



Reima Nevaranta

Kylmätilojen ilmanvaihdon kosteudenhallinta

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

14.5.2024

Tiivistelmä

Tekijä: Reima Nevaranta
Otsikko: Kylmätilojen ilmanvaihdon kosteudenhallinta
Sivumäärä: 32 sivua + 2 liitettä
Aika: 14.5.2024

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Talotekniikka
Ammatillinen pääaine: LVI-suunnittelu
Ohjaajat: LVI-suunnittelija Tuomas Mattila
Lehtori Pasi Partonen

Insinööriyön aiheena oli tutkia kylmätilojen ilmanvaihtoa kosteudenhallinnan näkökulmasta. Työn tavoitteena oli tarkastella Ramboll Finland Oyj:n eräissä suunnittelu-hankkeissa kohtaamaa ongelmaa, jossa kylmätilojen tuloilmakanavain tiivistyi huomattavasti vettä, kun jäähdytettyä ilmaa ei voitu jälkilämmittää.

Insinööriyössä pohdittiin kylmätilojen ilmanvaihdon haasteita, kuten sitä, kuinka kylmätilojen ilmanvaihtosuunnittelu nojautuu käytännössä täysin asiakkaan ilmoittamiin lähtötietoihin esimerkiksi tilan käyttöasteesta ja käyttöajoista. Lisäksi esitettiin ratkaisumalleiksi jälkilämmityspatterin lisäystä ilmanvaihtokoneeseen, ilman jäädytystä kylmätiloista saadulla poistoilmalla sekä eristyksen vaikutusta tuloilman olosuhteisiin. Parhaaksi ratkaisuksi tarkasteltuun ongelmaan osoittautui jälkilämmityspatterin lisäys ilmanvaihtokoneeseen, joka asianmukaisen eristämisen kanssa luo toimivan ilmanvaihtojärjestelmän, jolla saavutetaan halutut sisäilmasto-olosuhteet. Insinööriyössä esiteltiin myös ilman olosuhteita, niiden muutoksia ja tavallisimpia ilmankäsittelyprosesseja.

Insinööriyön lopputuloksena syntyi kirjallinen raportti, jota voidaan käyttää kylmätilojen ilmanvaihtosuunnittelun tukena. Työ toteutettiin pääosin kirjallisista lähteistä saaduilla tiedoilla, ja lisäksi tukena olivat hankkeesta saadut lähtötiedot, joita ratkaisussa sovellettiin.

Avainsanat: kylmätilat, ilmanvaihto, kosteudenhallinta, kylmätilojen ilmanvaihto, kylmätilojen kosteudenhallinta

Abstract

Author: Reima Nevaranta
Title: Moisture Control in Ventilation of Cold Rooms
Number of Pages: 32 pages + 2 appendices
Date: 14 May 2024

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Building Services Engineering
Professional Major: HVAC Design
Supervisors: Tuomas Mattila, HVAC Designer
Pasi Partonen, Senior Lecturer

The thesis aimed at solving a problem that arose in a project where a high amount of condensation was built in supply ducts of a cold room because the cooled air could not be reheated when necessary. To solve the problem, the thesis studied the moisture control of ventilation in cold rooms generally, mostly relying on literary sources but also on information gathered from the problem site.

The thesis discussed the conditions of air, changes in the conditions and the most common air treatment processes. The focus of the thesis was on the challenges of ventilation in cold rooms, such as how the design of the systems mostly relies on data provided by the customer.

The thesis suggested several alternatives to solve the initial problem. The best one turned out to be the installation of a heating coil in the air handling unit together with appropriate insulation. This would create a working ventilation system that would achieve the desired indoor climate conditions. The end result of the thesis was this report, an extensive collection of information about the HVAC design of cold rooms.

Keywords: cold rooms, ventilation, moisture control, ventilation of cold rooms, moisture control of cold rooms

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Kostea sisäilma	1
3	Kostean ilman ominaisuuksia	2
3.1	Absoluuttinen- ja suhteellinen kosteus.	4
3.2	Kastepistelämpötila	4
3.3	Vesihöyryn osapaine ja ilmanpaine	7
3.4	Kuiva- ja märkälämpötila	7
3.5	Lämpösisältö eli entalpia	9
4	Ilmanvaihdon perusprosessit	11
4.1	Lämmitys	11
4.2	Sekoitusilma	11
4.3	Jäähdytys	12
4.3.1	Kuivatus	15
4.3.2	Jäähdytyspatterin vedenpoisto	16
4.4	Lämmöntalteenotto	18
5	Haasteet kylmätilojen ilmanvaihdon kosteudenhallinnassa	18
6	Ratkaisuja kylmätilojen ilmanvaihdon kosteudenhallintaan	19
6.1	Jäähdytettävän ilman kuivatus	21
6.2	Kiertoilma	26
6.3	Eristys	30
6.3.1	Kondenssieristys	30
6.3.2	Lämmöneristys	30
7	Yhteenveto	31
	Lähteet	33
	Liitteet	
	Liite 1: Eristelaskut PAROC calculus 1	
	Liite 2: Eristelaskut PAROC calculus 2	

1 Johdanto

Tämä insinööri työ käsittelee kylmätilojen ilmanvaihdon kosteudenhallintaa ja sen haasteita sekä tarkastelee vaihtoehtoja kosteudenhallinnan tehokkaaseen toimintaan. Työn tilaajana on Ramboll Finland Oy, jonka eräessä suunnitteluhankkeessa kohtaamiin haasteisiin työ perustuu.

Työn tavoitteena on havainnollistaa sitä, mitä kylmätilojen ilmanvaihtosuunnittelussa on otettava huomioon sekä mitä erityisvaatimuksia kylmätiloilla ja niihin puhallettavalla tuloilmalla on. Työn tavoitteena on myös toimia tietopakettina kylmätiloja suunnittelevalle LVI-suunnittelijalle.

Insinööri työssä aihetta käsitellään lähinnä elintarviketeollisuuden näkökulmasta. Useat tässä insinööri työssä käsiteltävät asiat pätevät kuitenkin myös esimerkiksi jäähallien ilmanvaihtosuunnitteluun, vaikka jäähallien suunnittelussa on omat erityisvaatimuksensa, joita tässä insinööri työssä ei esitellä. Etenkin elintarvikkeiden kylmäsäilytyksessä- ja kuljetuksessa kosteudenhallinta voi tuottaa haasteita. Liian korkea kosteus voi aiheuttaa homeen ja bakteerien kasvua, mutta liian alhainen kosteus voi puolestaan kuivattaa tuotteita.

Insinööri työssä käsitellään kylmätilojen ilmanvaihtosuunnittelun haasteita ja tarkastellaan kylmätilojen ilmanvaihdon kosteusongelmia kolmesta eri näkökulmasta sekä tarjotaan niihin ratkaisuja. Ensimmäinen ratkaisu on kuivatustoiminnon lisääminen ilmanvaihtokoneeseen. Toisena vaihtoehtona esitetään ilman jäähdyttämistä kylmätilojen poistoilmalla. Kolmantena on huomioitu eristetyyppien ja -paksuuksien vaikutus kondensoitumiseen.

2 Kosteaa sisäilma

Kesäisin huoneilman suhteellinen kosteus on tyypillisesti noin 50–70 %. Talvella lämmityskaudella vastaava luku on lähes poikkeuksetta alle 40 %, ja kovilla pakkasilla se voi laskea jopa alle 20 %:iin. Ihanteellinen suhteellinen kosteus

talviaikaan on noin 20–40 %. Sisäilman kosteuden ollessa tavallista korkeampi alkaa kosteus tiivistymään kylmiin pintoihin ja pahimmissa tapauksissa aiheuttaa kosteusvaurioita rakenteisiin. (Huoneilman kosteus.) Liian matala sisäilman suhteellinen kosteus puolestaan aiheuttaa mm. limakalvojen ja ihon kuivumista sekä edesauttaa pölyn irtoavuutta, mikä aiheuttaa sen, että tilan käyttäjä kokee sisäilman epämiellyttäväksi (Sandberg ym. 2014: 81).

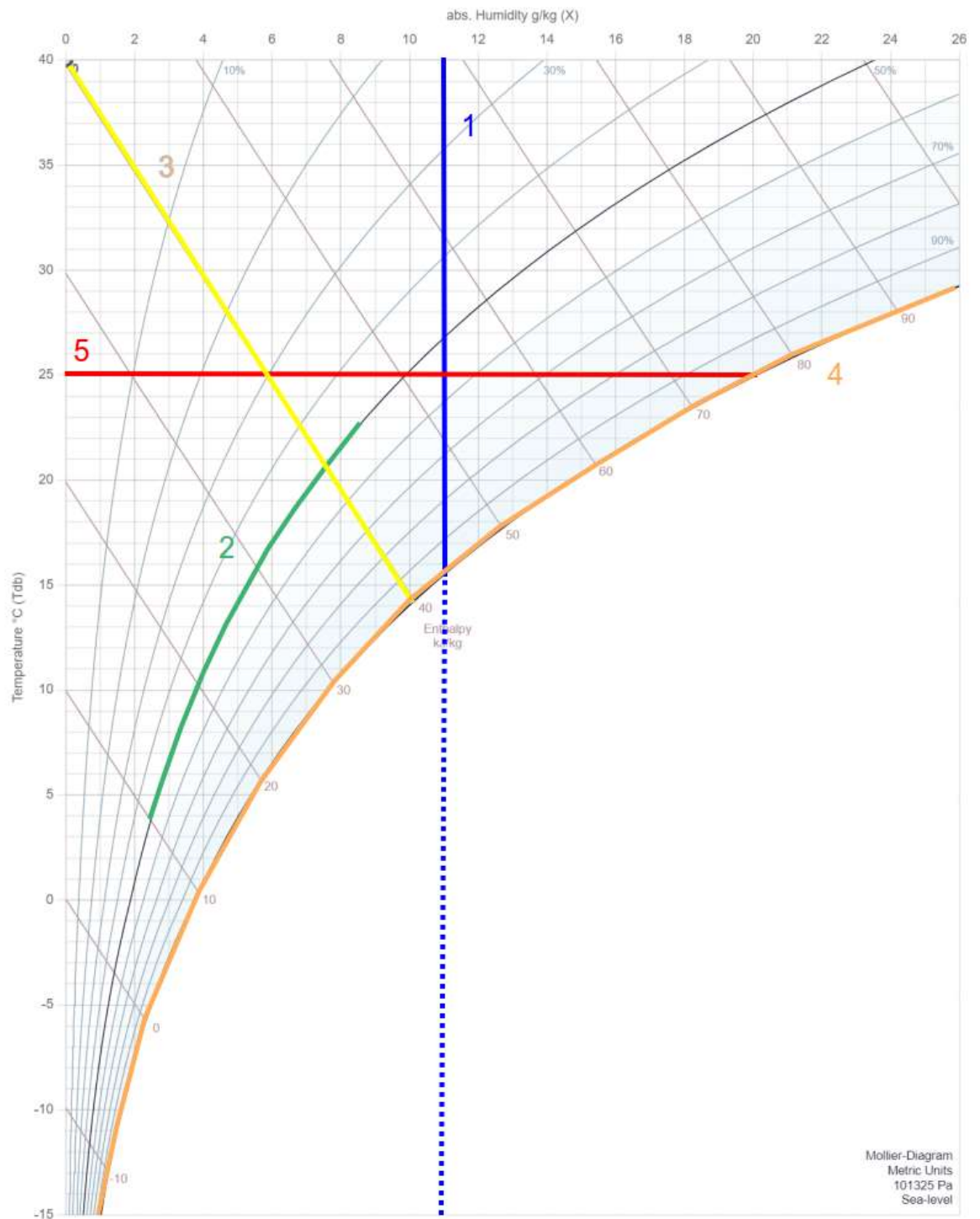
Otollisimpien kasvuolosuhteiden homesienille arvioidaan olevan noin 5–50°C lämpötilassa suhteellisen kosteuden ollessa pitkiä aikoja yli 75–80 % (Åström ym. 2020: 228). Nämä reunaehdot kuitenkin harvoin täyttyvät normaaleissa oleskelutiloissa, normaaleissa olosuhteissa, sillä kuten yllä mainittiin, ilmankosteus pysyttelee ympäri vuoden noin 20–70 %:ssa, joten liiallinen ilmankosteus on harvoin syynä kosteusvaurioille. Kylmätiloissa olosuhteet ovat kuitenkin poikkeukselliset, ja huolimattomalla suunnittelulla sekä kunnossapidolla ovat kosteusvaurioriskit moninkertaiset.

Kosteus- ja homevaurioiden vaikutuksia terveyteen on tutkittu jo vuosikymmenien ajan. On todettu, että niillä on selkeä yhteys astmaoireisiin sekä hengitystieinfektioihin ja -oireiluun, vaikka reaktiot solutasolla ovatkin vielä epäselviä. (Reijula ym. 2012: 12.)

3 Kostean ilman ominaisuuksia

Ilman kosteustekniset ominaisuudet muuttuvat lämpötilojen ja paineen muuttuessa huomattavasti. Tässä luvussa käsitellään tarkemmin kostean ilman keskeisiä ominaisuuksia sekä pyritään havainnollistamaan niitä Mollier-

diagrammin avulla. Kuvaan 1. on merkitty kostean ilman tärkeimpiä ominaisuuksia Mollier-diagrammiin.



Kuva 1. Mollier-diagrammi, jossa viiva 1 osoittaa absoluuttisen kosteuden, viiva 2 suhteellisen kosteuden, viiva 3 entalpiian, viiva 4 vesihöyryn kyllästyskäyrän ja viiva 5 lämpötilan.

3.1 Absoluuttinen- ja suhteellinen kosteus.

Suhteellinen kosteus eli RH (Relative Humidity) tarkoittaa sitä, kuinka monta prosenttiyksikköä tietyn lämpöinen ilma sisältää vettä sen maksimikosteussisällöstä eli absoluuttisesta kosteudesta (Absolute Humidity). (Ilman kosteus 2020). Kuvassa 1 absoluuttinen kosteus x (g/kg) on vaaka-akselilla ja sitä kuvaa pystysuora viiva numero 1. Suhteellinen kosteus on kuvassa 1 käyrä numero 2.

Taulukossa 1 esitetään ilman maksimikosteussisältöjä eri lämpötiloissa, eli kuinka paljon kosteutta ilma absoluuttisesti pystyy sitomaan eri lämpötiloissa.

Taulukko 1. Ilman maksimikosteussisältö eri lämpötiloissa.

Lämpötila °C	Kosteussisältö g/kg
4	5,0
15	10,6
21	15,7

Taulukosta huomataan, että lämmin ilma kykenee sitomaan huomattavasti enemmän vesihöyryä kuin kylmä ilma. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että vaikka kylmällä ja lämpimällä ilmalla on sama suhteellinen kosteus, on kylmä ilma absoluuttiselta kosteudeltaan lämmintä ilmaa kuivempaa. Jos ilman lämpötila on esimerkiksi 21 °C ja suhteellinen kosteus 50 %, on kosteussisältö siis puolet maksimikosteussisällöstä eli noin 7,7 g/kg.

3.2 Kastepistelämpötila

Kastepisteellä tarkoitetaan sitä ilman lämpötilaa, jossa se alkaa luovuttamaan kosteussisältöään eli sitä lämpötilaa, johon ilman tulee laskea, että suhteellinen kosteus on 100 %. Kastepiste voidaan laskea kaavalla 1.

$$Td = \frac{b\gamma(T,RH)}{a-\gamma(T,RH)} \quad (1)$$

Jossa

$$\gamma(T, RH) = \frac{aT}{b+T} + \ln RH \quad (2)$$

Td on kastepiste

T on lämpötila celsiusasteina

RH on suhteellinen kosteus tilavuusosina, (0,00–1,00)

a on 17,27

b on 237,7°C

\ln on luonnollinen logaritmi

Kaavalla 1 voidaan ratkaista esimerkiksi tyypillisen kesäajan ulkoilman eli 21 °C ja RH 55 % kastepiste. Ratkaistaan ensin $\gamma(T, RH)$ kaavalla 2.

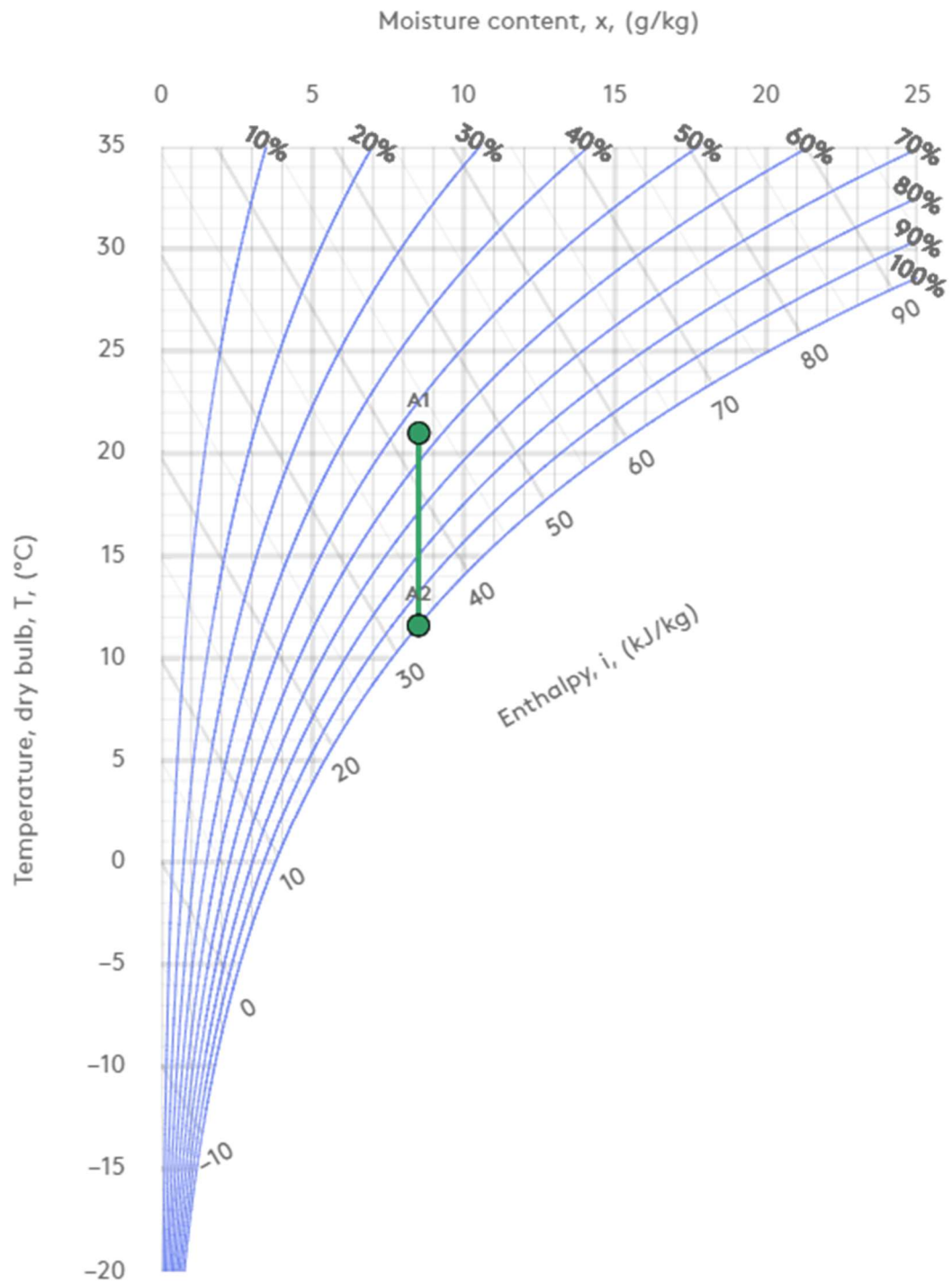
$$\gamma(T, RH) = \frac{17,27 \times 21^\circ\text{C}}{237,7^\circ\text{C}} + \ln 0,55 = 0,80$$

Sijoitetaan ratkaisu kaavaan 1:

$$Td = \frac{237,7 \times 0,80}{17,27 - 0,80} = 11,61$$

21°C ilmaa, jonka suhteellinen kosteus lähtötilanteessa on 55 %, voidaan siis jäähdyttää noin 11,6 °C:een, kunnes se saavuttaa maksimikosteussisältönsä, jolloin ilman vesihöyry alkaa tiivistyä pisaroiksi.

Sama asia voidaan kätevästi tarkastella Mollier-diagrammin avulla. Kuvassa 2 on esitetty edellä laskettu ilman kastepiste Mollier-diagrammissa.



Kuva 2. Kastepisteen selvittäminen 21°C , RH 55 % ilmalle Mollier-diagrammissa.

Kuvasta 2 nähdään, että absoluuttinen kosteus ei jäähdytysprosessissa muutu, jolloin ilman tilapiste siirtyy Mollier-diagrammissa suoraan alaspäin. Kastepiste löytyy siis kuvasta 1. viivalta numero 4.

3.3 Vesihöyryn osapaine ja ilmanpaine

Mollier-diagrammia eli h-x-piirrosta hallitsee vesihöyryn kyllästyspaineen käyrä, kuvassa 1 viiva numero 4. Se on eksponentiaalinen käyrä, joka kuvaa sitä ilman tilaa, jossa ilma on kylläistä eli sen suhteellinen kosteus on RH 100 %.

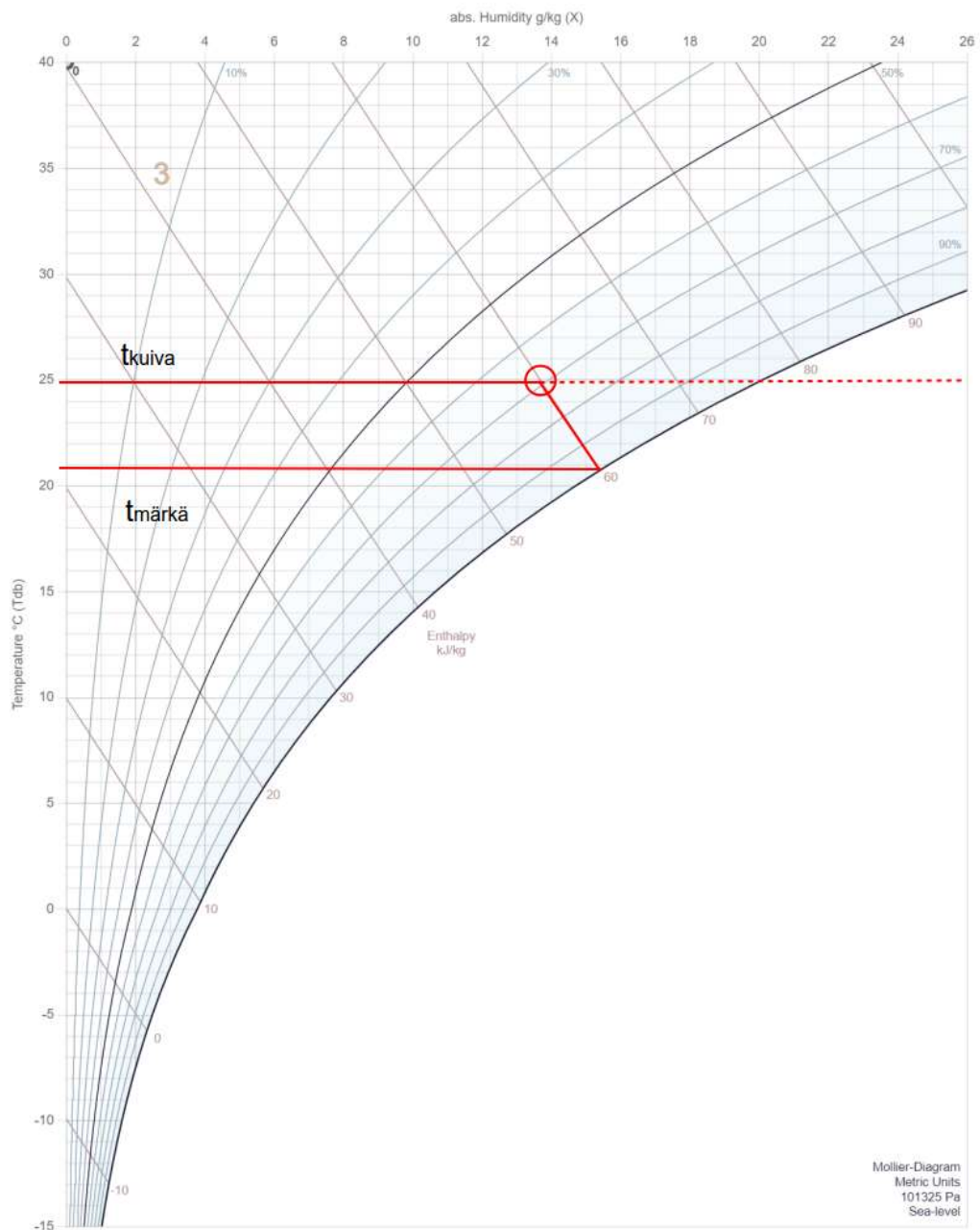
Vesihöyryn osapaine tarkoittaa vesihöyryn osuutta kokonaispaineesta. Talvisin ulkona vesihöyryn osapaine voi olla 200 pascalia ja sisällä 900 pascalia. Vesihöyryn osapaineen erot voivat aiheuttaa diffuusiota eli vesihöyryn pitoisuuksien pyrkimystä tasaantua. Diffuusio koskee kaikkia ilman osakaasuja. (Ilman ominaisuudet 2008.) Ilmastointitekniikassa termiä käytetään puhuttaessa vesihöyryn kyvystä läpäistä eristemateriaaleja.

Mollier-diagrammi on laadittu aina jollekin ilmanpaineelle, kuvien 1 ja 2 diagrammien tapauksessa 101,3 kilopascalia, joka vastaa tavallista ilmanpainetta eli 1,013 baaria.

3.4 Kuiva- ja märkälämpötila

Kuvassa 1 pystyakselilla on ilman kuiva lämpötila, sitä kuvaa viiva numero 5 ja se tarkoittaa tavallisen lämpömittarin osoittamaa lämpötilaa celsiusasteina. Märkälämpötilaa ei piirretty kuvan 1 diagrammiin mutta se kulkee viivan numero 3 suuntaisesti kyllästyskäyrälle, jonka kohdalta luettu kuiva lämpötila on yhtä suuri kuin märkälämpötila. Märkälämpötilaa mitataan psykrometrillä, joka on yksinkertaisesti kosteusmittari jonka toinen mittauspinta mittaa kuivalämpötilaa ja toinen, kosteaan kankaaseen kääritty mittauspinta mittaa märkälämpötilaa. Näiden lämpötilojen erotuksella voidaan määrittää suhteellinen kosteus seuraavasti:

Oletetaan kuivalämpötilan olevan 25 °C ja märkälämpötilan 21 °C. Sijoitetaan viivat Mollier-diagrammiin.



Kuva 3. Suhteellisen kosteuden määrittäminen kuiva- ja märkälämpötilojen avulla Mollier-diagrammissa.

Kuvasta 3 huomataan ympyröidyssä leikkauspisteessä suhteellisen kosteuden olevan noin 69 %.

3.5 Lämpösisältö eli entalpia

Kuvassa 1 viivan 3 mukaisella vinoakselilla on kuvattuna ilman lämpösisältö eli entalpia h . Entalpia ilmoitetaan kilojouleina kilogrammaa kohden ja sen muutos kuvaa ilman lämmittämiseen tai jäädyttämiseen vaadittua lämpöenergian määrää (Sandberg ym. 2014: 125; Seppänen & Seppänen. 2007: 22). Entalpia on erittäin tärkeä suure ilmaa jäädytettäessä sillä jäädytettäessä sekä ilman lämpötila että absoluuttinen kosteus voi muuttua. Jos ilmaa ei kuivata, voidaan tarvittava jäädytysteho laskea tehon kaavalla 3.

$$\Phi_{\text{ilma}} = \rho_i q_{vi} c_{pi} (T_{\text{tulo}} - T_{\text{ulko}}) \quad (3)$$

Φ_{ilma} on lämmitysteho (kW)

ρ_i on ilman tiheys (1,2 kg/m³)

q_{vi} on ilman tilavuusvirta (m³/s)

c_{pi} on ilman ominaislämpökapasiteetti (1,0 kJ/(kgK))

T_{tulo} on tuloilman lämpötila (°C tai K)

T_{ulko} on ulkoilman lämpötila (°C tai K)

Jos ilmaa on kuivattava, eli siitä poistetaan kosteutta, on teho laskettava kaavalla 4 jossa lämpötilojen ja ominaislämpökapasiteetin tilalla on ilmojen entalpiat.

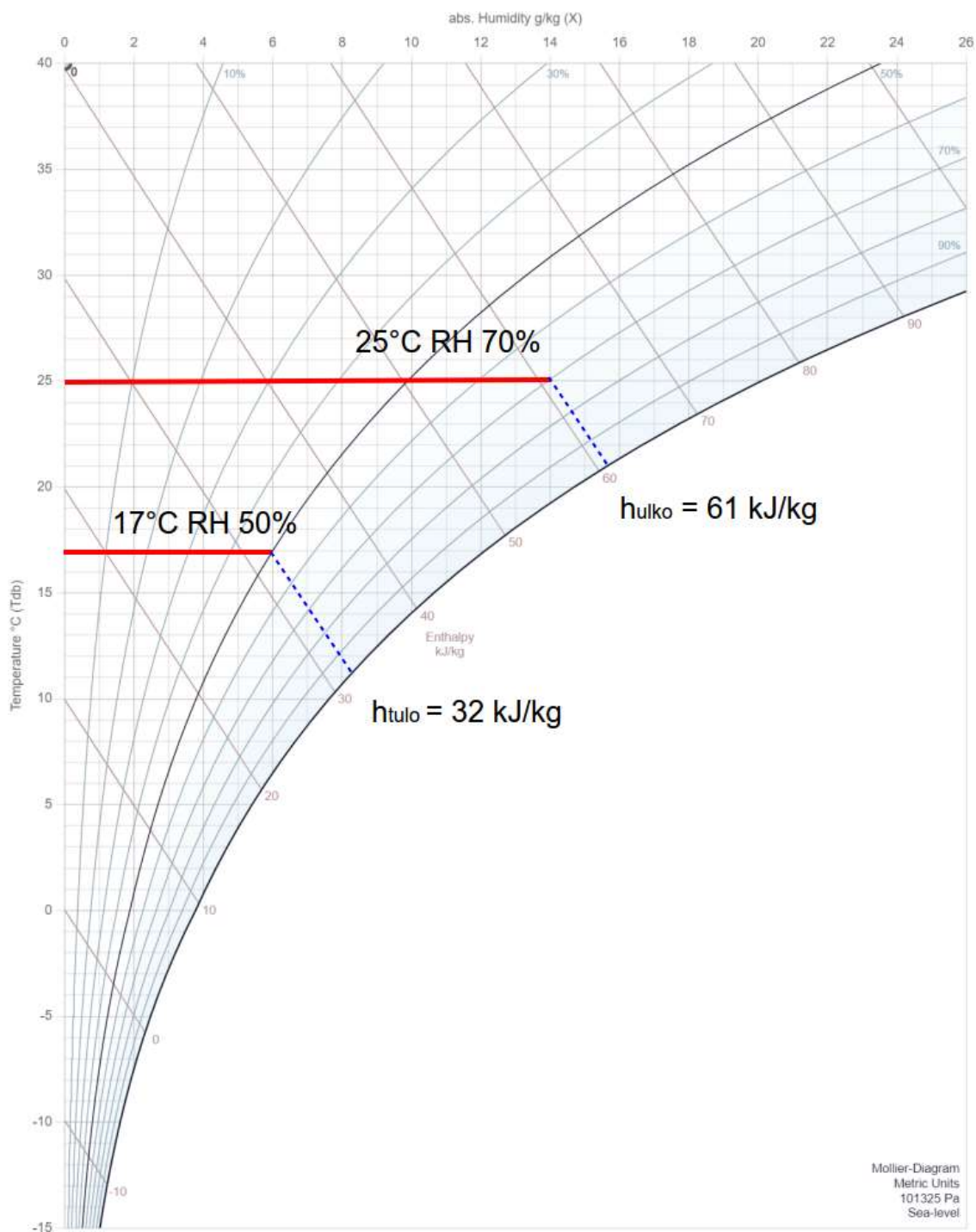
$$\Phi_{\text{ilma}} = \rho_i q_{vi} (h_{\text{tulo}} - h_{\text{ulko}}) \quad (4)$$

Jossa

h_{tulo} on tuloilman entalpia (kJ/kg)

h_{ulko} on ulkoilman entalpia (kJ/kg)

Ilman entalpia voidaan määrittää helposti Mollier-diagrammissa. Kuvassa 4 on määritetty tuloilman 17 °C RH 50 % ja ulkoilman 25 °C RH 70 % entalpiat Mollier-diagrammin avulla.



Kuva 4. Ilman entalpia eri olosuhteissa.

4 Ilmanvaihdon perusprosessit

4.1 Lämmitys

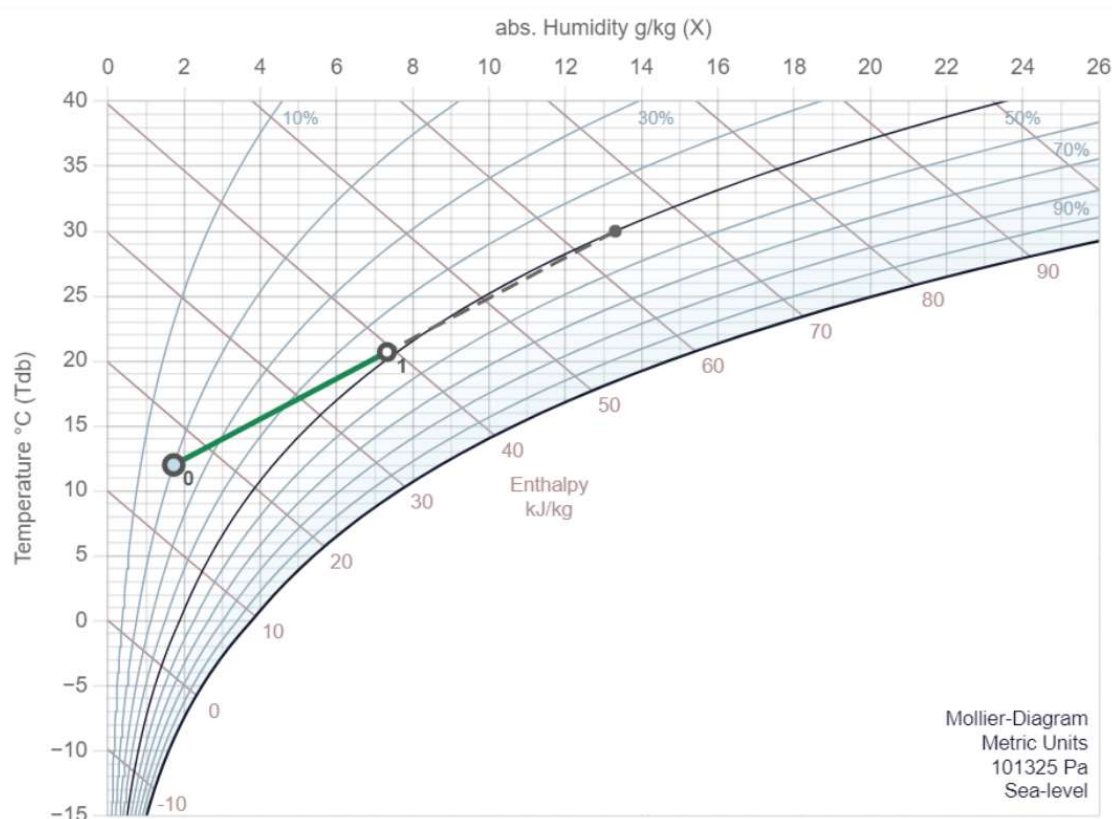
Ilman lämmitys on melko yksinkertainen prosessi. Ilmaa lämmitetään useimmiten vesikiertoisessa tai sähkölämmitteisessä lämmityspatterissa, joka kuumentaan tarpeenmukaiseen lämpötilaan ja joka luovuttaa lämpöenergiaa lämmityspatterin läpi puhallettavaan ilmaan. Ilman kosteussisältö ei tavallisesti lämmitysprosessissa muutu, eli Mollier-diagrammissa sen tilapiste siirtyy suoraan ylöspäin. (Sandberg ym. 2014: 131.)

Tavallisesti ilmaa lämmitetään talvisin ulkoilman ollessa kylmää, mutta ilmaa voidaan myös jälkilämmittää jäädyttämisen jälkeen suhteellisen kosteuden alentamiseksi sekä sopivan tuloilman lämpötilan takaamiseksi. Jos ilmaa kuivataan niin sanotussa comfort-ilmanvaihdossa, voi ilman lämpötila olla liian alhainen jäädytyspatterin jälkeen, jolloin tuloilma aiheuttaa vedon tunnetta.

4.2 Sekoitusilma

Ilmaa voidaan lämmittää myös sekoittamalla esimerkiksi kylmäkoneikosta tuotetulla lauhdeilmalla tai jäädytetyn tilan poistoilmalla. Kahden ilmavirran sekoitus on hyödyllistä mm. tuloilmakoneessa kierrätys- ja palautusilmaa käytettäessä, suutinkonvektoreissa tai haihdutuskostuttimien ohitussäädössä. (Sandberg ym. 2014: 136.) Sekoitusilman tilapiste sijoittuu Mollier-diagrammissa aina lähtötilapisteiden väliselle janalle sekoitussuhteen mukaan.

Sekoitusilmaa käytettäessä on otettava huomioon vaatimukset käytettävälle poistoilmalle. Palautusilman on oltava peräisin ilmanlaadultaan vastaavasta tai paremmista tiloista, eikä se saa sisältää epäpuhtauksia, jotka heikentäisivät ilmanlaatua (Torppa. 2020: 12).



Kuva 5. Ilmavirtojen sekoitus Mollier-diagrammissa.

Kuvassa 2. on havainnollistettu ilmavirtojen sekoitusta, pisteessä 0 ilma on 12 °C RH 20 %, ja siihen on sekoitettu 30 °C RH 50 % ilmaa. Ilmavirtojen sekoitussuhde on 50–50 eli tilapiste siirtyy keskelle pisteiden välistä janaa. Sekoituspisteessä ilman lämpötila on 20.7 °C ja RH 48.3 %.

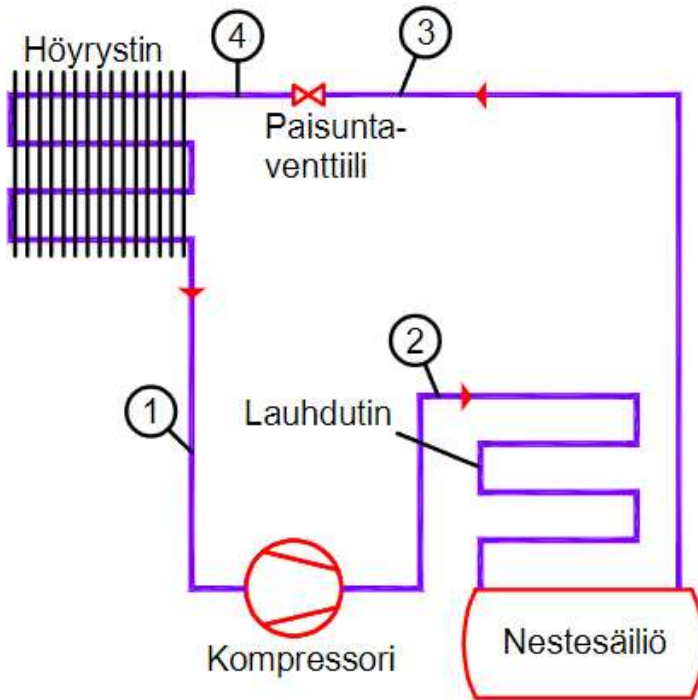
Talviolosuhteissa on myös huomioitava, että ulkoilman ja palautusilman sekoituspiste voi jäädä kyllästyskäyrän alapuolelle, jolloin sekoitusosaan voi syntyä vettä tai lunta. Suodatin voi tällöin tukkiutua tai kastua, ja kastuessaan se menettää suodatuskykynsä. (Sandberg ym. 2014: 136.)

4.3 Jäähdytys

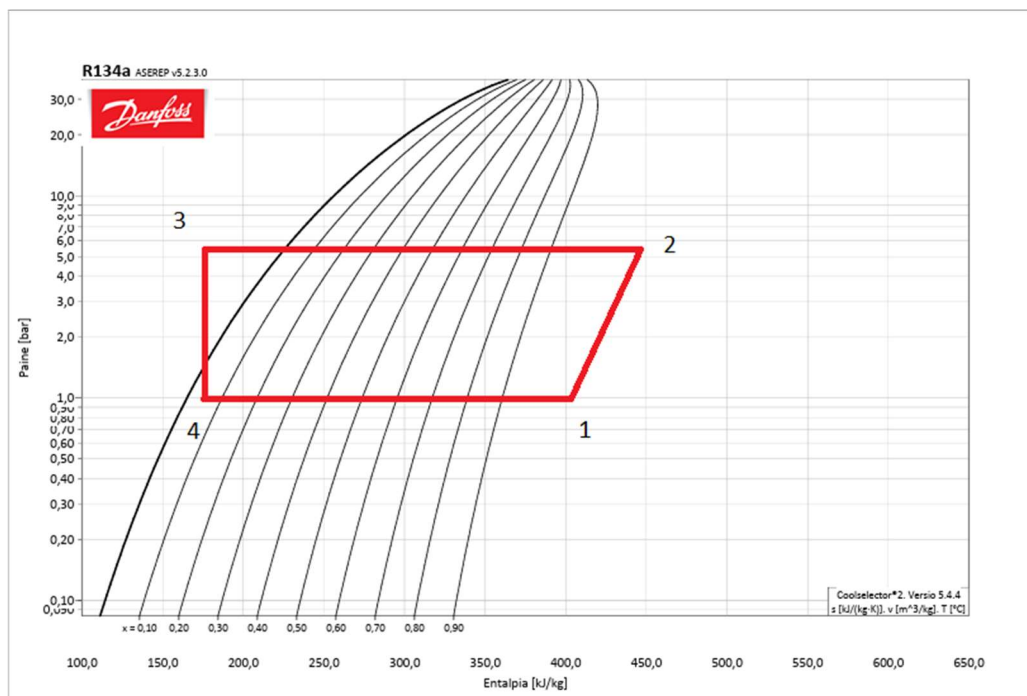
Ilmaa jäähdytetään ilmastointikoneessa yleensä vesikiertoisessa jäähdytyspatterissa. Tavallisesti tuloilman lämpötilan vaihteluväli on 15–20 °C, jolloin jäähdytyspatterille kulkevan veden lämpötila on noin 7 °C sisään ja 12 °C ulos.

(Sandberg ym. 2014: 187.) Ilmaa jäähdytetään yllä mainittua kylmemmäksi käytännössä ainoastaan silloin, kun siitä halutaan poistaa kosteutta eli kuivattaa, tai tuloilman on oltava kylmempää esimerkiksi kylmätilojen olosuhteiden ylläpitämiseksi. Jäähdytettäessä on lähtökohtaisesti varauduttava kondensointiin, ja jäähdytyspatteri on varustettava asianmukaisella viemäröinnillä (Sisäilmastoluokitus 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset: 19). Jäähdytyspatterit on myös asennettava siten, ettei kondenssivesi pääse muodostamaan altaita missään vaiheessa. (Hygienia sisätiloissa. Tilasuunnittelu: 6).

Ilmastoinnin jäähdytyksen kylmäprosessi voidaan toteuttaa kiertoprosessilla, jossa koneistossa kiertävä kylmäaine ensin höyrystyy höyrystimessä sitoen ympäristön lämpöä itseensä. Matalassa paineessa oleva kylmäinehöyry imetään sitten kompressoriin, joka puristaa kylmäaineen korkeampaan paineeseen, samalla kohottaen kylmäinehöyryn lämpötilaa. Kompressorista kylmäinehöyry kulkeutuu lauhduttimeen, jossa höyry nesteytyy, eli lauhtuu luovuttaen lämpöä ympäristöön. Lauhduttimelta kylmäinehöyry palaa höyrystimelle paisuntaventtiilin kautta, jossa nestemäisen kylmäaineen paine laskee, jolloin se muuttuu neste-höyryseokseksi samalla laskien seoksen lämpötilaa. (Sandberg ym. 2014: 244.) Tätä prosessia on havainnollistettu kuvissa 6 ja 7.



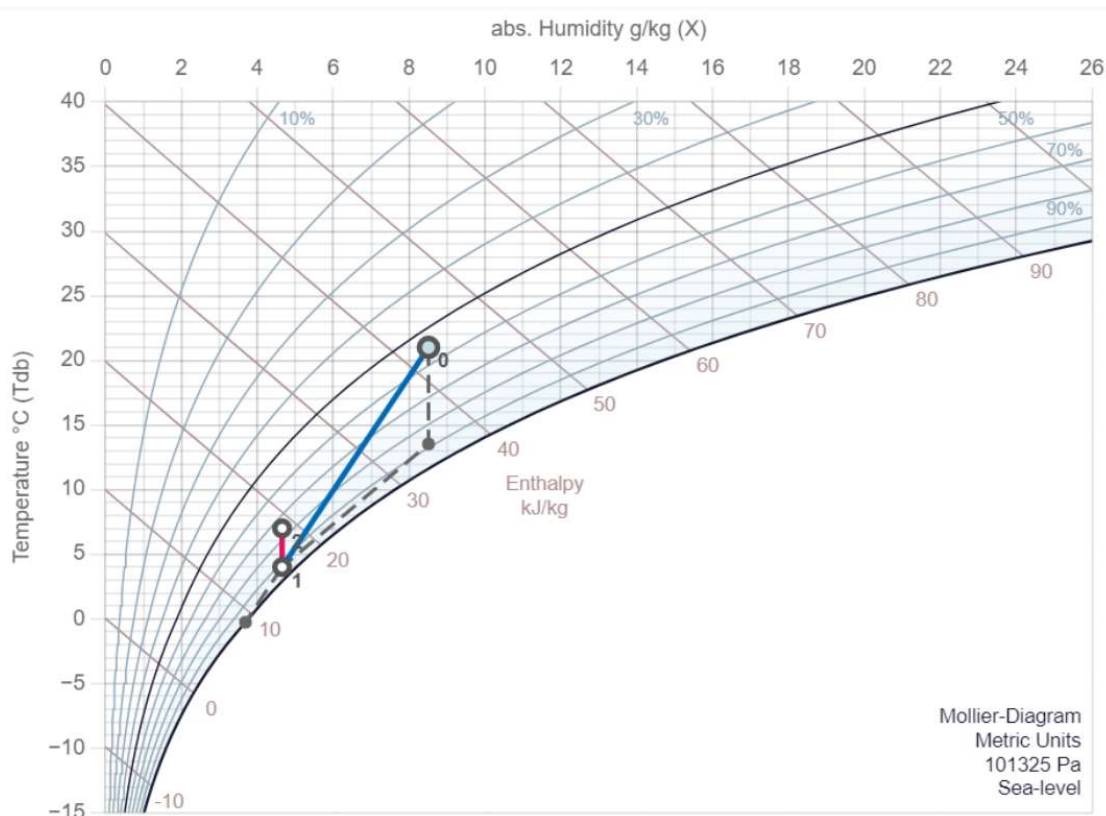
Kuva 6. Periaatekuva kylmäkoneikon peruskomponenteista. Numerot viittaavat prosessiin kuvassa 7.



Kuva 7. Kylmäprosessi kuvattuna log p, h-tilapiirroksessa.

4.3.1 Kuivatus

Yleensä ilmaa kuivataan jäähdytyspatterissa. Kosteus tiivistyy ilmavirrasta jäähdytyspatterin pinnalle, kun patterin pintalämpötila on alhaisempi kuin ilman kastepiste. (Comstock ym. 2016.) Kuivatuksesta syntynyt tiivistynyt kosteus johdetaan ilmanvaihtokoneesta yleensä kondenssiviemäriin. Kuivauksessa on myös huomioitava, ettei tiivistyneet pisarat lähde ilman mukaan ilman nopeuden ollessa liian suuri lamelliväliin nähden. Yleensä rajana voidaan pitää 2,5–3 m/s. Tarvittaessa kone voidaan varustaa myös erillisellä pisanerottimella. (Sandberg ym. 2014: 187.) Kuva 8. havainnollistaa Mollier-diagrammissa, kuinka ilman tilapiste muuttuu jäähdytettäessä, kun ilmaa samalla kuivatetaan.



Kuva 8. Ilman kuivatus, jäähdytys ja uudelleenlämmitys.

Pisteessä 0 ilma on 21 °C RH 55 %, ja sen absoluuttinen kosteussisältö on 8,5 g/kg. Pisteessä 1 ilman jäähtyessä lämpötilaan 4 °C, on sen suhteellinen kosteus noin 93 % mutta absoluuttinen kosteus vain 4,7 g/kg. Kyseinen jäähdytysprosessi vaatii, että jäähdytyspatterin on oltava hieman alle 0 °C lämpöinen.

Jäähdytyspatterista kondensoituva vesivirta voidaan laskea kaavalla 5.

$$m_v = m_i(x_{ui} - x_{ji}) \quad (5)$$

m_v on kondensoituva vesivirta (kg/s)

m_i on jäähdytetyn kuivan ilman massavirta

x_{ui} on jäähdytettävän ulkoilman kosteussisältö

x_{ji} on jäähdytetyn tuloilman kosteussisältö

Lasketaan yllä mainituilla arvoilla jäähdytyspatterista kondensoituva vesivirta, kun ilmastointikoneen tilavuusvirta on 4 m³/s ja kuivan ilman tiheys 1,2 kg/m³. Lasketaan ensin jäähdytetyn ilman massavirta kertomalla tilavuusvirta tiheydellä.

$$m_i = 4 \text{ m}^3/\text{s} \times 1,2 \text{ kg/m}^3$$

$$m_i = 4,8 \text{ kg/s}$$

Sijoitetaan arvot kaavaan 5.

$$m_v = 4,8 \text{ kg/s} (0,0085 \text{ kg/kgi} - 0,0047 \text{ kg/kgi})$$

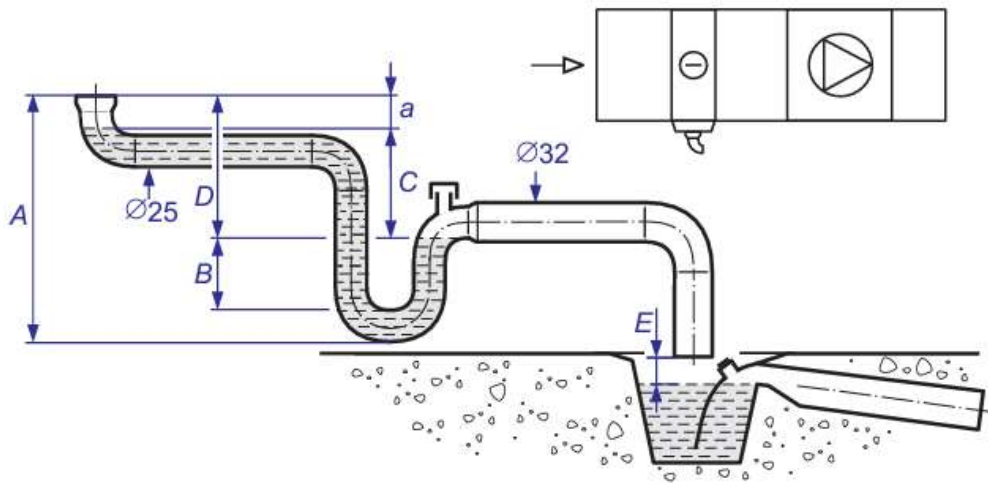
$$m_v = 0,000192 \text{ kg/s}$$

Vettä kondensoituu toisin sanoen siis noin 0,000192 dm³/s eli noin 17 dm³/vrk.

4.3.2 Jäähdytyspatterin vedenpoisto

Jäähdytyspatteri on ohjekortin Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset (2018: 19) mukaan varustettava lähtökohtaisesti aina pisaranerottimella sekä sisä- ja ulkopuolisella tippavesialtaalla, jotka on johdettava

viemäriin vesilukollisen lattiakaivon tai muun laitteen kautta. Vesilukon tehtävä kondenssivesiviemärissä on tavallisen vesilukon tavoin estää kaasumaisten epäpuhtauksien siirtyminen ylöspäin järjestelmässä (Holopainen. 2006: 1). Eri osien kondenssiliitäntöjä ei saa ennen vesilukkoa yhdistää toisiinsa, vaan kaikki on varustettava omalla vesilukollaan. Vesilukon läpi ei saa kuivanakaan virrata ilmaa, tai ennen puhallinta sijoitetun patterin kohdalla alipaine voi imeä ilmaa väärään suuntaan, jolloin kondenssivesi ei pääse vesilukkoon. (Sandberg ym. 2014: 188.) Kuva 9. havainnollistaa kondenssiveden viemäröintiä, kun viemäripisteen jälkeinen puhallin aiheuttaa putkistoon alipaineen.



Kuva 9. Kondenssiveden viemäröinti alipaineisessa viemäripisteessä. (Holopainen. 2006: 2)

Kuvassa 7 ilmastointikoneen puhaltimen alipaine on aiheuttanut korkeuseron C vesilukon nestepintojen välille. Korkeusero C voidaan laskea kaavalla 6.

$$C = \frac{\Delta p}{\rho g} \quad (6)$$

C on korkeusero nestepintojen välillä

Δp on staattinen paine-ero (Pa)

ρ on veden tiheys (1000 kg/m³)

g on putoamiskiihtyvyyys (9,81 m/s²)

4.4 Lämmöntalteenotto

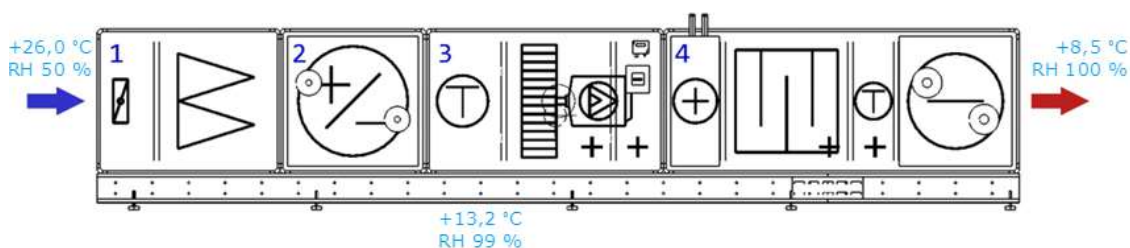
Lämmöntalteenotto tarkoittaa nimensä mukaisesti laitetta, joka ottaa talteen lämpöä kertaalleen käytetystä ilmasta. Lämmöntalteenottolaitteista puhuttaessa, puhutaan yleensä joko rekuperatiivisista tai regeneratiivisista lämmönsiirtimistä. Näiden laitteiden ero on se, että rekuperatiiviset lämmönsiirtimet eivät siirrä kosteutta, kun taas regeneratiiviset lämmönsiirtimet kykenevät siirtämään kosteutta prosentteina yhtä paljon tai vähemmän kuin lämpöä. Jos regeneratiivisissa siirtimissä kosteutta ei siirretä, näyttää prosessi Mollier-diagrammissa samanlaiselta kuin rekuperaattorilla. (Sandberg ym. 2014: 133–134.)

5 Haasteet kylmätilojen ilmanvaihdon kosteudenhallinnassa

Kylmätilojen suunnittelu eroaa tavallisesta LVI-suunnittelusta siten, että käytännössä suunnittelu perustuu täysin asiakkaalta saatuihin kokemusperäisiin lähtötietoihin, jolloin olisi äärimmäisen tärkeää tietää tilojen lämpötila- ja kosteusvaatimukset. Suunnittelu täytyy toteuttaa niin, että tila kykenee ylläpitämään otolliset olosuhteet huomattavista lämpökuormista huolimatta. Asiakkaalta saatuja lähtötietoja ovat mm. tuotteiden tulolämpötila, tuotevaihto eli vaihtuvien tuotteiden määrä varastoinnissa esimerkiksi kilogrammoina vuorokaudessa, tilassa työskentelevien määrä sekä vuorokausittainen työskentelyaika. Nämä lähtötiedot saattavat kuitenkin olla karkeita arvioita, ja jos tuotteet pääsevät esimerkiksi kuljetuksen aikana lämpenemään, suurien volyymien takia ne luovuttavat huomattavaa lämpötehoa kylmätilaan.

6 Ratkaisuja kylmätilojen ilmanvaihdon kosteudenhallintaan

Perustana ratkaisuille on käytetty tarkasteltuja vaihtoehtoja Rambollin haasteellisessa hankkeessa, jossa ilma kylmätilojen tuloilmakanavistoissa kondensoi huomattavasti, sillä ilmanvaihtokone ei pidä sisällään jälkilämmityspatteria, jolla ilmaa lämmitetään ja suhteellista kosteutta alennetaan jäähdyttämisen jälkeen. Tuloilman suhteellinen kosteus kanavistoissa nykytilanteessa on 100 %, jolloin kondensoituminen on välttämätöntä, sillä kanavaeristyksillä ei voida estää ilman jäähtymistä täysin kanavien kulkiessa kylmien tilojen ilmatilassa, tämä aiheuttaa kondensoitumista kanavan sisäpinnoille. Nykytilannetta ilmanvaihtokoneessa havainnollistaa kuva 10.



Kuva 10. Ilmanvaihtokoneen nykytilanne kondensoitumisongelman aikaan.

Kuvasta huomataan, että jos LTO-patteria käytetään jäähdytykseen, on ilma sen jälkeen jo lähes täysin kylläistä. Jäähdytyspatterin jälkeen ilma on jo kyläistä eli kanavistoihin puhallettaessa se tulee kondensoitumaan. Kuvasta myös huomataan, ettei ilmanvaihtokoneessa ole jälkilämmityspatteria tai tyhjää rakennosaa sellaisen lisäämistä varten.

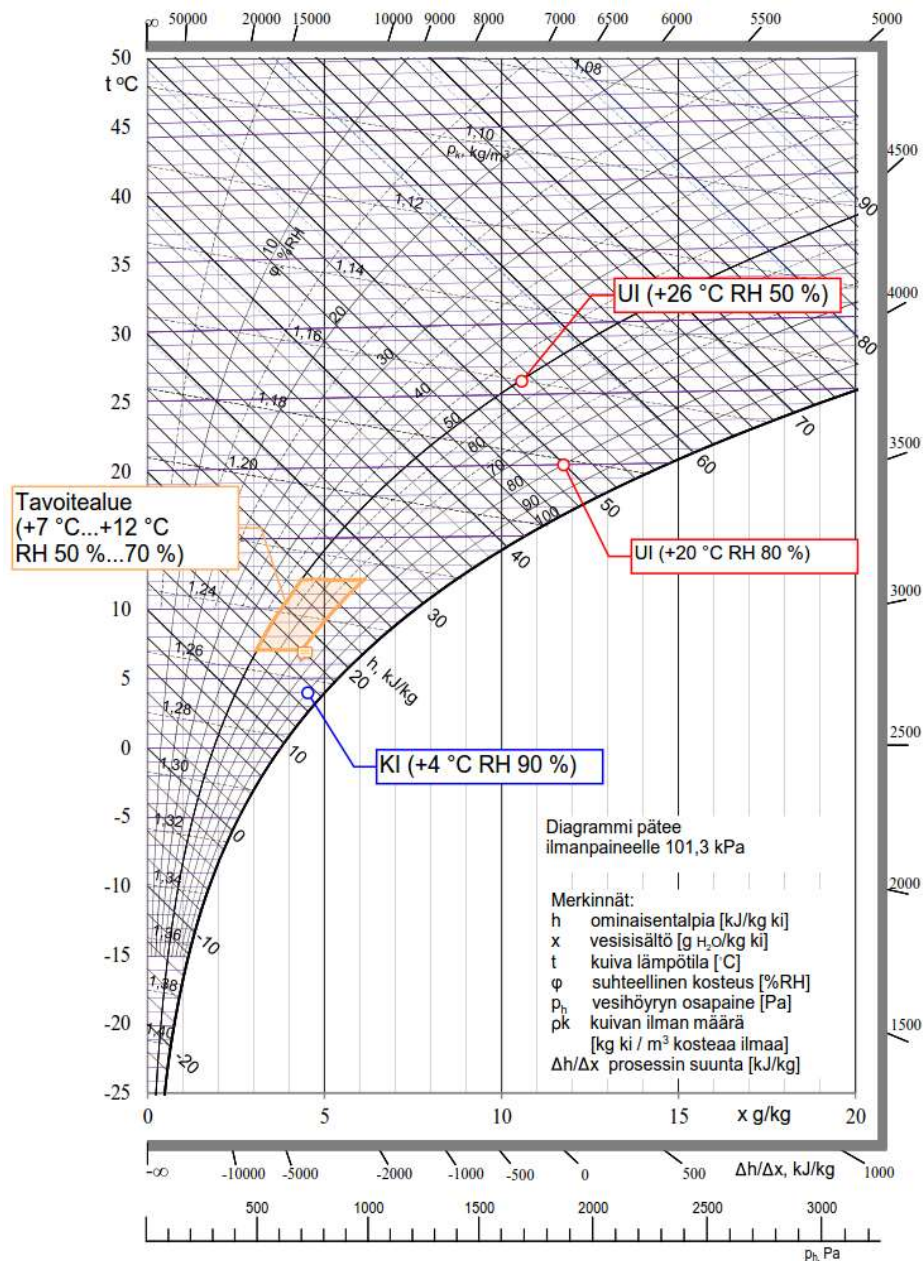
Tässä luvussa tutkitaan erilaisia ratkaisuja näihin kondensoitioongelmiin ja tarkasteltavina olosuhteina käytetään tavallisia kesäajan olosuhteita, jotka on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Tarkasteltavien ulkoilmojen olosuhteet.

$t_{\text{ulko}} (^{\circ}\text{C})$	$t_{\text{kp}} (^{\circ}\text{C})$	RH_{ulko}	$x_{\text{ulko}} (\text{g/kg})$
26	14,8	50 %	10,49
20	16,4	80 %	11,70

Taulukon tarkat arvot on saatu Mollier Sketcher -ohjelmasta. Lisäksi laskuissa käytetään tuloilman hyväksytyinä raja-arvoina 7 °C...12 °C ja RH 50 %...80 %.

Kuva 11. havainnollistaa olosuhteita Mollier-diagrammissa.



Kuva 11. Laskuissa käytetyt lähtöarvot Mollier-diagrammissa.

6.1 Jäähdytettävän ilman kuivatus

Tyypillisesti kylmätilojen lämpötila vaihtelee käyttötarkoituksen mukaan noin +4 °C ja +12 °C välillä. Tämä tarkoittaa sitä, että jos yllä mainittujen esimerkkiarvojen mukaista 26 °C & 50 % RH sisäänpuhallusilmaa jäähdytetään esimerkiksi +4 °C, on siitä tiivistynyt pinnoille vettä noin 5,7 g jokaista ilmakiloa kohden. Teoriassa ilmaa voidaan siis hallitsemattoman kondensoitumisen välttämiseksi

jäähdyttää enimmillään noin 15 °C asteiseksi, jolloin se saavuttaa maksimikosteussisältönsä. Vaikka jäähdytyspatteri olisikin viemäröity, aiheuttaa lähes 100 % suhteellinen kosteus ongelmia niin ilmanjaossa, kuin sisäilman laadussakin.

Yleisin tapa, jolla kondensointia hallitaan, on ilman kuivattaminen. Aina tämä ei kuitenkaan ole mahdollista ilman ilmanvaihtokoneremonttia, etenkin jos ilmanvaihtokoneeseen ei ole jätetty tyhjiä rakenneosia esimerkiksi lämmityspatterivaarusta varten. Jos jäähdytyspatteri on koneen viimeinen komponentti, voi jäähdytettävä ilma lähteä koneelta täysin kylläisenä, jolloin sen suhteellinen kosteus on 100 %. Käytännössä kanavisto vaatisi tässä tapauksessa äärettömän eristyksen estääkseen ilman kondensoitumisen täysin. Tämä kappale käsittelee tilannetta, jossa ilmaa jäähdytetään ilmanvaihtokoneessa, jonka jälkeen se lämmitetään jälkilämmityspatterissa suhteellisen kosteuden alentamiseksi. Aloitetaan määrittämällä entalpiat Mollier-diagrammista ilman tiloille +20 °C RH 80 % ja +4 °C RH 100 %. Tavoitealueelta valitaan vaadittua alhaisempi lämpötila, sillä ilmaa on jälkilämmitettävä. +20 °C RH 80 % ilman lämpösisältö eli entalpia on noin 50 kJ/kg ja vastaavasti +4 °C RH 100 % ilman entalpia on noin 16 kJ/kg. Käytetään jäähdytettävän ilman virtauksena 500 dm³/s eli 0,5 m³/h.

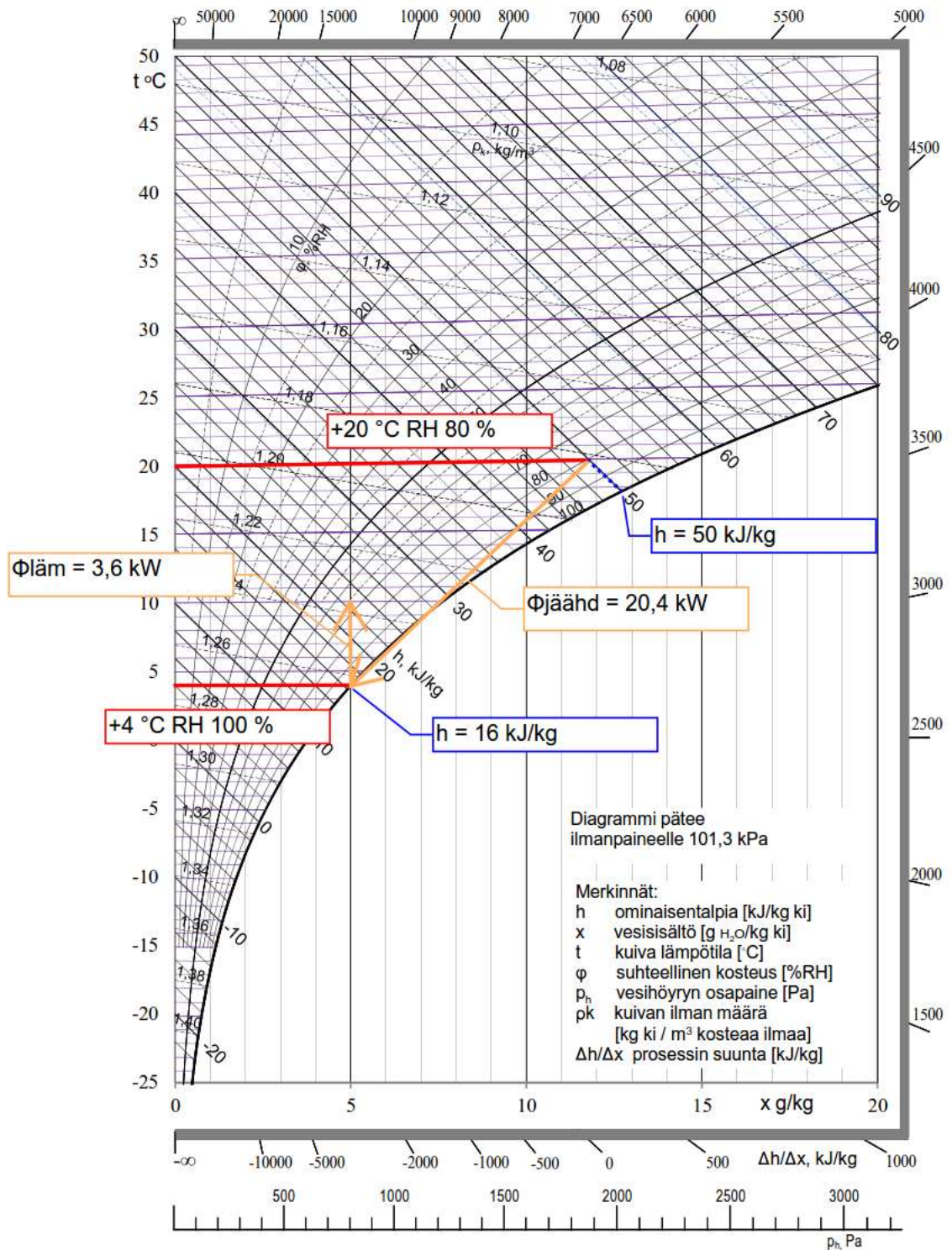
Sijoitetaan arvot kaavaan 4.

$$\Phi_{ilma} = 1,2 \text{ kg/m}^3 \times 0,5 \text{ m}^3/\text{s} \times 1,0 \text{ kJ}/(\text{kgK}) \times (50 \text{ kJ}/\text{kg} - 16 \text{ kJ}/\text{kg})$$

Jäähdytystehoksi saadaan noin 20,4 kW. Jäähdytyksen jälkeen ilmaa on vielä lämmitettävä, jotta päästään tavoitealueelle. Valitaan halutuksi lämpötilaksi +10 °C. Haluttua suhteellista kosteutta ei tässä voi määrittää sillä lämmitysprosessissa absoluuttinen kosteus ei muutu. Sijoitetaan nämä arvot tehon kaavaan 3.

$$\Phi_{ilma} = 1,2 \text{ kg/m}^3 \times 0,5 \text{ m}^3/\text{s} \times 1,0 \text{ kJ}/(\text{kgK}) \times (10 \text{ °C} - 4 \text{ °C})$$

Lämmitystehoksi saadaan noin 3,6 kW ja Mollier-diagrammista tarkasteltuna ilman tilapiste lämmityksen jälkeen on +10 °C RH 65 %. Lämmitys- ja jäähdytystehot yhteensä ovat siis noin 24 kW. Prosessi on esitettyä kuvassa 12.



Kuva 12. Jäähdytys ja jälkilämmitysprosessi esitettyinä Mollier-diagrammissa.

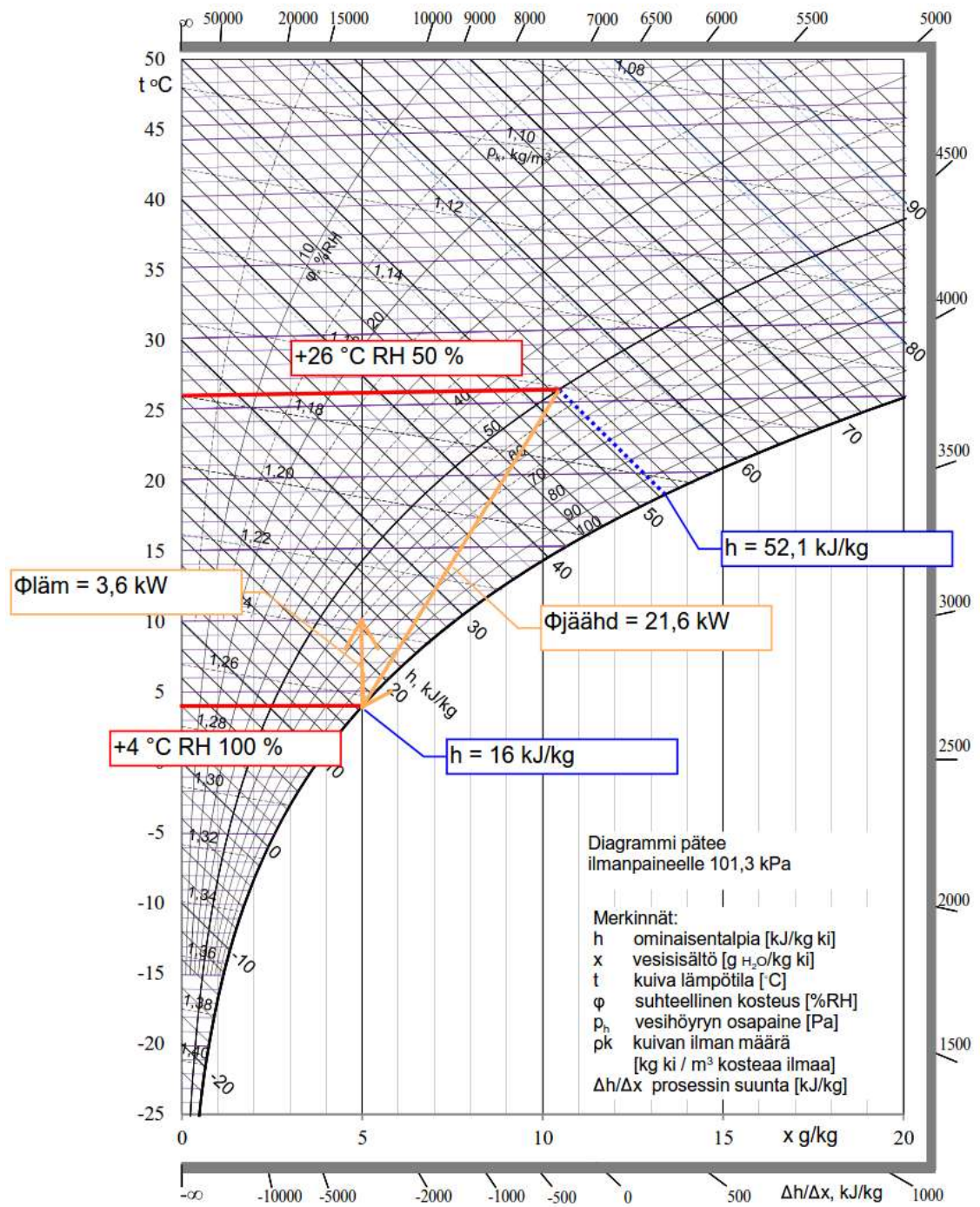
Sijoitetaan samat lähtöarvot yksikkömuunneltuina kaavaan 5 kondensoituneen vesivirran laskemiseksi. Mollier-diagrammista saadaan kosteussisällöiksi ulkoilmalle $x = 0,012 \text{ kg/kg}_i$ ja tuloilmalle $x = 0,005 \text{ kg/kg}_i$.

$$m_v = 0,6 \text{ kg/s} \times (0,012 \text{ kg/kg}_i - 0,005 \text{ kg/kg}_i)$$

Kondensoituvaksi vesivirraksi saadaan $0,0040 \text{ kg/s}$ eli noin $350 \text{ dm}^3/\text{vrk}$.

Liitteessä 1. On esitetty yksinkertaistettu esimerkki ilman sisäänpuhallustilasta Paroc Calculus- eristeiden laskentaohjelman laskemana. Esimerkissä ilman loppulämpötila on $9,6 \text{ }^\circ\text{C}$, jolloin sen suhteellinen kosteus Mollier-diagrammista tarkasteltuna on noin 68 %. Tällä ylletään esimerkin mukaiseen hyväksytyyn suhteelliseen kosteuteen, mutta ennen suunnittelun aloittamista on äärimmäisen tärkeää saada asiakkaalta tarvittavat lähtötiedot, etenkin tuotteiden vaatimat lämpötila- ja kosteusolosuhteet. Lähes 70 %:n tuloilman suhteellinen kosteus ei välttämättä sovellu kaikkien kylmätilojen tarpeisiin, sillä tilan lämpötilan ollessa tuloilman lämpötilaa alhaisempi, voi tilan suhteellinen kosteus nousta turhan suureksi.

Tehdään samat laskelmat ulkoilman olosuhteilla $+26 \text{ }^\circ\text{C}$ RH 50 %. Entalpiaksi saadaan Mollier-diagrammista noin $52,1 \text{ kJ/kg}$. Samoilla kaavoilla laskettuna tarvittavaksi jäähdytystehoksi saadaan noin 22 kW ja lämmitysteho säilyy samana. Yhteensä lämmitys- ja jäähdytystehoa tarvitaan siis noin 25 kW . Jäähdytyksestä aiheutunut kondensoituva vesivirta kyseisillä arvoilla on noin $283 \text{ dm}^3/\text{vrk}$. Kuvassa 13 on sama jäähdytys- ja lämmitysprosessi kyseisillä arvoilla.



Kuva 13. Jäähdytys- ja lämmitysprosessi ulkoilman ollessa +26 °C RH 50 %

6.2 Kiertoilma

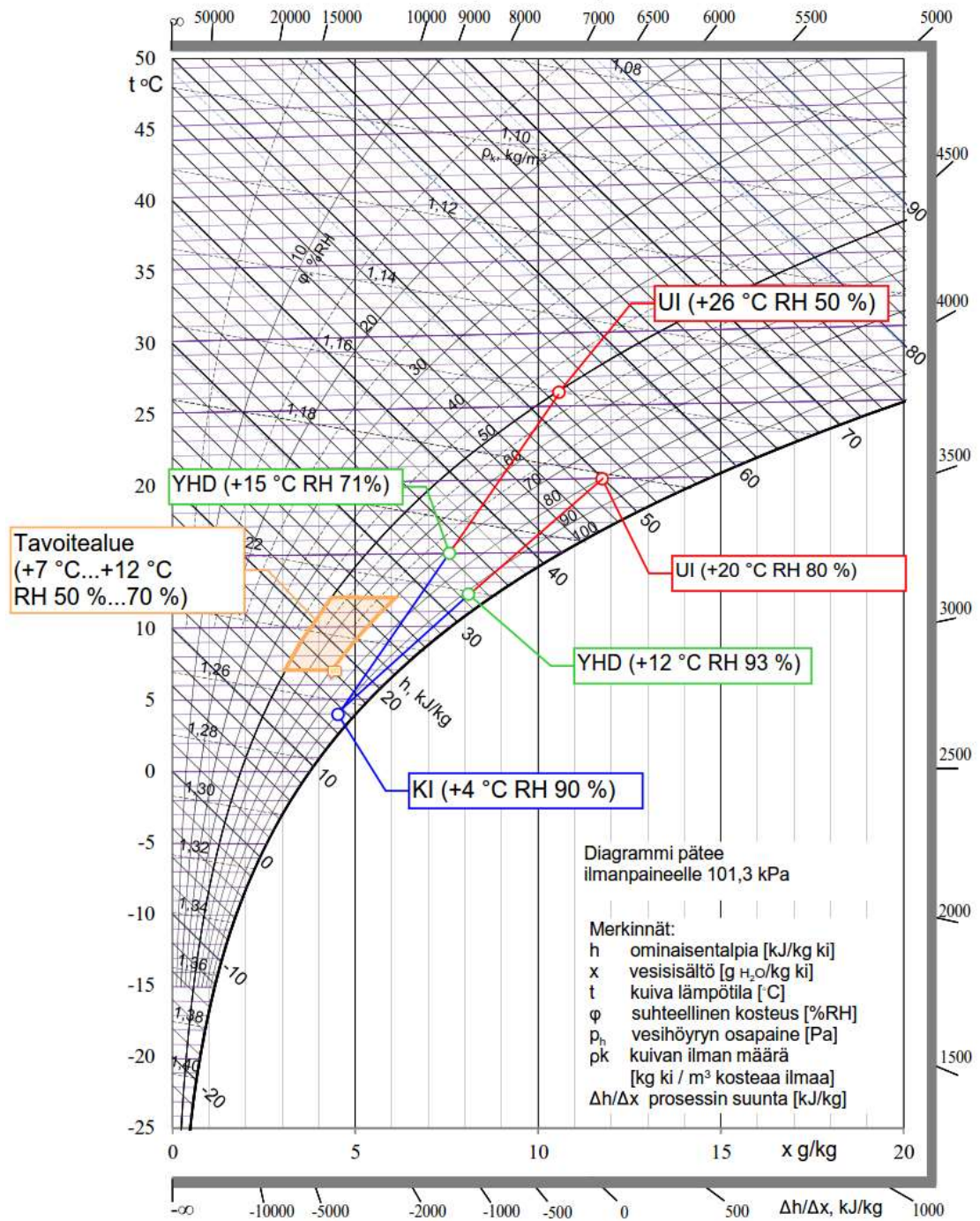
Tässä kappaleessa tarkastellaan ilman jäähdytysmahdollisuutta +4 °C RH 90 % kiertoilmalla. Kiertoilmaa käytettäessä on otettava huomioon, että kiertoilman on oltava puhdasta ilmaa.

Tarkastelussa käytetty tarkka sekoituspiste saadaan Mollier Sketcher -ohjelmalla ja tarkastelu on yksinkertaisinta tehdä kokonaan Mollier-diagrammissa. Tarkastelussa käytetään sekoitussuhteena 50 % kiertoilmaa ja 50 % ulkoilmaa. Ilmavirtojen sekoituspisteet on määritetty Mollier Sketcher -ohjelmalla ja esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Ilmavirtojen sekoituspisteet.

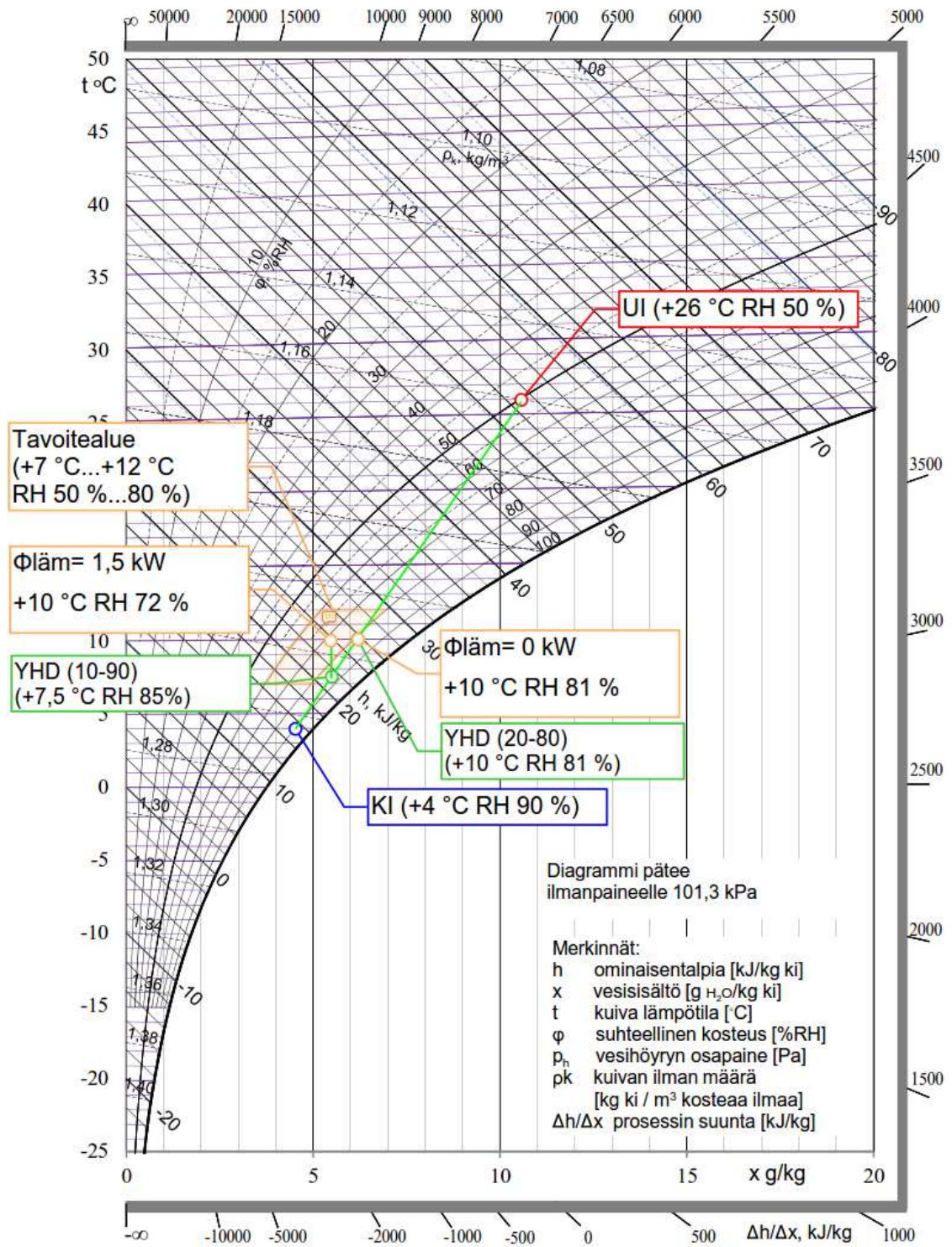
$t_{\text{ulko}} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$t_{\text{kierto}} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$t_{\text{yh}} \text{ (}^\circ\text{C)}$	RH_{ulko}	RH_{kierto}	RH_{yh}	Kl:n osuus
26	4	15	50	90	71	50 %
20	4	12	80	90	93	50 %

Kuva 14 havainnollistaa ilmajvirtojen sekoitusta Mollier-diagrammissa.



Kuva 14. Ulkoilmavirtojen sekoitus kiertoilmaan.

Kuten kuvasta huomataan, ei pelkällä kiertoilmalla ulkoilmaa jäähdytettäessä yllätytä tavoitealueelle. Kanavistossa jäähtyessä ilman absoluuttinen kosteus ei muutu, sen suhteellinen kosteus kasvaa ja kanavistossa jäähtyessäänkään il-mavirrat eivät yllä kosteusolosuhteidensa puolesta tavoitealueelle. Kiertoilman suhdetta voidaan tarkastella myös janan muilla pisteillä, mutta suunnittelussa on huomioitava epäpuhtauspitoisuuksien kumuloituminen, jos kiertoilman osuus on liian suuri. Kuvassa 15. on esitetty kiertoilman käyttöä eri sekoituspisteissä.



Kuva 15. Kiertoilman hyödyntäminen 90–10 ja 80–20 sekoitussuhteilla.

Kiertoilmaa suuremmalla sekoitussuhteella hyödyntäen päästäisiin siis tavoiteolosuhteisiin, mutta haasteeksi muodostuu ilman epäpuhtaudet, joita suurilla kiertoilman suhteilla kierrätettäisiin kanavistossa käytännössä ympyrää.

6.3 Eristys

6.3.1 Kondenssieristys

Kosteus- eli kondenssieristeen tarkoitus on estää sisäilman kosteuden kondensoituminen kanavarakenteisiin. Kanavarakenteisiin tiivistyessään kosteus saattaa aiheuttaa kanaviston vaurioitumista. Kondenssieristeen on oltava kanavassa kiinni niin tiiviisti, ettei kanavan ja eristeen väliin pääse kertymään vettä eikä kanavan kannake saa lävistää kondenssieristetyn kanavan eristettä. Kondenssieristykseen soveltuu esimerkiksi solukumieriste, kondenssitiivis umpisolueriste sekä kondenssitiivis kivivillaeriste. (Sisäilmasto ja ilmanvaihto-opas.)

6.3.2 Lämmöneristys

Lämmöneristyksen tehtävä on estää tai hallita kanavassa virtaavan ilman lämpeneminen tai jäähtyminen, ja samalla estää kondensoitumista sekä huurtumista kanavan pinnoille. Asianmukainen lämmöneristys myös tarkoittaa, ettei laitteiden jäähdytys- ja lämmitystehoa tarvitse kasvattaa, joka mahdollistaa huomattavia säästöjä energiankulutuksessa vuositasolla. (Sandberg ym. 2014. s. 218). Tavallisesti lämpöeristeenä käytetään esimerkiksi lasi- tai kivivillaa, solukumieristettä tai polyuretaanieristettä ja sen paksuus on noin 30–50 mm riippuen asennuspaikasta ulkoilmakanavissa eristyspaksuus on yleensä 100 mm. Esimerkiksi kivivillan diffuusiovastus on pieni eli se päästää lävitseen vesihöyryä, kivivilla voidaan kuitenkin päällystää esimerkiksi alumiinilaminaatilla, jolloin se toimii myös kondenssieristeenä, jos päädyt sekä liitokset teipataan huolellisesti. (Sisäilmasto ja ilmanvaihto -opas.)

Lämmöneristyksen vaikutus korostuu erityisesti kylmätilojen ilmanvaihdossa, sillä kylmätilojen tuloilma on huomattavasti ympäristöä lämpimämpää. Suurempi lämpötilaero tuloilman ja kanavia ympäröivän ilman välillä vaatii huomattavasti paksumpaa eristettä kanavistoon etenkin pitkissä kanavistoissa, jotta tuloilma

saavuttaa päätelaitteen kondensoimatta ja halutussa lämpötilassa. Liitteessä 2. on Parocin eristelaskuria apuna käyttäen laskettu yksinkertaisen kanaviston eristämisen vaikutusta kylmätilojen tuloilmaan. Kuvassa 16. on kyseisen laskelman lopputulos.

Laskenta 1 : Kanavat

Sisältö	
Tyyppi	Ilma
Lämpötila	7.0 °C
Energia	
Energialähde	Sähköenergia
Vuotuinen käyttöaika	8760 h
Energian hinta	5 c/kWh

Tulokset koko kanavistolle

Lämpöhäviö	-646.2 W
Lämpöhäviö eristämättömänä	-4410.4 W
Sisällön loppulämpötila	7.5 °C
Vuotuiset säästöt	32974.2 kWh, 1648.7 €/vuosi
CO2-päästöjen väheneminen verrattuna eristämättömään	0.0 t/vuosi

Kuva 16. Eristeen vaikutus yksinkertaisessa kanavistossa.

Laskennassa käytettiin lähtötietoina ympäristön lämpötilaa 21 °C ja RH 55 %, ja sisäänpuhallusilmaa jäähdytettiin 7 °C lämpöiseksi. Eristeenä käytettiin koko kanavistossa 50 mm:n paksuista PAROC Hvac Lamella Mat Alucoat -eristettä, joka on alumiinilaminaatilla päällystetty kivilamellimatto, päällysteensä ansiosta se toimii myös kondenssieristeenä. Laskelmassa käytettiin kanaviston pituutena 100 m:ä ja ulkohalkaisijana 200-125 mm: ä.

Kuvasta 16. Huomataan, että kyseisillä parametreilla energiaa säästetään noin 33000 kWh vuodessa, joka tarkoittaa lähes 1650 euron säästöä vuodessa energian hinnan ollessa 5 c/kWh.

7 Yhteenveto

Kylmätilojen ilmanvaihtosuunnittelu on haastavaa, sillä sisäilmaston olosuhteita ohjaaavat lähinnä ainoastaan tilaajan antamat lähtötiedot ja asettamat vaatimukset. Kylmätilojen ilmanvaihtoa ei ole suomenkielisessä kirjallisuudessa jäähalleja lukuunottamatta juurikaan käsitelty, minkä vuoksi insinööriyössä pyrittiin

soveltamaan eri lähteiden tietoja ja hyödyntämään niistä kylmätiloihin soveltuvia asioita.

Työn pääasiallisena tavoitteena oli tutkia eri vaihtoehtoja kylmätilojen ilmanvaihdon kosteudenhallintaan. On selvää, että kosteudenhallinnan kannalta järkevintä on rakentaa ilmanvaihtokone niin, että jäähdytyksen jälkeen ilmaa voidaan jälkilämmittää. Myös ilmanjako ja eristäminen on toteutettava asianmukaisesti, jotta ilmanvaihtojärjestelmästä saadaan toimiva kokonaisuus. Kiertoilman osuutta olisi luotettavampien tuloksien saamiseksi tutkittava laajemmin. Työssä jää epäselväksi esimerkiksi käytettävän ilman epäpuhtauspitoisuus ja hiilidioksidipitoisuus, jotka rasittavat ilmaa.

Työn toissijaista tavoitetta muovasi koko insinöörityöprosessin aikana kohdattu ongelma, kirjallisuuden puute. Niin sanottua hiljaista tietoa on suunnittelutoimistoissa mielin määrin, mutta kattavimmatkin kirjat mainitsivat kylmätilojen ilmanvaihdon lähinnä sivulauseessa. Työtä voidaan siis osittain käyttää perustana esimerkiksi yleisen kylmätilojen ilmanvaihdon suunnitteluohjeen laadinnassa.

Lähteet

Holopainen, Rauno. 2006. Jäähdytyspatterin vedenpoisto. Ilmanvaihdon modernit parannus- ja korjausratkaisut (MIV). Espoo. Tekes.

Huoneilman kosteus. Verkkoaineisto. Hengityслиitto. <<https://www.hengityслиitto.fi/kodin-sisailma-ja-kunnossapito/sisailman-laatu/sisailman-olosuhteet/huoneilman-kosteus/>>. Luettu: 1.2.2024.

Hygieniä sisätiloissa. Tilasuunnittelu. 2020. RT 103192. Rakennustieto.

Ilman kosteus. 2020. Verkkoaineisto. Ilmatieteen laitos. <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilman-kosteus>>. Luettu 15.2.2024

Reijula, Kari; Ahonen, Guy; Alenius, Harri; Holopainen, Rauno; Lappalainen, Sanna; Palomäki, Eero & Reiman, Marjut. 2012. Verkkoaineisto. Eduskunta. Eduskunnan tarkastusvaliokunnan julkaisu 1/2012. <https://www.eduskunta.fi/FI/naineduskuntatoimii/julkaisut/Documents/trvj_1+2012.pdf> Luettu 1.2.2024.

Romero, Rachel & Werman, Lynn. 2016. Air handling and distribution. Teoksessa Owen S, Mark (toim.). ASHRAE Handbook-HVAC Systems and Equipment. Atlanta. Comstock W, Stephen

Sandberg, Esa; Silvan, Jari; Kauppila, Kari & Kaappola, Esko. 2014. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät, ilmastointitekniikka osa 1. Helsinki. Talotekniikka-Julkaisut.

Seppänen, Olli & Seppänen, Matti. 2007. Rakennusten sisäilmasto ja LVI-tekniikka. Espoo: SIY Sisäilmätieto.

Sisäilmasto ja ilmanvaihto-opas. Verkkoaineisto. Talteka. <<https://talotekniikkainfo.fi/sisailmasto-ja-ilmanvaihto-opas/25-ilmanvaihtojarjestelman-eristaminen>>. Luettu 3.3.2024

Sisäilmastoluokitus 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. 2018. RT 07-11299. Rakennustieto.

Torppa, Sami. 2020. IV-koneen sekoitusosan toiminnan tutkiminen. Opinnäytetyö. Oulun ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Åström, Gunnar; Nousiainen, Aimo; Malmberg, Jonas; Valjus, Juha; Vinha, Juha; Reinikainen, Erja; Laine, Katariina & Mannonen, Petri. 2020. RIL 250-

2020 Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen. E-kirja. Suomen Rakennusinsinöörien liitto.

Eristelaskut PAROC Calculus 1

PAROC Calculus

Teknisten eristeiden laskentaohjelma

Laskenta 1 : Kanavat

Sisältö

Tyyppi	Ilma
Lämpötila	10.0 °C

Tulokset koko kanavistolle

Lämpöhäviö	266 W
Lämpöhäviö eristämättömänä	814 W
Sisällön loppulämpötila	9.6 °C

Pyöreä kanava : Osa 1

Kanavatyyppi	Pyöreä kanava
Materiaali	Teräs
Paksuus	0.70 mm
Virtausnopeus	500 l/s
Pituus	20 m
Ulkohalkaisija	400 mm

Ympäristö

Ympäristön lämpötila	21 °C
Ympäristön ilman nopeus	0 m/s
Suhteellinen kosteus	55 %

Eriste

PAROC Hvac Lamella Mat AluCoat	20 mm	17.1 °C
--------------------------------	-------	---------

Päällyste

Ei lisäpäällystettä	Emissiivisyys: 0.15
---------------------	---------------------

Tulokset

Lämpöhäviö	-16.7 W/m
Osan kokonaislämpöhäviö	-333.9 W
Lämpöhäviö eristämättömänä	-78.5 W/m
Pintalämpötila	17.1 °C
Pintalämpötila eristämättömänä	10.0 °C
Kastepiste	11.6 °C
Sisällön lämpötilamuutos	0.6 °C
Eristeen nimellispaino	0.9 kg/m

Pyöreä kanava : Osa 2

Kanavatyyppi	Pyöreä kanava
Materiaali	Teräs
Paksuus	0.70 mm
Virtausnopeus	500 l/s
Pituus	20 m
Ulkohalkaisija	400 mm

Ympäristö

Ympäristön lämpötila	4 °C
Ympäriävän ilman nopeus	0 m/s
Suhteellinen kosteus	65 %

Eriste

PAROC Hvac Lamella Mat AluCoat	20 mm	6.9 °C
--------------------------------	-------	--------

Päällyste

Ei lisäpäällystettä	Emissiivisyys: 0.15
---------------------	---------------------

Tulokset

Lämpöhäviö	8.4 W/m
Osan kokonaislämpöhäviö	168 W
Lämpöhäviö eristämättömänä	33.0 W/m
Pintalämpötila	6.9 °C
Pintalämpötila eristämättömänä	10.6 °C
Kastepiste	-2.0 °C
Sisällön lämpötilamuutos	-0.3 °C
Eristeen nimellispaino	0.9 kg/m

Pyöreä kanava : Osa 3

Kanavatyyppi	Pyöreä kanava
Materiaali	Teräs
Paksuus	0.70 mm
Virtausnopeus	500 l/s
Pituus	50 m
Ulkohalkaisija	400 mm

Ympäristö

Ympäristön lämpötila	4 °C
Ympäriävän ilman nopeus	0 m/s
Suhteellinen kosteus	65 %

Eriste

PAROC Hvac Lamella Mat AluCoat	20 mm	6.4 °C
--------------------------------	-------	--------

Päällyste

Ei lisäpäällystettä	Emissiivisyys: 0.15
---------------------	---------------------

Tulokset

Lämpöhäviö	8.6 W/m
Osan kokonaislämpöhäviö	432 W
Lämpöhäviö eristämättömänä	34.5 W/m
Pintalämpötila	6.4 °C
Pintalämpötila eristämättömänä	10.3 °C
Kastepiste	-2.0 °C
Sisällön lämpötilamuutos	-0.7 °C
Eristeen nimellispaino	0.9 kg/m

Eristelaskut Paroc calculus

PAROC Calculus

Teknisten eristeiden laskentaohjelma

Laskenta 1 : Kanavat**Sisältö**

Tyyppi	Ilma
Lämpötila	7.0 °C

Energia

Energialähde	Sähköenergia
Vuotuinen käyttöaika	8760 h
Energian hinta	5 c/kWh

2

Tulokset koko kanavistolle

Lämpöhäviö	-646.2 W
Lämpöhäviö eristämättömänä	-4410.4 W
Sisällön loppulämpötila	7.5 °C
Vuotuiset säästöt	32974.2 kWh, 1648.7 €/vuosi
CO2-päästöjen väheneminen verrattuna eristämättömään	0.0 t/vuosi

Pyöreä kanava : Osa 1

Kanavatyyppi	Pyöreä kanava
Materiaali	Austeniittista terästä
Paksuus	1 mm
Virtausnopeus	50 m/s
Pituus	20 m
Ulkohalkaisija	200 mm

Ympäristö

Ympäristön lämpötila	21 °C
Ympäriävän ilman nopeus	0.5 m/s
Suhteellinen kosteus	55 %

Eriste

PAROC Hvac Lamella Mat AluCoat	50 mm	19.7 °C
--------------------------------	-------	---------

Päällyste

Ei lisäpäällystettä	Emissiivisyys: 0.15
---------------------	---------------------

Tulokset

Lämpöhäviö	-8.3 W/m
Osan kokonaislämpöhäviö	-165.3 W
Lämpöhäviö eristämättömänä	-63.9 W/m
Pintalämpötila	19.7 °C
Pintalämpötila eristämättömänä	7.0 °C
Kastepiste	11.6 °C
Sisällön lämpötilamuutos	0.1 °C
Eristeen nimellispaino	1.4 kg/m
Vuotuiset säästöt	9740.6 kWh, 487.0 €/vuosi
CO2-päästöjen väheneminen verrattuna eristämättömään	1.9 t/vuosi

Pyöreä kanava : Osa 2

Kanavatyyppi	Pyöreä kanava
Materiaali	Teräs
Paksuus	1 mm
Virtausnopeus	50 m/s
Pituus	20 m
Ulkohalkaisija	200 mm

Ympäristö

Ympäristön lämpötila	21 °C
Ympäriävän ilman nopeus	0 m/s
Suhteellinen kosteus	55 %

Eriste

PAROC Hvac Lamella Mat AluCoat	50 mm	17.8 °C
--------------------------------	-------	---------

Päällyste

Ei lisäpäällystettä	Emissiivisyys: 0.15
---------------------	---------------------

Tulokset

Lämpöhäviö	-7.0 W/m
Osan kokonaislämpöhäviö	-139.8 W
Lämpöhäviö eristämättömänä	-40.3 W/m
Pintalämpötila	17.8 °C
Pintalämpötila eristämättömänä	7.1 °C
Kastepiste	11.6 °C
Sisällön lämpötilamuutos	0.1 °C
Eristeen nimellispaino	1.4 kg/m
Vuotuiset säästöt	5836.4 kWh, 291.8 €/vuosi
CO ₂ -päästöjen väheneminen verrattuna eristämättömään	1.1 t/vuosi

4/7

Pyöreä kanava : Osa 3

Kanavatyyppi	Pyöreä kanava
Materiaali	Teräs
Paksuus	1 mm
Virtausnopeus	50 m/s
Pituus	20 m
Ulkohalkaisija	160 mm

Ympäristö

Ympäristön lämpötila	21 °C
Ympäriävän ilman nopeus	0 m/s
Suhteellinen kosteus	55 %

Eriste

PAROC Hvac Lamella Mat AluCoat	50 mm	18.5 °C
--------------------------------	-------	---------

Päällyste

Ei lisäpäällystettä	Emissiivisyys: 0.15
---------------------	---------------------

Tulokset

Lämpöhäviö	-6.2 W/m
Osan kokonaislämpöhäviö	-123.5 W
Lämpöhäviö eristämättömänä	-47.6 W/m
Pintalämpötila	18.5 °C
Pintalämpötila eristämättömänä	7.2 °C
Kastepiste	11.6 °C
Sisällön lämpötilamuutos	0.1 °C
Eristeen nimellispaino	1.2 kg/m
Vuotuiset säästöt	7258.6 kWh, 362.9 €/vuosi
CO ₂ -päästöjen väheneminen verrattuna eristämättömään	1.4 t/vuosi

Pyöreä kanava : Osa 4

Kanavatyyppi	Pyöreä kanava
Materiaali	Teräs
Paksuus	1 mm
Virtausnopeus	50 m/s
Pituus	20 m
Ulkohalkaisija	160 mm

Ympäristö

Ympäristön lämpötila	21 °C
Ympäriävän ilman nopeus	0 m/s
Suhteellinen kosteus	55 %

Eriste

PAROC Hvac Lamella Mat AluCoat	50 mm	18.0 °C
--------------------------------	-------	---------

Päällyste

Ei lisäpäällystettä	Emissiivisyys: 0.15
---------------------	---------------------

Tulokset

Lämpöhäviö	-5.8 W/m
Osan kokonaislämpöhäviö	-116.3 W
Lämpöhäviö eristämättömänä	-31.9 W/m
Pintalämpötila	18.0 °C
Pintalämpötila eristämättömänä	7.3 °C
Kastepiste	11.6 °C
Sisällön lämpötilamuutos	0.1 °C
Eristeen nimellispaino	1.2 kg/m
Vuotuiset säästöt	4571.3 kWh, 228.6 €/vuosi
CO2-päästöjen väheneminen verrattuna eristämättömään	0.9 t/vuosi

Pyöreä kanava : Osa 5

Kanavatyyppi	Pyöreä kanava
Materiaali	Teräs
Paksuus	1 mm
Virtausnopeus	50 m/s
Pituus	20 m
Ulkohalkaisija	125 mm

Ympäristö

Ympäristön lämpötila	21 °C
Ympäriävän ilman nopeus	0 m/s
Suhteellinen kosteus	55 %

Eriste

PAROC Hvac Lamella Mat AluCoat	50 mm	18.7 °C
--------------------------------	-------	---------

Päällyste

Ei lisäpäällystettä	Emissiivisyys: 0.15
---------------------	---------------------

Tulokset

Lämpöhäviö	-5.1 W/m
Osan kokonaislämpöhäviö	-101.3 W
Lämpöhäviö eristämättömänä	-36.8 W/m
Pintalämpötila	18.7 °C
Pintalämpötila eristämättömänä	7.4 °C
Kastepiste	11.6 °C
Sisällön lämpötilamuutos	0.1 °C
Eristeen nimellispaino	1.0 kg/m
Vuotuiset säästöt	5567.3 kWh, 278.4 €/vuosi
CO2-päästöjen väheneminen verrattuna eristämättömään	1.1 t/vuosi