

Mauno Vitikka

**EPÄSUORAN KOSTUTUSJÄÄHDYTYKSEN KÄYTTÖ KONEEL-
LISEN JÄÄHDYTYKSEN YHTEYDESSÄ**

EPÄSUORAN KOSTUTUSJÄÄHDYTYKSEN KÄYTTÖ KONEEL- LISEN JÄÄHDYTYKSEN YHTEYDESSÄ

Mauno Vitikka
Opinnäytetyö
Kevät 2016
Talotekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Talotekniikan koulutusohjelma, LVI-tekniikan suuntautumisvaihtoehto

Tekijä: Mauno Vitikka

Opinnäytetyön nimi: Epäsuoran kostutusjäähdytyksen käyttö koneellisen jäähdytyksen yhteydessä.

Työn ohjaaja: Pirjo Kimari.

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2016. Sivumäärä: 38 + 2 liitettä

Tämä työ on tehty FreshWind Oy:n toimeksiannosta. Työssä tarkastellaan epäsuoran kostutusjäähdytyksen kannattavuutta koneellisen jäähdytyksen yhteydessä. Tarkasteltava järjestelmä koostuu jäähdytykseen vaikuttavilta osilta korkeapainesumutuslaitteesta ja lämmönsiirtimestä. Taloudellinen kannattavuus voi syntyä järjestelmän energiansäästöstä ja joissain tapauksissa myös pienentyneistä investointikustannuksista.

Kostutusjäähdytyksen energiataloudellista kannattavuutta tutkittiin valitussa esimerkkitapauksessa Jyväskylän, Vantaan ja Sodankylän olosuhteissa. Esimerkkitapaus pyrittiin valitsemaan vastaamaan tyypillistä toimistotilojen ilmastointiin käytettyä järjestelmää. Kostutuslaitteiston tuottama vuosittainen hyödyksi tuleva jäähdytysenergia laskettiin Excel-taulukossa Ilmatieteenlaitoksen laa-
timille rakennuksen energialaskennan testivuosille.

Työn tuloksista selviää, että epäsuoralla kostutusjäähdytyksellä voidaan saavuttaa merkittäviä prosentuaalisia säästöjä tuloilman jäähdytykseen tarvittavassa energiassa. Suomen oloissa tuloilman jäähdyttämiseen tavanomaisessa ilmastointikoneessa kuluu kuitenkin suhteellisen vähän sähköenergiaa. Näin ollen epäsuoran kostutusjärjestelmän lisääminen jo olemassa olevaan hyvin toimivaan jäähdytysjärjestelmään ei ole taloudellisesti perusteltua.

Sen sijaan epäsuoraa kostutusjäähdytyslaitteistoa voidaan käyttää yksinään kesä-ajan lämpötilojen alentamiseksi. Jäähdytysenergian tuottoon nähden tä-
mänkaltaisen laitoksen investointi ja energiakustannukset tulevat tavanomaista kylmäkoneikolla varustettua laitteistoa edullisimmiksi

Asiasanat: kostutusjäähdytys, korkeapainesumutus, energialaskenta, ilmanvaihto.

ALKULAUSE

Tämän työn yhteydessä olen pääsy tutustumaan kostutukseen ja jäähdytykseen liittyviin prosesseihin ja niitä yhdistäviin matemaattisiin kaavoihin. Tästä saan kiittää työn tilaajaa FreshWind Oy:tä, joka on tarjonnut tarvittavat laitteet ja tilat työn suorittamista varten. Samalla haluan kiittää kaikkia yrityksen työntekijöitä, jotka ovat kukin omalta osaltaan tarjonneet apuaan, niin käytännön järjestelyissä, kuin myös työhön liittyvien ongelmapaikkojen ylipääsemisessä. Erityisen kiitoksen haluan esittää tilaajan yhdyshenkilölle Simo Saariselle, joka on työn edetessä kannustanut ja auttanut työhön tarvittavien resurssien järjestelyssä.

Oppilaitoksen osalta haluan kiittää erityisesti työn ohjaajaa Pirjo Kimaria kannustavasta ja opiskelijaa huomioivasta tuesta.

Oulu 15.1.2006

Mauno Vitikka

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
TIIVISTELMÄ	1
ALKULAUSE	2
SISÄLLYS	3
1 JOHDANTO	5
2 ILMAN OMINAISUUKSISTA	6
2.1 Sääolosuhteet ja niiden ennustettavuus	6
2.2 Ilman ominaisuuksia ja niitä yhdistävät laskentakaavoja	6
2.2.1 Kastepiste	6
2.2.2 Kylläisen höyryn paine	7
2.2.3 Vesihöyryn osapaine ja suhteellinen kosteus	8
2.2.4 Ilman kosteussisältö	8
2.2.5 Ilman ominaisentalpia	9
2.2.6 Märkälämpötila	10
3 JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄT JA NIISSÄ KÄYTETYT KOMPONENTIT	11
3.1 Korkeapaineekostutusjärjestelmä	11
3.2 Lämmönsiirtimet	13
3.2.1 Levylämmönsiirtimet	13
3.2.2 Pyörivät lämmönsiirtimet	13
3.2.3 Lämmönsiirrinten lämpötilasuhde/rekuperatioaste	14
3.3 Ilmastointikoneen jäähdytyspatteri	15
4 LASKETTU ESIMERKKITAPPAUS	20
4.1 Esimerkkitapauksen kuvaus	20
4.2 Huoneen vaikutus kosteuteen	20
4.3 Kylmäkertoimen vaikutus jäähdytyksen energiakulutukseen	21
4.4 tutkittavan järjestelmän toiminta	23
4.5 Esimerkkitapauksen laskennasta saadut tulokset	24

5 KOELAITTEISTOLLA TEHDYT MITTAUKSET	26
5.1 Mittausjärjestely	26
5.2 Koelaitteella tehdyt mittaukset	28
5.2.1 Lämpötilasuhteen mittaukset	28
5.2.2 Epäsuoran kostutusjäähdytyksen mittaukset	28
6 JOHTOPÄÄTÖKSET	31
7 YHTEENVETO	32
LÄHTEET	33
LIITTEET	34

1 JOHDANTO

FreshWind Oy suunnittelee ja valmistaa korkeapainesumutusjärjestelmiä, joita voidaan käyttää muun muassa kostutukseen, jäähdytykseen ja pölynsidontaan. Korkeapainesumutusjärjestelmiä on toimitettu vuodesta 2006 lähtien. Tässä opinnäytetyössä keskitytään korkeapainesumutusjärjestelmän käyttöön jäähdytystarkoituksessa.

Kostutusjäähdytyksen käyttö eri muodoissaan on tunnettu jo muinaisen Egyptin ja Persian ajoilta. 1900-luvulla Yhdysvalloissa on asiaan liittyen tehty useita patenteja (2). Suomessa asiaa on tutkittu erityisesti 1990-luvulla, jolta ajalta löytyy useita asiaa tutkivia opinnäytetöitä. Veden haihtumiseen perustuvien jäähdytyslaitteistojen yhteydessä puhutaan useimmin haihdutusjäähdytyksestä, kostutusjäähdytyksestä tai adiapaattisesta jäähdytyksestä (eng. adiabatic cooling, evaporative cooling).

Aihetta alustavasti selvitettäessä ei kuitenkaan löydetty opinnäytetyötä tai tutkimusta, jossa tarkastellaan epäsuoran kostutusjäähdytyksen käytön hyödyllisyyttä koneellisen jäähdytysjärjestelmän yhteydessä.

Epäsuoran kostutusjäähdytyksen käyttö koneellisen jäähdytysjärjestelmän apuna on lähtökohtana mielenkiintoinen. Koneellisella jäähdytyksellä varustetut ilmanvaihtojärjestelmät sisältävät yleensä valmiiksi suurimman osan myös epäsuoran kostutusjärjestelmän tarvitsemista komponenteista. Koneellisen jäähdytyksen yhteydessä kostutusjäähdytystä ei tarvitse mitoittaa huipputehon suhteen, vaan voidaan tukeutua siihen että koneellinen jäähdytys huolehtii tarvittaessa lopusta jäähdytystehon tarpeesta.

2 ILMAN OMINAISUUKSISTA

2.1 Sääolosuhteet ja niiden ennustettavuus

Normaalisti sää vaikuttaa erilaisten tilojen lämpökuormiin ja sitä kautta jäähdytystarpeeseen. Samalla ulkoilman lämpötila vaikuttaa ilmanvaihdesta saatavaan luonnolliseen jäähdytykseen ja tuloilman jäähdytystarpeeseen. Keskimääräiset ilman olosuhteet vaihtelevat vuorokauden ja vuodenaikojen mukaan. Lähipäiviä lukuun ottamatta tulevia hetkellisiä ilman olosuhteita ei voida ennustaa kovin tarkasti etukäteen. Sen sijaan tilastoihin pohjautuen voidaan määrittää mitoituksessa käytettäviä järkeviä mitoitusolosuhteita ja energialaskennassa käytettäviä keskimääräistä vuotta vastaavia olosuhteita.

Jäähdytyksen mitoituksessa voidaan käyttää esimerkiksi Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D2 kerrottuja mitoittavia ulkoilmaolosuhteita. Suomessa jäähdytyksen energialaskentaan käytetään yleisesti ympäristöministeriön eri paikkakunnille laatimia esimerkkivuotia (TRY2012), joissa on kerätty tunti-kohtaista säädataa, niin että ne kunkin kuukauden osalta vastaavat paikkakunnan keskimääräisiä olosuhteita.

2.2 Ilman ominaisuuksia ja niitä yhdistävät laskentakaavoja

2.2.1 Kastepiste

Kastepisteellä tarkoitetaan lämpötilaa, jossa ilman suhteellinen kosteus on 100 %. Kastepistelämpötilassa ilmassa olevan vesihöyryn tiivistyminen ja haihtuminen ovat tasapainossa. Kastepistelämpötilan alapuolella ilman sisältämä vesihöyry tiivistyy, eli tapahtuu kondensoitumista. Kastepistelämpötilan yläpuolella olevassa lämpötilassa taas tapahtuu veden haihtumista ilmaan. Kastepiste voidaan laskea kaavasta 1. (2)

$$T_d = \frac{T_n}{\left(\frac{m}{\log\left(\frac{P_w}{A}\right)} - 1 \right)}$$

KAAVA 1

T_d = kastelämpötila

P_w = Vesihöyryn osapaine hehtopascaleina

A ja T_n = ovat lämpötilasta riippuvia taulukoituja muuttujia, joiden arvot Väisälän (2) taulukon mukaan ovat lämpötilavälillä $-20\text{ °C} \dots +50\text{ °C}$:

$A = 6,116441$

$T_n = 240,7263$

$m = 7,59138$

.

2.2.2 Kylläisen höyryn paine

Kylläisen höyryn paineella tarkoitetaan vesihöyryn osapainetta tilanteessa jossa ilman suhteellinen kosteus on 100 %. Kylläisen höyryn paine voidaan kohtuullisella tarkkuudella laskea kaavasta 2. (2)

$$P_{ws} = A \cdot 10^{\frac{(m \cdot T)}{T + T_n}}$$

KAAVA 2

P_{ws} = Kylläisen höyryn paine hehtopascaleina

T = Lämpötila

A = Lämpötilasta riippuva taulukoitu muuttuja, jonka arvo tässä tapauksessa on 6,116441

2.2.3 Vesihöyryn osapaine ja suhteellinen kosteus

Vesihöyryn osapaineella tarkoitetaan ilman sisältämä vesihöyryn paineen osuutta ilman kokonaispaineesta. Ilman suhteellisella kosteudella tarkoitetaan ilman kosteussisältöä verrattuna kylläisen ilman vesisisältöön. Suhteellinen kosteus voidaan laskea kaavasta 3.(3)

$$\varphi = \frac{P_h}{P_{hs}} \quad \text{KAAVA 3}$$

φ = Ilman suhteellinen kosteus murtolukuna

P_h = Vesihöyryn osapaine (P_w)

P_{hs} = Kylläisen höyryn painen (P_{ws})

Vastaavasti edellisestä kaavasta ratkaisten vesihöyryn osapaine voidaan laskea kaavasta 4.

$$P_h = \varphi \cdot P_{hs} \quad \text{KAAVA 4}$$

2.2.4 Ilman kosteussisältö

Ilmastointia käsittelevissä laskelmissa ilman kosteussisältö ilmoitetaan vesihöyryn massan osuutena kuivan ilman massaa kohden. Kosteussisältö voidaan laskea kaavasta 5. (3 s. 188)

$$x = 0.6220 \cdot \frac{P_h}{P - P_h} \quad \text{KAAVA 5}$$

Tästä ratkaisemalla saadaan kaava 6, joka ilmoittaa vesihöyryn osapaineen ilmankosteuden funktiona.

$$P_h = x \cdot \frac{P}{x + 0.622}$$

KAAVA 6

x = Ilman kosteussisältö g/kg k.i

P_h = vesihöyryn osapaine Pascaleina

P = kostean ilman kokonaispaine (101325 Pa)

2.2.5 Ilman ominaisentalpia

Ilman ominaisentalpialla tarkoitetaan ilman lämpösisältöä painoyksikköä kohden verrattuna sovittuun nollapisteseen. Yleensä energiasisällön nollapisteenä käytetään 0 asteisen kuivan ilman energiasisältöä. Ilman ominaisentalpia voidaan laskea kaavasta 7. (3, s.186)

$$h = 1.006 \cdot t + x(2501 + 1.85 \cdot t)$$

KAAVA 7

h = ilman entalpia [kJ/kg]

t = ilman lämpötila [°C]

x = ilman kosteussisältö kg/kg k.i

2.2.6 Märkälämpötila

Ilman märkälämpötila voidaan laskea kohtuullisella tarkkuudella kaavasta 8 (4).

$$T_w := T \cdot \operatorname{atan} \left(0.151977 \cdot (RH + 8.313659)^{\frac{1}{2}} \right) + \operatorname{atan}(T + RH) - \operatorname{atan}(RH - 1.676331) \\ + 0.00391838 \cdot RH^{\frac{3}{2}} \cdot \operatorname{atan}(0.023101 \cdot RH) - 4.686035$$

KAAVA 8.

- T_w = ilman märkälämpötila

- T = ilman kuivalämpötila

- R_h % = ilman suhteellinen kosteus prosentteina

3 JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄT JA NIISSÄ KÄYTETYT KOMPONENTIT

Suorassa kostutusjäähdytyksessä jäähdytysteho saadaan aikaan jäähdyttämällä tuloilmaa haihduttamalla siihen vettä. Tämä lisää tuloilman kosteutta. Tästä voi olla haittaa esimerkiksi, silloin kun käytetään samanaikaisesti myös jäähdytyspalkkeja. Tällöin lisääntynyt ilmankosteus voi aiheuttaa veden kondensoitumista jäähdytyspalkkeissa.

Välillisessä kostutusjäähdytyksessä ilmaa, joko ulkoilmaa tai rakennuksesta poistuvaa poistoilmaa jäähdytetään kostuttamalla. Saatu jäähdytysteho hyödynnetään tuloilman jäähdytykseen lämmönsiirtimen avulla. Näin tuloilman kosteussisältö ei kasva.

Koneellinen jäähdytysjärjestelmä koostuu kompressorikäyttöisestä kylmäkoneesta ja jäähdytyspatterista. Suorahöyrysteisissä jäähdytyspattereissa kylmäaineen höyrystyminen tapahtuu suoraan jäähdytyspatterissa. Vesipattereissa kylmäaine höyrystyy erillisessä lämmönsiirtimessä, joka jäähdyttää ensin väliaineena toimivan veden. Jäähdytettyä vettä käytetään edelleen vesipatterin jäähdyttämiseen.

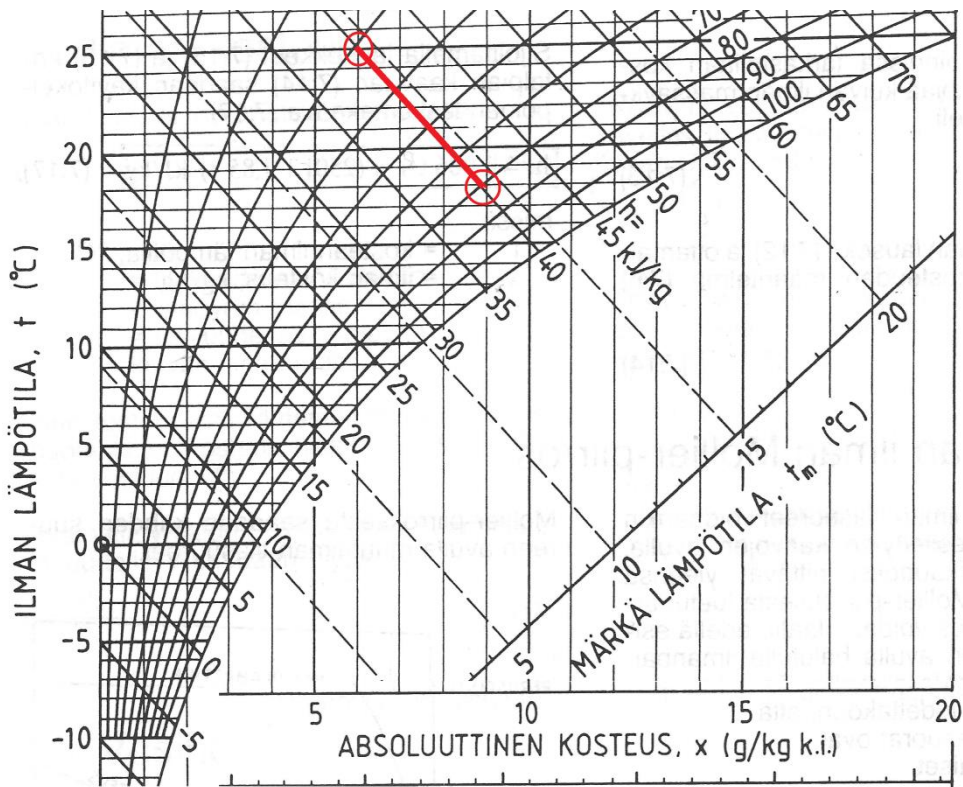
3.1 Korkeapainekostutusjärjestelmä

Korkeapaineisessa kostutusjärjestelmässä vettä ruiskutetaan suurella noin 80 bar:in paineella suutinten läpi kanavassa virtaavan ilman sekaan. Suuren paineen ansiosta vesi jakautuu hienoksi sumuksi, jonka pisarakoko on n. 20 μm . Pisarakoko riippuu jossain määrin käytetystä paineesta ja veden laadusta. (5)

Pienen pisarakoon ansiosta veden haihtuminen on nopeaa. Haihtuminen sitoo ilmassa olevaa lämpöä ja näin kanavassa olevaa ilmaa saadaan jäähdytettyä.

Seppäsen mukaan haihdutuskostutuksen prosessi kulkee Hx-diagrammissa vakioentalpiasuoraa pitkin. Vakioentalpiasuora on käytännössä samansuuntainen kuin märkälämpötilaa kuvaava suora, johon yleisesti viitataan ulkomaisissa kostutusjäähdystystä käsittelevissä artikkeleissa. (1)

Kostutusjäähdtyksestä on hyvä muistaa sen erityinen piirre. Kostutusjäähdtyks ei muuta ilman märkälämpötilaa, eli mitattavissa oleva märkälämpötila pysyy samana riippumatta, siitä mistä kohtaa prosessia se mitataan. Kuvassa 1 esitetään prosessin kulku hahmoteltuna HX-diagrammiin.



KUVA 1. Haihdutusjäähdtyksen prosessi kuvattuna Hx-diagrammiin.

Kuvan tapauksessa ilman alkulämpötila on 25 °C ja alkukosteus 6 g/kgki. Ilman kosteutta lisätään haihduttamalla vettä 3g/kgki, jolloin ilman loppulämpötilaksi saadaan 18 °C.

3.2 Lämmönsiirtimet

Lämmönsiirtimet voidaan jakaa kahteen pääryhmään. Rekuperatiivisissa lämmönsiirtimissä lämpö siirtyy johtumalla virtaukset erottavan lämpöä siirtävä pinnan läpi. Regeneratiivisissa lämmönsiirtimissä lämpö varastoituu välillä lämpöä siirtävään aineeseen. Regeneratiivisessa lämmönsiirtimessä lämpöä siirtävä pinta tulee vuoroin kosketukseen kummankin virtauksen kanssa, minkä ansiosta regeneratiivinen lämmönsiirrin voi siirtää lämmön lisäksi myös kosteutta.

3.2.1 Levylämmönsiirtimet

Rekuperatiivisissa lämmönsiirtimistä tyypillisimmin ilmastointikoneissa käytetään levylämmönsiirtimiä, joita valmistetaan sekä ristivirta- että vastavirtaperiaatteella toimivina. Näistä vastavirtaperiaatteella toimivien lämmönsiirtimien lämmönsiirtokyky on parempi. Levylämmönsiirtimissä ilmavirrat eivät pääse sekoittumaan, eivätkä ne myöskään missään olosuhteissa siirrä kosteutta ilmavirtojen välillä.

3.2.2 Pyörivät lämmönsiirtimet

Regeneratiivisista lämmönsiirtimistä pyörivä lämmönsiirrin on ilmastointikoneissa yleisin. Pyörivä lämmönsiirrin koostuu pyörivästä kennosta, jonka läpi ilma virtaa vuoroin kumpaankin suuntaan. Pyöriviä lämmönsiirtimiä on ilmastointitaroituksiin kahta päätyyppiä.

Kosteutta siirtävissä pyörivissä lämmönsiirtimissä kennon pinta on päällystetty kosteutta sitovalla aineella, jonka ansiosta lämmönsiirrin kykenee siirtämään myös kosteutta. Kosteutta siirtävän lämmönsiirtimen roottoria nimitetään usein hygroskooppiseksi tai sorptioroottoriksi. (6)

Tavanomaisessa pyörivissä lämmönsiirtimissä kennon pinnat eivät kykene sitomaan kosteutta, joten ne eivät siirrä kosteutta lukuun ottamatta tilanteita, joissa ilmavirtojen lämpötila ja kosteuserot ovat niin suuret, että kennon pinnassa tapahtuu kondensoitumista. (6)

3.2.3 Lämmönsiirrinten lämpötilasuhte/rekuperatioaste

Käytännön laskutoimituksia varten lämmönsiirtimille voidaan määrittää rekuperatioaste. Rekuperatioaste tarkoittaa kuinka paljon lämpöä lämmönvaihtimessa saadaan siirrettyä verrattuna siihen, kuinka paljon lämpöä olisi ollut ilmavirtojen välillä mahdollista siirtää. Ilmastointikoneiden yhteydessä rekuperatioastetta nimitetään yleensä tuloilman lämpötilasuhteeksi. Tuloilman lämpötilasuhte voidaan laskea kaavasta 9. (3, s. 295)

$$\eta_t = \frac{t_{u2} - t_{u1}}{t_{p1} - t_{u1}}$$

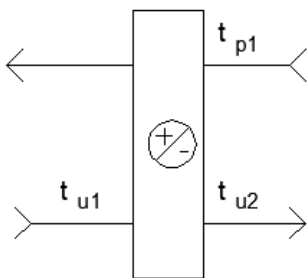
KAAVA 9.

η_t =tuloilman lämpötilasuhte

t_{u2} =ulkoilman lämpötila ennen lämmönvaihtimen jälkeen

t_{u1} =ulkoilman lämpötila ennen lämmönvaihdinta

t_{p1} =poistoilman lämpötila ennen lämmönvaihdinta



Tapauksissa, joissa lämmönsiirron yhteydessä ei siirry kosteutta, virtaukset pysyvät samoina ja väliaineiden lämmönsiirto-ominaisuudet eivät muutu, pysyy lämmönsiirtimeen lämpötilasuhte vakiona. Näin lämmönsiirtimeen lämmönsiirto-teho voidaan määrittää lämpötilasuhteen avulla eri tulo- ja poistoilman lämpötiloista riippuvana.

3.3 Ilmastointikoneen jäähdytyspatteri

Ilmastointikoneen jäähdytyspatterin tehtävänä on jäähdyttää ilmaa niin, että tilojen tuloilma pysyy halutussa lämpötilassa. Samalla jäähdytyspatterilla kuivataan ilmaa tarkoituksellisesti.

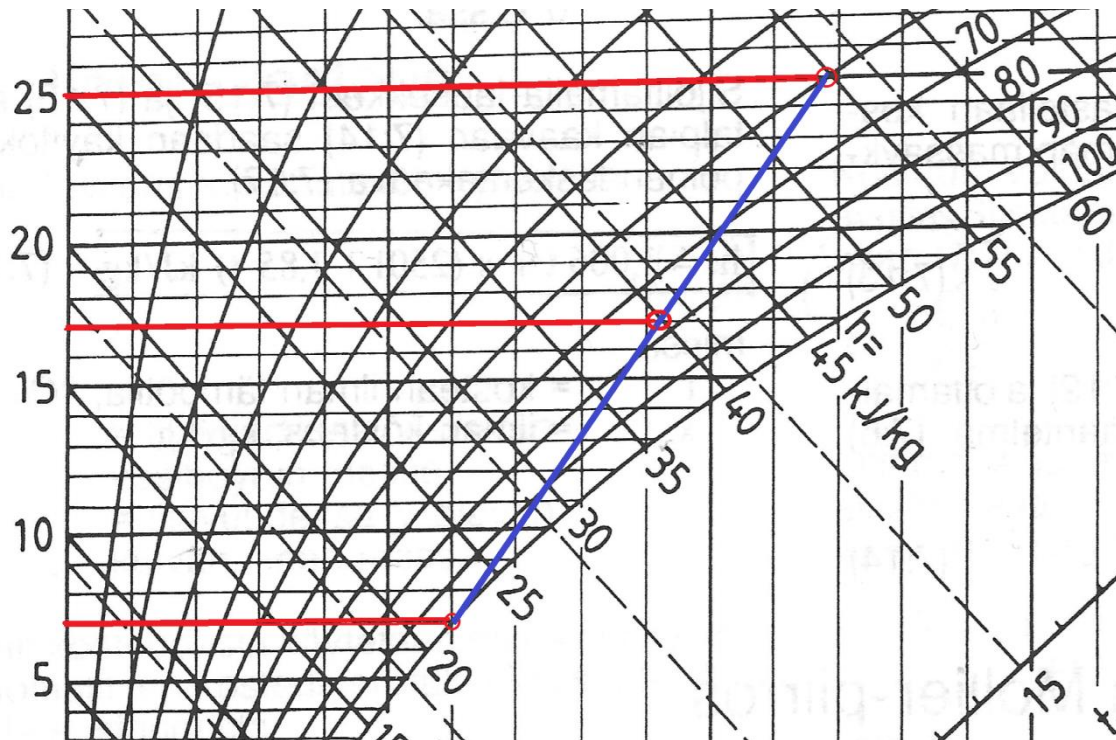
Jäähdytyspalkkijärjestelmässä pidetään ilmastointikoneen jäähdytyspatterille menevän veden lämpötila alhaisena noin $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa, koska jäähdytyspatteria halutaan käyttää myös tuloilman kuivaamiseen (7, s. 142). Tällä tavoin pyritään rajoittamaan huoneilman kosteus riittävän alhaiseksi jäähdytyspalkkien toimintaa ajatellen. Jäähdytyspalkeille menevän veden lämpötilaa pidetään vastavasti n. $+14\ldots+16\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa. (7, s. 142) Kondensoitumisvaaran välttämiseksi sisäilman kastepiste ei saa alittaa em. lämpötiloja. Ilmastoinnin tuloilman lämpötilana voidaan käyttää minimissään $+16\ldots+17\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilaa, ilman että ilmastointi aiheuttaa vedon tunnetta kylmän ilman epätasaisesta jakautumisen vuoksi (8).

Tämän työn lähtöaineistoa tutkittaessa havaittiin, että toisinaan ulkoilman lämpötila voi olla alle $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja kastepiste kuitenkin jäähdytyspalkin tuloveden lämpötilaa suurempi. Tämän kaltaisissa tilanteissa ilmastointikoneen jäähdytyspatteri ei ole vielä toiminnassa eikä poista vettä. Näin myös sisäilman kastepiste voi ylittää jäähdytyspalkkien tuloveden kastepisteen ja altistaa palkit veden kondensoitumiselle.

Mahdolliset ongelmat voidaan välttää jäähdytyspalkkien tuloveden lämpötilan kastepistesäädöllä. Sisäilman kastepistettä mitataan ja tarvittaessa jäähdytyspalkkien tuloveden lämpötilaa nostetaan niin, että jäähdytyspalkeissa ei tapahdu kondensoitumista. (9)

Kosteuden muutokseen jäähdytyspatterissa vaikuttavat patterin tyyppi ja kytkentätapa. (10, s. 92). Edellä mainitut seikat vaikuttavat jäähdytyspatterin pinta-
lämpötilaan sen eri osissa ja näin myös patterin kuivaustehoon.

Käytännön laskelmissa on varsinkin suora- ja jäähdytyspatterin tapauksessa tarkoituksenmukaisinta käyttää patterin keskimääräistä tai näennäistä lämpötilaa (10 s. 92). Tällöin oletetaan patterin läpi virtaavan ilman kosteussisällön muuttuvan samassa suhteessa kuin lämpötilankin. Oletettu ilman olosuhteiden muutos on kuvattu Hx- diagrammiin kuvassa 2.



KUVA 2. Jäähdytyspatterilta tulevan ilman ominaisuuksien määrittäminen näennäistä patterin lämpötilaa käyttäen

Kuvassa tuloilman lämpötila on 25 °C:tta, ja suhteellinen kosteus 60 %:a. Jäähdytyspatterin keskimääräisenä lämpötilana on käytetty 7 °C:ta. Jäähdytyspatterilla ilma jäähdytetään +17 °C:n lämpötilaan, jolloin jäähdytyspatterilta tulevan ilman suhteelliseksi kosteudeksi saadaan 88 %:a ja ominaisentalpiaksi 40 kJ/kg.

Tämän työn yhteydessä tehtävissä tarkasteluissa on kuitenkin kysymyksessä vesijäähdytteinen patteri, jossa lämpötila ei pysy vakiona koko patterin matkalla ja jossa paluuv veden lämpötila muuttuu kuormituksen mukaan. Tämän kaltaiseen laskentaan ei löydetty analyyttistä kaavaa, joka kattaisi kaikki jäähdytys-

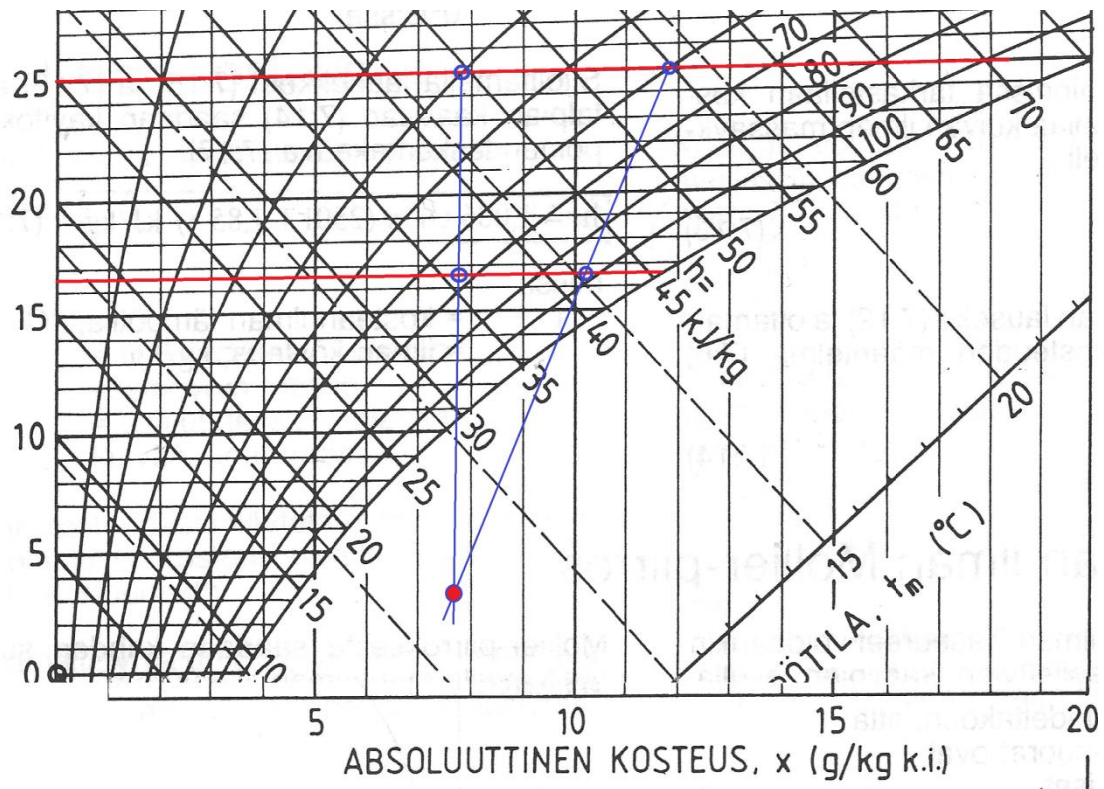
patterityypit ja kuormitustilanteet. Tämän vuoksi jouduttiin esimerkkilaskennassa käytetylle jäähdytyspatterille sovittamaan yhtälö, joka vastaa riittävällä tarkkuudella laskentaan valitun jäähdytyspatterin toimintaa.

Laskettavaa tapausta varten valittiin esimerkkilaskentaan FläktWoodsin jäähdytyspatteri tyyppimerkinnältä EQNN-050-03-1-1-02-01-0-1-1-3. Valitun jäähdytyspatterin mitoitusarvot olivat seuraavat:

- patterille tuleva ilma $4 \text{ m}^3/\text{s}$, $+25 \text{ °C}$ / 60 %
- patterilta lähtevä ilma 16.5 °C
- jäähdytysvesi $+7/+12 \text{ °C}$.

Kohtuullisen tarkkaan tulokseen laskennassa päästiin olettamalla, että HX-diagrammilta voidaan löytää yhteinen lämpötilaa ja kosteussisältöä kuvaava piste, jota ilmastointiprosessi lähestyy riippumatta ilman alkukosteudesta ja lämpötilasta.

Esimerkkitapaukseen valitulle jäähdytyspatterille simuloitiin FläktWoods Oy:n Accon-ohjelmalla joukko jäähdytetyn ilman olosuhteita eri tuloilman lämpötiloille ja kosteuksille. Näin saatujen arvoparien avulla piirrettiin simuloituja tapauksia vastaavia lämpötilaa ja kosteutta kuvaavia pisteitä, joita kohden jäähdytysprosessi näennäisesti etenee. Kuvassa 3 on esitetty, kuinka kahden simuloidun tapauksen avulla on etsitty edellä mainittu piste.



KUVA 3. Lämpötilaa ja kosteutta kuvaavan pisteen arvioiminen tunnettujen lämpötila/kosteusparien avulla

Kuvan tapauksessa tuloilman lämpötila on 25 °C ja jäähdytetyn ilman lämpötila 16,5 °C. Tuloilman suhteelliset kosteudet ovat 40 % ja 60 %. Jäähdytetyn ilman kosteudet ovat 67,3 % ja 88 %. Lämpötilan ja kosteussisällön muodostama piste, jota prosessi lähestyy, löytyy arvoparien kautta piirrettyjen suorien leikkauspisteestä, tässä tapauksessa 3,5 °C ja 7,8 g/kg k.i.

Näin tutkien jäähdytyspatterille tulevan ilman lämpötilan pysyessä samana prosessit näyttäisivät lähestyvän samaa pistettä riippumatta juurikaan ilman alkukosteudesta. Tämä on helposti ymmärrettävissä, sillä näissä tapauksissa jäähdytyspatterin teho ei muutu merkittävästi, jolloin myös patterin keskilämpötila pysyy vakiona.

Jäähdytyspatterille tulevan ilman lämpötila sen sijaan näytti muuttavan etsityn pisteen paikkaa etenkin lämpötilan osalta. Tämä johtuu siitä, että jäähdytyspatterin tehon muuttuessa myös jäähdytyspatterin keskimääräinen lämpötila muuttuu.

Saatujen alkuarvojen avulla kyettiin kuitenkin iteroimaan piste, jota käyttämällä laskennan tarkkuus pysyi hyväksyttävänä riippumatta alkulämpötilasta tai kosteudesta. Käytännössä laskennassa käytettävä piste valittiin tarkkuuden puolesta suurempia ilman lämpötilaeroja suosivaksi. Tämä valinta perustuu siihen seikkaan, että pienillä tehoilla jäähdytyspatterin poistama vesimäärä on joka tapauksessa hyvin pieni, eikä näin laskennassa syntyvällä suhteellisella virheelä ole juurikaan merkitystä tukittavaan asiaan.

Näin saadun laskettavaa esimerkkitapauksen jäähdytyspatterille saadun pisteen lämpötila oli 2,7 °C ja kosteussisältö 7,8 g/kg k.i. Simuloidun ja edellä kuvatun pisteen avulla lasketun vedenpoiston keskinäinen virhe eri tapauksissa on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Simuloidun ja laskennassa käytetyn vedenpoiston erotus eri patterille tulevan ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoilla [g/kg k.i.]

	Jäähdytyspatterin tulolämpötila [°C]							
	20,00	21,00	22,00	23,00	24,00	25,00	26,00	27,00
Kosteus (%)								
30								- 0,03
35							- 0,03	- 0,06
40			- 0,03	- 0,02	- 0,02	0,01	- 0,02	- 0,05
45	- 0,01	- 0,04		0,00	0,04	0,00	- 0,02	- 0,02
50			0,09	0,09	0,03	- 0,01	- 0,01	- 0,01
55	0,03	0,16		0,05	0,00	- 0,01	0,01	
60			0,04	0,00	- 0,01	- 0,02		
65	0,12	0,04		- 0,02				
70			- 0,05					
75	- 0,04	- 0,07						

4 LASKETTU ESIMERKKITAPPAUS

4.1 Esimerkkitapauksen kuvaus

Esimerkkitapauksessa laskettiin kuvan 4 mukainen järjestelmä, jossa Ilmastointikoneen tulo- ja poistoilmavirrat olivat $4 \text{ m}^3/\text{s}$. Poistoilman lämpötilan oletetaan pysyvän jäähdytyspalkkijärjestelmän ansiosta vakiona $+23 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tilojen oletettiin olevan tavanomaisessa toimistokäytössä, millä perustein saatiin määritettyä ilmapirtaasta vastaavan normaalin toimistotilan pinta-ala ja sen myötä edelleen kuvitellun tilan henkilömäärä ja henkilöiden aiheuttama kosteuskuorma. Tilojen lämpökuormalla ei lasketussa esimerkissä ole merkitystä, sillä esimerkkitapauksessa lähdettiin oletuksesta, että lämpökuorma on kaikissa tapauksissa niin suuri, että tuloilman lämpötilana voidaan käyttää $+17 \text{ }^\circ\text{C}$:ta ja että muu ylimääräinen lämpökuorma hallitaan koneelliseen jäähdytykseen kytkeytyillä jäähdytyspalkeilla. Tämän kaltainen oletus helpottaa laskentaa, sillä silloin poistoilman osalta jää muuttuvaksi tekijäksi ainoastaan kosteussisältö. Jäähdytyspatteri valittiin esimerkkitapaukseen niin, että Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D2 kesäajan mitoitustilanteessa saadaan jäähdytyspatterilta lähtevän ilman lämpötila laskettua $+16.5 \text{ }^\circ\text{C}$:n patterin veden mitoitustilanteen ollessa $7/12 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.2 Huoneen vaikutus kosteuteen

Huoneen kosteuskuormat vaikuttavat poistoilman kosteuteen. Erilaisissa rakennuksissa kosteuskuormat voivat olla erilaisia rakennusten kesken ja yksittäisessä rakennuksessa vaihdella ajankohdan mukaan. Tässä toimistorakennusta kuvaavassa esimerkkitapauksessa oletetaan kosteuskuorman syntyvän pelkästään siellä työskentelevistä ihmisistä. Ilmamäärät oletetaan suunnitellun Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D2:n toimistotiloja koskevan ohjeen mukaisiksi. Tällöin ulkoilmavirran tulee käyttöaikana olla $0,0015 \text{ m}^3/\text{m}^2$.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D3 taulukosta 4 löytyy energialaskennassa käytettävät henkilötiheydet eri rakennustyypeille. Toimistorakennuksen osalta oletetaan henkilötiheyden olevan $1/17 \text{ m}^2$. Näiden edellä esitetty-

jen arvojen avulla voidaan määrittää tyypillisen toimistorakennuksen ilmavirta henkilöä kohden. Yhden henkilön tuntia kohden tuottamaksi kosteuskuormaksi oletettiin 90g/h (11, Taulukko 2.1). Näillä tiedoin pystyttiin laskemaan keskimääräisessä toimistossa työskentelevien henkilöiden aiheuttama lisäys huoneen poistoilman kosteussisältöön.

4.3 Kylmäkertoimen vaikutus jäähdytyksen energiakulutukseen

Jäähdytyspatterin sähköenergian tarve määräytyy paitsi jäähdytyspatterin jäähdytystehon, niin myös siihen liitetyn kylmäkoneiston kylmäkertoimesta. Esimerkkitapauksen kylmäkoneen vuotuinen kylmäkerroin saatiin Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D5 taulukosta 8.1. Taulukosta saatiin vesilaudutteiselle kompressorikylmälaitokselle vuotuisen kylmäkertoimen arvoksi 3,0.

Esimerkkitapauksen kaaviokuvassa 4 on indeksoituna laskennassa tarvittavia muuttujia, joiden selvittäminen kutakin laskettavaa esimerkkivuoden tuntia kohden on tarpeen.

4.4 tutkittavan järjestelmän toiminta

Jäähdytykseen vaikuttavilta osilta esimerkkijärjestelmä koostuu ilmastointikoneen lämmönsiirtimestä, jäähdytyspatterista, tuloilmapuhaltimesta, huoneessa olevista jäähdytyspalkeista, huoneen lämpö- ja kosteuskuormista ja poistoilma-kanavaan asennetusta kostutuslaitteesta. Komponenttien toiminta ilman kulkusuunnassa on seuraava:

1. Ilma saapuu ilmastointikoneen lämmönsiirtimeen ulkoilman olosuhteiden mukaisena.
2. Lämmönsiirrin jäähdyttää ilmaa hyödyntäen kostutetun poistoilman ja ulkoilman välistä lämpötilaeroa.
3. Ilma siirtyy jäähdytyspatterille, jota säätämällä tuloilma jäähdytetään haluttuun lämpötilaan. Jäähdytyspatterissa ilmaa myös kuivataan tarkoituksellisesti.
4. Tuloilmapuhaltimessa ilma lämpenee hieman.
5. Jäähdytetty ilma siirtyy tuloilmalaitteisiin ja jäähdytyspalkkeihin. Jäähdytyspalkkeja säätämällä säädetään huoneilman lämpötila halutuksi. Tämä vakioi myös poistoilman lämpötilan, mikä helpottaa myöhempiä tarkasteluja.
6. Ilmastoitavassa tilassa ilma lämpenee ja sen kosteussisältö kasvaa huoneessa olevien kuormien johdosta.
7. Poistoilmaa kostutetaan korkeapainesumutusjärjestelmällä, jolloin sen lämpötila laskee ja kosteussisältö kasvaa. Saavutettua kosteudenlisäystä kuvaa kostutussuhde, joka ilmaistaan saavutettuna kosteudenlisäyksenä verrattuna kosteudenlisäykseen, joka olisi mahdollista saavuttaa, jos kostutusprosessi etenisi kastepisteeseen asti.
8. Lämmönsiirtimessä kostutettu poistoilma lämpenee jäähdyttäen tuloilmaa, minkä jälkeen ilma poistuu jäteilmänä.

Tutkittavan järjestelmän toiminta eri vaiheissaan kuvattiin Exel-taulukkoon. Taulukossa laskettiin ilman olotilan muutokset vaihe vaiheelta tuntikohtaisesti, niin että lopputuloksena saatiin kutakin energialaskennassa käytettyä tuntia kohden ilmastointikoneen sähköverkosta ilman jäähdyttämiseen tarvitsema energia. Laskemalla vuoden tuntikohtaiset energiatarpeet yhteen saatiin laskettua ilman jäähdyttämiseen esimerkkivuosina tarvittava kokonaissähköenergia.

LTO:n toiminta laskennassa rajattiin niihin tunteihin, joissa LTO:lla saatiin ilmaa jäähdytettyä lähemmäksi tavoitelämpötilaa. Vastaavasti kostutusjäähdytyksen toimintaa laskennassa rajoitettiin niin, että niissä tapauksissa, joissa epäsuora kostutusjäähdytys riittää yksinään tuloilman jäähdyttämiseksi ei kuitenkaan aliteta haluttua tuloilman lämpötilaa.

Ajallisesti laskenta rajattiin niihin tunteihin, joissa koneen oletettiin olevan päällä. Tältä osin päädyttiin laskemaan kahdenlaisia tapauksia. Ensimmäisessä tapauksessa käytettiin D3:n taulukon 3 mukaista toimistorakennukselle määritettyä käyttöaikaa klo 7–18 viitenä päivänä viikossa. Tämän lisäksi oletettiin ilmastoinnin olevan päällä vielä tunnin ennen ja jälkeen käyttöajan. Näillä perustein laskennassa oletettiin ilmastoinnin olevan päällä klo 6–19. Viikonloppujen energiatarvetta vähentävä osuus huomioitiin kertomalla laskennasta saatu ilman jäähdyttämiseen tarvittava energia 0,72:lla. Toinen tutkittava tapaus vastaa muilta osin edellä mainittua, mutta siinä oletettiin ilmastoinnin olevan päällä läpi vuorokauden.

Laskennassa tiloista poistuvan, jäähdytystä varten kostutettavan ilman lämpötilana ja kosteutena käytettiin edellisen tunnin laskennasta saatuja arvoja. Tähän ratkaisuun päädyttiin koska kyseisen tunnin vastaavia arvoja ei voitu laskennassa käytettävien yhtälöiden suuren määrän ja monimutkaisuuden vuoksi määrittää etukäteen.

4.5 Esimerkkitapauksen laskennasta saadut tulokset

Tuloksina esimerkkitapauksen laskennasta saatiin jäähdytyspatterin tuloilman jäähdyttämiseen tarvitsema sähköenergia eri käyttöajoilla, eri kostutusasteilla ja eri lämmönsiirtimen lämpötilasuhteille laskettuna.

Kuvassa 10 on esitetty simerkintapauksen ilmanvaihtokoneen jäähdytyspatterin tuloilman jäähdyttämiseen tarvitsema sähköenergian eri tapauksissa, kun ilmanvaihtokone on päällä klo. 6-19 viitenä päivänä viikossa.

Tapaus	Vuotuinen sähköenergian tarve [kWh]		
	Vantaa	Jyväskylä	Sodankylä
Ilman kostutusta, LTO:n lämpötilasuhde 0	3190	2678	1848
Ilman kostutusta, LTO:n lämpötilasuhde 60%	3065	2595	1769
Ilman kostutusta, LTO:n lämpötilasuhde 80%	3023	2568	1743
Kostutusaste 70%, LTO:n lämpötilasuhde 60%	2080	1647	1082
Kostutusaste 80%, LTO:n lämpötilasuhde 60%	1796	1396	899
Kostutusaste 90%, LTO:n lämpötilasuhde 60%	1518	1170	723
Kostutusaste 100%, LTO:n lämpötilasuhde 60%	1258	962	573
Kostutusaste 70%, LTO:n lämpötilasuhde 80%	1719	1312	833
Kostutusaste 80%, LTO:n lämpötilasuhde 80%	1372	1021	614
Kostutusaste 90%, LTO:n lämpötilasuhde 80%	1066	774	437
Kostutusaste 100%, LTO:n lämpötilasuhde 80%	808	559	309

Kuva 10.

Kuvassa 11 on esitetty esimerkintapauksen ilmanvaihtokoneen jäähdytyspatterin tuloilman jäähdyttämiseen tarvitsema sähköenergian eri tapauksissa, kun ilmanvaihtokone on päällä koko vuorokauden viitenä päivänä viikossa.

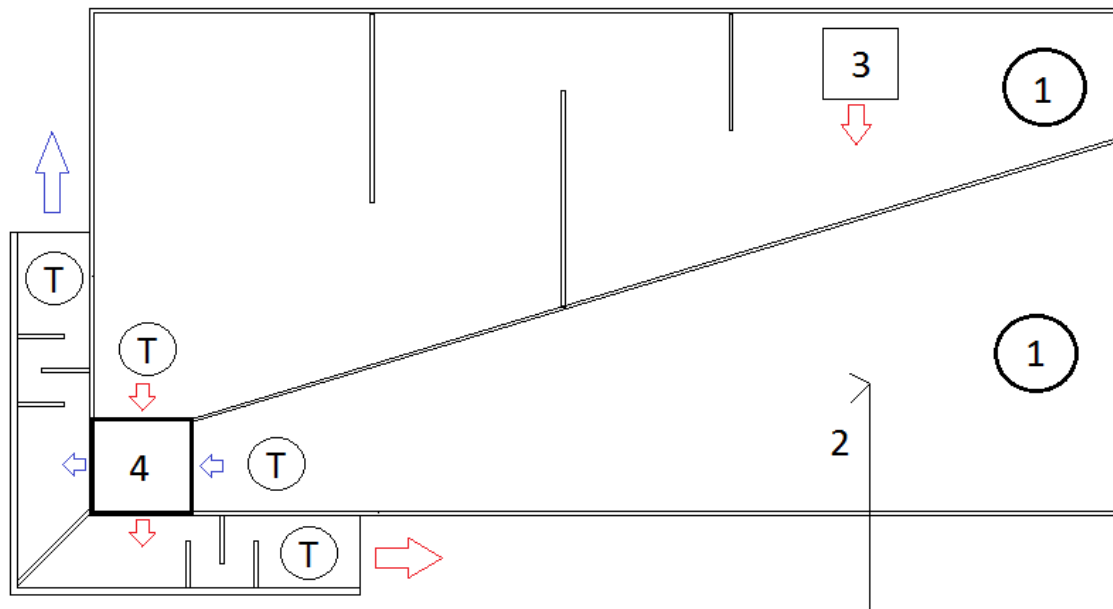
Tapaus	Vuotuinen sähköenergian tarve [kWh]		
	Vantaa	Jyväskylä	Sodankylä
Ilman kostutusta, LTO:n lämpötilasuhde 0	4008	3193	2316
Ilman kostutusta, LTO:n lämpötilasuhde 60%	3864	3105	2223
Ilman kostutusta, LTO:n lämpötilasuhde 80%	3816	3076	2191
Kostutusaste 70%, LTO:n lämpötilasuhde 60%	2664	2010	1376
Kostutusaste 80%, LTO:n lämpötilasuhde 60%	2308	1706	1147
Kostutusaste 90%, LTO:n lämpötilasuhde 60%	1955	1428	927
Kostutusaste 100%, LTO:n lämpötilasuhde 60%	1618	1168	738
Kostutusaste 70%, LTO:n lämpötilasuhde 80%	2228	1627	1071
Kostutusaste 80%, LTO:n lämpötilasuhde 80%	1791	1273	801
Kostutusaste 90%, LTO:n lämpötilasuhde 80%	1393	964	578
Kostutusaste 100%, LTO:n lämpötilasuhde 80%	1048	692	414

Kuva 11

5 KOELAITTEISTOLLA TEHDYT MITTAUKSET

5.1 Mittausjärjestely

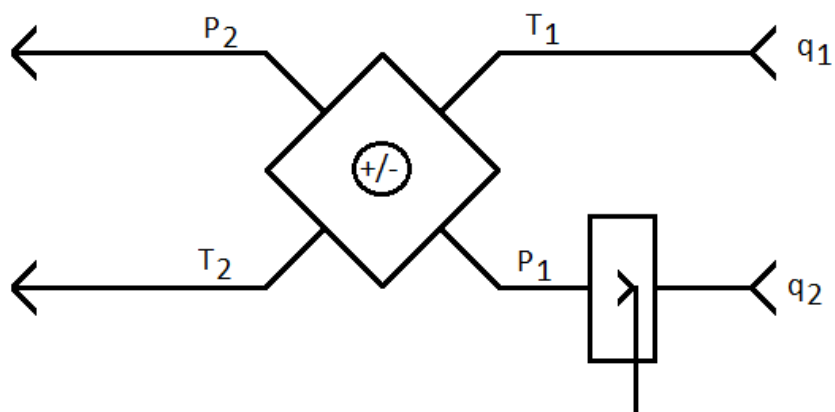
Teorian tueksi rakennettiin välillisen kostutusjäähdytyksen mittaamista varten kuvan 6 mukainen koelaitte, joka koostui tarvittavista puhaltimista, kostutuslaitteistosta ja lämmönvaihtimesta. Laitteiston erityinen tarkoitus oli mitata kostutusjäähdytyksen tehokkuutta toimintatilanteessa, jossa hyväksytään lämmönsiirto-
tokennon kastuminen kostutuksen johdosta. Tällöin osa jäähdyttävästä vaikutuksesta syntyy kennon pinnassa olevan veden haihtumisesta.



KUVA 6. Koelaitteen poikkileikkaus yksinkertaistettuna

Kuvaan on numeroitu tärkeimmät komponentit seuraavasti:

1. Puhaltimet ja virtauksen mittauslaitteet
2. Korkeapainesumutussuutin
3. Lämmitin lämpötilasuhteen mittausta varten
4. Ristivirtalämmönsiirrin
- T. Lämpötilan mittauspaikka.



KUVA 7. Koelaitteiston kaaviokuva



KUVA 8. Koelaitte koottuna

Lämmönsiirtimenä käytettiin Vallox Oy:n valmistamaa lämmöntalteennotokennoa 200x200x400, tuotetunnus 933010. Kyseistä talteenotokennoa käytetään mm. Vallox 130E- asuntoilmanvaihtokoneessa.

Ilmavirran mittaamiseen käytettiin Halttonin PRA200 ilmavirran säätö ja mittausyksikköjä. Kennon läpi kulkevien ilmavirtojen mittaukseen käytettiin digitaalista lämpötilamittaria varustettuna K- tyypin mittausantureilla. Kostutuskokeessa koelaitteeseen tulevan ilman olosuhteiden mittaukseen käytettiin digitaalista Rotronic hygroPalm- kosteus/lämpötilamittaria. Ennen mittauksia Digitaalinen lämpötilamittari kalibroitiin näyttämään samaa lämpötilaa kosteus/lämpömittarin kanssa.

5.2 Koelaitteella tehdyt mittaukset

5.2.1 Lämpötilasuhteen mittaukset

Ennen varsinaista kostutusjäähdytystestiä koelaitteelle mitattiin lämpötilasuhte erisuuruksilla ilmavirroilla. Näin samalle lämmönsiirtimelle saatiin määriteltyä suuruudeltaan erilaisia lämpötilasuhteita. Käytetyt ilmavirrat ja mitatut lämpötilasuhteet on esitetty liitteen 1 taulukossa.

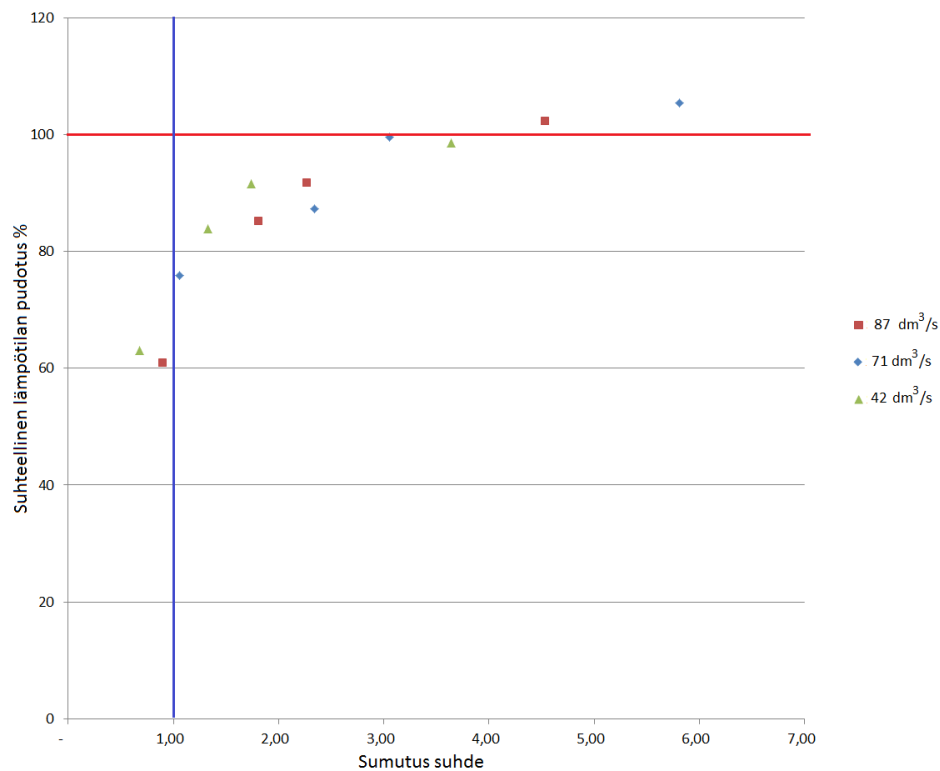
5.2.2 Epäsuoran kostutusjäähdytyksen mittaukset

Epäsuoran kostutusjäähdytyksen toimintaa mitattiin käyttäen erisuuruisia ilmavirtoja ja erisuuruisia kostutusveden tilavuusvirtoja ja eripituisia kostutusmatkkoja. Kostutusmatkalla tarkoitetaan tässä tapauksessa sumutussuuttimen etäisyyttä lämmönsiirtimen kennosta. Tuloksina mittauksista saatiin laitteiston jäähdytysteho Celsius asteina sekä välillisesti rekuperaatioasteen avulla laskettuna jäähdytyskennon tuntema kostutetun ilman lämpötila.

Tässä yhteydessä jäähdytyskennon tuntemalla lämpötilalla tarkoitetaan kennoon tulevan ilman lämpötilaa, jolla olisi saatu sama jäähdytysteho kuin testeissä. Tämä ei ole tarkalleen ottaen kennoon saapuvan kostutetun ilman lämpötila, sillä käytetyillä vesimäärillä myös lämmönsiirtimen levyt kostuvat ja osa haihtu-

misesta tapahtuu vasta lämmönsiirtimen kennon pinnassa. Tämä selittää myös sen ilmiön, että riittävällä vesimäärällä päästään kennon tuntemaan kostutetun ilman lämpötilassa hieman märkälämpötilan alle, mikä teoriassa muuten vaatisi, että kostutusaste olisi yli 100 %. Mittauksista koottu taulukko on esitettynä liitteessä 2

Tuloksia tutkittaessa havaittiin, että paras tapa hahmottaa asiaa on verrata saavutettua kostutetun ilman lämpötilan pudotusta lämpötilan pudotukseen tilanteessa jossa kostutuksessa päästäisiin märkälämpötilaan asti. Määrittämällä tämä lämpötila eli kostutuslaitteen sumutussuhteilla saadaan kuvaaja, joka kuvaa lämpötilan pudotusta eri sumutusasteilla verrattuna lämpötilan pudotukseen 100 % kostutusasteella. Sumutussuhteella tässä tapauksessa tarkoitetaan laitteessa sumutetun veden määrää verrattuna veden määrään, joka kokonaisuudessa haihtuessaan riittäisi jäähdyttämään ilman märkälämpötilaan. Vertailun tulos on esitetty kuvaajassa 1. Teoriassa jos kaikki laitteeseen syötetty vesi haihtuisi, sumutussuhteella 1 päästäisiin sataan prosenttiin siitä lämpötilan pudotuksesta, joka vastaisi lämpötilan pudotusta, jossa kostutuslaitteessa olisi päästy märkälämpötilaan asti. Piirrettyssä kuvaajassa kyseinen piste löytyy sinisellä ja punaisella piirrettyjen janojen leikkauspisteestä.



Kuvaaja 1. Suhteellinen lämpötilan pudotus eri sumutussuhteilla

Punainen jana vastaa lämpötilan pudotusta, joka saataisiin 100 % kostutusteella, eli jos kostutusjäähdytyksessä päästäisiin märkälämpötilaan asti. Sininen jana vastaa sumutussuhdetta, jolla päästäisiin märkälämpötilaan, jos kaikki sumutettu vesi haihtuisi enne lämmönsiirintä. Pisteet on määritetty käyttäen lämmönsiirtimen kummallakin puolella samansuuruisia ilmavirtoja 78, 71, ja 42 dm³/s.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Jälkikäteen lisätyllä kostutusjäähdytyksellä voidaan esimerkkilaskennan kaltaisessa tilanteessa säästää laskelmien mukaan jopa 70 % tuloilman jäähdytykseen tarvittavasta sähköenergiasta. Kuitenkin tuloilman jäähdytyksen vuotuinen sähköenergian tarve ilman kostutuslaitteistoakin on niin pieni, että siitä saatavalla säästöllä ei voida perustella investointia kostutusjäähdytyksen lisäämiseen jälkikäteen. Esimerkiksi voidaan ottaa tapaus, jossa lämmönsiirtimen lämpötilasuhde on 80 %, Ilmastointikoneen läpivirtaavat tulo ja poisto ilmamäärät ovat $4 \text{ m}^3/\text{s}$ ja saavutettava kostutusaste on 90 %. Tapauksessa voidaan laskelmien mukaan Espoon olosuhteissa säästää vuosittaisessa energiatarpeessa n. 2000 kWh. Tämä tarkoittaisi 0.1€/kWh sähköhinnalla 200 € vuosittaista säästöä. Sen sijaan, jos ilmastointikonetta palvelevan vedenjäähdytyskoneen kapasiteetti käy liian pieneksi voi kostutusjäähdytyksen lisääminen jo olemassa olevaan laitteistoon olla hyödyllistä koneellisen jäähdytystehon säästämiseksi esimerkiksi jäähdytyspalkkijärjestelmää varten.

Valmistetuttua koelaitetta vastaavan epäsuoran kostutusjäähdytyslaitteen jäähdytystehon mitoituksessa voidaan olettaa, että kostutusjäähdytyksellä päästää lämmönvaihtimen kannalta kulloistakin märkälämpötilaa vastaavaan jäähdytetyn ilman lämpötilaan. Tällöin tulee kuitenkin muistaa, että kaikki käytetty vesi ei haihdu ilmaan, vaan osa vedestä jää laitteeseen, josta se on johdettava pois ja toisaalta osa vedestä menee sellaisenaan haihtumattomana lämmönsiirtimen läpi. Tällöin on myös hyväksyttävä, että lämmönsiirtimen kenno kastuu, mikä ei sinällään ole kovin harvinainen tapahtuma, kun puhutaan Suomen olosuhteisiin asennetuista ilmastoinnin lämmönsiirtimistä.

7 YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä haettiin vastausta siihen, onko taloudellisesti kannattavaa lisätä jo olemassa olevaan lämmöntaiteenotolla varustettuun ilmastointikoneeseen korkeapainesumutuslaitteistoon perustuvaa epäsuoraa kostutusjäähdytystä Suomen olosuhteissa. Toisaalta rakennetun koelaitteistolla pyrittiin hakemaan vahvistusta teoreettisten laskelmien ja käytännön yhtenevyydelle ja samalla saamaan alustavaa tietoa tulevien laitteistojen mitoitusta ajatellen.

Kuvattujen epäsuoran kostutusjäähdytyksen komponenttien lisääminen jo olemassa olevaan koneellisella jäähdytyksellä varustettuun ilmastointikoneeseen ei ole perusteltua energiakustannusten vähentämiseksi. Tämä ei niinkään johdu siitä, etteikö kostutusjäähdytyksellä saavutettaisi merkittävää prosentuaalista säästöä tuloilman jäähdytyksen vaatimista energiakuluista, vaan siitä, että tuloilman jäähdytystarve vuositasolla on energiakustannuksiltaan niin pieni, että siitä säästämällä ei voida saada kovin suuria taloudellisia säästöjä. Sen sijaan kuvattujen kaltaisen kostutusjäähdytyksen lisääminen voi olla kannattavaa järjestelmän kapasiteetin lisäämiseksi. Epäsuoran kostutusjäähdytyksen mitoitusta ajatellen voidaan tehtyjen mittausten perusteella olettaa, että koelaitteistoa vastaavissa tapauksissa saavutetaan kostutuksella jäähdytysteho, joka vastaa tilannetta, jossa kostutettava ilma jäähtyy märkälämpötilaan asti.

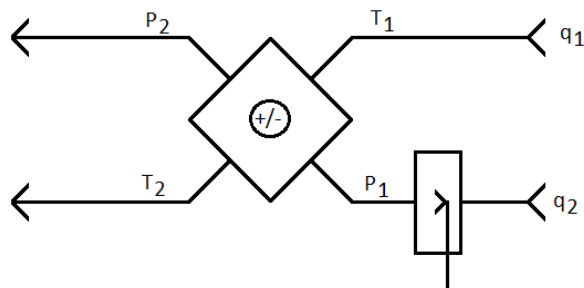
LÄHTEET

1. Evaporative cooler. Wikipedia. Saatavissa:
https://en.wikipedia.org/wiki/Evaporative_cooler.
Hakupäivä 25.7.2015.
2. Humidity conversion formulas. Väisälä. Saatavissa:
http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Application%20notes/Humidity_Conversion_Formulas_B210973EN-F.pdf.
Hakupäivä 16.12.2015
3. Seppänen, Olli 1996. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. LVI-yhdistysten liitto
4. Wet-Bulb Temperature from Relative Humidity and Air Temperature. Roland Stull 2011, American Meteorological Society. Saatavissa:
<http://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/JAMC-D-11-0143.1>
5. Nessie Water Mist Nozzles with anti drip. Danfoss group. Saatavissa:
http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/16B4AA50-B41C-4777-A0DC-CB556163A7BA/0/521B0834_DKCFNPD091B802_Nozzleswithantidrip_GB.pdf. Hakupäivä 14.12.2015.
6. Pyörivä lämmönsiirrin. Wikipedia. Saatavissa:
https://fi.wikipedia.org/wiki/Pyörivä_lämmönsiirrin . Hakupäivä 2.8.2015.
7. Sandberg, Esa (toim.) 2014, Ilmastointitekniikka osa 1. Talotekniikka-Julkaisut Oy.
8. Keskustelu Pirjo Kimari. 16.12.2015.
9. Puhelinkeskustelu Risto Malinen FläktFoods Oy. 4.9.2015.
10. Seppänen, Olli 2004. Ilmastoinnin suunnittelu. Suomen LVI-liitto Ry
11. VTT Tiedotteita. VTT. Saatavissa:
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1999/T1991.pdf>.
Hakupäivä 10.12.2015.

LIITTEET

Liite 1 Koelaitteen lämpötilasuhteet eri ilmavirroilla.

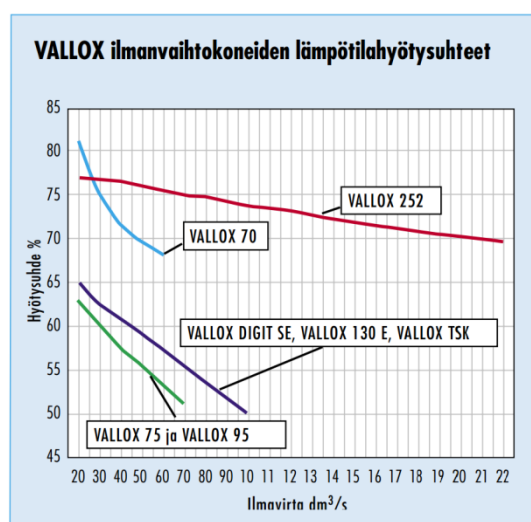
Liite 2 Koelaitteen mittaustulokset eri tapauksissa.



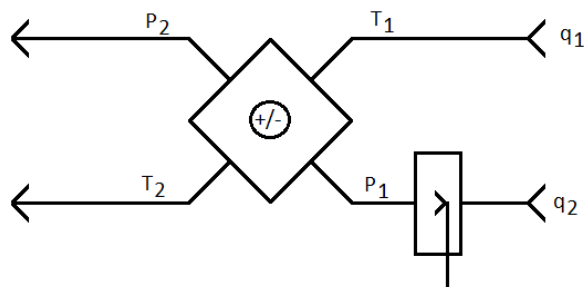
Kaaviokuva.

q_1 [dm ³ /s]	q_2 [dm ³ /s]	Lämpötila- suhde [%]
87	87	54,7
71	71	56,3
67	94	60,8
42	118	78,3
42	42	63,9

Taulukko mitatusta lämpötilasuhteesta eri ilmavirroilla.



Valmistajan ilmoittama lämpötilasuhde vastaavalle lämmönsiirtimen kennolle (Vallox 130 E). Valmistajan ilmoitus vastaa kohtuullisella tarkkuudella koelaitteella mitattuja lämpötilasuhteita.



q1 [dm ³ /s]	q2 [dm ³ /s]	qv [g/s]	Kostutus matka [mm]	Tulo- lämpötilat [°C]	Tulo- kosteudet [%]	Laskettu kostutun ilman lämpötila [°C]	tuloilman märkä- lämpötila [°C]	Jäähtyminen T1-T2 [°C]	Lämpötila- hyötysuhde (q1) [%]
87	87	0,373	75	24,5	37,3	19,2	15,5	2,9	54,7
87	87	0,373	1000	24,6	37,5	19,1	15,6	3,0	54,7
87	87	0,373	1250	24,6	37,8	19,0	15,7	3,1	54,7
71	71	0,373	75	25,1	36,2	17,9	15,8	4,0	56,3
71	71	0,373	1000	25,0	36,1	17,8	15,7	4,0	56,3
71	71	0,373	1250	25,0	36,0	18,3	15,7	3,8	56,3
41	118	0,373	75	24,5	38,4	19,3	15,7	4,1	78,3
41	118	0,373	1000	24,5	38,9	18,8	15,8	4,3	78,3
41	118	0,373	1250	24,4	38,8	18,8	15,7	4,3	78,3
87	87	0,746	75	24,9	38,1	17,1	16,0	4,3	54,7
87	87	0,746	1000	24,8	38,5	17,3	16,0	4,1	54,7
87	87	0,746	1250	24,8	38,9	17,5	16,0	4,0	54,7
69	69	0,746	75	24,8	40,0	17,3	16,2	4,2	56,3
69	69	0,746	1000	24,8	39,9	17,2	16,2	4,3	56,3
69	69	0,746	1250	24,8	39,9	17,4	16,2	4,1	56,3
42	121	0,746	75	24,9	39,1	17,9	16,2	5,5	78,3
42	121	0,746	1000	24,8	39,9	17,4	16,2	5,8	78,3
42	121	0,746	1250	24,7	39,7	17,4	16,1	5,8	79,3
94	94	0,983	75	24,4	39,5	16,4	15,8	4,5	54,7
94	94	0,983	1000	24,6	39,1	16,6	15,9	4,5	54,7
94	94	0,983	1250	24,7	39,2	17,0	16,0	4,4	54,7
69	69	0,983	75	25,3	40,4	16,6	16,7	4,9	56,3
69	69	0,983	1000	25,3	40,3	16,9	16,7	4,8	56,3
69	69	0,983	1250	25,3	40,2	16,7	16,7	4,9	56,3
42	121	0,983	75	25,1	39,5	17,2	16,4	6,4	78,3
42	121	0,983	1000	25,1	40,0	17,2	16,5	6,4	78,3
42	121	0,983	1250	25,1	39,8	17,0	16,4	6,5	78,3
87	87	1,839	75	25,3	39,8	16,5	16,6	4,9	54,7
87	87	1,839	1000	25,3	40,1	16,5	16,6	4,9	54,7
87	87	1,839	1250	25,3	40,5	16,5	16,7	4,9	55,4
69	69	1,839	75	25,3	40,8	16,2	16,8	5,1	56,3
69	69	1,839	1000	25,3	41,2	16,3	16,8	5,1	56,3
69	69	1,839	1250	25,2	41,3	16,4	16,8	5,0	56,3
41	112	1,839	75	25,2	41,3	17,0	16,8	6,5	78,3
41	112	1,839	1000	25,1	41,9	16,9	16,8	6,7	79,3
41	112	1,839	1250	25,1	42,0	16,9	16,8	6,7	79,3

qv = Kostutuksen vesivirta

Kostutusmatka = Kostutussuuttimen etäisyys lämmönsiirtimestä

Kummankin puolen (q1 ja q2) ilman tulolämpötilat ja kosteudet ovat samat.