



Elias Koivula

Sisäilman ja kylmäkalusteiden vuorovaikutus elintarvikemyymälässä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö 30.1.2025

Tiivistelmä

Tekijä:	Elias Koivula
Otsikko:	Sisäilman ja kylmäkalusteiden vuorovaikutus elintarvikemyymälässä
Sivumäärä:	42 sivua + 1 liite
Aika:	30.1.2025
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Talotekniikka
Ammatillinen pääaine:	LVI-suunnittelu
Ohjaajat:	Toimitusjohtaja Timo Reikko, Kylmävisio Oy Yliopettaja Aki Valkeapää

Insinööriyössä tutkittiin kylmäkalusteiden ja sisäilman molemminpuolista vuorovaikutusta elintarvikemyymälässä. Tavoitteena oli selvittää, kuinka yhtäältä avoimet ja toisaalta suljetut kylmäkalusteet jäähdyttävät ja kuivaavat ilmaa. Lisäksi tarkasteltiin, kuinka korkea myymälän sisäilman kastepiste voi olla ilman, että kylmäkalusteiden lasiovet huurtuvat.

Kylmäkalusteiden ilmaa jäähdyttävää vaikutusta tarkasteltiin laskennallisesti ja kirjallisuuden avulla. Avoimien kalusteiden vaikutuksen arviointi perustui kirjallisuudessa annettuihin arvoihin. Suljettujen kalusteiden johtumislämpöhäviö laskettiin tyypillisillä rakenteilla ja lämpötiloilla, ja vuotoilman jäähdystehoa arvioitiin kirjallisuudesta saatujen komponenttien perusteella. Myymälän kastepisteen raja-arvo määritettiin laskeamalla erilaisten kylmä- ja pakastekalusteiden lasipintojen lämpötila. Laskelmia tuettiin pintalämpötilamittauksilla K-Supermarket Postitalossa.

Työssä todettiin, että lasiovilla ja -kansilla varustetut kylmä- ja pakastekalusteet eivät merkittävästi jäähdytä ympäröivää sisäilmaa, eikä niiden jäähdystehoa tarvitse huomioida lämmitystehossa. Avoimet kalusteet sen sijaan jäähdyttävät ilmaa merkittävästi, ja niiden vaikutus on otettava huomioon lämmitysjärjestelmän suunnittelussa. Laskelmien ja mittausten perusteella tyypillisen elintarvikemyymälän kastepisteen raja-arvoa voitaisiin nostaa 11 °C:sta 15–16 °C:seen. Lisäksi todettiin, että sisäilman lämpötilaa voitaisiin nostaa 23–24 °C:seen kesällä, mikä vähentäisi kylmäkalusteiden lasiovien huurtumisriskiä.

Tulosten perusteella kylmäsuunnittelijan antamat lähtötiedot LVI- ja energiasuunniteluun tarkentuvat, ja epärelevantit tiedot voidaan poistaa. Työn perusteella kaupan alan toimijat voivat tarkastella sisäilman kastepisteen asetusarvoa ja pohtia erilaisia ilmastointiratkaisuja, joilla optimoidaan LVI- ja kylmäjärjestelmien toiminta.

Avainsanat: kylmäkaluste, elintarvikemyymälä, lasiovien huurtuminen, ilman kuivaus, sisäilmaston hallinta, kastepiste

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Elias Koivula
Title: Interaction between Indoor Air and Refrigerated Display Cases in Grocery Store
Number of Pages: 42 pages + 1 appendix
Date: 30 January 2025

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Building Services Engineering
Professional Major: HVAC Design
Supervisors: Timo Reikko, Managing Director, Kylmävisio Oy
Aki Valkeapää, Principal Lecturer

The thesis aimed at studying the interaction between refrigerated display cabinets and indoor air in a grocery store, focusing on cooling, dehumidification, glass door fogging, and indoor air dew point.

The cooling effect of open display cabinets was analysed through literature, while closed cabinets were evaluated using both literature and calculations that included conduction and infiltration loads to determine the maximum indoor air dew point using heat transfer equations and typical display cabinet properties. Surface temperature measurements conducted in a typical Finnish grocery store supported the calculations.

The study concluded that closed refrigerated and freezer cabinets do not significantly cool their surroundings. Thus, their cooling effect can be excluded from total heat load calculations. Open display cabinets, however, significantly affect indoor temperature and should be considered when designing a grocery store's heating system.

According to the results, the indoor air dew point setpoint could be increased from 11 °C to 15–16 °C. Furthermore, raising the indoor air temperature to 23–24 °C during summer would further reduce the risk of condensation.

The findings revise the design data, making it more accurate and reducing unnecessary details. They support grocery store operators in evaluating dew point setpoints and optimizing ventilation strategies for improved HVAC and refrigeration system performance.

Keywords: refrigerated display case, grocery store, glass door condensation, air dehumidification, indoor climate control, dew point

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Myymälän sisäilmasto	2
2.1	Ilman kosteus	2
2.2	Myymälän ilmanvaihto ja ilmastointi	7
3	Myymälän kylmäteknikka	10
3.1	Kauppan kylmälaitos	10
3.2	Jäähdytetyt myymäläkalusteet	13
3.2.1	Kylmäkalusteiden jäähdytystehontarve	14
3.2.2	Kylmäkalustetyypit	15
3.2.3	Kylmäkalusteiden vaikutus ympäröivään ilmaan	17
4	Kylmäkalusteiden kondenssi ja huurtumisenesto	19
4.1	Lasioven ulkopinnan lämpötilan määrittäminen	19
4.2	Ilmastoinnin kuivauskapasiteetin optimointi	22
4.3	Kalusteiden huurteenestomenetelmät	24
5	K-Supermarket Postitalon kylmäkalusteet ja sisäilmaston hallinta	26
5.1	Kohteen esittely ja tutkimusongelma	26
5.2	Kalusteiden ovien ja kansien lämpötilan mittaus	27
5.3	Sisäilmaston hallinta	32
5.4	Ratkaisut ja kehitysehdotukset	34
6	Yhteenveto	37
	Lähteet	40

Liite 1: K-Supermarket Postitalon mittaussuunnitelma

Lyhenteet

AFF: *Anti-Fog Film*. Kylmä- ja pakastekalusteiden lasioveen asennettava huurteenestokalvo.

ASH: *Anti-Sweat Heater*. Kylmä- ja pakastekalusteiden kondenssin ja jäätymisen estävä lämmitin.

LT: *Low Temperature*. Jäähdytyskohteet, joiden lämpötila on alle 0 °C, kuten pakasteet.

M-Package:

Measurement Package. Kylmä- ja pakastekalusteiden testauksessa käytettävä elintarvikkeita simuloiva pakkaus, joka jäljittelee tuotteiden lämpöominaisuuksia ja käyttäytymistä säilytysolosuhteissa.

MT: *Medium Temperature*. Jäähdytyskohteet, joiden lämpötila on 0 °C tai korkeampi, kuten kylmäsäilytys.

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä tutkitaan kylmäkalusteiden ja sisäilman vuorovaikutusta elintarvikemyymälässä. Tavoitteena on selvittää, kuinka yhtäältä avoimet ja toisaalta suljetut kylmäkalusteet vaikuttavat ympäröivän ilman lämpötilaan ja kosteuteen. Lisäksi tarkastellaan tuloilman kuivaustarvetta määrittämällä sisäilman kastepisteen raja-arvo vuoden kosteimpana aikana. Raja-arvo valitaan siten, että kastepiste on matalampi kuin laskennallinen kylmäkalusteen lasiovien tai -kannen ulkopinnan lämpötila.

Työ tehdään Ramboll Finland Oy:n kylmäsuunnitteluosaston toimeksiannosta. Ramboll on kansainvälinen suunnittelu- ja konsultointiyritys, joka tarjoaa asiantuntijapalveluja eri toimialoilla, kuten kiinteistö-, energia- ja infrasektoreilla. Tavoitteena on tukea kylmäsuunnittelijoita, jotta he voivat antaa tarkempia lähtötietoja LVI- ja energiasuunnitteluun kylmäkalusteiden ja sisäilmastoinnin yhteensovittamiseksi. Näin kylmäkalusteiden vaikutus otettaisiin realistisesti huomioon ilmaston ja lämmityksen suunnittelussa, mikä parantaisi myymälöiden energiatehokkuutta.

Aihe valittiin, koska suljettujen kylmäkalusteiden ja sisäilman vuorovaikutusta on aiemmin tutkittu melko vähän, eikä kylmäkalusteiden vaikutusta aina huomioida oikein LVI- ja kylmätekniikan integraatiossa. Lasiovilla varustettujen kalusteiden yleistyessä on tärkeää tutkia, miten sisäilman olosuhteet voidaan optimoida, jotta lasiovien huurtuminen voidaan estää energiatehokkaasti. Työn tavoitteena on tuoda uutta tietoa kylmäkalusteiden lasiovien pintalämpötilan ja sisäilman kastepisteen yhteydestä sekä esitellä ratkaisuja, joilla voidaan vähentää huurtumista ilman tarpeetonta sisäilman kuivausta.

2 Myymälän sisäilmasto

Elintarvikemyymälä poikkeaa muista rakennuksista etenkin suuren kylmäsäilytysalueen takia. Kylmäkalusteiden oikean toiminnan varmistamiseksi sisäilman kosteuteen ja lämpötilaan pitää kiinnittää huomiota.

2.1 Ilman kosteus

Ilma sisältää lähes aina myös vesihöyryä, joka kasvattaa ilman lämpösisältöä eli entalpiaa. Ilman sisältämän vesihöyryn energiaa kutsutaan sidotuksi eli latentiksi lämmöksi. Veden höyrystyminen vaatii lämpöä noin 2 500 kJ/kg, joten latentti lämpö on merkittävä osa kostean ilman entalpiaa. Latentin lämmön huomiointi on tärkeää ilmastoinnin jäähdytyspatterin ja kylmäkalusteiden jäähdytystehon määrittämisessä. Kostean ilman suureet voidaan laskea tarkasti, mutta usein tarkkuudeksi riittää kostean ilman hx- eli Mollier-diagrammista luetut arvot.

(Sandberg 2014b: 81.)

Absoluuttinen kosteus

Absoluuttinen kosteus kuvaa vesihöyryn massan suhdetta kuivan ilman tilavuuteen tai massaan. Yleensä käytettävät yksiköt ovat kg/kg_{k.i.}, g/kg_{k.i.} tai g/m³. Lyhenne k.i. viittaa kuivaan ilmaan, ja sitä käytetään erottamaan vesihöyryn ja kuivan ilman massa. (Lämpötila ja kosteus.)

Ilma voi sitoa rajatun määrän vesihöyryä. Vesihöyryn pitoisuuden ylärajaa kutsutaan kylläiseksi pitoisuudeksi tai kyllästyskosteudeksi. Usein käytetään vesihöyryn kyllästyspainetta, joka kuvaa vesihöyryn suurinta mahdollista osapainetta ilman kokonaispaineesta. Absoluuttista kosteutta voidaan käyttää määrittämään esimerkiksi tiivistyvän veden määrä jäähdytysprosessissa, ja se laskeaan kaavalla 1. (Lämpötila ja kosteus; Sandberg 2014a: 126.)

$$x = \frac{M_h p_h}{M_i p_i} = 0,622 \frac{p_h}{p - p_h} \quad (1)$$

x on absoluuttinen kosteus (kg/kg_{k.i.})

M_h on vesihöyryn moolimassa (kg/kmol)

M_i on kuivan ilman moolimassa (kg/kmol)

p_h on vesihöyryn osapaine (Pa)

p_i on kuivan ilman osapaine (Pa)

p on ilman kokonaispaine (Pa).

Suhteellinen kosteus

Suhteellinen kosteus tarkoittaa vesihöyryn osapaineen ja kyllästyspaineen suhdetta. Kyllästyspaine kasvaa lämpötilan noustessa, joten lämmin ilma pystyy sitomaan enemmän kosteutta kuin kylmä ilma. Tämä johtaa siihen, että absoluuttisen kosteuden pysyessä vakiona on kylmän ilman suhteellinen kosteus korkeampi kuin lämpimän ilman. (Lämpötila ja kosteus.)

Talvella ulkoilman absoluuttinen kosteus on matala, mutta suhteellinen kosteus on korkea, koska kylmä ilma sitoo vain vähän vesihöyryä ja vesihöyryn osapaine on lähellä kyllästyspainetta. Kun pakkasilma lämmitetään esimerkiksi ilmastointikoneessa huoneilman lämpötilaan, absoluuttinen kosteus pysyy samana mutta suhteellinen kosteus laskee kyllästyspaineen kasvaessa. Tämän vuoksi sisäilman suhteellinen kosteus on talvella matala, vaikka absoluuttinen kosteus sisätiloissa on ulkoilmaa korkeampi sisäisten kosteuskuormien vuoksi. Suhteellinen kosteus lasketaan kaavalla 2 (Sandberg 2014a: 125).

$$\varphi = \frac{p_h}{p_{hs}} 100 \% \quad (2)$$

φ on suhteellinen kosteus (%)

p_{hs} on vesihöyryn kyllästymispaine (Pa).

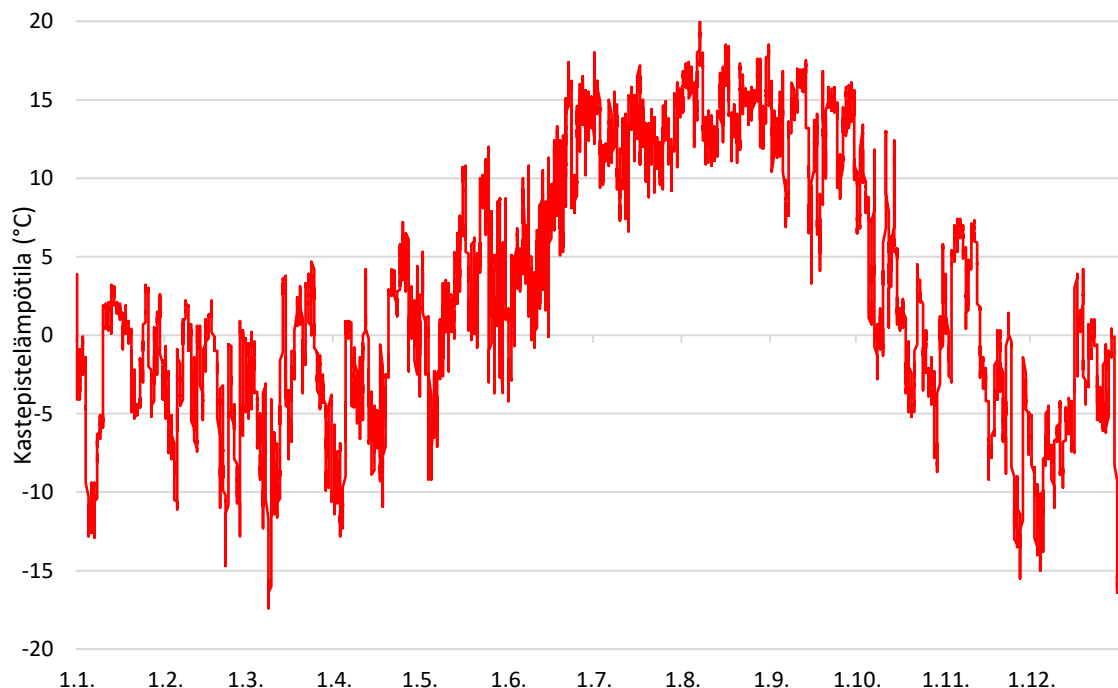
Vesihöyryn kyllästymispaine normaali-ilmanpaineessa on vain absoluuttisen lämpötilan funktio, ja se voidaan laskea esimerkiksi kaavalla 3 (Sandberg 2014a: 125).

$$p_{hs} = 100\,000 e^{11,78(T-372,79)/(T-43,15)} \quad (3)$$

T on lämpötila (K).

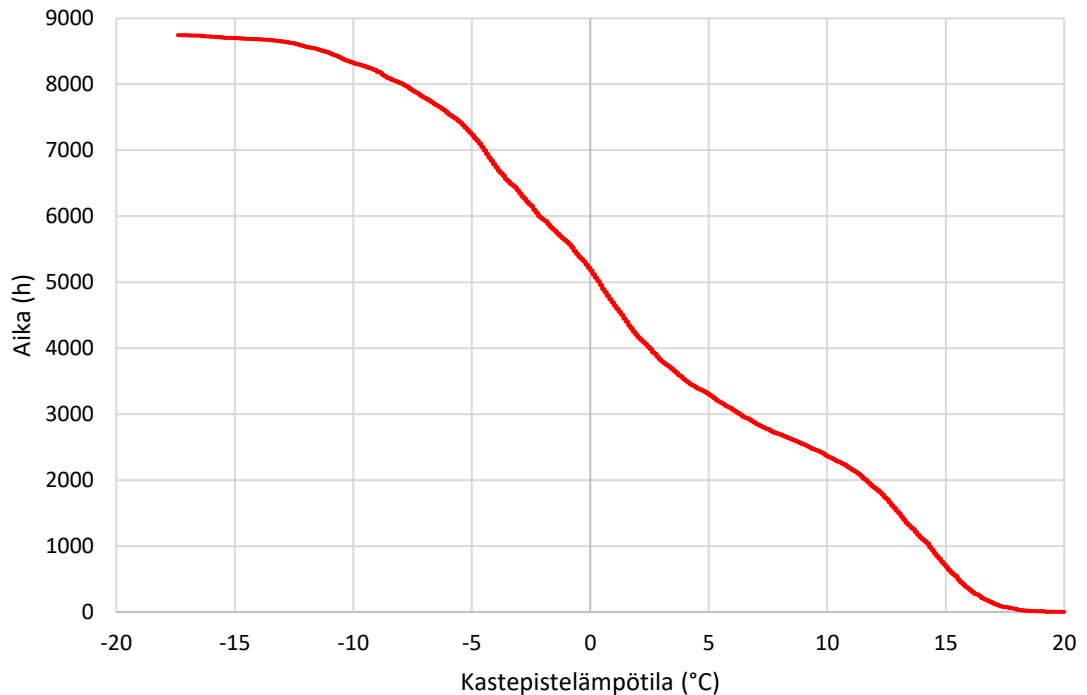
Kastepistelämpötila

Kastepistelämpötila tarkoittaa lämpötilaa, jossa ilman suhteellinen kosteus on kyseisellä absoluuttisella kosteudella 100 %. Jos lämpötila laskee kastepistelämpötilaan tai sen alle, alkaa vesihöyry tiivistyä vedeksi. Kastepiste on tärkeä tekijä kylmäkalusteiden lasiovien huurtumisen hallinnassa: huurretta alkaa muodostua, kun sisäilman kastepiste ylittää lasipinnan lämpötilan. Kastepistelämpötilan voi havaita helposti siirtymällä Mollier-diagrammissa ilman tilapisteestä suoraan alaspäin kyllästyskäyrälle ja lukemalla ilman kuivalämpötilan pystyakselilta. Kastepiste on hyvä indikaattori siitä, kuinka kostealta ilma tuntuu. Mitä korkeampi kastepiste on, sitä kosteammalta ilma yleensä tuntuu. Myymälän sisäilman kastepisteeseen vaikuttaa voimakkaimmin ulkoilman kastepiste, jonka vaihtelu eri vuodenaikoina on esitetty kuvassa 1. (Lämpötila ja kosteus.)



Kuva 1. Ulkoilman kastepiste Kaisaniemen havaintoasemalla vuonna 2023 (Säähavainnot Kaisaniemi 2024).

Kastepiste nousee loppukesällä ja alkusyksyllä, jolloin lämmin ilma pystyy pidättämään enemmän vesihöyryä. Kastepisteen pysyvyys on esitetty kuvassa 2. Pystyakselilta luetaan aika, jolloin kastepiste on ollut yhtä suuri tai suurempi kuin vaaka-akselin lämpötila.



Kuva 2. Ulkoilman kastepisteen pysyvyys Kaisaniemen havaintoasemalla vuonna 2023 (Säähavainnot Kaisaniemi 2024).

Ilman entalpia

Kostean ilman entalpia tarkoittaa kuivan ilman, vesihöyryn tuntuvan lämmön ja veden höyrystymislämmön yhteenlaskettua lämpösisältöä. Entalpia määritetään aina suhteessa ns. nollapisteseen, jossa lämpötila on yleensä 0 °C ja kosteus 0 g/kg_{k.i.}. Ilman entalpia ilmoitetaan yleensä kuivaa ilmakiloa kohden, ja se voidaan laskea kaavalla 4. Kaavan ensimmäinen termi on se lämpömäärä, jonka kuiva ilma sitoo tai luovuttaa, kun se lämmitetään tai jäähdytetään tiettyyn lämpötilaan. Toinen termi tarkoittaa sitä lämpömäärää, joka tarvitaan ilman sisältämän vesihöyryn lämmittämiseen tiettyyn lämpötilaan. Jos ilmaa jäähdytetään alle nollapisteen, ovat kaksi ensimmäistä termiä negatiivisia. Kolmas termi

tarkoittaa kostean ilman latenttia lämpöä eli sitä lämpömäärää, joka tarvitaan ilman sisältämän vesimäärän höyrystämiseen. (Aittomäki 2008: 27.)

$$h = c_i t + x c_h t + x l_h \quad (4)$$

h on ilman entalpia (kJ/kg_{k.i.})

c_i on ilman ominaislämpö vakiopaineessa (1,01 kJ(kgK))

t on ilman lämpötila (°C)

c_h on vesihöyryn ominaislämpö vakiopaineessa (1,85 kJ(kgK))

l_h on veden höyrystymislämpö (0 °C:ssa 2501 kJ/kg).

Myymälän kosteuskuormat

Sisäilman kosteuteen vaikuttavat ulkoilman kosteus, sisäiset kosteuslähteet ja ilmanvaihto. Kaava 5 kuvaa sisäilman vesihöyrypitoisuutta eli absoluuttista kosteutta jatkuvuustilassa. (Lehtoviita 2020: 21.)

$$v_s = v_u + \frac{G}{nV} \quad (5)$$

v_s on sisäilman vesihöyrypitoisuus (g/m³)

v_u on ulkoilman vesihöyrypitoisuus (g/m³)

G on sisäilman kosteudentuotto (g/h)

n on sisäilman ilmanvaihtoluku (1/h)

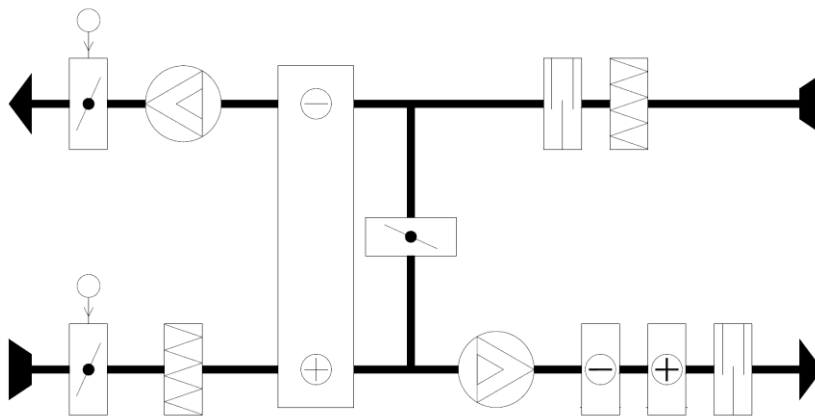
V on sisätilan tilavuus (m³).

Ulkoilman kosteus on myymälän merkittävin kosteuskuorma, ja sitä pääsee myymälään vuotoilman ja tuloilman mukana. Näistä merkittävämpi on tuloilma, koska myymälän ulkoilmavirta on usein suuri. Ulkoilma on suurimman osan vuodesta melko kuivaa Suomessa, mutta kesän loppupuolella ja alkusyksystä kosteus nousee, kuten kuvan 1 kastepisteestäkin voidaan todeta.

Myymälän sisäisiä kosteuslähteitä ovat ihmiset, tuoretuotteet ja satunnaiset prosessit, kuten siivous. Ihmisestä haihtuu ilmaan kosteutta aktiviteetin mukaan 40–300 g/h, keskimäärin noin 90 g/h (Lehtoviita 2020: 22).

2.2 Myymälän ilmanvaihto ja ilmastointi

Myymälän ilmastointikoneella (kuva 3) hallitaan sisäilman CO₂-pitoisuutta, lämpötilaa ja kosteutta. Myymälät lämmitetään ja jäähdytetään usein ilmalla, jolloin tuloilmavirran mitoittaa yleensä tarvittava lämmitys- tai jäähdytysteho. Ulkoilmaa tulisi johtaa myymälään vain tarpeen mukaan, jotta ilmaa ei turhaan käsitellä. Ulkoilmavirran mitoituksessa käytetään henkilö- tai pinta-alaperusteista mitoitusta. Yli 400 neliömetrin myymälän ilmanvaihto mitoitetetaan siten, että ulkoilmavirta on 6 dm³/(s hlö) tai 1 dm³/(s m²), mutta kuitenkin vähintään 0,5 dm³/(s m²). (Opas ilmanvaihdon mitoitukseen muissa kuin asuinrakennuksissa 2020: 15.)



Kuva 3. Myymälän ilmastointikone, jossa on sekoitusosa, jäähdytyspatteri ja jälkilämmityspatteri.

Ilman sekoitus

Ulkoilman osuutta tuloilmavirrasta säädetään sekoitusosan moottoripellillä. Osuutta säädetään usein huone- tai poistoilman CO₂-pitoisuuden mukaan. Lisäksi määritellään vähimmäisulkoilmavirta, joka myymälään johdetaan kaikissa tilanteissa, vaikka poistoilman CO₂-pitoisuus mahdollistaisi pienemmän ulkoilmavirran. Ulkoilmavirran tulee olla keskimäärin vähintään 0,15 dm³/s neliometriä kohden, ja ilman tulee vaihtua kaikissa huonetiloissa myös käyttöajan ulkopuolella (Opas ilmanvaihdon mitoitukseen muissa kuin asuinrakennuksissa 2020: 5).

Tuloilman lämpötila, kosteus tai entalpia voidaan laskea ulko- ja palautusilman tilapisteiden lämpökapasiteettivirroilla painotettuna keskiarvona. Käytännössä voidaan käyttää massavirroilla painotettua keskiarvoa, koska ilman ominaislämpökapasiteetti pysyy likimäärin vakiona tarkasteltavalla lämpötila- ja kosteusalueella. Tällöin tuloilman entalpia voidaan laskea kaavalla 6. Entalpien tilalta kaavassa voidaan käyttää myös lämpötilaa tai absoluuttista kosteutta, jolloin entalpien paikalle vaihdetaan haluttu suure. (Sandberg 2014a: 136.)

$$h_t = \frac{q_{mu}h_u + q_{mp}h_p}{q_{mu} + q_{mp}} = \beta h_u + (1 - \beta)h_p \quad (6)$$

h_t on tuloilman entalpia (kJ/kg)

q_{mu} ja q_{mp} ovat ulko- ja palautusilman massavirrat (kg/s)

h_u ja h_p ovat ulko- ja palautusilman entalpiat (kJ/kg)

β on ulkoilman suhteellinen osuus tuloilmavirrasta (-).

Ilman sekoituspiste voidaan määritellä myös Mollier-diagrammista siten, että sekoitettavien ilmavirtojen tilapisteiden välille piirretään jana, johon sekoitetun ilman tila päätyy. Jana jaetaan massavirtojen suhteessa siten, että sekoituspiste on lähempänä suuremman massavirran tilapistettä. (Sandberg 2014a: 136.)

Ilman jäähdytys

Tuloilman jäähdytys toteutetaan yleensä nestekiertoisella vastavirtapatterilla, ja nesteen mitoituslämpötila on usein +7/+12 °C, mikä mahdollistaa nesteen jäädyttämisen yli 0 °C:n höyrystymislämpötilalla. Tällöin veden jäätyminen höyrystimessä on epätodennäköistä. Lämpötilan nostaminen parantaa vedenjäähdytyskoneen kylmäkerrointa mutta kasvattaa patterin kokoa. Jos jäähdytykseen käytetään kaukojäähdytystä tai halutaan parantaa vedenjäähdytyskoneen hyötysuhdetta, mitoituslämpötila voi olla korkeampi. (Sandberg 2014b: 281.)

Jäähdytyspatterin teho koostuu kahdesta osasta: lämpötilan muutokseen tarvittavasta tehosta eli tuntuvasta tehosta ja vesihöyryn tiivistämiseen tarvittavasta tehosta eli latentista tehosta. Jäähdytyspatterin teho lasketaan entalpiaeron

avulla kaavalla 7, jos prosessissa tapahtuu vesihöyryn tiivistymistä. (Sandberg 2014b: 87.)

$$\phi_i = q_{mi}(h_1 - h_2) = \rho_i q_{vi}(h_1 - h_2) \quad (7)$$

ϕ_i on jäähdytyspatterin teho (kW)

q_{mi} on ilman massavirta (kg/s)

h_1 ja h_2 ovat ilman entalpia ennen patteria ja patterin jälkeen (kJ/kg)

ρ_i on ilman tiheys (kg/m³)

q_{vi} on ilman tilavuusvirta (m³/s).

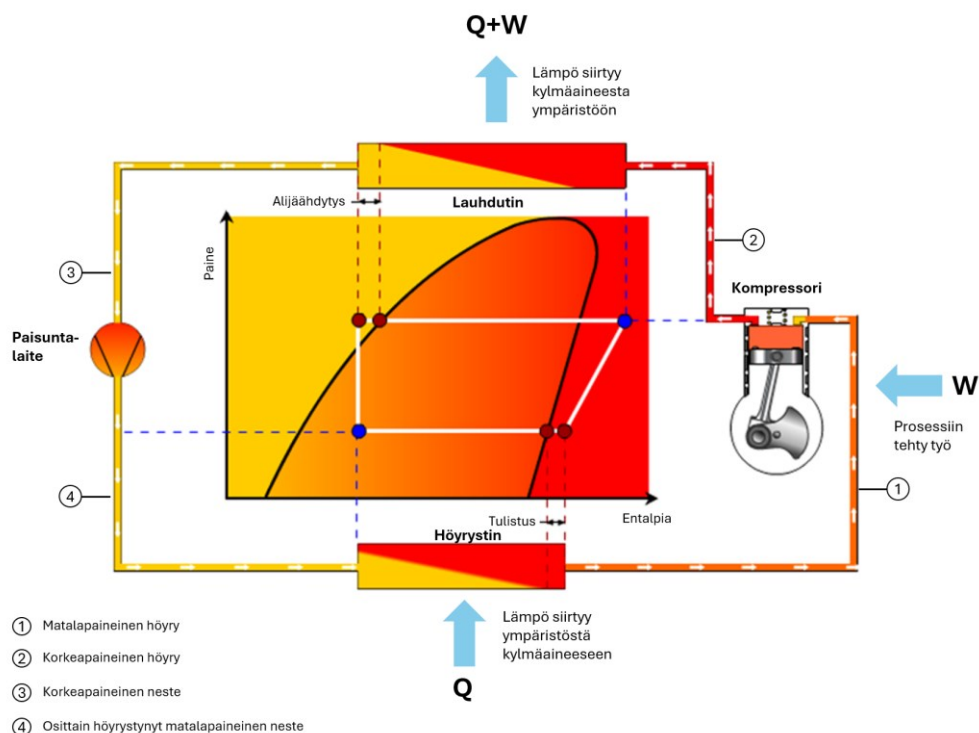
Myymälässä ilmaa saatetaan jäähdyttää lämpötilan ylläpitämisen lisäksi myös kosteuden hallinnan takia. Kylmä- ja pakastekalusteiden lasiovien huurtumisen ehkäisemiseksi sisäilman absoluuttisen kosteuden raja-arvona on pidetty usein 8–9 g/kg_{k.i.}, joka perustuu laskennalliseen kylmäkalusteen lasioven ulkopinnan lämpötilaan (Niemelä 2024). Tämä on melko konservatiivinen arvo, ja myöhemmin tarkastellaan näin merkittävän kuivauksen tarvetta.

Sisäisten kosteuskuormien takia tuloilma täytyy kuivattaa hieman kuivemmaksi (7–8 g/kg_{k.i.}). Raja-arvo on niin matala vuoden kosteimpaan aikaan, että riittävän kuivaustehon saavuttamiseksi ilmaa pitää jäähdyttää alhaisempaan lämpötilaan kuin pelkän lämpötilan hallinnan jäähdytysprosessissa. Alhaisen lämpötilan takia ilmaa pitää yleensä vielä lämmitellä jäähdytyspatterin jälkeen, jotta tuloilman lämpötila ei ole liian alhainen. Kuivausprosessi on siis energiaintensiivinen prosessi ja vaatii matalan jäähdytysvesiverkoston lämpötilan. (Pihlajamaa 2023: 40.)

3 Myymälän kylmäteknikka

3.1 Kaupan kylmälaitos

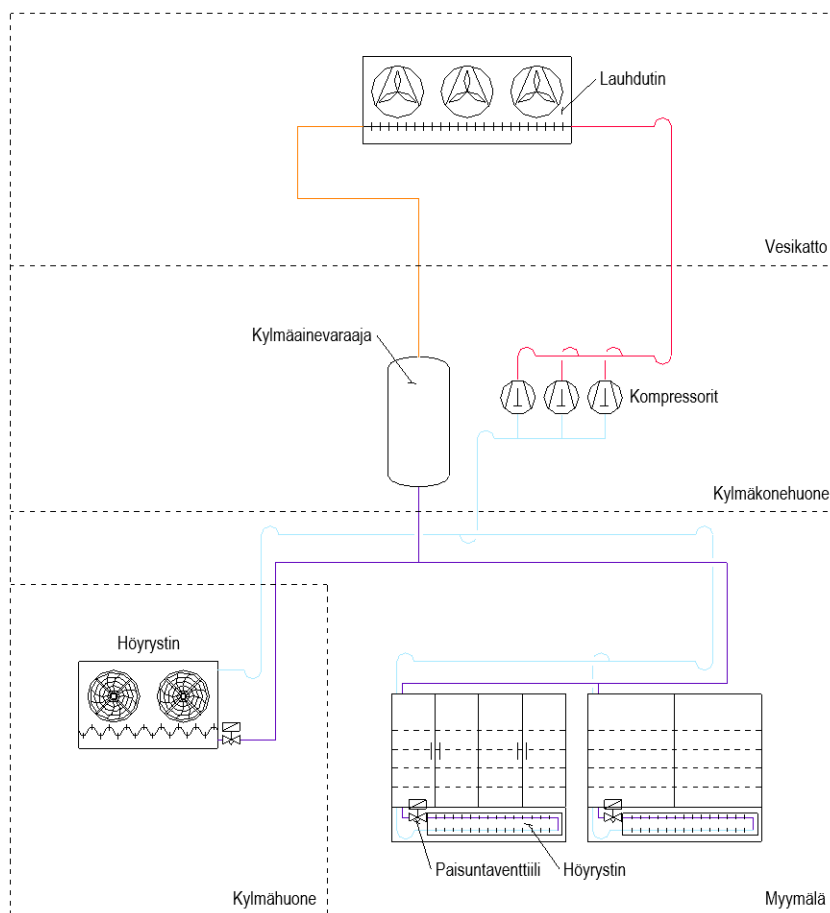
Kylmä- ja pakastekalusteiden sekä kylmä- ja pakastehuoneiden lämpötilan hallinta perustuu kylmätekniseen kiertoprosessiin (kuva 4), jossa jäähdytyskohteesta poistetaan lämpöä kompressorin avulla. Nestemäistä kylmäainetta syötetään höyrystimeen, jossa se höyrystyy sitoen lämpöä ympäristöstä. Höyrystynyt kylmäaine imetään kompressorin, jossa paine nostetaan lauhduttimen paineeseen. Kuuma ja korkeapaineinen kaasu johdetaan lauhduttimeen, jossa kylmäaine nesteytyy luovuttaen lämpöä ympäristöön. Lauhduttimelta nestemäinen kylmäaine johdetaan paisuntaventtiilille, joka laskee paineen höyrystymispaineeseen, ja kierto alkaa alusta. (Kaappola ym. 2018: 18.)



Kuva 4. Kylmätekninen kiertoprosessi (Kaappola ym. 2018: 17).

Keskuskoneellinen kylmlaitos

Super- ja hypermarketit toteutetaan usein niin sanotulla keskuskoneellisella kylmlaitoksella (kuva 5), jossa kompressorit sijaitsevat erillisessä konehuoneessa ja lauhdutin ulkoilmassa, yleensä vesikatolla. Tällaisessa laitoksessa jäähdytyskohteet liitetään putkistolla yhteen tai muutamaan jäähdytyskompressorikoneikkoon, jossa on useita rinnankytkettyjä matala- tai keskilämpötilakompressoreita. Keskuskoneeseen liitetty kylmä- tai pakastekaluste sisältää höyrystimen, paisuntaventtiilin ja automatiikan. Automatiikka ohjaa puhaltimia, sulatusta ja paisuntaventtiiliä kylmäkalustekohtaisesti. Kompressoreita ohjataan epäsuorasti koneikkosäätimellä imupaineen mukaan taajuusmuuttajalla tai on-off-kytkimellä. (Kaappola ym. 2018: 87–88; Lavento 2022.)



Kuva 5. Keskuskoneellisen kylmlaitoksen periaatekaavio.

Hiilidioksidin (CO₂) käyttö kylmäaineena on yleistynyt kaupan kylmätekniikassa etenkin sen ympäristöystävällisyyden takia. Uusissa ja saneerattavissa super- ja hypermarketeissa kylmälaitos toteutetaan usein CO₂-booster-järjestelmällä, jossa sekä kylmäjäähdytyskohteet (MT, Medium Temperature) että pakastejäähdytyskohteet (LT, Low Temperature) jäähdytetään yhdellä järjestelmällä. Laitos sisältää perinteisten järjestelmien tapaan kompressorin, höyrystimen, paisuntaventtiilin, kylmäainevaraajan ja lämmön poistamiseen käytettävän lämmönsiirtimen, joka toimii lauhduttimena tai kaasunjäähdyttimena ulkolämpötilan mukaan. Lisäksi järjestelmässä on CO₂-booster-järjestelmälle ominaisia komponentteja, kuten korkeapaine- ja kaasunohitusventtiili. (CO₂ Booster System Technology Explained.)

CO₂-booster-laitoksessa nestettä syötetään varaajasta MT- ja LT-höyrystimille paisuntaventtileiden kautta. LT-höyrystimessä höyrystynyt kylmäaine imetään LT-kompressorille, joka nostaa paineen MT-kompressorin imupaineeseen. LT-kompressorin kuumakaasu yhtyy MT-höyrystimissä höyrystyneen kylmäaineen kanssa, ja seos imetään MT-kompressoriin, joka nostaa paineen kaasunjäähdyttimen tai lauhduttimen paineeseen. (CO₂ Booster System Technology Explained.)

CO₂:n kriittinen lämpötila on matala (31,1 °C) ja paine korkea (72,7 bar). Kun lämpötila ja paine ylittävät kriittisen pisteen, kylmäaine on ylikriittistä fluidia, eikä neste- ja kaasuolomuotoja voida enää erottaa. Laitoksen toimiessa ylikriittisellä alueella kylmäaine ei tiivisty nesteeksi lauhduttimessa, ja ylikriittistä fluidia vain jäähdytetään kaasunjäähdyttimessä. Jos ulkoilman lämpötila on alhainen, laitos voi toimia alikriittisellä alueella, jolloin kylmäaine nesteytyy lauhduttimessa perinteisen järjestelmän tapaan. Kaasun jäähdyttämisen jälkeen paine lasketaan korkeapaineventtiilillä, jolloin syntyy neste-kaasuseosta. Neste painuu kylmäainevaraajan pohjalle, josta se johdetaan höyrystimille. Paineen laskussa syntynyt kaasu johdetaan kaasunohitusventtiiliin kautta MT-kompressorille. (CO₂ Booster System Technology Explained.)

Keskuskoneelliset kylmä- ja pakastekalusteet eivät aiheuta lämpökuormaa myymälään, koska lauhdelämpö poistetaan myymälän ulkopuolelle.

Omakoneelliset kylmälaitteet

Omakoneelliset kylmä- ja pakastekalusteet sisältävät höyrystimen, paisunta-venttiilin, lauhttimen, kompressorin ja automatiikan. Näiden kalusteiden lauhtuminen tapahtuu myymälän sisäilmaan, mikä aiheuttaa lämpökuormaa. Tällaiset kalusteet pyritään rajaamaan usein siirrettäviin ja sesonkituotteiden myyntiin käytettäviin yksiköihin, mikä vähentää kylmälaitteista syntyvää ääni- ja lämpökuormaa. (Lavento 2022.)

Pienemmissä myymälöissä käytetään usein niin sanottua waterloop-kylmäjärjestelmää, jossa kalusteiden jäähdytykseen käytetään omakoneellisia laitteita, mutta lauhdutus toteutetaan vesipohjaisella liuksella. Tällaisessa järjestelmässä lauhdelämpö siirretään liuksen välityksellä ulkoilmaan tai rakennuksen lämmitysverkostoon, eikä lauhdelämpö siten aiheuta lämpökuormaa myymälään. (CoolFlow® Waterloop -kylmäjärjestelmä on taloudellisempi tapa toteuttaa kaupan kylmäkalustus.)

3.2 Jäähdytetyt myymäläkalusteet

Iso osa elintarvikemyymälän kylmätehtarpeesta koostuu jäähdytetyistä myymäläkalusteista, joissa säilytetään helposti pilaantuvia tuotteita, kuten lihaa, kalaa ja maitotuotteita. Yleisimmin käytettyjä kalusteita ovat suljetut ja avoimet monitoimikylmähyllit, ovelliset pakastekaapit sekä kannelliset pakastealtaat. Lämpötila kylmäkalusteessa on yleensä 0...8 °C ja pakastekalusteessa enintään –18 °C (Esimerkkejä elintarvikkeiden säilytyslämpötiloista 2023).

3.2.1 Kylmäkalusteiden jäähdytystehontarve

Jotta kylmäkalusteissa säilytettävät pilaantuvat tuotteet voidaan pitää ympäröivää sisäilmaa alhaisemmassa lämpötilassa, täytyy lämpöä poistaa jatkuvasti kalusteen sisältä. Lämpökuormat voidaan jakaa komponentteihin, joita ovat

- johtuminen seinien, lattian, katon ja lasiovien läpi
- lämpösäteily ympäröivän tilan rakenteista, laitteista ja ihmisistä
- ilmaverhoon sekoittuvan lämpimän ilman lämpö- ja kosteuskuorma
- kalusteen valaisimien ja puhaltimien lämpökuorma
- sulatuksen ja kondenssin estävien lämmittimien lämpökuorma
- säilytyslämpötilaa lämpimämpien tuotteiden lämpökuorma (Faramarzi 1999: 47).

Standardi SFS-EN ISO 23953-2:2024 määrittää jäähdytettyjen myymäläkalusteiden testausolosuhteet ja -menetelmät sekä ilmasto- ja lämpötilaluokat. Suomessa kalusteet testataan yleensä ilmastoluokassa 3, jossa lämpötila on 25 °C ja kosteus 60 %. Näissä olosuhteissa mitataan kalusteen poistama energia vuorokauden aikana ja lasketaan keskimääräinen jäähdytysteho kaavalla 8. (SFS-EN ISO 23953-2:2024: 16, 68.)

$$\phi_{run} = \frac{Q_{tot}}{t_{run}} = \frac{Q_{tot}}{24 - t_{deft} - t_{stop}} \quad (8)$$

ϕ_{run} on keskimääräinen jäähdytysteho (kW)

Q_{tot} on vuorokauden aikana kalusteesta poistettu lämpö (kWh)

t_{run} on kompressorin käyntiaika (h)

t_{deft} on sulatusaika (h)

t_{stop} on kompressorin pysähdysaika (h).

Standardissa määritetään myös lämpötilaluokat, jotka määrittelevät testipakkausten (M-package, Measurement Package) lämpötilojen sallitun vaihteluvälin. Testipakkauksien ominaisuuksilla, kuten mitoilla, lämpökapasiteetilla ja lämmönjohtavuudella, pyritään jäljittelemään kalusteissa säilytettäviä tuotteita. (SFS-EN ISO 23953-2:2024: 24.)

3.2.2 Kylmäkalustetyypit

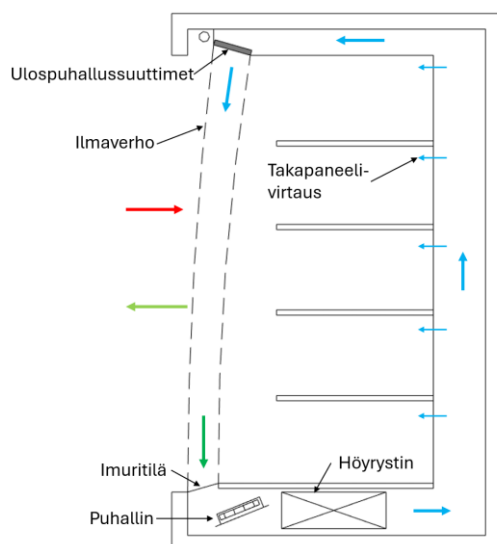
Avoimet kylmäkalusteet

Avoimet kylmähyllyt (kuva 6) ovat edelleen yleisesti käytössä, vaikka ne kuluttavat huomattavasti enemmän energiaa kuin suljetut kalusteet. Suuri energiankulutus johtuu kalusteeseen vuotavasta kosteasta ja lämpimästä ilmasta. Avoimen kylmäkalusteen etuna on se, että tuotteet ovat helposti asiakkaiden saatavilla, mikä ainakin yleisen käsityksen mukaan parantaa myyntiä. (Evans & Foster 2015: 10.)



Kuva 6. Costan NordicLine MD7 -monitoimikylmähyllly ilman ovia (NordicLine 2025).

Kuvassa 7 on esitetty avoimen monitoimikylmähyllyn toimintaperiaate. Ilmaa imetään puhaltimella höyrystimeen, jossa ilma luovuttaa lämpöä höyrystyvään kylmäaineeseen. Höyrystimessä jäähdytetty ilma puhalletaan yläosan puhallussuuttimista ja rei'itetystä takapaneelista kalusteeseen. Puhallussuuttimista alaosan imuritulaa kohti puhallettava ilmavirta luo ilmaverhon kalusteen ja ympäristön välille, ja takapaneelin läpi puhallettava ilma kompensoi ilmaverhon häiriöitä ja auttaa ylläpitämään tasaisia lämpötiloja kalusteessa. (Evans & Foster 2015: 10.)



Kuva 7. Avoimen kylmähyllyn periaatekuva. Vaaleansiniset nuolet kuvaavat höyrystimessä jäähdytettyä kylmää ilmaa, punainen nuoli ilmaverhoon sekoittuvaa sisäilmaa, vaaleanvihreä nuoli ulos vuotavaa ilmaa ja vihreä nuoli höyrystimen imuilmaa.

Suljetut kylmä- ja pakastekalusteet

Pakastekalusteet on jo pitkään varustettu lasiovilla ja -kansilla energian säästämiseksi, ja myös kylmäkalusteiden varustaminen ovilla on yleistynyt. Lasiovet ja -kannet estävät lämpimän ilman pääsyn kalusteeseen tehokkaasti, mikä vähentää kalusteen lämpötilan ylläpitoon tarvittavaa jäähdytysenergiaa. Faramarzin ym. (2002: 676) mukaan avoimen pystykylmähyllyn varustaminen lasiovilla pienentää jäähdytystehontarvetta jopa 68 %. Jäähdytystehontarpeen lasku johtuu vuotoilman lämpö- ja kosteuskuorman pieneneemisestä. Kuvassa 8 on tyypillisiä suljettuja kylmä- ja pakastekalusteita.



Kuva 8. Costan NordicLine MD7-kylmähyllly (vas.), VF1 Luxo -pakastekaappi (kesk.) ja IS7-pakasteallas (oik.) (NordicLine 2025).

3.2.3 Kylmäkalusteiden vaikutus ympäröivään ilmaan

Kylmäkalusteiden tarkoitus on ylläpitää elintarvikkeille sopivaa lämpötilaa säilyvyyden ja turvallisuuden varmistamiseksi, mutta osa jäähdystehosta jäähdyttää ympäröivää ilmaa. Kylmäkaluste myös kuivaa ilmaa paikallisesti, koska sisäilman kosteus tiivistyy höyrystimessä, ja kuivempaa ilmaa vuotaa ulos kalusteesta.

Avoimen kylmäkalusteen jäähdytysvaikutuksesta noin 80–90 % koostuu vuotoilman konvektiosta. Avoimen monitoimikylmähyllyn vaikutus ympäröivään ilmaan on esitetty taulukossa 1. Taulukon arvot ovat viitteellisiä, ja todellinen teho vaihtelee kalusteen valmistajan ja mallin mukaan. (ASHRAE 2023: 3–4.)

Taulukko 1. Avoimen monitoimikylmähyllyn jäähdytysvaikutus, kun ympäröivän ilman lämpötila on 22,2–23,3 °C ja suhteellinen kosteus 50–55 % (ASHRAE 2023: 3).

	Latentti lämpö (W/m)	Tuntuva lämpö (W/m)	Latentin lämmön osuus
Liha	211	842	20 %
Maitotuotteet	188	754	20 %
Hevi	184	738	20 %

Suljettu kylmäkaluste jäähdyttää ympäristöä huomattavasti avointa kalustetta vähemmän. Lasiovien ja rakenteiden läpi johtuva lämpö sekä oviraoista ja avausten aikana ulos vuotava kylmä ilma jäähdyttävät ympäröivää ilmaa paikallisesti. Lämpösäteilyn ovet estävät melko tehokkaasti.

Johtumislämpöhäviö voidaan laskea jatkuvuustilassa kaavalla 9, kun tiedetään lasiovien ja rakenteiden U-arvot ja pinta-alat sekä kalusteen ja ympäröivän ilman lämpötilaero (Faramarzi 1999: 47).

$$\phi_j = UA(t_y - t_k) \quad (9)$$

ϕ_j on johtumislämpöhäviö (W)

U on rakenteen tai lasioven U-arvo (W/(m²K))

A on rakenteen tai lasioven pinta-ala (m²)

t_y on ympäristön lämpötila (°C)

t_k on kalusteen säilytyslämpötila (°C).

Taulukossa 2 on esitetty suljettujen kalusteiden ympäristöä jäähdyttävä vaikutus kalustemetriä kohden talvella ja kesällä. Talvella sisäilman lämpötila on 18 °C ja kesällä 23 °C. Päädyt on laskettu erikseen, sillä kalusteita asennetaan yleensä useita vierekkäin, jolloin vain reunimmaisiin kalusteisiin johtuu lämpöä päätyseinien kautta. Kylmähyllyn rakenteiden U-arvo on 0,4 W/(m²K) ja lasioven 1,1 W/(m²K). Pakastekaapin rakenteiden U-arvo on 0,3 W/(m²K) ja lasioven 0,9 W/(m²K). Kylmähyllyn ja pakastekaapin päätyseinät on oletettu kokonaan lasipinnoiksi, joiden U-arvo vastaa lasiovia. Pakastealtaan kansien U-arvo on 3,6 W/(m²K), ja kansien alapuolinen lämpötila on 7 °C. Kannen alapuolisen lämpötilan arvio perustuu K-Supermarket Postitalossa toteutettuihin mittauksiin, joita käsitellään myöhemmin tarkemmin. Altaan seinät on oletettu lasipinnoiksi U-arvolla 1,1 W/(m²K). Kylmähyllyn teho koostuu johtumisen lisäksi vuotoilmasta, joka on arvioitu Orlandin ym. (2013) CFD-simuloinnin perusteella. Pakastekalusteet ovat tiiviitä, ja ovia avataan vähän, joten tehossa on huomioitu pelkästään johtuminen.

Taulukko 2. Kylmä- ja pakastekalusteiden ympäristöä jäähdyttävä teho kalustemetriä kohden.

Kaluste	Ulkomitat (leveys x korkeus) [mm]	Säilytyslämpötila [°C]	talvi/kesä [W/m]	talvi/kesä [W/pääty]
5-tasokylmähyllly	1000x2000	0	125/157	34/43
Pakastekaappi	1000x2000	-20	100/114	58/66
Pakasteallas	2000x1000	-20	109/145	38/43

4 Kylmäkalusteiden kondenssi ja huurtumisenesto

Kylmäkalusteiden varustaminen lasiovilla saattaa aiheuttaa ovien sisä- ja ulkopuolista kondenssia, mikä johtaa huurtumiseen ja heikentää tuotteiden näkyvyyttä ja myyntiä. Kondenssia tapahtuu, kun ympäröivän sisäilman kastepiste ylittää lasin pinnan lämpötilan. Tällöin kostea ilma ei pysty pidättämään kaikkea sitomaansa vesihöyryä, ja osa siitä tiivistyy vedeksi lasin pintaan.

Sisäpuolista huurtumista ovien avausten yhteydessä ei voida käytännössä yleensä estää kokonaan etenkin pakastekalusteissa, koska lasin sisäpinnan lämpötila on niin alhainen, ettei sisäilman kastepistettä voida yleensä pitää tätä lämpötilaa matalampana. Huurtumisen poistumista oven sulkemisen jälkeen voidaan kuitenkin nopeuttaa varustamalla ovi lämmitysvastuksilla tai huurteenestokalvoilla. Myös sisäilman kastepisteen laskeminen ja ilmaverho nopeuttavat huurteen poistumista.

Lasiovien ulkopuolinen huurtuminen on epätodennäköisempää, koska ulkopinnan lämpötila pysyy lähellä sisäilman lämpötilaa, kun käytetään kaksi- tai kolmilasiovia, joiden välissä on huonosti lämpöä johtavaa kaasua. Yksilasiovilla ulkopuolinen huurtuminen on todennäköisempää, koska lämpöä johtuu enemmän oven läpi, mikä laskee lasipinnan lämpötilaa.

4.1 Lasioven ulkopinnan lämpötilan määrittäminen

Lasin ulkopinnan lämpötilaa käytetään usein ympäröivän sisäilman kastepisteen raja-arvon määrittämiseen. Sisäilman kastepisteen pitää olla lasin pintalämpötilaa matalampi, jotta voidaan välttyä vesihöyryn tiivistymiseltä ja ovien huurtumiselta. Ulkopinnan lämpötila voidaan laskea hyvällä tarkkuudella pystymallisille kylmä- ja pakastekalusteille kaavalla 10, joka perustuu siihen, että sama lämpövirta kulkee koko ovirakenteen läpi. Yhtälö tarkoittaa sitä, että ympäristöstä siirtyy lasiin (vasen puoli) yhtä suuri lämpövirta kuin ympäristöstä kalusteeseen (oikea puoli). (Niemelä 2024.)

$$\alpha(t_y - t_{up}) = U(t_y - t_k) \quad (10)$$

α on ulkopinnan lämmönsiirtokerroin (W/(m²K))

t_{up} on lasin ulkopinnan lämpötila (°C).

Kaavasta 10 voidaan johtaa kaava 11 lasin ulkopinnan lämpötilalle

$$t_{up} = t_y - \frac{U}{\alpha}(t_y - t_k) \quad (11)$$

K-Supermarket Postitalossa tehtyjen mittausten perusteella voidaan olettaa riittävällä tarkkuudella, että pystymallisissa kylmähylyissä ja pakastekaapeissa välittömästi lasioven sisäpuolella vallitsee kalusteen säilytyslämpötila. Vaakamallisissa kalusteissa, joita käytetään lähinnä pakasteiden myyntiin, ilman kerrostuminen aiheuttaa sen, että lämpötila välittömästi pakastealtaan kannen alapuolella on huomattavasti korkeampi kuin tuotteiden säilytyslämpötila. Ilman kerrostuminen johtuu siitä, että kylmä ilma on tiheämpää kuin lämmin ilma. Tämän takia ulkopinnan laskennallinen lämpötila määritetään K-Supermarket Postitalossa mitatun pintalämpötilan perusteella kaavalla 12. Laskelmissa oletetaan, että lämpötila riippuu lineaarisesti ympäröivän sisäilman lämpötilasta.

$$t_{up,pak.allas} = t_y - \Delta t_{ref} \quad (12)$$

$t_{up,pak.allas}$ on pakastealtaan kannen ulkopinnan lämpötila (°C)

Δt_{ref} on ympäristön ja lasin ulkopinnan lämpötilaero KSM Postitalossa, kaava 13 (°C).

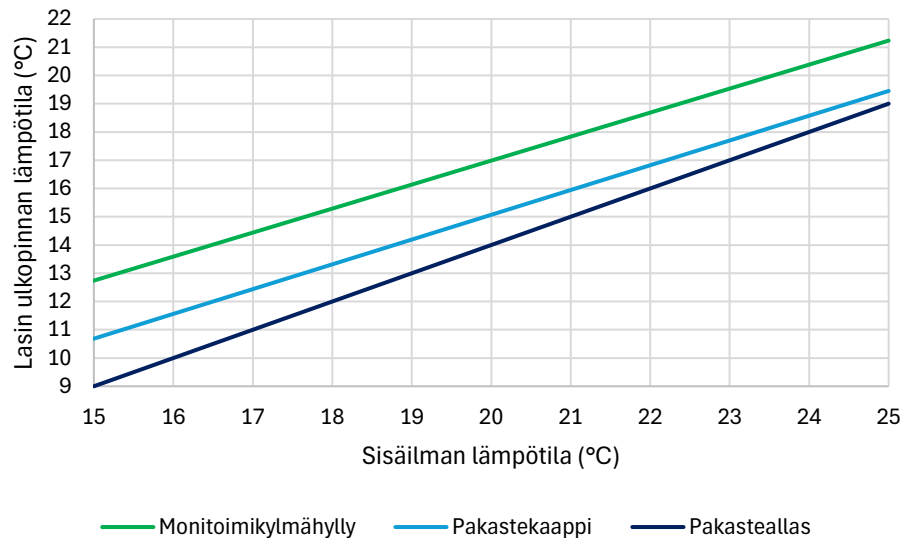
$$\Delta t_{ref} = t_{y,ref} - t_{up,ref} \quad (13)$$

$t_{y,ref}$ on ympäristön lämpötila mittaushetkellä KSM Postitalossa (~17 °C)

$t_{up,ref}$ on mitattu ulkopinnan lämpötila KSM Postitalossa (~11 °C).

Kuvaan 9 on laskettu 5-tasomitoimikylmähylyn ja pakastekaapin lasiovien sekä pakastealtaan kannen ulkopinnan lämpötila erilaisilla ympäröivän sisäilman lämpötiloilla. Kylmähylyn säilytyslämpötila on laskelmissa 0 °C ja pakastekalusteiden –20 °C. Kylmähylyn lasioven U-arvo on 1,1, pakastekaapin

lasioven 0,9 ja pakastealtaan kannen 3,6 W/(m²K) (Niemelä 2024). Ulkopinnan lämmönsiirtokerroin on 7,3 W/(m²K) (SFS-EN 673 2024: 13).



Kuva 9. Kylmä- ja pakastekalusteiden ovien ja kansien laskennalliset lämpötilat ympäröivän sisäilman lämpötilan funktiona.

Kuvasta 9 voidaan todeta, että sisäilman lämpötilaa ei tulisi laskea liian alas, koska se laskee lasipinnan lämpötilaa ja lisää kondenssiriskiä. Lämpötila voi olla korkeampi kesällä, koska asiakkaat tulevat myymälään kesävaatteissa lämpimästä ulkoilmasta. Sopiva lämpötila on noin 23–24 °C. (The Best Temperature for Retail Stores 2018.)

Ulkoilman lisäksi ihmisistä ja muista lähteistä haihtuu hieman kosteutta, mikä nostaa myymälän kastepistettä. Jos ilmanvaihto toimii hyvin, merkitys on vähäinen suhteessa ulkoilmaan. (Lehtoviita 2020: 21.)

4.2 Ilmastoinnin kuivauskapasiteetin optimointi

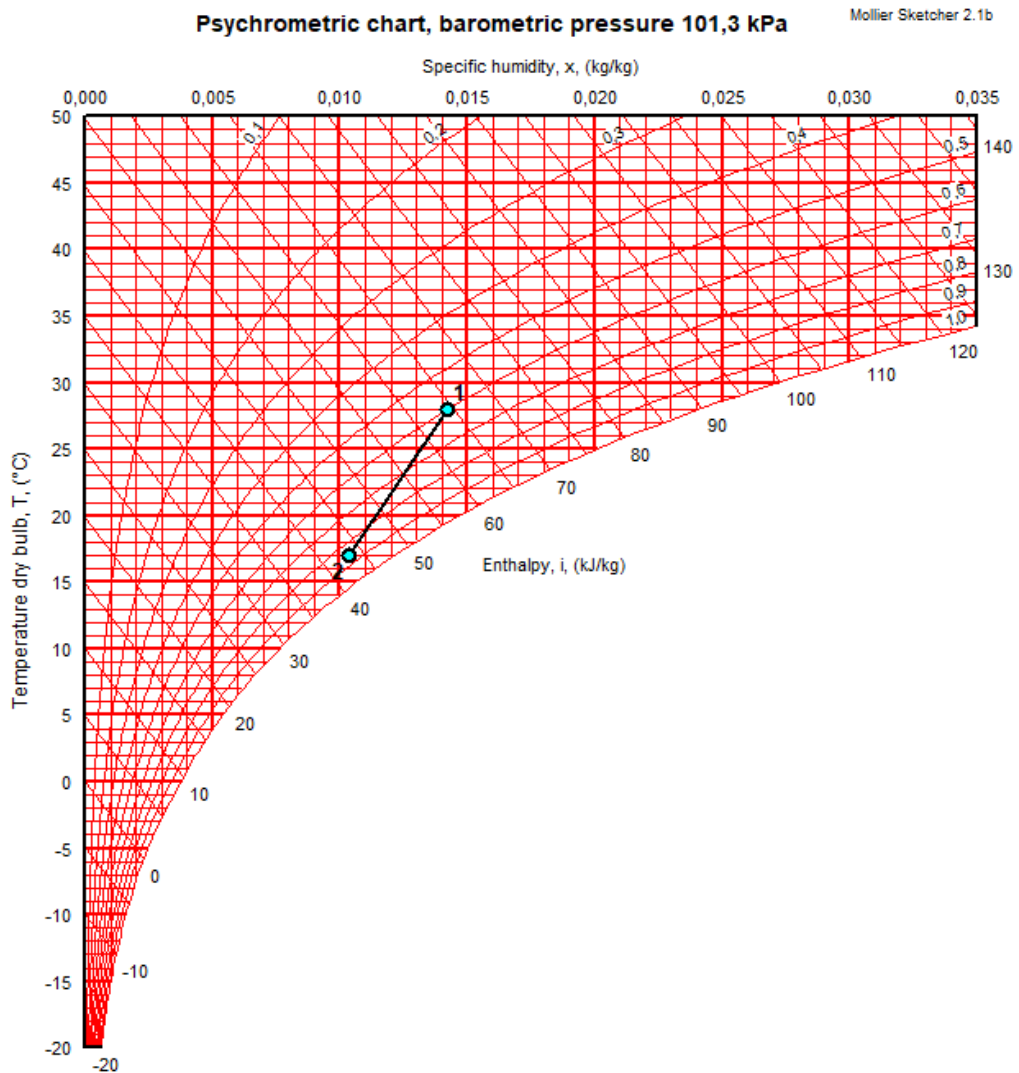
Pakastealtaan kannen ulkopinnan lämpötila pysyy kesällä noin 15–19 °C:ssa sisäilman lämpötilan mukaan. Tämä lämpötila on hyvin verrattavissa jäähdytyspalkkiverkostoon, jossa lämpötilataso on +15/+18 °C, ja sisäilmaa kuivataan siten, että jäähdytyspalkkeihin ei tiivisty vesihöyryä. Yleensä riittävä tuloilma kuivaus saavutetaan, kun ilmastoinnin jäähdytysverkoston lämpötilataso on +7/+12 °C. Ilma jäähdytetään suoraan tuloilman lämpötilaan, joten jäähdytyspatteri voidaan sijoittaa ilman virtaussuunnassa lämmityspatterin jälkeen. Näin varmistetaan, että jäähdytyspatteri ei jäädy talvella. (Sandberg 2014b: 281.)

Perinteisesti tuloilman kastepisteen raja-arvo elintarvikemyymälässä on noin 11 °C, jolloin tuloilma kuivataan ylijäähdyttämällä ilma noin 10 °C:seen. Jäähdytysvesiverkoston lämpötilataso on matala, esimerkiksi +5/+10 °C. Jäähdytyksen jälkeen ilma pitää vielä lämmittää sopivaan tuloilman lämpötilaan, joten jäähdytyspatteri pitää asentaa ilman virtaussuunnassa ennen lämmityspatteria. Jotta jäätyminen voidaan estää, täytyy ennen jäähdytyspatteria asentaa esilämmityspatteri tai käyttää jäähdytysnesteenä jäätyvätöntä liuosta, esimerkiksi vesi-etanoliseosta. (Pihlajamaa 2023: 30.)

Laskelmien perusteella nykyaikaisilla kylmä- ja pakastekalusteilla kastepistettä ei tarvitse laskea näin alas. Riittää, että tuloilman kastepiste on enintään 16 °C, kun sisäilman lämpötila on 23 °C. Kastepisteen asettaminen 16 °C:seen on riittävän matala estämään pakastealtaan kansien kondenssin ja huurtumisen, ja pystykylmähylyt ja pakastekaapit sallivat jopa 18 °C:n kastepisteen.

Kuvassa 10 esitetään jäähdytysprosessi FläktGroupin eQ MASTER® -ilmankäsittelykoneella, joka on valittu ACON-mitoitusohjelmalla. Ilmavirraksi on valittu 3 m³/s, joka vastaa suurehkon supermarketin ilmamäärää. Ilman kuivaus patterissa vaihtelee sen ominaisuuksien mukaan, mutta esimerkkipatteri antaa hyvän kuvan kuivauskapasiteetista, kun jäähdytysvesiverkoston lämpötila on +7/+12 °C. Todellisen laitteen tarkastelu antaa myös realistisemmän kuvan kuin

yksinkertaistettu prosessi, jossa patterin pinta oletetaan kokonaan kosteaksi ja tasalämpöiseksi. (ACON 2025.)



Kuva 10. Jäähdytysprosessi Mollier-diagrammissa. Piste 1 on ulkoilma ($28\text{ }^{\circ}\text{C}$ / 60% , $x=14,2\text{ g/kg}_{\text{k.i.}}$) ja piste 2 on tuloilma ($17\text{ }^{\circ}\text{C}$ / 86% , $x=10,3\text{ g/kg}_{\text{k.i.}}$). (Mollier Sketcher 2004; ACON 2025.)

Kuvasta 10 nähdään, että ilmaa pystytään kuivaamaan riittävästi myös äärimmäisissä olosuhteissa ($28\text{ }^{\circ}\text{C}$ / 60%). Tuloilman kastepiste on $14,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, joten sisäilman kastepiste pysyy noin $15\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa, jos ilmanvaihto toimii hyvin. Tuloilman lämpötila $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ei myöskään ole todennäköisesti liian matala kesällä, jolloin on jäähdytystarvetta.

Korkeampi tuloilman kastepiste mahdollistaa veden käytön jäähdytysvesiverkostossa, koska jäätymisvaaraa ei ole. Maltillisempi tuloilman kuivaus vähentää myös jäähdytysjärjestelmän energiankulutusta, koska latenttia lämpöä poistetaan vähemmän ja vedenjäähdytyskone käy korkeammalla kylmäkertoimella korkeamman höyrystymislämpötilan takia.

4.3 Kalusteiden huurteenestomenetelmät

Lämpövastukset (ASH)

Kylmä- ja etenkin pakastekalusteiden lasiovien huurtumista voidaan ehkäistä varustamalla ovet lämpövastuksilla, joista käytetään usein lyhennettä ASH (Anti-Sweat Heater). Lämpövastukset voidaan asentaa joko ovikarmiin tai upottaa suoraan lasiin. Ovikarmiratkaisu on edullisempi, mutta vastusten upottaminen lasiin tarjoaa paremman lopputuloksen. ASH pitää lasin tai ovikarmin pinnan lämpötilan sisäilman kastepisteen yläpuolella, jolloin lasiin ei pitäisi syntyä huurretta. (Humar ym. 2022: 2.)

ASH:n huono puoli on energiankulutus. ASH tarvitsee sähköenergiaa toimiakseen, minkä lisäksi osa vastusten tuottamasta lämmöstä siirtyy kalusteen sisälle aiheuttaen lisäkuormaa kylmälaitokselle. Energiankulutusta voidaan vähentää ohjaamalla ASH:ta sisäilman kastepisteen mukaan. Kun sisäilman kastepiste on matala, ei lasia tarvitse lämmittää niin suurella teholla. Tällaisella ohjauksella voidaan säästää jopa 90 % ASH:n sähkönkulutuksessa. Suomessa jo pelkästään on-off-ohjauksella voitaisiin päästä riittävän hyvään lopputulokseen, koska kostea aika vuodesta on niin lyhyt, ettei huurtumisen estäviä lämmittämiä tarvitse pitää jatkuvasti päällä. (Humar ym. 2022: 2, 9.)

Huurteenestokalvot (AFF)

Toinen vaihtoehto lasiovien huurtumisen ehkäisyyn on huurteenestokalvo (AFF, Anti-Fog Film), joka asennetaan lasin sisäpintaan. AFF ei vaadi sähköenergiaa, mikä tekee siitä houkuttelevan vaihtoehdon ASH:lle. AFF vähentää

sähkönkulutuksen lisäksi myös kalusteen jäähdytyskuormaa, koska ASH:n aiheuttama lämpökuorma poistuu. Toisaalta AFF on herkkä ulkoisille vaurioille, jolloin kalvon kyky estää huurtumista heikkenee. Huurteenestokalvot eivät ole yhtä tehokkaita poistamaan huurreta kuin lämpövastukset, mutta materiaalien kehittyessä tämä saattaa muuttua tulevaisuudessa. (Humar ym. 2022: 2.)

5 K-Supermarket Postitalon kylmäkalusteet ja sisäilmaston hallinta

5.1 Kohteen esittely ja tutkimusongelma

K-Supermarket Postitalo sijaitsee Helsingin ydinkeskustassa, noin 100 metrin päässä päärautatieasemalta. Myymälän myyntipinta-ala on noin 2 000 m², ja suurin osa kylmä- ja pakastekalusteista on liitetty keskitettyihin jäähdytyskompressorikoneikkoihin. Lisäksi on muutamia omakoneellisia kalusteita.

Myymälässä on noin 90 metriä 5-tasomonitoimikylmähyllä, joista 25 metriä on suljettuja ja 65 metriä avoimia. Lämpötila vaihtelee kalatuotteiden 0 °C:sta virvoitusjuomien 8–10 °C:seen. Pakastealtaita on 10 metriä ja korkeita pakaste-kaappeja vajaa 30 metriä.

Pakastekaappien ja kylmähyllöjen lasiovet, pakastealtaiden liukukannet sekä avokalusteiden kylmät pinnat kondensoivat kosteimpaan aikaan vuodesta, kuten kuvassa 11 on esitetty. Kondenssi heikentää tuotenäkyvyyttä ja vaikuttaa myyntiin. Lisäksi runsas vesihöyryn tiivistyminen voi aiheuttaa ongelmia, kuten liukastumisvaaran kalusteiden edessä. Runsas kondenssi viittaa liian korkeaan sisäilman kastepisteeseen, ja samalla kalusteiden toimintaa kosteissa olosuhteissa tulisi tarkastella.



Kuva 11. KSM Postitalon kondenssiongelma (Länsiluoto 2024).

Tässä työssä tutkitaan syitä kalusteiden kondenssille ja tarjotaan mahdollisia ratkaisuja ja kehitysehdotuksia ongelman poistamiseksi.

5.2 Kalusteiden ovien ja kansiin lämpötilan mittaus

Lasipintojen huurtumiseen vaikuttaa voimakkaasti pinnan lämpötila. Mitä matalammaksi se laskee, sitä todennäköisemmin kondenssia muodostuu. Erilaisten kalusteiden lasipintojen lämpötilaa tarkasteltiin lämpötilamittauksilla ja lämpökuvauksella.

Liitteessä 1 esitetään mitatut kalusteet ja ovet, niille määritetyt tunnuksiset ja sisäilman olosuhteiden mittauspisteet. Ympäristön keskimääräinen lämpötila ja suhteellinen kosteus mitattiin pakastealueella, koska ympäristön olosuhteet vaikuttavat lasipinnan lämpötilaan. Kylmähyllysten mittauksissa olosuhteita ei erikseen mitattu, mutta myymälän tasaisen ilmanvaihdon ja kylmäkalusteiden sijainnin perusteella voidaan riittävällä tarkkuudella olettaa, että ne eivät poikkea merkittävästi pakastealueen olosuhteista.

Mittalaitteet

Mittauksissa käytettiin kolmea laitetta, jotka on esitetty kuvassa 12. Pintalämpötila mitattiin Testo 925 -lämpömittarilla ja siihen liitetyllä pintalämpötila-anturilla. Mittarin virhe on $\pm 0,5 \text{ °C} + 0,3 \%$ mittaustuloksesta ja anturin $\pm 2,5 \text{ °C}$ (Testo 925 2017: 3). Lämpökuvaukseen käytettiin FLIR E8 -lämpökameraa, jonka tarkkuus tarkasteltavalla lämpötila-alueella on $\pm 2 \text{ °C}$ tai 2% mittaustuloksesta (FLIR E8 2014: 2). Ympäristön lämpötila ja suhteellinen kosteus mitattiin TSI:n IAQ-Calc 7545:llä, jonka tarkkuus lämpötilassa on $\pm 0,5 \text{ °C}$ ja kosteudessa $\pm 3 \%$ -yksikköä (IAQ-CALC™ INDOOR AIR QUALITY METERS 2012).



Kuva 12. Testo 925 -lämpömittari pintalämpötila-anturilla (vas.), FLIR E8 -lämpökamera (kesk.) ja TSI IAQ-Calc 7545 -mittari (oik.).

Pintalämpötilan mittaus

Pintalämpötilaa mitatessa huomattiin, ettei lämpötila merkittävästi vaihtelee lasin eri kohdissa, joten ajan säästämiseksi mittaukset tehtiin silmämääräisesti lasin keskikohdasta. Ulko- ja sisäpinnan lämpötila mitattiin peräkkäin liitteen 1 kaluste- ja ovitunnusten mukaisesti numero- ja aakkosjärjestyksessä. Mittarilukeman annettiin tasaantua ennen tuloksen kirjaamista.

Pakastealtaiden mittaukset rajattiin aikataulullisista syistä kahteen altaaseen, joista mitattiin yhteensä seitsemän kannen lämpötilat. Lämpötila mitattiin altaiden kansien keskikohdasta samalla tavalla kuin lasiovien kohdalla. Ovien jatkuva avaaminen mittauksen yhteydessä aiheutti pakastekaappien sisälämpötilan vaihtelua noin $-19...-16$ °C välillä, minkä vuoksi alussa kirjatut lämpötilat eivät täysin vastaa todellisia lämpötiloja mittaushetkellä. Tästä huolimatta mitatut pintalämpötilat antavat riittävän tarkan kuvan kalusteiden lämpötilajakaumasta.

Lämpökuvauus

Lämpökuvauksessa kohdattiin useita haasteita, joista merkittävin oli ovien matala emissiivisyys. Matala emissiivisyys lisää heijastuvan säteilyn vaikutusta,

mikä heikentää mittaustulosten luotettavuutta. Tarkkaa emissiivisyysarvoa lasille ei ollut tiedossa, ja lisäksi lasin ja ovikarmien emissiivisyys eroavat merkittävästi toisistaan. Tämä vaikeutti karmien ja lasipinnan lämpötilojen tarkastelua samasta lämpökuvasta, koska näiden pintojen käyttäytyminen emissiivisyyden suhteen on erilaista.

Ovikarmien lämpötilaa, kylmäsiltoja ja vuotokohtia voitiin kuitenkin tarkastella lämpökuvista käyttämällä mattapintaisen materiaalin oletusemissiivisyyttä (0,95). Näissä kuvissa saatiin esiin havaintoja karmien lämpötilajakaumista ja mahdollisista lämpövuodoista. Tämä emissiivisyysarvo aiheutti kuitenkin sen, että lasipinnan lämpötila näytti kuvissa todellista korkeammalta. Heijastuvan säteilyn vaikutus oli erityisen selvä, sillä kuvista voitiin tunnistaa kuvaajan hahmo ja muita ympäristön lämpökuormia.

Vaikka lämpökuvauksessa esiintyi rajoitteita, se tarjosi tietoa ovikarmien lämpötiloista ja mahdollisista vuotokohdista. Näistä havainnoista huolimatta lasipinnan tarkkaa lämpötilaa ei voitu määrittää riittävällä tarkkuudella. Haasteet heijastusten ja emissiivisyyden eroavaisuuksien kanssa korostivat tarvetta täydentää lämpökuvausta pintalämpötilamittauksilla, jotka mahdollistavat luotettavampien arvojen määrittämisen lasipinnoille.

Tulokset

Pakastealueella mitattiin liitteen 1 mukaisista kohdista ympäröivän sisäilman lämpötilaksi keskimäärin 16,8 °C ja suhteelliseksi kosteudeksi 41 %. Pintalämpötilamittausten keskeiset tulokset kalustetyypeittäin esitetään taulukossa 3.

Taulukko 3. Lasiovien pintalämpötilat.

Kalustetyyppi ja kalustenumerot	Ulkopinnan lämpötila (°C)	Sisäpinnan lämpötila (°C)	Huomiot
Pakastekaappi, korkea (1–8)	Min: 10,5; Max: 19,1	Min: -12,1; Max: -4,9	Ovien 1d ja 5c lämpötilat ulkopinnalta matalia.
Pakasteallas (9–10)	Min: 11,5; Max: 12,9	Min: 10,0; Max: 12,0	Lämpötilat tasaisia.
Pakastekaappi, matala (11)	13,5	-9,3	Vain yhden oven tulokset kirjattu.
Kylmähylly, liha/vege (12–13)	Min: 13,9; Max: 14,1	Min: 11,7; Max: 13,0	Ulko- ja sisäpinnan ero pieni.
Kylmähylly, juomat (14)	Min: 13,9; Max: 14,1	Min: 13,7; Max: 13,9	Lämpötilat tasaisia.

Pakastekaappien ulkopinnan lämpötilat pysyivät pääosin lähellä sisäilman lämpötilaa (17–18 °C), mutta ovissa 1d ja 5c lämpötilat olivat matalampia (10–11 °C), mikä johtuu mahdollisesti eristyksen puutteesta tai lämpövastusongelmista. Sisäpinnan lämpötila oli keskimäärin noin –10 °C, joka on 5–10 °C säilytyslämpötilaa korkeampi ilmaverhon ja lasin sisäpinnan matalan emmissiivisyyden takia.

Pakastealtaiden yksilasikannet aiheuttivat ulko- ja sisäpinnan lämpötiloihin vain pieniä eroja. Sisäpinta oli keskimäärin noin 5–7 °C ympäröivää ilmaa viileämpi ja 28–30 °C säilytyslämpötilaa lämpimämpi.

Matalan pakastekaapin neljästä ovesta vain yhden oven mittaustulokset kirjattiin ylös, mutta lämpötila ei vaihdellut merkittävästi ovien välillä. Sisäpinnan lämpötila oli noin –9 °C, joka vastaa hyvin korkean pakastekaapin tuloksia. Ulkopinnan lämpötila oli noin 14 °C, joka on muutaman asteen ympäröivää ilmaa matalampi. Arvo vastaa hyvin kaksoislasiovea, jossa lämpövastukset eivät lämmitä ulkopintaa, ja lämpötilaero sisäilman ja lasin välille syntyy pinnan lämpövastuksesta.

Lämpökuvista pystytään havaitsemaan kylmän ja lämpimän pakastekaapin ero. Kuvasta 13 nähdään, että oven 1d lämpötila on huomattavasti alhaisempi kuin

viereisen oven 1c. Kuvassa on käytetty oletusemissiivisyyttä 0,95, joten lasin pintalämpötila ei ole kovin luotettava heijastuvan säteilyn takia. Oven karmi on kuitenkin mattapintainen, ja kuvasta nähdään, että oven 1d karmin lämpötila on alle 10 °C.



Kuva 13. Ovien 1c (vas.) ja 1d (oik.) lämpötilaero lämpökameralla kuvattuna.

Pakastealtaissa voidaan havaita kylmempiä kohtia reuna-alueilla tiivisteiden läheisyydessä (kuva 14). Joissain kohdissa oli nähtävissä myös silmällä havaittavia vuotoaukkoja.



Kuva 14. Pakastealtaiden lämpötilajakauma.

Tulosten analysointi

Pintalämpötilamittauksista havaittiin, että pakastekaappien ulkopinnan lämpötila pysyi yleensä lähellä sisäilman lämpötilaa, mutta joissain tapauksissa, kuten ovissa 1d ja 5c, lämpötila oli huomattavasti alhaisempi (n. 10 °C). Nämä poikkeamat viittaavat mahdollisiin karmilämmittimien toimintahäiriöihin tai heikkoon eristykseen. Ilman karmilämmittäjäkin ulkopinnan lämpötilan ei kuitenkaan odoteta laskevan niin alas, koska eristetty kaksilasiovi johtaa lämpöä heikosti. Ovien kylmemmät pinnat lisäävät kondenssin riskiä kosteina kesäkuukausina.

Mittaukset osoittivat, että ovet 1d ja 5c ovat ainoita, joissa ulkopinnan lämpötila laskee niin alas, että kondenssia muodostuu. Tämä ongelma voitaisiin todennäköisesti ratkaista tarkastamalla karmilämmittimien toiminta sekä ovien eristys ja tiiveys.

Pakastealtaan mittaustuloksista käy ilmi, että kylmä ilma painuu tiheämpänä alas vaakasuuntaisessa kalusteessa. Tämä aiheuttaa sen, että lasikannen välitörmässä läheisyydessä vallitseva lämpötila on huomattavasti säilytyslämpötilaa korkeampi. Säilytyslämpötilan käyttäminen laskennassa yhdessä kannen U-arvon kanssa johtaa näin ollen lämpötilan aliarviointiin, koska ilman kerrostumista ei oteta huomioon.

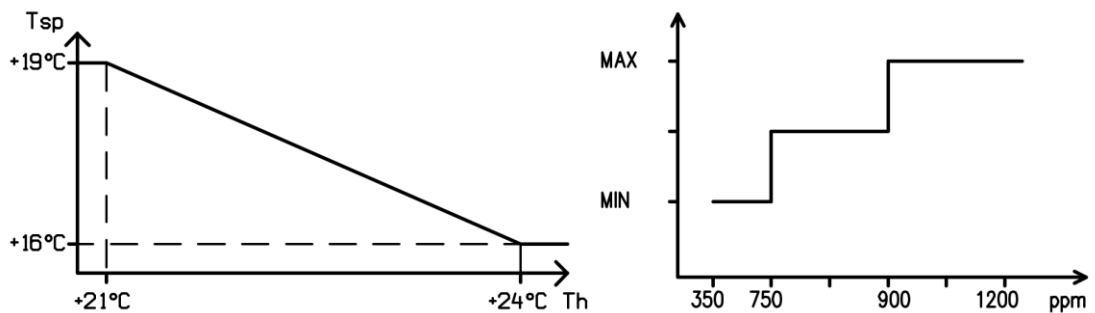
Kylmähylyjen lasiovien ulko- ja sisäpinnan lämpötilaero oli pieni, koska yksilasiovi johtaa hyvin lämpöä. Tämä lisää ulkopinnan kondenssiriskiä, koska lämpötila pysyy kaksilasiovea matalampana.

5.3 Sisäilmaston hallinta

Kohteen ilmastointi- ja lämmitysjärjestelmä

Myymälän kylmäsäilytys- ja pakastealueita palvelee 3 ilmastointikonetta: 303TK, 304TK ja 305TK. Kaikissa koneissa on nestekiertoinen LTO ja jäähdytyspatteri, joka on asennettu ilman virtaussuunnassa lämmityspatterin jälkeen. Tuloilman lämpötilaa säädetään kolmen huonelämpötila-anturin keskiarvon

perusteella. Tulo- ja poistoilmapuhaltimien pyörimisnopeutta säädetään kolmen huoneanturin CO₂-pitoisuuden keskiarvon mukaan portaallisesti (50–75–100 %), minkä lisäksi ilmamäärää voidaan säätää portaattomasti välillä 50–100 %, jos tuloilman lämpötila on minimiarvossaan ja jäähdytystarve kasvaa edelleen. Lämpötilan ja pyörimisnopeuden säätökäyrät on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Tuloilman lämpötilan säätö (vas.) ja puhaltimien pyörimisnopeuden säätö (oik.).

Ilmastoinnin jäähdytysverkoston mitoituslämpötilat ovat +10/+18 °C, ja jäähdytys tuotetaan kaukojäähdytyksellä. Jäähdytyspatterin tehoa säädetään 2-tieventtiilillä.

Myymälä lämmitetään puhallinkonvektoreilla, joiden lämmitystehoa säädetään huonelämpötila-anturilla moottoriventtiin asentoa ja puhaltimen pyörimisnopeutta muuttamalla. Konvektorit on sijoitettu kylmäkalusteiden läheisyyteen, jossa ne kompensoivat etenkin avokalusteiden jäähdyttävää vaikutusta.

Ilman kosteuden vaikutus kalusteiden kondenssiin

Ilmastoinnin jäähdytysverkoston korkea lämpötila (+10/+18) vähentää ilman kuivumista jäähdytyspatterissa, mikä nostaa sisäilman kastepistettä ja lisää kondenssiriskiä. Kun ulkoilmaa (28 °C / 60 %) jäähdytetään tuloilman lämpötilaan 17 °C, tuloilman absoluuttinen kosteus on noin 12 g/kg_{k.i.} ja kastepiste 16,8 °C.

Kuivaus on arvioitu luvun 4.2 eQ MASTER® -ilmankäsittelykoneella. Todelliseen prosessiin vaikuttaa kohteen jäähdytyspatterin ominaisuudet (ACON 2025.)

Tuloilma on melkein täysin vesihöyryllä kyllästettyä (suhteellinen kosteus ~98 %), joten on tärkeää, että tuloilma sekoittuu lämpimään sisäilmaan ennen kuin se päätyy kylmäkalusteiden eteen. K-Supermarket Postitalossa on matala huonekorkeus, joten jos tuloilman päätelaitteet on sijoitettu kylmäkalusteiden yläpuolelle, tuloilman vesihöyryä saattaa tiivistyä kylmille pinnoille.

Kylmähylyjen kondenssi saattaa viitata siihen, että myymälässä on liian kylmä kesällä. Mittausten mukaan lasin ulkopinta on noin 5 °C ympäröivää ilmaa kylmempi, joten pinnan lämpötila on noin 18 °C, kun ympäristön lämpötila on 23 °C. Tällöin kondenssi olisi epätodennäköistä. Mittausten ajankohdan takia lämpötilaa ei voitu mitata kesäaikaan, eikä rakennusautomaatiosta saatu trendidataa.

5.4 Ratkaisut ja kehitysehdotukset

Kondenssia voidaan estää tai ainakin vähentää kylmä- ja pakastekalusteiden varusteilla ja ominaisuuksilla sekä sisäilman kosteuden ja lämpötilan hallinnalla.

Kalusteiden ominaisuudet

Pakastekaappien kondenssiongelma ratkeaa todennäköisesti kondensoivien ovien karminlämmittimien toiminnan tarkastuksella, koska näiden kahden pakastekaappin ovien lämpötila oli huomattavasti muita alhaisempi. Myös lasien välissä olevassa kaasutilassa saattaa olla pieni vuoto, joka heikentää kaasun eristyskykyä ja laskee ulkopinnan lämpötilaa.

Pakastealtaiden kansien tiiveys kannattaa tarkistaa, koska lämpökuvauksesta oli havaittavissa kylmiä kohtia kannen reuna-alueilla. Näihin alueisiin tiivistyy todennäköisemmin vesihöyryä kuin kannen keskiosaan. Kansiin voidaan myös asentaa jälkiasennettavia kalvoja (AFF), jotka estävät kondenssia.

Kylmähyllysten kondenssiriskiä vähentäisi kaksilasiovien käyttö. Yksilasiovet ovat kuitenkin helppokäyttöisiä, joten niiden käyttö voi olla perusteltua. Kaksilasiovien jälkiasentaminen ei myöskään todennäköisesti ole kannattavaa, joten sitä kannattaa tarkastella vasta kylmäkalusteiden vaihdon yhteydessä. Lasioviin voidaan pakastealtaan kansien tapaan jälkiasentaa AFF.

Sisäilman kosteus

Jäähdytysverkoston korkean lämpötilan takia tuloilman kuivaus on rajallista, mikä nostaa sisäilman kastepistettä, jos kosteutta ei poisteta paikallisesti. Tuloilman merkittävä kuivaus on myös energiaintensiivistä, koska koko ilmavirta kuivataan, mutta vain murto-osa siitä palvelee kylmä- ja pakastealueita. Paikalliset kuivausratkaisut ovat hyvä vaihtoehto kalusteiden kondenssin estämiseen ilman, että myös muun myymälän tuloilmaa kuivataan tarpeettoman paljon.

Kohteessa on käytetty siirrettäviä paikallisia ilmankuivaimia, mikä on vähentänyt kondenssiongelmia jonkin verran. Lattialle asennettavat kuivaimet voivat kuitenkin tuoda esteettistä haittaa eivätkä ole välttämättä hyvä lopullinen ratkaisu. Markkinoilla on saatavilla myös kattoon tai seinälle asennettavia ilmankuivaimia, jotka sopivat pienen alueen ilman kuivaukseen.

Tuloilmaa voisi olla mahdollista kuivata enemmän, jos jäähdytysvesiverkoston lämpötilaa laskettaisiin. Kaukojäähdytys rajoittaa kuitenkin lämpötilan laskua, minkä lisäksi tuloilman ylijäähdytys kuivauksen mahdollistamiseksi vaatii jälkilämmityspatterin lisäämisen ilmastointikoneeseen tai tuloilmakanavaan.

Sisäilman lämpötila

Lämpötilan pitäminen 23–24 °C:ssa vähentää kondenssiriskiä, koska pinnat pysyvät lämpimämpinä. Tämä parantaa asiakasmukavuutta kesäaikaan ja säästää jäähdytyskustannuksissa. Todennäköisesti tuloilman lämpötila voidaan pitää 16 °C:ssa kuivauskapasiteetin maksimoimiseksi ilman, että sisäilman lämpötila laskee tavoitearvosta. Avoimien kalusteiden edessä lämpötila on paikallisesti alhaisempi, mutta suljetut kalusteet ja huurtuvat lasipinnat sijaitsevat näistä

erillään. Ilmavirran säätö CO₂-pitoisuuden mukaan mahdollistaa ilmavirran säädön henkilömäärän mukaan, ja ilmamäärän kasvaessa myös sisäiset lämpökuormat kasvavat, mikä kompensoi jäähdytystehoa.

Kuivat elintarvikkeet ja täyssäilykkeet kestävät jopa +30 °C:n lämpötilaa, mutta monet hedelmä- ja vihannestuotteet (HeVi) ovat lämpötilaherkkiä. Useimpien HeVi-tuotteiden optimaalinen säilytyslämpötila on alle +15 °C, minkä vuoksi niitä ei yleensä säilytetä pitkiä aikoja huoneenlämmössä vaan kylmäkalusteissa tai -huoneissa. Lämpötilan vaikutus riippuu oleellisesti sekä lämpötilan noususta että siitä, kuinka kauan tuote on huoneenlämmössä. Vilkkaimmissa myymälöissä nopeasti kiertävät tuotteet, kuten tomaatti, kurkku ja banaani, säilytetään usein huoneenlämmössä, koska ne myydään ennen laadun heikkenemistä. (Tuotteiden asettamat vaatimukset ja pakkaukset; Säilytyslämpötilat.)

Kalusteiden eteen asennettuja puhallinkonvektoreita voisi olla mahdollista hyödyntää paikalliseen lämmitykseen kesällä siten, että pinnat pysyvät lämpimämpinä. Tämä on hyvä vaihtoehto ilmanvaihdon jälkilämmityspatterin asentamiselle, koska erillisiä asennustöitä tai investointeja ei tarvita.

6 Yhteenveto

Työssä selvitettiin, miten yhtäältä kylmä- ja pakastekalusteet vaikuttavat myymälän sisäilmaan ja miten toisaalta sisäilma vaikuttaa kalusteiden toimintaan. Työllä pyrittiin antamaan lisätietoa kylmäkalusteiden sisäilmaa jäähdyttävästä vaikutuksesta ja tuomaan esille, ettei kylmäkalusteiden kuivaava vaikutus ole olennainen osa myymälän sisäilman kosteuden hallintaa. Työssä käsiteltiin kylmä- ja pakastekalusteiden lasiovien ja -kansien huurtumista ja huurtumisenestokeinoja, minkä lisäksi tarkasteltiin tuloilman todellista kuivaustarvetta huurtumisen kannalta, jotta sisäilman mahdollisesti tarpeettoman suuri kuivaus voidaan välttää.

Myymälän sisäilmaston hallintaa, erilaisia kylmäkalusteita ja kalusteiden lasipintojen lämpötilaa tarkasteltiin teoreettisesti laskelmilla ja Mollier-diagrammissa. Teoriaa tuettiin tutkimalla K-Supermarket Postitalon kalusteiden kondenssiongelman syitä ja mahdollisia ratkaisuja. Kohteessa mitattiin lasiovien ja -kansien pintalämpötiloja, mikä tukee sisäilman kastepisteen määrittämiseen käytettäviä lämpötiloja.

Kirjallisuuden ja laskelmien perusteella suljettujen kalusteiden ympäristöä jäähdyttävä vaikutus on olematon, eikä se vaadi huomiointia lämmityksen mitoituksessa. Suljetun kalusteen latentti teho on myös pieni, eikä se juurikaan kuivaa ilmaa. Näin ollen kaluste toimii juuri niin kuin sen on tarkoituskin eli ylläpitää sopivaa lämpötilaa elintarvikkeiden säilymiseksi. Avokaluste sen sijaan jäähdyttää ympäristöä voimakkaasti, minkä lisäksi sen latentti teho on merkittävä. Avokalusteen kuivaava vaikutus on lähtökohtaisesti kuitenkin sivutuote, joka tulisi minimoida kylmälaitoksen energiatehokkaan toiminnan varmistamiseksi.

Sisäilman ja kylmäkalusteiden vuorovaikutus osoittautui laajaksi aiheeksi, ja opinnäytetyön sisältö olisi ollut hyvä rajata tarkemmin. Sisäilman lämpötilan ja kosteuden vaikutusta avoimiin kylmäkalusteisiin on käsitelty paljon vieraskielisissä akateemisissa tutkimuksissa, mutta suljetuista kalusteista ei löydy yhtä paljon vastaavaa tietoa. Lisäksi aiemmissa tutkimuksissa keskitytään

nimenomaan kylmäkalusteen energiatehokkuuden maksimointiin, kun taas tässä työssä oli alun perin tarkoitus selvittää kalusteiden vaikutus sisäilmaan ilmastoinnin ja lämmityksen näkökulmasta.

Kalusteiden tarkkaa jäähdyttävää ja kuivattavaa vaikutusta on vaikea selvittää, koska vaikutus on kalustekohtainen ja riippuu voimakkaasti ympäristön olosuhteista. Edes kylmäkalusteiden jäähdytystehon komponentteja ei ole suljetuille kalusteille laajasti saatavilla, ja avoimien kalusteiden jäähdytystehon komponenteissa latenttia ja tuntuva tehoa ei ole usein selkeästi eroteltu. Kirjallisuus on osittain vanhentunutta, mikä vaikeuttaa tiedon soveltamista nykyaikaisiin kalusteisiin. Kalustevalmistajat eivät myöskään jaa kaikkia tietoja, mikä vaikeuttaa tarkempaa tutkimista.

Kalusteiden jäähdyttävää ja kuivattavaa vaikutusta ei pystytty tarkasti selvittämään, mutta se ei ole yleensä oleellistakaan, paitsi avokalusteilla toteutetussa myymälässä. Siirtymä lasiovilla varustettuihin kalusteisiin on kuitenkin käynnissä, joten huomio kannattaa siirtää ilmastoinnin jäähdytystarpeen tarkastelemiseen kalusteiden ilmastointiominaisuuksien sijaan.

Suljettuja kalusteita käytettäessä korostuu lasiovien huurtumisen estäminen, joka Suomessa yleensä toteutetaan tuloilman kuivauksella. Tuloilman kuivauksen lisäksi tulisi tarkastella lasiovien eristystä, kalvoja (AFF), lämmittimiä (ASH) ja paikallisia kuivausratkaisuja. Työssä todettiin, että riittävä tuloilman kuivauskapasiteetti saavutettaisiin perinteisellä koneella, jossa jäähdytyspatteri on lämmityspatterin jälkeen ja jäähdytysvesiverkoston lämpötila on +7/+12 °C. Uusilla hyvin eristetyillä kalusteilla myymälän kastepiste voitaisiin nostaa 4–5 °C korkeammaksi, mikä mahdollistaa tämän perinteisemmän ilmastointijärjestelmän käytön ylijäähdytyksen ja jälkilämmityksen sijaan.

Työssä käsitelty esimerkkikohte, KSM Postitalo, ei vastaa tyypillistä myymälää, mikä vaikeuttaa tulosten soveltamista. Esimerkiksi kalusteiden lasipintojen lämpötilamittaukset olisi hyvä toteuttaa vielä toisessa myymälässä, jossa on kaksilasiovet ja uusin teknologia kondenssin estämiseen. Talviaikaan toteutetut

mittaukset eivät myöskään vastaa olosuhteita, joissa kondenssiongelma esiintyy. Tarkempien tulosten saamiseksi mittaukset tulisi toteuttaa vuoden kosteimpaan aikaan heinä-syyskuussa.

Tätä työtä tullaan hyödyntämään kylmä-, ilmastointi- ja lämmitystekniikan integraatiossa siten, että kylmäkalusteille saavutetaan sopivat olosuhteet ilman, että tuloilmaa tarpeettomasti käsitellään. Kylmäkalusteiden kuivaava vaikutus ei ole relevantti lähtötieto, joten se voidaan lähtökohtaisesti poistaa kylmäsuunnitteluaineistosta. Suljettujen kylmäkalusteiden ilmaa jäähdyttävän vaikutuksen huomioiminen lämmitystehon mitoituksessa ei ole välttämättä tarpeen, koska käytännössä jo valaistuksen lämpökuorma riittää kattamaan tämän lämpöhäviön. Lämmitysteho mitoitetaan ilman lämpökuormia, joten suljettujen kalusteiden mahdollisesti yliarvioidun jäähdytysvaikutuksen lisääminen lämmitystehoon kasvattaa järjestelmän ylimitoitusta entisestään.

Lähteet

ACON. Versio 3.33.133826. 2025. Ilmankäsittelykoneiden valintaohjelma. Verkkoaineisto. FläktGroup.

<<https://acon.flaktgroup.com/WebApp/Fläkt.Acon.WebApp/home.aspx>>. Käytetty 27.1.2025.

Aittomäki, Antero (toim.). 2008. Kylmäteknikka. 3. painos. Helsinki: Suomen kylmäteknistys.

ASHRAE. 2023. 2023 ASHRAE Handbook: HVAC applications, SI edition, luku 2. Peachtree Corners, GA: ASHRAE.

CO₂ Booster System Technology Explained. Verkkoaineisto. Hillphoenix.

<<https://www.hillphoenix.com/wp-content/uploads/2018/02/Advansor-White-Paper-RS-CO2-Transcritical-Booster-Systems-Explained.pdf>>. Luettu 23.1.2025.

CoolFlow® Waterloop -kylmäjärjestelmä on taloudellisempi tapa toteuttaa kaupan kylmäkalustus. Verkkoaineisto. Coolfors.

<<https://www.coolfors.com/coolflow/>>. Luettu 23.1.2025.

Esimerkkejä elintarvikkeiden säilytyslämpötiloista. 2023. Verkkoaineisto. Ruokavirasto.

<<https://www.ruokavirasto.fi/elintarvikkeet/elintarvikeala/hygieninen-toiminta/tuotanto--ja-kasittelyhygienia/elintarvike/esimerkkeja-elintarvikkeiden-sailytyslampotiloille/>>. Päivitetty 30.11.2023. Luettu 7.12.2024.

Evans, Judith & Foster, Alan. 2016. Sustainable retail refrigeration. E-kirja. John Wiley & Sons, Incorporated.

Faramarzi, R. 1999. Efficient display case refrigeration. ASHRAE journal. Vol. 41, s. 46–54.

Faramarzi, Ramin; Coburn, Bruce & Sarhadian, Rafik. 2002. Performance and energy impact of installing glass doors on an open vertical deli/dairy display case. ASHRAE Transactions. Vol. 108, s. 673–679.

FLIR E8. 2014. Verkkoaineisto. FLIR Systems, Inc. <<https://docs.rs-online.com/37bd/0900766b81371928.pdf>>. Luettu 6.1.2025.

Humar, Iztok; Hudomalj, Uroš; Marinšek, Alexander & Umberger, Mark. 2022. Optimizing the Power Usage of Anti-Sweat Heaters in Glass-Door Refrigerators According to the Dew Point. Energies. Vol. 15 (13), ID 4601.

IAQ-CALC™ INDOOR AIR QUALITY METERS. 2012. Verkkoaineisto. TSI Incorporated. <https://tsi.com/getmedia/a19eb5ac-cb83-4381-8c98-9aecc99f0824/7515-25-45_IAQ-Calc_A4_5001008-web?ext=.pdf>. Luettu 6.1.2025.

Kaappola, Esko; Hirvelä, Aulis; Jokela, Matti & Kianta, Jani. 2018. Kylmäteknii-
kan perusteet. 5. painos. Helsinki: Opetushallitus.

Lavento, Dakota. 2022. Verkkoaineisto. Myymäläkylmää tehdään turvallisesti ja
energiatehokkaasti. KylmäExtra. <<https://kylmaextra.fi/teemat/myymalakylymaa-tehdaan-turvallisesti-ja-energiatehokkaasti/>>. Luettu 23.1.2025.

Lehtoviita, Timo. 2020. Rakennusfysiikkaa rakennusinsinööreille. Kosteus,
kappale 4. Verkkoaineisto. Terveet tilat 2028 -ohjelma. Ympäristöministeriö.
<https://tilatjaterveys.fi/documents/39510712/102937006/Rakennusfysiikan+op-pimateriaali+insinööri+koulutukseen_Kosteus.pdf>. Luettu 29.12.2024.

Lämpötila ja kosteus. Verkkoaineisto. Ilmatieteen laitos.
<<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/lamopotila-ja-kosteus-kysymyksiä-ja-vastauksia>>. Luettu 15.10.2024.

Länsiluoto, Mikko. 2024. Kauppias, K-Supermarket Postitalo, Helsinki. Teksti-
viestikeskustelu 17.12.2024.

Mollier Sketcher. Versio 2.b. 2004. IV Produkt AB.

Niemelä, Tuomo. 2024. Keskon päivittäistavarakauppianteistojen kosteusvaa-
timusten päivitys. Yrityksen sisäinen aineisto. Granlund Oy.

NordicLine. 2025. Verkkoaineisto. Epta S.p.a.
<<https://www.costan.com/fi/products/product-family/nordicline>>. Luettu
20.10.2024.

Opas ilmanvaihdon mitoitukseen muissa kuin asuinrakennuksissa. 2020.
Verkkoaineisto. FINVAC ry. <https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Opas-ilmanvaihdon-mitoitukseen-muissa-kuin-asuinrakennuksissa_2019b-D9B578DC_66D4_44BC_B1AE_DCAB875D5907-144726.pdf/9f1ca28e-57de-3fa4-5388-a00f4d973afb/Opas-ilmanvaihdon-mitoitukseen-muissa-kuin-asuinrakennuksissa_2019b-D9B578DC_66D4_44BC_B1AE_DCAB875D5907-144726.pdf?t=1603260098252>. Korjattu 28.1.2020. Luettu 5.12.2024.

Orlandi, Maurizio; Visconti, Federico & Zampini, Samuele. 2013. CFD Assisted Design of Closed Display Cabinets. Verkkoaineisto. 2nd IIR International Conference on Sustainability and the Cold Chain. <https://www.researchgate.net/profile/Samuele-Zampini/publication/236120199_CFD_ASSISTED_DESIGN_OF_CLOSED_DISPLAY_CABINETS/links/02e7e5162a0ebbf2d1000000/CFD-ASSISTED-DESIGN-OF-CLOSED-DISPLAY-CABINETS.pdf>. Luettu 20.12.2024.

Pihlajamaa, Jari. 2023. KSM ja KM LVIA-tekniikka. Yrityksen sisäinen aineisto. Kesko Oyj.

Sandberg, Esa (toim.). 2014a. Ilmastointilaitoksen mitoitus, ilmastointitekniikka osa 2. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.

Sandberg, Esa (toim.). 2014b. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät, ilmastointitekniikka osa 1. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.

SFS-EN 673:2024. Glass in building. Determination of thermal transmittance (U value). Calculation method. Suomen Standardoimisliitto.

SFS-EN ISO 23953-2:2024. Refrigerated display cabinets. Part 2: Classification, requirements and test conditions. Suomen Standardoimisliitto.

Säilytyslämpötilat. Verkkoaineisto. Kotimaiset Kasvikset ry. <<https://kasvikset.fi/kasvitieto/kasvisten-sailytyksesta/sailytyslampotilat/>>. Luettu 11.1.2025.

Säähavainnot Kaisaniemi. Muuttujana kastepistelämpötila, 2023. 2024. Verkkoaineisto. Ilmatieteen laitos. <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus/>>. Luettu 6.10.2024.

Testo 925. 2017. Testo 925 – Temperature measuring instrument for TC Type K with App connection. Verkkoaineisto. Suomen Lämpömittari Oy. <<https://www.suomenlampomittari.fi/wp-content/uploads/2017/03/Testo-925-UUSI.pdf>>. Luettu 20.12.2024.

The Best Temperature for Retail Stores. 2018. Verkkoaineisto. The Severn Group. <<https://www.theseverngroup.com/temperature-for-retail-stores/>>. Luettu 23.1.2025.

Tuotteiden asettamat vaatimukset ja pakkaukset. Verkkoaineisto. Yhteinen Toimialaliitto ry (YTL). <<https://ytl.fi/neuvottelukunnat/atp-lampotilahallittavien-elintarvikkeiden-kuljetukset/kylmaketju/tuotevaatimukset-ja-pakkaukset/>>. Luettu 11.1.2025.

