivirta aineen lämpötilamuutoksella. [5, s. 17.]

$$\Phi = \dot{C} * \Delta t \quad (2)$$

$\Phi$	teho, W
$\dot{C}$	lämpökapasiteettivirta, W/K
$\Delta t$	virran lämpötilan muutos, K.

Lämmönsiirtyminen lämmönsiirtimissä ei ole lineaarista, joten sitä ei voida luotettavasti  
laskea suoraan keskilämpötilaeroista. Laskennassa tulee käyttää logaritmista lämpöti-  
laeroa. [6] Logaritminen lämpötilaero lasketaan lämmönsiirtimen läpi virtaavien ainei-  
den lämpötilaerojen avulla seuraavasti [5, s. 17]:

$$\theta_{ln} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\ln(\frac{\theta_2}{\theta_1})} \quad (3)$$

$\theta_{ln}$	logaritminen lämpötilaero, K.
$\theta_2$	virtaavien aineiden lämpötilaero lämmönsiirtimessä, K.
$\theta_1$	virtaavien aineiden lämpötilaero lämmönsiirtimessä, K.

Lämmönsiirtimen konduktanssi on suure, joka kuvaa lämmönsiirtimen lämmönsiirtokykyä. Lämmönsiirtimen konduktanssin voi laskea, kun lämmönsiirtimen lämmönläpäisykerroin sekä lämmönsiirtopinta-ala on tiedossa [6].

$$G = UA \quad (4)$$

G	konduktanssi, W/K
U	lämmönsiirtimen lämmönläpäisykerroin, W/m <sup>2</sup> K
A	lämmönsiirtimen lämmönsiirtopinta-ala, m <sup>2</sup>

Luotettavin keino määrittää lämmönsiirtimessä siirtyvä teho on laskea se lämmönsiirtimen konduktanssin ja logaritmisen lämpötilaeron välillä [6].

$$\Phi = G * \theta_{ln} \quad (5)$$

$\Phi$	lämmönsiirtimessä siirtyvä teho, W
$\theta_{ln}$	logaritminen lämpötilaero, K.

Tuloilman lämpötilahyötysuhde on laskennan kannalta oleellinen tieto, koska ekosuunnitteludirektiivi 2009/125 EY:n asettamat rajat sallituille ilmanvaihtokoneille käsittelevät tätä arvoa. Tuloilman lämpötilahyötysuhde voidaan selvittää seuraavalla kaavalla [6].

$$\eta_t = \frac{t_{tulo} - t_{ulko}}{t_{poisto} - t_{ulko}} \quad (6)$$

$\eta_t$	tuloilman lämpötilahyötysuhde
$t_{tulo}$	ulkoilman lämpötila lämmöntalteenoton lämmönsiirtimen jälkeen, °C
$t_{ulko}$	ulkoilman lämpötila, °C
$t_{poisto}$	poistoilman lämpötila, °C

Painehäviön muutos lämmönsiirtimissä eri virtaamilla voidaan määrittää seuraavalla kaavalla [7].

$$\Delta p_2 = \left(\frac{q_{v2}}{q_{v1}}\right)^2 * \Delta p_1 \quad (7)$$

$\Delta p_2$	painehäviö uudella virtaamalla, Pa.
$\Delta p_1$	painehäviö alkuperäisellä virtaamalla, Pa.
$\Delta q_{v2}$	uusi virtaama, m <sup>3</sup> /s.
$\Delta q_{v1}$	alkuperäinen virtaama, m <sup>3</sup> /s.

## 2.6 Nestekiertoisen lämmöntalteenoton laskenta

Laskennassa hyödynnetään edellä mainittuja kaavoja. Laskennan tavoite on saada koko lämmönsiirtoketju asettumaan tasapainotilaan iteroimalla [6]:

- Poistoilmavirta luovuttaa nesteeseen:  $\Phi_{\text{poistoilma}} = \dot{C}_{\text{poistoilma}} * \Delta t_{\text{poistoilma}}$
- Tuloilmavirta saa nesteestä:  $\Phi_{\text{tuloilma}} = \dot{C}_{\text{tuloilma}} * \Delta t_{\text{tuloilma}}$
- Neste saa ja antaa:  $\Phi_{\text{neste}} = \dot{C}_{\text{neste}} * \Delta t_{\text{neste}}$
- Poistoilman lämmönsiirrin siirtää:  $\Phi_{\text{poistolämmönsiirrin}} = G_{\text{poistolämmönsiirrin}} * \theta_{\text{In,poistolämmönsiirrin}}$
- Tuloilman lämmönsiirrin siirtää:  $\Phi_{\text{tulolämmönsiirrin}} = G_{\text{tulolämmönsiirrin}} * \theta_{\text{In,tulolämmönsiirrin}}$

Laskennassa haetaan lämpötilatasoja, joissa kaikkien edellä mainittujen yhtälöiden tulokset ovat yhtä suuria ja tuloilman lämpötila hyötysuhde on mahdollisimman suuri. Tasapainotilanteen löytyessä voidaan tuloksista määrittää esimerkiksi optimaalinen nesteen lämpökapasiteettivirta ja siitä edelleen laskea nestevirta. [6]

Tärkeimmät reunaehdot laskentaan ovat jäteilman alin sallittu lämpötila sekä nesteen alin sallittu lämpötila sen lähtiessä tuloilman lämmönsiirtimestä. Jäteilman alin sallittu lämpötila on riippuvainen poistoilman absoluuttisesta kosteudesta. Poistoilman absoluuttisen kosteuden ollessa korkea kastepiste tulee korkeamassa lämpötilassa vastaan, ja

tällöin huurretta alkaa esiintyä jo korkeammassa jäteilman lämpötilassa. Normaaaleissa olosuhteissa (Ilman kosteus 20...30 % ja lämpötila 20...24 °C) alin jäteilman lämpötila ennen huurtumista on +1...1,5 °C. [3]

Nesteen alin sallittu lämpötila määrittyy nesteen ominaisuuksista. Esimerkiksi vesi-glykoliliuokselle (35 % etyleeniglykolia) jäätymispiste on –16,6 °C [3]. Mitoituksissa on kuitenkin hyvä käyttää varmuuskertoimia, ja tässäkin tapauksessa olisi suositeltavaa mitoittaa nesteen tuloilman lämmönsiirtimestä lähteväksi lämpötilaksi joitakin asteita jäätymispistettä lämpimämmäksi.

Laskennassa ei oteta huomioon lämmönsiirtimien konduktanssin muutosta virtaamien muuttuessa. Tällöin painehäviöt muuttuvat siirtimissä ja lämmönsiirtokyky muuttuu. Kaikessa laskennassa on käytetty kuivaa ilmaa ja ilmakehän kosteutta ei ole huomioitu.

### 3 Kohteen esittely

#### 3.1 Lähtötiedot

Lähtötietoina saatiin kohteen vanhoja piirustuksia, mukaan lukien LVI-suunnitelmat, sähkösuunnitelmat ja rakennesuunnitelmat. Kohteen nykyiset energiankulutustiedot pyydettiin paikalliselta energiayhtiöltä tunneittain vuoden ajalta ja kulutukset normeerattiin vertailutietoihin (TRY2012). [8]

Tilaaajan toiveesta toimistotiloja palvelevan IV-koneen palvelualueelle haluttiin mitoittaa riittävät ilmapirrat mahdollista tulevaa tilamuutosta ajatellen. Lähitulevaisuudessa rakennuksessa on tarkoitus purkaa nykyiset toimistohuoneet ja rakentaa tilalle avokonttori-tyyppisiä tiloja.

Nykyiset puhaltimet ovat kaksinopeuspuhaltimia, joiden nykyiset käyntiajat selvitettiin kohteen automaatiojärjestelmästä. IV-koneiden mitoitusilmapirrat selvitettiin alkuperäisistä LVI-suunnitelmista ja niiden paineentuotto nykytilanteessa mitattiin kohdekäynnillä.

### 3.2 Ilmanvaihtokoneet nykytilanteessa

Taulukossa 1 on esitetty nykytilanteen mukaiset toimeksiannon piiriin kuuluvat ilmanvaihtokoneet, niiden sijainti, suunnitellut ilmavirrat sekä mahdollinen lämmöntalteenotto. Ilmanvaihtojärjestelmän saneerauksen suunnittelussa tässä kohteessa merkittäviä huomioitavia asioita ovat uima-allasta palvelevan IV-koneen erityisvaatimukset sekä poistokoneiden PK204 ja PK206 jäteilmakanavistojen eristeettömyys. Nykyaikaista lämmöntalteenottoa suunniteltaessa on jäteilmakanaviston eristys tärkeää, jotta kondenssiongelmita vältytään. [9] Toinen vaihtoehto on sijoittaa PK204 ja PK206 uusissa suunnitelmissa vesikatolle, jolloin nykykanavisto voi pysyä eristyksen osalta ennallaan.

Taulukko 1. Kohteen IV-koneet nykytilanteessa.

	Vaikutusalue	Sijainti	Ilmamäärä (m <sup>3</sup> /s)	LTO
TK201	1-4 krs	Ullakko krs	10,6	Glykoli
TK202	Saunatilat	Ullakko krs	0,7	Ei
TK203	Arkisto	2. kellari krs	1,3	Ei
TK204	Uima-allas ja kuntosali	2. kellari krs	4,9	Ei
TK205	Yhdystunneli	2. kellari krs	1,4	Ei
TK206	Pysäköintihalli	2. kellari krs	10,8	Ei
PK201	1-4 krs	Ullakko krs	10,2	Glykoli
PK202	Saunatilat	Ullakko krs	0,8	Ei
PK203	Arkisto	Vesikatto	1,3	Ei
PK204	Uima-allas ja kuntosali	2. kellari krs	4,9	Ei
PK205	Yhdystunneli	Vesikatto	1,4	Ei
PK206	Pysäköintihalli	2. kellari krs	12,5	Ei
PK207	1-4 krs WC-tilat	Vesikatto	0,7	Ei
PK208	1-4 krs WC-tilat	Vesikatto	0,4	Ei

## 4 Tulokset

Opinnäytetyössä laadittiin taulukkolaskentatyökalu, jolla pystyy tehokkaasti ratkaisin-toiminon avulla selvittämään ilmavirtojen ja nestevirtojen lämpötilat useilla eri muuttujilla. Laskennan tuloksena on myös selvinnyt, että optimaalinen nestevirta lämmönsiirtymiselle on piste, jossa ilmavirtojen sekä nesteen lämpökapasiteettivirrat ovat yhtä suuret. Tällöin saadaan suurin teho lämmönsiirtimistä ja paras tuloilman lämpötilahyötysuhde.

Taulukossa 2 on esitetty perustilanne ekosuunnitteludirektiivin määrittämällä lähtöarvoilla (poistoilman lämpötila 25 °C, tuloilman lämpötila +5 °C, ilmankosteudet 0 %) ja hyötysuhdevaativuksella (68 %) [1]. Tähän tulokseen päästään, kun lämmönsiirtimien konduktanssit ovat 4,2-kertaiset lämpökapasiteettivirtoihin nähden.

Taulukko 2. Ilmavirtojen ja nestevirran lämpökapasiteettivirrat yhtä suuret.

<b>Syöttötiedot</b>					
Poistoilman lämpötila	25 °C	Poistoilman lämpökapasiteettivirta	1 kW/k		
Ulkoilman lämpötila	5 °C	Tuloilman lämpökapasiteettivirta	1 kW/k		
Poistopatterin G-arvo	4,2 kW/k	Nesteen lämpökapasiteettivirta	1 kW/k		
Tulopatterin G-arvo	4,2 kW/k				
<b>Tulokset</b>					
Tuloilman hyötysuhde	68 %	Poistoilman lämpötila	25 °C		
Järjestelmän teho	13,5 kW	Jäteilman lämpötila	11,5 °C		
		Ulkoilman lämpötila	5 °C		
		Tuloilman lämpötila	18,5 °C		
		Nestevirran lämpötila poistopatterilta	21,8 °C		
		Nestevirran lämpötila tulopatterilta	8,2 °C		

Tehostamalla nesteen lämpökapasiteettivirtaa voidaan pienentää tuloilman lämpöhyötysuhdetta ja laskea järjestelmän siirtävää tehoa. Taulukossa 3 on esitetty nesteen lämpökapasiteettivirran eli tässä tapauksessa massavirran kaksinkertaistamisen vaikutus järjestelmän siirtämään tehoon ja tuloilman lämpötilahyötysuhteeseen. Käytännössä aineen lämpökapasiteettivirran muutokset ovat massavirran muutoksia, koska ominaislämpökapasiteetit pysyvät likimain vakioina.

Taulukosta 3 voidaan havaita järjestelmän tehon lasku ja tuloilman lämpötilahyötysuhteen lasku. Suurin muutos tapahtuu nestevirran lämpötilaerossa.

Tutkimustuloksena tämä on merkittävä, koska tilanteessa, jossa nestevirran lämpötila lähestyy jäätymisrajoja, voidaan sen tehonsiirtoa vähentää massavirtaa nostamalla.



Taulukko 3. Nestevirran lämpökapasiteettivirta kaksinkertainen ilmavirtojen lämpökapasiteettivirtoihin nähden.

<b>Syöttötiedot</b>					
Poistoilman lämpötila	25 °C	Poistoilman lämpökapasiteettivirta	1 kW/k		
Ulkoilman lämpötila	5 °C	Tuloilman lämpökapasiteettivirta	1 kW/k		
Poistopatterin G-arvo	4,2 kW/k	Nesteen lämpökapasiteettivirta	2 kW/k		
Tulopatterin G-arvo	4,2 kW/k				
<b>Tulokset</b>					
Tuloilman hyötysuhde	61 %	Poistoilman lämpötila	25 °C		
Järjestelmän teho	12,2 kW	Jäteilman lämpötila	12,8 °C		
		Ulkoilman lämpötila	5 °C		
		Tuloilman lämpötila	17,2 °C		
		Nestevirran lämpötila poistopatterilta	18,0 °C		
		Nestevirran lämpötila tulopatterilta	12,0 °C		

Taulukossa 4 on esitetty edelleen tilanne ekodirektiivin määrittelemillä lähtöarvoille. Tällä kertaa on tutkittu pattereiden konduktanssin vaikutusta tehoon. Konduktanssin suhde lämpökapasiteettivirtoihin on mitoituksen kannalta merkittävin tutkittava arvo.

Taulukko 4. Pattereiden konduktanssin (G-arvo) vaikutus järjestelmän tehoon ja tuloilman lämpötila hyötysuhteeseen.

<b>Syöttötiedot</b>					
Poistoilman lämpötila	25 °C	Poistoilman lämpökapasiteettivirta	1 kW/k		
Ulkoilman lämpötila	5 °C	Tuloilman lämpökapasiteettivirta	1 kW/k		
Poistopatterin G-arvo	2,5 kW/k	Nesteen lämpökapasiteettivirta	1 kW/k		
Tulopatterin G-arvo	2,5 kW/k				
<b>Tulokset</b>					
Tuloilman hyötysuhde	56 %	Poistoilman lämpötila	25 °C		
Järjestelmän teho	11,1 kW	Jäteilman lämpötila	13,9 °C		
		Ulkoilman lämpötila	5 °C		
		Tuloilman lämpötila	16,1 °C		
		Nestevirran lämpötila poistopatterilta	20,6 °C		
		Nestevirran lämpötila tulopatterilta	9,4 °C		

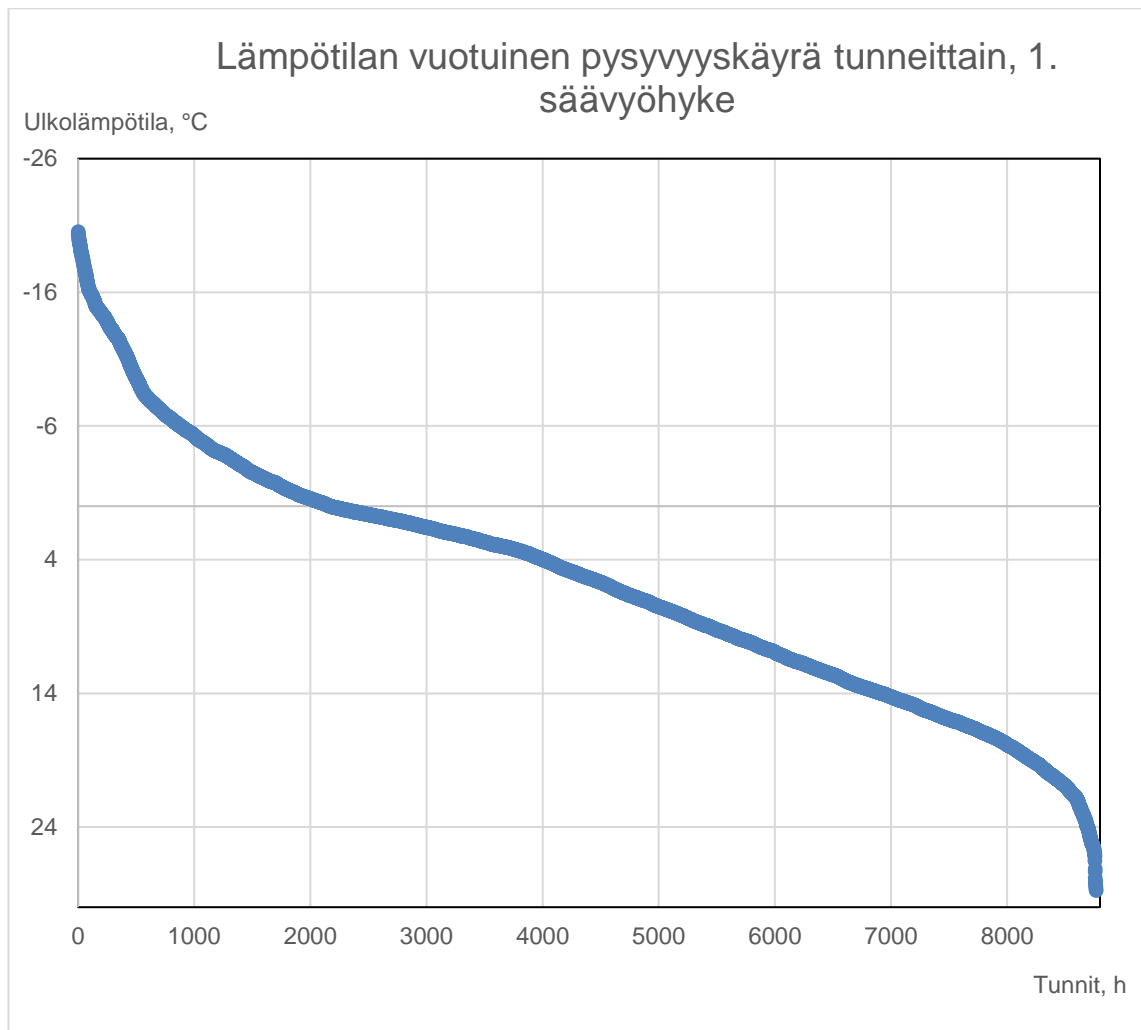
## 5 Suunnitteluohje

### 5.1 LTO-pattereiden mitoittaminen taulukkolaskentatyökalun avulla

Taulukkolaskentatyökalun avulla tutkittiin sopivaa mitoituskohteesta nestekiertoisen LTO:n pattereille. Mitoittamisessa merkittävät muuttujat ovat pattereiden lämmönsiirtopinta-ala, ulkolämpötila ja jäteilman haluttu lämpötila.

Tutkimustulosten perusteella optimaalinen nestevirta tehon suhteen pattereiden välillä saavutetaan, kun nestevirran lämpökapasiteettivirta on yhtä suuri kuin pattereille tulevien ilmavirtojen lämpökapasiteettivirrat. Nestekapasiteettivirtaa suurentamalla siirtyvä teho pienenee, ja tällöin nestevirran lämpötilamuutokset pysyvät myös pienempinä. Tätä tietoa voidaan käyttää hyväksi, kun ulkoilma on todella kylmä, nestevirran lämpötila laskee ja jäteilman lämpötila laskee huurtumisrajalle.

Mitoittamisen suurin haaste on kuitenkin optimin löytäminen energiatehokkuuden ja toimintavarmuuden väliltä. Kun pattereiden G-arvo on 1,5-kertainen suhteessa sekä ilmavirtojen että nesteen lämpökapasiteettivirtoihin, saadaan täysin turvallinen mitoitus toiminnan kannalta 1. säävyöhykkeen mitoitusulkolämpötilassa  $-26\text{ °C}$ . Tällöin jäteilman ulospuhalluslämpötila on  $+1,4\text{ °C}$ . Järjestelmän tuloilman lämpötilahyötysuhde on kuitenkin vain 43 %. Kuvasta 2 voidaan havainnoida lämpötilan pysyvyyttä 1. säävyöhykkeellä [8]. Vain 1,7 % vuotuisista tunneista on kylmempiä kuin  $-15\text{ °C}$  ja vain 0,6 % vuotuisista tunneista on kylmempiä kuin  $-18\text{ °C}$ .



Kuva 2. Lämpötilan vuotuinen pysyvyyskäyrä tunneittain, 1. säävyöhyke [8].

Mitoittamalla lämmönsiirtimet vastaavalla jäteilman ulospuhalluslämpötilalla  $+1,4\text{ °C}$  ulkolämpötilassa  $-15\text{ °C}$  saadaan pattereiden G-arvoiksi 2,5-kertainen suhteessa ilmavirtojen ja nesteen lämpökapasiteettivirtoihin. Tällöin tuloilman lämpötilahyötysuhde on 56 %, mikä on jo huomattavasti parempi ja energiatehokkaampi ratkaisu.

Jotta voidaan saavuttaa ekosuunnitteludirektiivin vaatimusten mukainen 68 %:n lämpötilahyötysuhde [1], täytyy pattereiden G-arvojen olla vähintään 4,2-kertainen suhteessa ilmavirtojen ja nesteen lämpökapasiteettivirtoihin. Tällöin jäteilman lämpötila laskee kriittisille rajoille  $-8\text{ °C}$ :n ulkolämpötilassa.

Pattereita mitoittaessa tulee huomioida myös muuttuvat ilmavirrat ja nestevirrat. Normalisissa toimintatilanteissa nestepuolen painehäviö tulisi mitoittaa siten, että se on

toimiva ja lämmönsiirto ei häiriinny (turbulenttinen virtaus). Nestevirran tehostamisen myötä täytyy kuitenkin jättää pelivaraa, eli lämmönsiirrintä ei saa mitoittaa liian suurella painehäviöllä, jotta tehostusvara jää.

LTO-pattereiden mitoituksessa täytyy myös huomioida ilmapuolella poistoilman suhteellisen kosteuden vaikutus tarvittavaan lamelliväliin. Suunniteltaessa LTO-pattereita, on myös tärkeää muistaa niiden käytönajan huollettavuus. Riittävän suuret lamellivälit ja -paksuudet helpottavat oleellisesti käytönaikaista huoltoa. [4]

## 5.2 LTO-verkoston lämmönsiirtimien mitoittaminen kohteeseen

Kohteessa LTO-verkoston lämmönsiirtimien mitoitusta helpottaa toimistokerrosten likaisista poistoista saatava lämpöteho. Näiden avulla LTO-verkostoa palvelevien poistoilmavirtojen lämpökapasiteettivirta on vähintään 1,08-kertainen tuloilmavirtojen lämpökapasiteettivirtaan nähden. Tämä heikentää hieman laskennallisesti tuloilman lämpötilahyötysuhdetta, mutta sen avulla jäteilmojen keskimääräinen lämpötila pysyy hieman korkeammalla. Tällöin lämmönsiirtimet voidaan mitoittaa hieman suuremmalla G-arvolla ja silti pysyä vielä turvallisella mitoitusalueella.

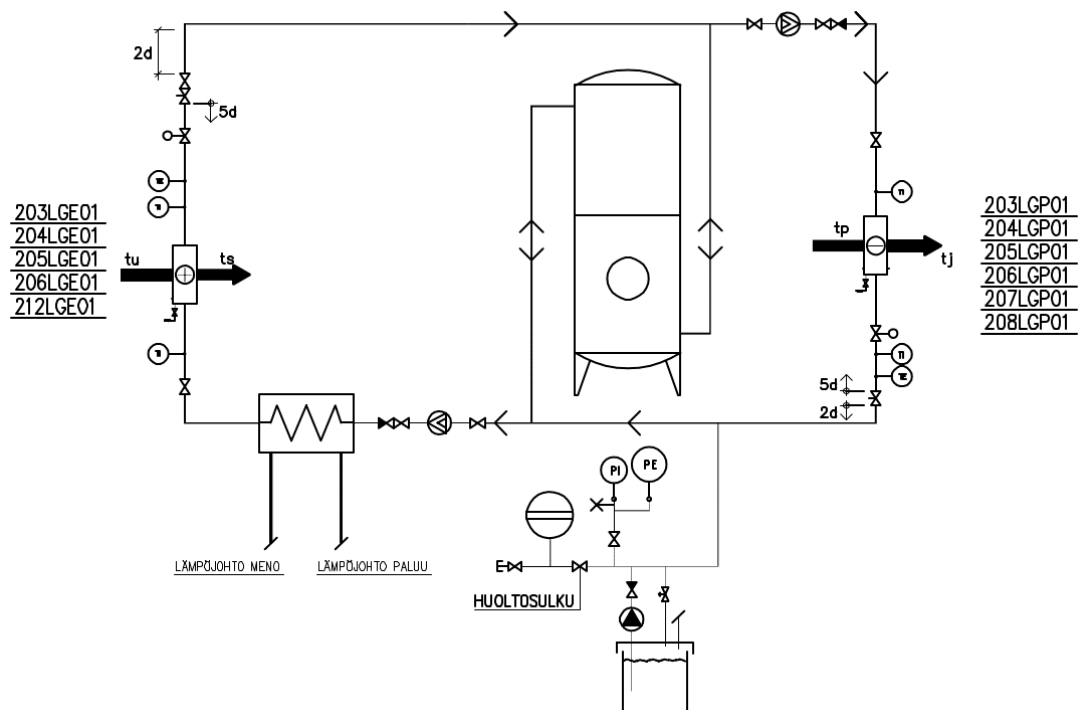
## 5.3 LTO-verkoston suunnittelu kohteeseen

Perinteisillä kytkennöillä yksi kiertopumppu huolehtii koko nesteverkoston toiminnasta. Tämä asettaa toiminnalle rajoitteita, koska lähestyttäessä jäätymisvaaratilannetta ainut säätövara on nostaa kyseisen kiertopumpun avulla nestevirtaa koko verkostossa. Tällöin lämmönsiirto heikkenee sekä tuloilmalämmönsiirtimessä että poistoilmalämmönsiirtimessä. Jos samaan aikaan on huurteenpoistotilanne joissakin poistoilmapattereista, lopputuloksena on edelleen verkoston negatiivinen lämpöenergiantase ja nesteen keskimääräisen lämpötilan lasku. Kuvassa 3 esitetyllä kahdella kiertovesipumpulla toimiva verkosto varaajakytkennällä antaa lisää ohjattavuutta verkostolle. Tällöin jäätymisvaaratilanteessa voidaan nostaa tuloilmapattereita palvelevan kiertopumpun kierroslukua ja sitä kautta sen tuottamaa virtaamaa, jolloin tuloilmapattereissa tapahtuva lämmönsiirto heikkenee. Samaan aikaan toinen kiertovesipumppu voi pitää poistopuolella kiertävän

nestevirran optimaalisena lämmönsiirron kannalta, ja tällöin koko verkoston kokonaislämpötase on positiivinen. Yksittäisten poistoilmapattereiden huurteenpoistotilanne laskee hieman nestevirtaan tulevaa lämpöenergiaa, mutta tilanne ei ole lainkaan niin huono kuin yhden pumpun ohjauksella.

Varaajasäiliön käyttö mahdollistaa erisuuruisten virtaamien käyttämisen verkoston tulo- ja poistopuolella. Varaaja täytyy kuitenkin kytkeä kuvassa 3 esitetyllä tavalla, jotta tuloilmapattereille saadaan jokaisessa tilanteessa mahdollisimman korkeassa lämpötilassa olevaa nestettä sekä poistoilmapattereille vastaavasti mahdollisimman kylmää nestettä. Varaajasäiliö toimii myös järjestelmässä energiavaraajana, joka auttaa verkoston toimintaa palvelevien IV-koneiden käyntiaikojen vaihdellessa.

Lämmönsiirtimen ainoa tarkoitus kytkennässä on estää vesi-glykoli-liuosta jäätymästä tilanteesta, jossa ulkolämpötila on alhainen ja huurteenpoistotilanteista johtuen verkoston energiatasopaino reilusti negatiivinen. Tässä tilanteessa lämmönsiirtimen kautta voidaan nesteelle syöttää lisää lämpöenergiaa ja pitää sen lämpötila yli jäätymispisteen. Lisälämmön syöttäminen romahduttaa hetkellisesti lämmöntalteenoton lämpötilahyötysuhteen, mutta energiatehokkuuden kannalta on järkevämpää mitoittaa korkean hyötysuhteen lämmönsiirtimet ja huolehtia jäätymisenestosta kylmissä olosuhteissa esimerkiksi näin.



Kuva 3. Kytkentäesimerkki nestekiertoisesta lämmöntalteenottoverkostosta

Putkikokojen mitoittaminen täytyy tehdä huolella, jotta verkoston painehäviöt eivät kasva kohtuuttoman suuriksi. Putkikokojen mitoituksessa on mitoittavana tilanteena käytettävä tulopattereiden tehonrajoitustilannetta, jolloin nesteen virtaama on huipussaan. Kiertopumput täytyy mitoittaa niin, että niissä on riittävästi säätövaraa varmistaakseen verkoston toiminta kaikissa eri tilanteissa. Pumppuja mitoittaessa täytyy myös huomioida riittävä paineentuottokyky.

Jokaiselle tulo- ja poistoilmalämmönsiirtimelle tulee nestepuolelle suunnitella sopivan kokoinen 2-tieventtiili. 2-tieventtiileiden tulee olla säätöviä, ja niillä tulee olla riittävä auktoriteetti verkoston painehäviöihin nähden säätövyiden takaamiseksi. Lisäksi jokaisen ilmanvaihtokoneen omalle putkiosuudelle tulee suunnitella linjasäätöventtiili, jotta nestevirrat pystytään tasapainottamaan eri lämmönsiirtimien välillä.

## 5.4 Toimintaselostus

Oikeanlaisen toimintaselostuksen laadinta on yksi tärkeimmistä suunnitteluprosessissa laadittavista dokumenteista, jotta automaatio-ohjelmoitsija voi ohjelmoida järjestelmät toimimaan suunnitellulla tavalla. Tässä työssä esitettävien asioiden on oltava toimintaselostuksessa:

Ilmanvaihtokoneilla on asetusarvon mukainen käynnistymisviive, jotta LTO-pattereille saadaan riittävä virtaus ennen puhaltimen käynnistystä.

Tuloilmakoneiden LTO-pattereita palvelevat 2-tieventtiili saavat konekohtaisesti avautumisluvat, kun kyseinen IV-kone saa käyntiluvan. IV-koneen käyntiluvan poistuessa palataan lähtötilanteeseen käänteisessä järjestyksessä.

IV-koneiden lämmöntalteenoton lämmönsiirtimien paluulämpötilaa säädetään lämpötilamittauksen mukaisesti ulkolämpötilasta riippuvan lämpökäyrän mukaan, jotta nestevirtaa voidaan säätää ilmanvaihdon tarpeenmukaista seuraillen.

Nestekiertoisen lämmöntalteenottoverkoston toiminnan kannalta tuloilmapattereita palvelevan pumpun pyörimisnopeutta tulee säätää pattereilta palaavan nesteen mukaan. Jos palaavan nesteen lämpötilamittaus laskee alle asetusarvon, pyrkii kiertopumppu pitämään kierroksia nostamalla nesteen lämpötilan asetusarvossaan ja vastaava venttiili avataan kokonaan lämpötilan maksimoimiseksi. Lämpötilamittauksen noustessa kierto-pumpun pyörimisnopeutta voidaan pienentää, kunnes saavutetaan perustilanne.

Poistoilmakoneiden LTO-pattereita palvelevat 2-tieventtiilit saavat konekohtaisesti avautumisluvat, kun kyseinen IV-kone saa käyntiluvan. Venttiilit ovat normaalitilanteessa täysin auki, mutta niillä tarvittaessa pienennetään lämmönsiirtimen nestevirtaa, jos paineeromittaus lämmönsiirtimen ilmapuolen yli ylittää asetusarvon. Tällöin siirrytään huurteenpoistotilaan ja venttiilillä säätämällä normalisoidaan paine-ero lämmönsiirtimen yli.

Lämmönsiirtimen venttiili saa käyntiluvan ainoastaan tilanteessa, jossa tuloilman lämmöntalteenoton lämmönsiirtimiltä palaavien liuosten heikoin lämpötilamittaus alittaa asetusarvon. Tällöin venttiili pyrkii pitämään heikoimman lämpötilamittauksen asetusarvos-  
saan.

Tilanteessa, jossa vesi-glykoli-liuoksen heikoin lämpötila alittaa jäätymissuojan asetusarvon, kyseiseltä IV-koneelta poistuu käyntilupa välittömästi.

## 6 Pohdinta

Ekosuunnitteludirektiivin 2009/125 EY asettamat lämmöntalteenoton hyötysuhdevaatimukset ovat todella haastavat nestekiertoiselle lämmöntalteenotolle [1]. Direktiivin mukaisella hyötysuhdevaatimuksella toimiva järjestelmä vaatii huolellista suunnittelua. Riski nesteliuoksen jähmettymisestä tai jäätymisestä tuloilmakoneessa on todellinen, kun huurteenpoistotilasta aiheutuva nestekierto tulevan energian määrä laskee ja ulkolämpötila on todella kylmä.

Asioilla on kuitenkin usein useampia näkökulmia. Energiatehokkuuden näkökulmasta voitaneen todeta, että Etelä-Suomessa saavutetaan todella harvoin mitoitusulkolämpötilaa ( $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ja keskimäärin järjestelmän kannalta kriittisiä ulkolämpötilatunteja tulee vuosittain todella vähän. Onko kuitenkin järkevämpää ja elinkaarikustannuksiltaan kustannustehokasta ratkaista liuoksen jähmettymisongelma esimerkiksi insinööriyössä esitetyllä tavalla tai vaihtoehtoisesti esilämmittää raitisilmaa ennen sen LTO-lämmönsiirintä, jolloin liuoksen lämpötila ei pääse laskemaan kriittisille rajoille?

Laskennan mukaan 68 %:in hyötysuhteen nestekiertoisella lämmöntalteenotolla varustettu IV-kone säästää 65 % vuotuisesta lämmitysenergian tarpeesta, vaikka alle  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n ulkolämpötilassa lämmöntalteenoton hyötysuhde olisi 0 %, kun vertailu tehdään vastaavan kokoluokan IV-koneeseen, jossa ei ole lämmöntalteenottoa. Jos lämmöntalteenoton hyötysuhde olisi 30 % alle  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  ulkolämpötiloissa, olisi vuotuinen lämpöenergian säästö 70 %. Tästä voidaan todeta, että lisälämmön syöttäminen järjestelmään ei ole energiakustannuksiltaan läheskään yhtä merkittävä tekijä kuin IV-koneen lämmöntalteenoton hyötysuhde.

Elämme tällä hetkellä nopeasti muuttuvassa maailmassa ja energiatehokkuudella on yhä suurempi merkitys LVI-suunnittelussa, kun rakennusten hiilijalanjälkeä halutaan pienentää. Uusille innovaatioille on valtava tarve, mutta järjestelmien toimivuudesta ei kuitenkaan tule tinkiä energiatehokkuuden kustannuksella.



## 7 Yhteenveto

Työn tarkoituksena oli selvittää IV-saneerauksen toteutettavuutta haastavassa korjausrakentamisen kohteessa. Painopiste oli selvittää nestekiertoisen lämmöntalteenottojärjestelmän suunnittelua ja toimintaa eri olosuhteissa.

Insinööriyötä varten tutustuttiin alan kirjallisuuteen ja tiedossa oleviin ratkaisuihin, jotta ekosuunnitteludirektiivin 2009/125 EY asettamiin lämmöntalteenoton lämpötilahyötysuhdetavoitteisiin päästäisiin järjestelmän toimivuudesta tinkimättä. [1]

Työn tuloksena syntyi taulukkolaskentatyökalu, jonka avulla voidaan mitoittaa ja selvittää nestekiertoisen lämmöntalteenoton toimintaa eri lähtöarvoilla sekä eri mitoitus tilanteissa. Toisena tuloksena oli uusi kytkentätapa nestekiertoiselle lämmöntalteenottojärjestelmälle. Kahden kiertopumpun sekä varaajasäiliön järjestelmässä voidaan järjestelmää ohjata tehokkaammin. Kytkenämenetelmällä voidaan samanaikaisesti rajoittaa tuloilmaan siirtyvää tehoa ja tuloilmapatterin lämpötilahyötysuhdetta sekä optimoida poistoilmavirrasta saatavaa tehoa.

Insinööriyön laskelmissa ei huomioitu nestevirran muuttumisen vaikutusta lämmönsiirtimien konduktanssiin. Ilmavirroista saatu teho laskettiin kuivalla ilmalla, ja ilman kosteudesta siirtyvä teho jäi huomiotta. Näitä asioita on tarpeen tutkia lisää, kun taulukkolaskentatyökalua kehitetään yhä paremmaksi työkaluksi projektityön tarpeisiin.

## Lähteet

- 1 Ekosuunnitteludirektiivi tiukentaa vaatimuksia 1.1.2018. 2017. Verkkoaineisto. Energent Oy. <https://www.energent.fi/ilmanvaihdon-asiantuntijoilta/ekosuunnitteludirektiivi-tiukentaa-vaatimuksia-1-1-2018/>. Luettu 10.10.2019.
- 2 Lämmön talteenotto. Verkkoaineisto. Retermia Oy. <https://www.retermia.fi/fi/tekologia/lammontalteenotto/>. Luettu 10.10.2019.
- 3 Tani, Jussi. 2018. LTO-poistopatterin huurtumisen rajoittaminen. Verkkoaineisto. Taniplan Oy. <https://www.taniplan.fi/userData/taniplan/tiedostot/lammonsiirtopatterit/Huurtumistarkastelu-2018-C.pdf>. Luettu 5.10.2019.
- 4 Pelkonen, Keijo. 2018. LTO-järjestelmien LVI-suunnittelun osaamisen vaatimuksia. Verkkoaineisto. <https://www.helvi.net/ajankohtaista/52-lto-jarjestelmien-lvi-suunnittelun-osaamisen-vaatimuksia>. Luettu 6.10.2019.
- 5 Teollisuuden energiatekniikka – Peruskaavat ja käsitteet. Aalto Yliopisto. Opetusmateriaali. 2011. Verkkoaineisto. [https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/188122/mod\\_resource/content/1/Ene-59\\_4101\\_peruskaavat\\_ja\\_kasitteet.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/188122/mod_resource/content/1/Ene-59_4101_peruskaavat_ja_kasitteet.pdf). Luettu 12.10.2019.
- 6 Yrjölä, Jukka. 2017. Yliopettaja. Vasta- ja myötävirtalevyllämmönsiirtimet. Luentomateriaali. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 7 Valkeapää, Aki. 2017. Yliopettaja. LVI-verkostojen virtaustekninen tasapainotus. Luentomateriaali. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 8 Lämpötilavyöhykkeittäin lasketut pysyvyysarvot nykyisessä ilmastossa. Verkkoaineisto. Ilmatieteen laitos. <https://ilmatieteenlaitos.fi/energiälaskennan-testivuodet-nyky>. Luettu 6.10.2019.
- 9 Matilainen, Veijo. Asuinrakennusten ilmanvaihto. Verkkoaineisto. <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK050306.pdf>. Luettu 14.10.2019.
- 10 Ethylene Glycol Heat-Transfer Fluid. Verkkoaineisto. The Engineering ToolBox. [https://www.engineeringtoolbox.com/ethylene-glycol-d\\_146.html](https://www.engineeringtoolbox.com/ethylene-glycol-d_146.html). Luettu 21.11.2019.