



JÄÄHALLIEN ENERGIAEHO- KAS SISÄILMASTON HALLINTA

Kangasalan Jäähalli

Joona Myllymäki

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2019

Talotekniikka
LVI-talotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Talotekniikka
LVI-talotekniikka

MYLLYMÄKI, JOONA:

Jäähallien energiatehokas sisäilmaston hallinta
Kangasalan Jäähalli

Opinnäytetyö 114 sivua, joista liitteitä 11 sivua
Huhtikuu 2019

Työssä tutkittiin jäähallien tyypillisiä sisäilmaolosuhteita, sekä teknillisiä ratkaisuja, joilla sisäilmaa voidaan hallita energiatehokkaasti. Vertailukohteenä työssä oli Kangasalan jäähalli, jonka sisäilmaolosuhteiden toteutumista ja toimivuutta tutkittiin mittausten ja havaintojen avulla.

Työ koostuu teoriaosuuksista, vertailukohteen esittelystä, mittaustulosten esittämisestä, sekä vertailukohteen parannusehdotuksista, koskien energiatehokkuutta ja sisäilmaolosuhteiden hallintaa. Ensimmäisessä teoriaosuudessa käsitellään erilaiset hallityypit, sisäilmaolosuhteiden suunnitteluvarot ja jäähallien energijärjestelmät. Toinen teoriaosuus käsittelee jäähallien sisäilmaston hallintaan liittyviä seikkoja, kuten ilmavaihtokoneita, ilmavirtoja, kosteutta, ilman kuivastusta ja lämpökuormia.

Työn tarkoituksena oli teoriaosuuksiin nojautuen selvittää vuonna 1996 Kangasalle rakennetun jäähallin nykyiset sisäilmaston hallintaan liittyvät ratkaisut, niiden energiatehokkuus, ja kyky hallita olosuhteita sisätiloissa. Jäähalli on yli 20 vuotta vanha, ja ilmanvaihtojärjestelmä on lähes ainoa kohde, jota ei ole saneerattu tuona aikana. Mahdollisiin ongelma- ja kehityskohtiin on syytä kiinnittää huomiota, jotta jäähalli säilyttää toimintakykynsä turvallisena urheilupaikkana myös jatkossa.

Työssä saavutettujen tulosten avulla voitiin päätellä, että tarpeenmukainen ilmanvaihto on olennainen osa jäähallien sisäilmastonhallintaa. Käyttäjäsot ja kuormat vaihtelevat jäähalleissa suuresti, mistä syystä tilojen ilmanvaihto on toteutettava nykyaikaista automaatiota ja valvontajärjestelmää hyödyntäen. Tarpeenmukaisilla ilmavirroilla saavutetaan tilan käyttöjaksoon nähden riittävä ilmanvaihto, joka turvaa myös rakenteiden pitkäikäisyyttä, ja säästää energiaa.

Asiasanat: jäähalli, sisäilmasto, energiatehokkuus

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Building Services Engineering
HVAC Systems

MYLLYMÄKI, JOONA:
Energy Efficient Management of Indoor Climate in Hockey Halls.
Kangasala's hockey hall

Bachelor's thesis 114 pages, appendices 11 pages
April 2019

This thesis considers the typical indoor circumstances in ice hockey halls, and energy efficient solutions and systems which are part of indoor climate management. Comparative circumstances and functionality of indoor climate were measured and observed in Kangasala's hockey hall.

Thesis consists of two theory parts, introduction of comparison hall, presentation of measurement results and suggestions for improving energy efficiency and management of indoor climate. The first theoretical part discusses the different types of hockey halls, design values for indoor circumstances, and energy systems in hockey halls. The second theoretical part deals with issues related to indoor climate management, such as air handling units, air flows, humidity and heat loads.

The purpose of this thesis was to find out the current systems concerning indoor climate management in Kangasala's hockey hall, as well as energy efficiency of the systems and ability to manage circumstances indoor. The hockey hall is over 20 years old and the ventilation is nearly the only system that has not been renovated during that time. Paying attention to possible trouble and improvement sights is needed so that the hockey hall maintains its ability of being a safe place for sport actions in future as well.

The results in this thesis lead to a conclusion that demand-based ventilation is a relevant part of managing the indoor climate in hockey halls. Usage periods and loads in different spaces of the hall vary greatly, which means that the ventilation must be fulfilled using modern automation and control systems. Suitable airflows not only provide sufficient ventilation, but also secure the longevity of structures and save in energy costs.

Key words: hockey hall, indoor climate, energy efficiency

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	TEORIAA JÄÄHALLEISTA	8
	2.1 Käyttötarkoitus	8
	2.2 Hallityypit ja suunnitteluarvot.....	9
	2.2.1 Harjoitushalli	9
	2.2.2 Pieni kilpailuhalli	10
	2.2.3 Suurhalli ja kilpailuhalli	11
	2.3 Tilatarpeet	13
3	ENERGIANKÄYTTÖ.....	14
	3.1 Kylmälaitteisto ja lauhde-energia	16
	3.1.1 Jäähdytystehon tarve	18
	3.1.2 Käytössä olevat kylmäaineet	19
	3.2 Tilalämmitys	20
	3.2.1 Lämmitystehontarve	21
	3.3 Käyttövesi	21
	3.3.1 Jäänhoitovesi	22
	3.4 Valaistus	23
	3.5 Ilmanvaihto.....	24
	3.5.1 Lämmöntalteenotto.....	27
	3.5.2 Puhallinmallit	31
4	SISÄILMAOLOSUHTEIDEN HALLINTA	33
	4.1 Ilmanvaihtokoneet ja tilojen ilmapirrat	34
	4.1.1 Kiertoilma ja ilmojen sekoittuminen	37
	4.1.2 Ilman lämmitys.....	39
	4.1.3 Ilmanjako	41
	4.2 Kosteus	42
	4.2.1 Kosteuden liikkuminen.....	44
	4.2.2 Tilojen paineistaminen.....	46
	4.2.3 Virtauskatve.....	48
	4.2.4 Kosteuskuormat.....	49
	4.3 Ilman kuivatus	51
	4.3.1 Kondenssikuivain.....	52
	4.3.2 Sorptiokuivain.....	54
	4.3.3 Suora ulkoilman kuivatus.....	55
	4.3.4 Kondenssikuivaimen kuivatustarve ja energiakulutus	56
	4.3.5 Sorptiokuivaimen tehontarve	59

4.4	Ilman epäpuhtaudet	60
4.5	Lämpökuormat	62
4.5.1	Konvektion lämpökuorma	62
4.5.2	Lämpösäteilyn lämpökuorma.....	63
4.5.3	Jäänhoidon lämpökuorma	65
4.5.4	Ilmasta jäähän kondensoituvan veden lämpökuorma	65
4.5.5	Valaistuksen lämpökuorma	67
4.5.6	Ihmisistä syntyvä lämpökuorma.....	67
4.5.7	Maan lämpökuorma.....	68
4.5.8	Kylmäliuospumpun lämpökuorma.....	69
4.5.9	Lämpökuormat lämpimistä tiloista	69
5	KANGASALAN JÄÄHALLI OY	70
5.1	Kohteen yleistiedot.....	70
5.2	Käyttöolosuhteet	72
5.3	Energiankulutus	72
5.4	Valaistus	74
5.5	Lämmitysjärjestelmä	74
5.6	Kylmäjärjestelmä.....	74
5.7	Ilmanvaihtojärjestelmä	76
5.7.1	Hallitilan ilmanvaihtokone	77
5.7.2	Sosiaalitilojen tulo- ja poistoilmakoneet.....	79
6	MITTAUKSET	82
6.1	Lämpötila-, kosteus- ja hiilidioksidimittaukset.....	82
6.1.1	Katsomo	83
6.1.2	Pukuhuonekäytävä	83
6.1.3	Kaukalon pääty ja vaihtoaitio.....	85
6.1.4	Varustekoppi	86
6.1.5	Pukuhuone	87
6.2	Ilmavirtamittaukset	88
6.3	Valaistusmittaukset	90
6.4	Lämpökameramittaukset.....	92
7	ENERGIANSÄÄSTÖ- JA PARANNUSEHDOTUKSET	94
7.1	Sosiaalitilojen ilmanvaihto	94
7.2	Hallitilan ilmanvaihto	95
7.3	Muut	96
8	POHDINTA	98
	LÄHTEET.....	99
	LIITTEET	104
	Liite 1. Liiga-joukkueiden jäähallit. (Liiga, 2019)	104

Liite 2. IV-kone osana lauhdutus- ja kylmäenergiaa. (Oy Yleiskylmä-Findri Ltd., 2019).....	105
Liite 3. Mollier-diagrammi.....	106
Liite 4. Jään pintalämpötilaa vastaavan kylläisen tilan vesisisältö. (Laitinen, 2010).....	107
Liite 5. Mittalaitteiden tarkkuustiedot.....	108
Liite 6. Katsomon mittaukset (27.-28.2.2019)	109
Liite 7. Pukuhuonekäytävän mittaukset (27.-28.2.2019).....	110
Liite 8. Kaukalon päädyn/vaihtoaition mittaukset (2.-3.2.2019).....	111
Liite 9. Varustekopin mittaukset (27.-28.2.2019).....	112
Liite 10. Pukuhuoneen mittaukset (27.-28.2.2019)	113
Liite 11. Sosiaalitilojen ilmavirtamittaukset.....	114

1 JOHDANTO

Tässä työssä tutustuttiin ja selvitettiin jäähallien tyypilliset sisäilmaolosuhteet, niihin vaikuttavat tekijät, sekä ratkaisut, joilla sisäilmaa voidaan hallita energiatehokkaasti. Jäähallin sisäilmasto poikkeaa kylmän sisäilmansa takia tavallisesta liikuntahallista, minkä vuoksi mm. kosteuden hallintaan tulee erityisesti kiinnittää huomiota. Jäähallin sisäilmasto vaikuttaa olennaisesti myös jään laatuun, millä luodaan mahdollisuus harrastaa jääurheilua käyttöaktiivisuudesta tai ulko-olosuhteista riippumatta.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää Kangasalan jäähallin sisäilmasto-olosuhteet mittaamalla lämpötiloja, kosteutta, hiilidioksidia ja toteutuneita tulo- ja poistoilmavirtoja jäähallin eri tiloissa. Mittausten ja havaintojen perusteella pohdittiin nykyisen sisäilmaston toimivuutta, hallittavuutta, sekä energiansäästömahdollisuuksia.

Teoriaosuuksissa käsitellään erilaiset jäähallityypit, käyttötarkoitukset, suunnitelluarvot, jäähallien energiankäyttö, ja sisäilmasto-olosuhteiden hallintaan liittyvät kuormat ja ratkaisut. Teoriaosuuksien jälkeen siirrytään vertailukohteen esittelyyn ja mittaustulosten esittämiseen. Työn loppupuolella käsitellään mittaustuloksiin ja havaintoihin perustuen energiansäästömahdollisuuksia, joita vertailukohteessa voitaisiin toteuttaa.

Valitsin tämän aiheen työlleni, koska jäähallit jo itsessään ovat aikaisemman jääkiekkoharrastuksen kautta lähellä sydäntä. Nykyisen jäähallin sisäilmasto ja energiansäästömahdollisuudet on kannattava selvittää, jotta jäähalli voi energiaa ja luontoa säästäen toimia jatkossakin moitteettomasti, turvaten kuntalaisille liikunta- ja harrastusmahdollisuuksia.

2 TEORIAA JÄÄHALLEISTA

Vuonna 1862 Montrealin kaupungin katujen väliin rakennettu jäärata, Victoria Skating Rink, määräsi nykyaikaisen kaukalon muodon ja koon, vaikuttaen täten myös jäähallien kokovaatimuksiin. Kyseinen jäärata oli 60 metriä pitkä ja 25 metriä leveä. Tänä päivänä Pohjoisamerikkalaisen kaukalon mitat ovat lähes samat, ollen 61 x 26 m. Ensimmäinen jäähalli rakennettiin Montrealiin 13 vuotta myöhemmin, vuonna 1875. (Podnieks, 2008) (A&E Television Networks, 2018)

Suomen ensimmäinen jäähalli valmistui Tampereelle Hakametsään vuonna 1965. Koulukadun tekojääradan olosuhteet eivät miellyttäneet katsojia, eikä seuroja, ja lisävauhtia jäähallin rakentamishaaveille antoi Suomelle myönnetyt jääkiekon MM-kisat vuodelle 1965. Helsinkiin suunnitellun jääkiekkohallin rakennus-hanke ei edennyt, mistä syystä ensimmäiset MM-kisat Suomessa pelattiin Hakametsän jäähallissa 1965. (Ilves, 2019)

2.1 Käyttötarkoitus

Jäähallien ensisijainen käyttötarkoitus on toimia liikuntapaikkana, jossa voidaan harrastaa jääturheilulajeja, kuten jääkiekkoa, curlingia, taitoluistelua, kaukalopalloa ja ringetteä. Jääradan päälle koottavalla muovimatolla on mahdollista harrastaa rullakiekkoa tai muita pallopelejä. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 6)

Urheilutapahtumien lisäksi jäähalleissa voidaan hallityypin mukaan järjestää tilaisuuksia, kuten konsertteja, messuja, kokouksia ja näyttelyitä. Pienemmissä kunnissa jäähalli on usein suurin kokoontumispaikka, jossa on mahdollista järjestää yleisötapahtuma. Hallin monitoimikäyttö on kuitenkin taloudellisesti merkittävää vain suurilla asutusalueilla, ja jäähallin tarkoituksenmukainen toiminta ja kannattavuus tulisikin saavuttaa vain liikuntaan liittyvässä toiminnassa. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 6)

2.2 Hallityypit ja suunnitteluarvot

Suunniteltavan jäähallin hallityyppi määrittyy käyttötarkoituksen, kunnan tai kaupungin asukasmäärän ja urheilullisten edellytysten mukaan. (Jäähallit ja tekojääkentät, 1999, s. 29)

Erilaisia hallityyppejä ovat katettu tekojääkenttä, harjoitushalli, pieni kilpailuhalli, kilpailuhalli ja suurhalli. Seuraavissa luvuissa ei käsitellä katettua tekojääkenttää, jonka olosuhteet määräytyvät ulkoilman mukaan.

2.2.1 Harjoitushalli

Harjoitushallia käytetään pääasiassa harjoitteluun, mutta sitä voidaan käyttää myös juniorijääkiekko- ja alimpien sarjatasojen otteluiden järjestämiseen. (Jäähallien valaistusohje, 2014, s. 6) Jääkentän kokovaatimus on minimissään 56 x 26 m ja maksimissaan 61 x 30 m. Harjoitushallin katsomopaikkoja on 0-300 kpl. (Jäähallit ja tekojääkentät, 1999, s. 29)



Kuva 1. Maan alla, väestönsuojan yhteyteen rakennetussa Hervannan harjoitushallissa on käytössä 2 jäärataa. (Tuho Hockey, s. 2017)

Kentän lämpötilan tulee olla +2...+6 °C, joka mitataan 1,5 m korkeudelta kentästä. Taitoluistelukäytössä lämpötilan ohjeistettu arvo on +6 °C. Katsomon operatiivisen lämpötilan suunnitteluarvo on +10 °C. Jään lämpötila voi harjoitus- tai ottelutilanteesta riippumatta olla -3 °C. Arvot on esitetty taulukossa 1.

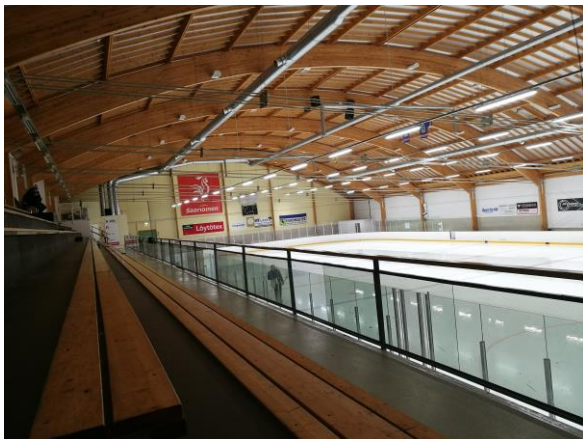
Taulukko 1. Harjoitushallin lämpötilojen suunnitteluarvoja. (Jäähallit ja tekojääkentät, 1999, s. 40)

Kentän lämpötila °C	Katsomon lämpötila °C	Jään lämpötila °C
+2...+6	+10	-3
+6 (taitoluistelu)		

Harjoitushalleissa ja muissa hallityypeissä suhteellisen kosteuden tulisi olla maksimissaan 70%. Sisäänpuhallettavan ilman tilavuusvirta mitoitetaan henkilömäärän mukaan, ollen sama kaikissa hallityypeissä. Suunnitteluarvo katsojaa kohden on 4-8 l/s, ja pelaajaa/luistelijaa kohden 12 l/s. (Jäähallit ja tekojääkentät, 1999, s. 40)

2.2.2 Pieni kilpailuhalli

Pienessä kilpailuhallissa voidaan järjestää Suomi-sarjan, 2-divisioonan ja nuorten Liigan/Mestiksen välisiä jääkiekko-otteluita (Jäähallien valaistusohje, 2014, s. 6). Kentän koko on minimissään 58 x 28 m, ja maksimissaan 60 x 30 m. Katso-mopaikkoja pienessä kilpailuhallissa on 300-1500 kpl. (Jäähallit ja tekojääkentät, 1999, s. 29)



Kuva 2. Kangasalan jäähalli on hallityypiltään pieni kilpailuhalli.

Pienen kilpailuhallin jääkenttälämpötilan suunnitteluarvot ovat käytöstavasta riippuen +6...+12 °C. Katsomon operatiivisen lämpötilan suunnitteluarvo on +15 °C. Jään lämpötilalle annetut suunnitteluarvot ovat käytötavan mukaan -3...-5 °C. Muussa, kuin jääurheiluun liittyvässä toiminnassa, tulisi lämpötilan kenttä ja katsomoympäristössä olla +18 °C. Arvot on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Pienen kilpailuhallin lämpötilojen suunnitteluarvoja. (Jäähallit ja tekojääkentät, 1999, s. 40)

Kentän lämpötila °C	Katsomon lämpötila °C	Jään lämpötila °C
+6	+15	-3
+12 (taitoluistelukilpailu)		-4 (taitoluistelukilpailu)
+18 (muu käyttö)		-5 (jääkiekkopeli)

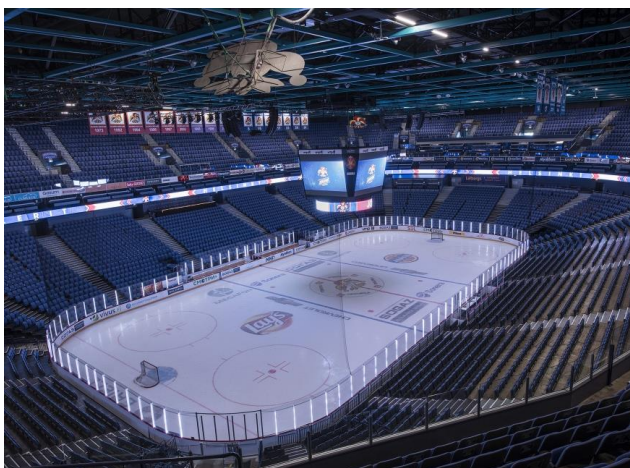
Suhteellisen kosteuden jäähallissa tulisi olla 70%, pl. muu toiminta, johon ei ole annettu suunnitteluarvoa. Sisäänpuhallettavan ilman suunnitteluarvoina käytetään samoja arvoja, kuin harjoitushallissa. (Jäähallit ja tekojääkentät, 1999, s. 40)

2.2.3 Suurhalli ja kilpailuhalli

Suurhallit eroavat kilpailuhalleista siten, että niiden katsomokapasiteetti on suurempi, ja hallin tilatarjonta on muutenkin sellaisella tasolla, että siellä voidaan toteuttaa kansainvälisiä tapahtumia. Kilpailuhalleissa voidaan pelata pääsarjatason

Liiga-otteluita, sekä alemman sarjatason otteluita, kuten Mestis-otteluita (Jääkiekon mestaruussarja). Molemmat hallityypit soveltuvat monitoimikäyttöön, ja hallit ovat myös varustettu TV-valmiudella. (Jäähallien valaistusohje, 2014, s. 3)

Tyypillinen suurhalli Suomessa on Helsingissä sijaitseva Hartwall-areena, jonka katsomokapasiteetti jääkiekko-otteluissa on 13 349, ja konserteissa 15 000. (Jokerit Hockey Club Oy, 2019) Tampereelle 2022 valmistuva Kansiareena voidaan myös luokitella suurhalliksi, sillä areenan katsomokapasiteetti tulee olemaan noin 13 000-14 000 ihmistä. (Kansiareena.fi, 2019)



Kuva 3. Hartwall Arena on tyypillinen suurhalli Suomessa. (Hartwall Arena, 2019)

Kentän koko suurhalleissa on suunnitteluarvojen mukaan 60 x 30 m, ja kilpailuhalleissa 58 x 28 m tai 60 x 30 m. Katsomokapasiteetti suurhalleissa on 6000-20 000, ja kilpailuhalleissa 1500-6000 henkilöä. (Jäähallit ja tekojäähallit, 1999, s. 29)

Suur- ja kilpailuhalleille annetut suunnitteluarvot lämpötilojen, suhteellisen kosteuden, sekä mitoitettavien ilmavirtojen osalta ovat samanlaiset, kuin kilpailuhalleissakin. (Jäähallit ja tekojäähallit, 1999, s. 40)



Kuva 4. Lahden Pelicansin kotihalli, Isku-Areena, on hallityypiltään kilpailuhalli. (Santala). Yli puolet Suomen pääsarjatason jäähalleista voidaan katsomokapasiteetin perusteella luokitella kilpailuhalleiksi. (Liite 1)

2.3 Tilatarpeet

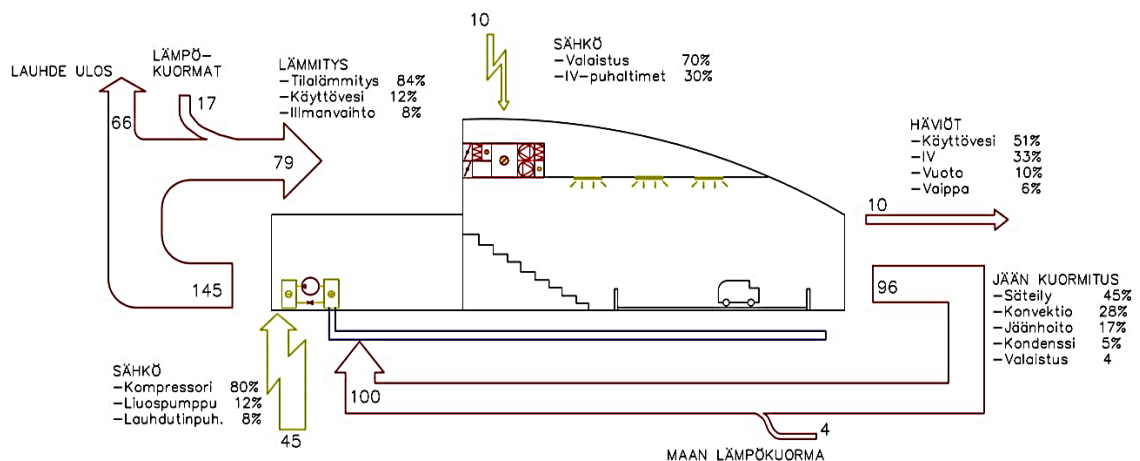
Jäähallit ovat haastavia suunnittelukohteita, sillä samassa rakennuksessa on vierekkäin lämpimiä ja puolilämpimiä tiloja. Puolilämpimässä tilassa huonetilan lämpötila vaihtelee välillä $+5\text{ °C} - 17\text{ °C}$. Esimerkiksi harjoitusjäähallissa suositellaan kosteudenhallinnan ja viihtyvyyden vuoksi sisälämpötilaksi $+5\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$. Puolilämpimiä tiloja jäähallissa ovat yleisesti ottaen jäärata ja katsomoalue. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 7)

Jäähallin eri tilat voidaan jaotella käyttötarkoituksen mukaan käyttäjiä palveleviin tiloihin, yleisöä palveleviin tiloihin, henkilöstötiloihin, huolto- ja tekniikkatiloihin, ja muihin tiloihin. Riippuen hallityypistä erilaisia tiloja käyttäjille, yleisölle, henkilöstölle ja tekniikalle voi olla useita. Päälähtökohdat tilasuunnittelulle ovat tilaohjelma ja valittu laatutaso. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 7)

Yleisesti ottaen käyttäjiä palvelevia tiloja ovat jäärata, pukuhuoneet, suihkutilat ja varustekopit. Yleisöä palvelevia tiloja ovat katsomo, kahvio ja yleiset wc-tilat. Henkilöstötiloja ovat mm. henkilökunnan taukotila ja valvomo, ja huolto- ja tekniikkatiloja ovat mm. kylmä-, lämmitys ja ilmanvaihtokonehuone. Muita tiloja jäähallissa ovat esimerkiksi lehdistölle ja medialle varatut tilat, sekä kuntosalit. (Jäähallit ja tekojääkentät, 1999, s. 42)

3 ENERGIANKÄYTTÖ

Jäähallien energiankulutus riippuu paljon hallityypistä ja sen vuodenaikaisesta käytöstä. Keskimäärin yhden kaukalon jäähalli kuluttaa kuukauden aikana sähköä ja lämpöä 80-150 MWh, mikä tekee vuodessa jopa 1800 MWh energiaa. (Talouselämä, 2015) (Ferrantelli, 2014) Pelkästään jäähdytyskompressorit kuluttavat keskikokoisessa harjoitushallissa 9 kuukauden käyttöaikana n. 500 MWh sähkötehoa. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 97)



Kuva 5. Harjoitushallin vuotuinen energiatase. Jään lämpökuormitusta kuvaa suhdeluku 100, joka vastaa 1700 MWh:n kulutusta vuodessa. Muut luvut ovat suhteutettuna tähän lukuun. Kyseisillä arvoilla hallin lämpötila on +12 °C, ja jään pintalämpötila -3 °C. Kuvaa muutettu. (Jäähallit ja tekojääkentät, 1999, s. 168)

Kun hallissa ylläpidetään kosteuden hallinnan vuoksi keskimäärin +4 °C...+7 °C lämpötilaa, ja n. 1800 m² pinta-alaltaan oleva jäärata jäähdyttää hallin sisäilmaa ollessaan -3 °C...-5 °C lämpötilassa, edellyttää se jatkuvaa lämmittämistä. Jään tasainen jäähdytys tuottaa kuitenkin jatkuvasti lauhde-energiaa, jota voidaan käyttää esim. tila- tai käyttöveden lämmittämiseen. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 97)

Esimerkiksi Mäntän Pihlajalinna-jäähallissa vuonna 2017 tuotettiin omavaraisesti energiaa 1267 MWh, joka riitti kattamaan koko jäähallin energiatarpeen siten, että ostoenergian määrä oli -746 MWh. Ylimääräisen energian jäähalli myi vieressä sijainneelle uimahallille. (Lipasinfor, 2019)

Jäähallissa kyseistä lauhde-energiaa hyödynnettiin routasulatukseen kaukalon alla, reunasulatukseen kaukalon reuna-alueilla, hallin lämmitykseen, sekä ilman kuivatukseen. Jäähallissa on lisäksi käytössä Led-valaistus, sekä liiketunnistimella toimivat valot pukuhuoneissa. Kyseisen jäähallin toimintoja ja järjestelmiä voidaan seurata ja optimoida jatkuvasti, mikä on oleellinen asia energiatehokkuuden kannalta. (Lipasinfor, 2019)



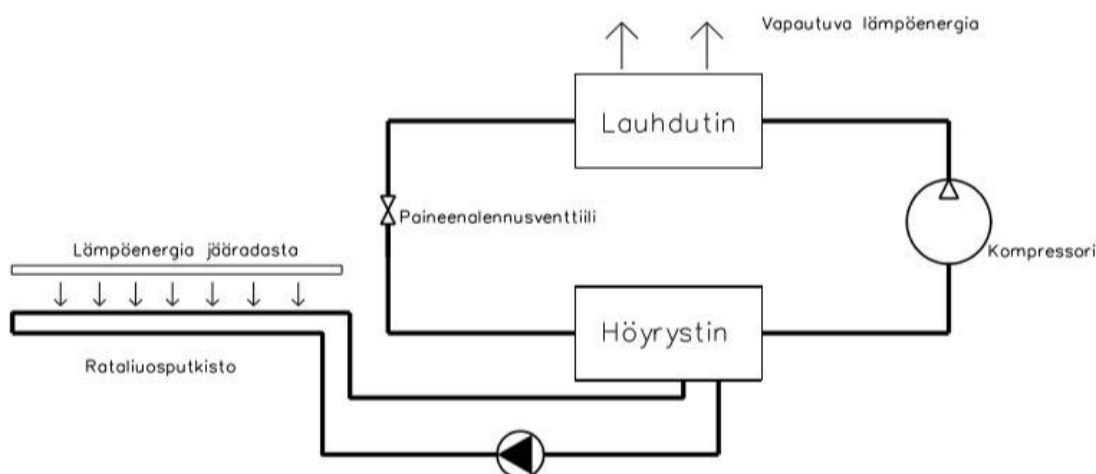
Kuva 6. Kylmälaitteisto on suurin sähkönkuluttaja jäähallissa. Jäärataa palvelevan valaistuksen osuus jäähallin sisävalaistuksen sähkönkulutuksesta on n. 85 %. (IIHF, 2016)



Kuva 7. Jääradan jäähdyttävä vaikutus on suurin lämmitystarpeen lisääjä. Jatkuva jäähdytys synnyttää lauhdelämpöä, jota voidaan käyttää tilalämmitykseen ja käyttöveden lämmittämiseen. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 97)

3.1 Kylmälaitteisto ja lauhde-energia

Kylmäaineprosessissa jääradan alla kulkevan kylmäliuoksen tarkoitus on siirtää lämpöenergia jääradasta kylmäkoneen höyrystimessä liikkuvaan kylmäaineeseen. (Rantala, 2015, s. 22) Kylmäaine siirtyy höyrystimeltä kompressorille, missä kylmäaineen lämpötila nousee puristustyön vaikutuksesta. Lämmennyt ja kaasuuntunut kylmäaine virtaa kompressorilta lauhduttimelle, missä kylmäaineeseen sitoutunutta lämpöenergiaa vapautetaan suoraan ulos, tai hyödynnetään lämmityksessä. Kylmäaine virtaa lauhduttimen ja paisuntaventtiilin kautta takaisin kiertoon muuttuen jälleen matalalämpötilaiseksi ja -paineiseksi nesteeksi. (Rauman Kylmä rakenne Oy, 2015)



Kuva 8. Jäähallin kylmäainekierto yksinkertaistettuna. (kuvaa muokattu) (Rantala, 2015, s. 24)

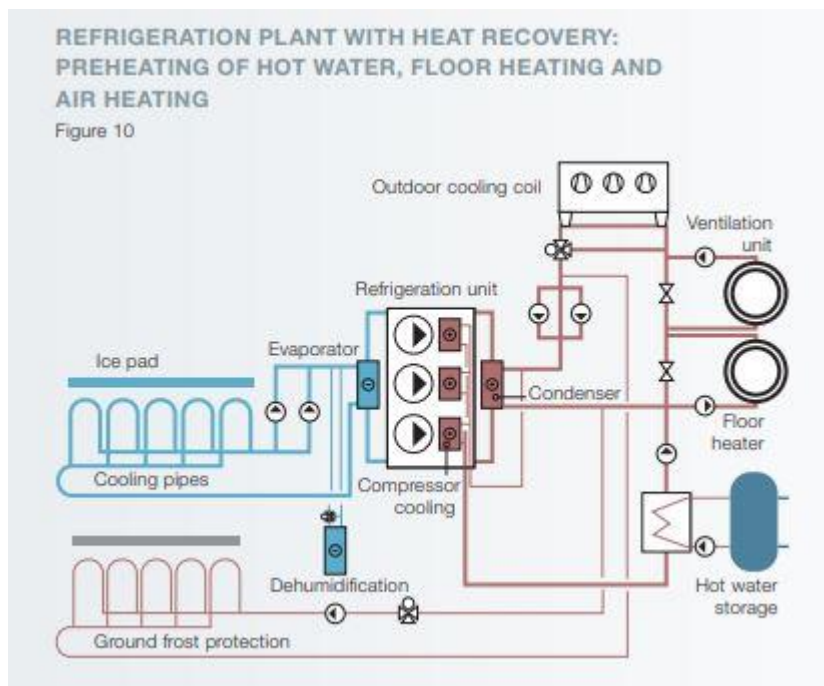
Jäähallin kylmälaitteisto sisältää kylmäkoneiston, siirtoputket, rata-alueen jäähdytysputkiston ja muut vaadittavat apulaitteet. Kylmäkoneiston käyttövarmuuden ja toiminnan varmistamiseksi kannattaa kytkeä rinnan vähintään kaksi kompressoria, jotka tasaavat huippukulutuksia keskenään. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 54)

Kylmäkoneistojen kompressorit ovat pääsääntöisesti mäntä- tai ruuvikompressoireita. Mäntäkompressorin hyviä puolia ovat sen edullinen hankintahinta, helppo tehon säätö ja hyvät hyötysuhteet osakuormituksillakin. Mäntäkompressorin huoltokustannukset ovat kuitenkin korkeat. Ruuvikompressorin hyviä puolia ovat

käyttövarmuus, portaaton säätö ja alhaiset huoltokustannukset. Osakuormituksella ruuvikompressorin hyötysuhde on huonompi, kuin mäntäkompressorilla. (Jäähallit ja tekojäähentät, 1999, s. 115)

Kylmäprosessissa vapautuvaa matalalämpöistä lauhdelämpöä voidaan hyödyntää jäähallin lattialämmityksessä, käyttöveden lämmityksessä, kenttäalueen jäähdytysveden lämmittämässä, sekä halliosan ilmalämmityksessä. Lauhdelämpö soveltuu myös jäähallin läheisyydessä olevan uimahallin, tekonurmikentän, tai muun rakennuksen lämmittämiseen. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, ss. 44-45)

Mitä pienemmästä jäähallista ja sen tilaohjelmasta on kyse, sitä suurempi osuus jäähallin lämmityksestä voidaan toteuttaa pelkällä lauhdelämmöllä. Tavallisen harjoitushallin lauhde-energia on usein riittävä kattamaan koko hallin lämmitystarpeen. Pelkästään lauhdelämpöön perustuvassa jäähallissa täytyy huomioida se, että kylmäkoneiden tulee olla koko ajan päällä, jotta lauhdelämmöstä saadaan energiaa tilojen ja veden lämmittämiseen. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, ss. 45,47)



Kuva 9. Lauhdelämmön hyödyntäminen osana kylmäainekiertoa. (IIHF, 2016, s. 41)

3.1.1 Jäähdytystehon tarve

Jäähän kohdistuvat lämpökuormat määrittävät sen, kuinka paljon jäähdytysenergiaa kylmäkoneikolta vaaditaan lämpökuormien kompensoimiseksi. Jään lämpökuorma käytön aikana koostuu pääpiirteittäin seuraavasti:

- Halli-ilmasta jäähän siirtyvä lämpö konvektiossa
- Hallivaipan sisäpinoista säteilevä lämpö
- Valaistuksesta jäähän säteilevä lämpö
- Jäänhoitoveden aiheuttama lämpö
- Halli-ilman kosteuden siirtyminen jäähän
- Ihmisistä jäähän säteilevä lämpö
- Maasta säteilevä lämpö

Kylmäkoneiston tehontarve maksimikäyttöjaksolla lasketaan kaavalla 1.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{jää}} = & \dot{Q}_{\text{konv.}} + \dot{Q}_{\text{sät.}} + \dot{Q}_{\text{hoito}} + \dot{Q}_{\text{kond.}} + \dot{Q}_{\text{valaistus}} + \dot{Q}_{\text{henkilö}} + \dot{Q}_{\text{maa}} \\ & + \dot{Q}_{\text{pump.}} \end{aligned} \quad (1)$$

jossa

$\dot{Q}_{\text{jää}}$ on jään kokonaislämpökuorma, W/m²

$\dot{Q}_{\text{konv.}}$ on jään konvektiolämpökuorma, W/m²

$\dot{Q}_{\text{sät.}}$ on jään säteilylämpökuorma vaipan läpi kyseisellä kuukaudella, W/m²

\dot{Q}_{hoito} on jäähoidosta aiheutuva lämpökuorma jäähän, W/m²

$\dot{Q}_{\text{kond.}}$ on ilmasta jäähän kondensoituvan veden lämpökuorma, W/m²

$\dot{Q}_{\text{valaistus}}$ on valaistuksesta aiheutuva lämpökuorma jäähän, W/m²

\dot{Q}_{kuorma} on lämpökuormista aiheutuva lämpökuorma jäähän, W/m²

\dot{Q}_{maa} on maasta johtumalla siirtyvä lämpökuorma, W/m²

$\dot{Q}_{\text{pump.}}$ on kylmäliuospumpun lämpökuorma, kW

Käytön ulkopuolisella ajalla valaistuksen, ihmisten ja jäähoidon lämpökuormat ovat nolla. (Laitinen, 2010, s. 49)

Jäähdytysenergiaa voidaan tarvita myös ilman kuivauksessa, jos käytössä on kondenssikuivain, joka liitetään jäärataliuoksen kylmäpiiriin. Kondenssikuivauksen tehotarpeesta on kerrottu kappaleessa 4.3.4., ja lämpökuormia käsitellään kappaleessa 4.5.

Kylmäkerroin, eli COP-luku, kuvaa kylmälaitteiston suorituskykyä. COP-luku kertoo, kuinka paljon jäähdytyslaitteisto pystyy tuottamaan kylmätehoa suhteessa sen sähkön ottotehoon. Kylmäkerroin voidaan arvioida kaavasta 2.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{tuotto}}{\dot{Q}_{otto}} \quad (2)$$

jossa

\dot{Q}_{tuotto} on jäähdytyslaitteiston tuottama kylmäteho tai -energia, kW tai kWh

\dot{Q}_{otto} on jäähdytyslaitteiston ottama sähköteho tai -energia, kW tai kWh

Mitä suurempi COP-luku on, sitä paremmalla hyötysuhteella jäähdytyslaitteisto pystyy tuottamaan kylmätehoa. Kylmäkerroin määritetään yleensä pelkälle kompressorille. Koko kylmälaitteiston COP-luvussa huomioidaan kaikkien kyseisen laitteiston komponenttien ottama sähköteho, kuten kylmäliuospumppun, kompressorin ja lauhdutinpuhaltimien ottama sähköteho. (Rantala, 2015, s. 28)

3.1.2 Käytössä olevat kylmäaineet

Käytössä olevat kylmäaineet Suomen jäähalleissa ovat yleisimmin ammoniakki (NH₃) ja HFC-kylmäaine R404A. Aiemmin yleinen jäähallien käytössä ollut HCFC-kylmäaine, R22 (kloorifluorihilivety), on otsoniasetuksen ((EY) N:o 1005/2009) myötä vähentynyt jäähallien käytössä, sillä HCFC-kylmäaineiden käyttö laitteiden huollossa vuoden 2014 jälkeen ollut kiellettyä. (Rantala, 2015, s. 22), (Suomen ympäristökeskus SYKE, 2016)

Huoltoa vaativat, HCFC-yhdisteitä sisältävät laitteet on täytynyt uusia ennen vuotta 2015, tai sitten HCFC-yhdisteininen kylmäaine on täytynyt vaihtaa vanhaan

laitteistoon. Korvaavana kylmäaineena HCFC-yhdisteille on yleensä käytetty otsonikerrosta tuhoamattomia HFC-aineita. HFC-aineita, kuten R404A ja R507 tulisi korvausinvestoinneissa kuitenkin välttää, sillä nekin ovat voimakkaita kasvihuonekaasuja, ja niiden käyttöä EU-alueella rajoittaa EU:n F-kaasuasetus ((EU) N:o 517/2014). (Suomen ympäristökeskus SYKE, 2016)

3.2 Tilalämmitys

Lauhdelämpöä täydentäviä energiamuotoja jäähallissa ovat suora sähkö, kaukolämpö tai kattilalaitos. Energiamuodon valintaan vaikuttaa paikkakuntaan liittyvä sähkön ja kaukolämmön liittymismaksu, käyttömaksu, sekä niiden määräytyminen. Täydentävän energiamuodon valinnan jälkeen mietitään lämmitysmuodot hallin eri tiloissa. Näitä ovat mm. ilmalämmitys, säteilylämmitys, vesikiertoinen lattialämmitys ja vesikiertoinen patterilämmitys. Vesikiertoinen patterijärjestelmä perustuu kuitenkin korkealämpöiseen energiaan, lauhdelämmöstä saatavaan matalalämpöiseen energiaan verrattuna, mikä osittain rajaa lauhdelämmön hyötykäyttöä (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, ss. 45,46)

Jäähallien rata-alueen lämmittämiseen on perinteisesti käytetty ilmalämmitystä, joka on toteutettu pääilmanvaihtokoneeseen asennetun lämmityspatterin avulla, tai yksittäisillä kiertoilmalämmittimillä, tai näiden yhdistelmällä. Lämmityksen säätö halliosan lämmityksen osalta tapahtuu hallin lämpötilan tai poistoilmavirran perusteella, joiden mukaan tuloilmavirrat säätyvät. Tuloilmamääriä säädetään ilmanvaihtokoneessa portaattomasti taajuusmuuntajalla tai manuaalisesti 1/1- ja ½ tehoasunnoilla. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, ss. 57-58)

Hallitilan lämmityksessä on energiankulutuksen kannalta kannattava laskea hallin lämpötilaa esimerkiksi yön ajaksi, kun jäähallia ei käytetä. Hallin lämpötilan laskiessa suhteellinen kosteus nousee, mikä tulee estää hallin kuivatusjärjestelmällä. (Jäähallit ja tekojäähallit, 1999, s. 120)

Matalalämpöistä lauhdelämpöä hyödynnettäessä lattialämmitys soveltuu hyvin sosiaalitulojen lämmitykseen. Lattialämmityksen käyttö halliosan lämmityksessä

on ternisesti ilmalämmitystä heikompi, sillä suuret mittasuhteet muodostavat suuria ajallisia vaihteluita lattialämmityksen teholle. Sen avulla voidaan kuitenkin estää virtauskatveiden muodostuminen halliosan ulkoseinien vierustoilla. Virtauskatveesta on kerrottu lisää kappaleessa 4.2.2. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 58)

3.2.1 Lämmitystehontarve

Jäähallin lämmitystehontarve muodostuu jään jäähdyttävästä vaikutuksesta, ilmanvaihdon ja vuotoilman lämmitystarpeesta, ja johtumishäviöistä ulkovaipan läpi. Lämmitystehontarvetta laskee jäähallissa syntyneet lämpökuormat. Käyttäjän aikainen ja ulkopuolinen lämmitystehontarve voidaan laskea kaavalla 3, käyttäen laskelmissa käyttöjaksolle määritettyjä arvoja. (Laitinen, 2010, s. 59)

$$\dot{Q}_{\text{lämmitys}} = \dot{Q}_{\text{konv,jää}} + \dot{Q}_{\text{vaippa}} + \dot{Q}_{\text{vuotoilma}} + \dot{Q}_{\text{iv}} - \dot{Q}_{\text{lämpök.}} \quad (3)$$

jossa

$\dot{Q}_{\text{lämmitys,kj}}$ on hallin lämmityksen nettotehontarve, kW

$\dot{Q}_{\text{konv,jää}}$ on jäähän siirtyvä lämpöteho konvektiolla, kW

\dot{Q}_{vaippa} on vaipan läpi siirtyvä lämpöteho, kW

$\dot{Q}_{\text{vuotoilma}}$ on vuotoilman lämmityksen tarvitsema teho, kW

\dot{Q}_{iv} on ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsema teho, kW

$\dot{Q}_{\text{lämpök.}}$ on lämpökuormista syntyvä lämpöteho, kW

3.3 Käyttövesi

Jäähallin käyttöveden kulutus ja siihen kuluva lämmitysenergia riippuu paljolti hallityypistä, käyttäjämääristä, ja aikajaksosta, jonka jäähalli on vuoden aikana käytössä. Vettä jäähallissa kuluu pääasiassa jäänhoitoon ja sosiaalityötilojen käyttövetenä. Käyttöveden lämmitykseen kuluu n. 1/10 hallin kokonaisenergian kuluksista. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 97)

Jäänhoitoveden ja sosiaalitulojen käyttöveden lämmitykseen kuluva lämmitysenergia voidaan laskea kaavalla 4. Laskelmat tehdään erikseen kummallekin kulutukselle, sillä jäänhoitoveden lämpötila on yleensä suihkussa käytettävän veden lämpötilaa selvästi alhaisempi. (Laitinen, 2010, s. 65)

$$Q_{lkv} = V_{lkv} \cdot \rho_v \cdot c_{p_v}(T_{lkv} - T_{kv})/3600 \quad (4)$$

jossa

Q_{lkv} . on lämpimän käyttöveden energiankulutus, kWh

V_{lkv} on lämpimän käyttöveden kulutus tarkastelujaksolla, m³

ρ_v on veden tiheys, kg/m³

c_{p_v} on veden ominaislämpökapasiteetti, kWs/(kgK)

T_{lkv} on lämpimän käyttöveden lämpötila, °C

T_{kv} on lämmitettävän kylmän veden lämpötila, °C

Keskimääräinen käyttöveden lämmitysteho tietyllä ajanjaksolla lasketaan kaavalla 5. (Laitinen, 2010, s. 66)

$$\varnothing_{lkv} = \frac{Q_{lkv}}{\Delta t} \quad (5)$$

jossa

\varnothing_{lkv} on keskimääräinen käyttöveden lämmitystehontarve ajanjaksolla, kW

Δt on ajanjakso, h

3.3.1 Jäänhoitovesi

Jäänhoidossa käytetään 300-800 litraa vettä yhdellä ajokerralla. Jäänajokertoja voi päivän aikana olla yli kymmenen, jos jää ajetaan tunnin välein aamusta iltaan. Jäänhoidossa käytetyn veden lämpötila vaihtelee välillä 5...55 °C, jolloin jäänhoitovettä joudutaan usein myös lämmittämään. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 64)

Lämpimän veden käyttö jäähoidossa perustuu jäärakenteiden vapautumiseen, jolloin vanha jää muodostaa kiinteämmän sidoksen uuden jään kanssa, eikä täten lohkeile yhtä helposti. Lämmin vesi myös sulattaa jään pinnalle jääneet epämuodostumat, jolloin pinnasta tulee tasainen. (Russel-Ausley, 2019)

Kylmän käyttöveden kulutuksen ja sen lämmittämisen lisäksi jäänhoito aiheuttaa lämpökuormaa jäähallissa. Myös jäälle levitettävän veden täytyy jäätyä, mikä vaatii kylmätehoa. Jos jäähoidosta syntynyttä lunta ei voida kuljettaa jäähallista ulos, täytyy sen sulattamiseen kuluva lämmitysenergia huomioida. Lumen sulatus voidaan toteuttaa lauhde-energiasta saadulla matalalämmöllä. (Laitinen, 2010, s. 58)

3.4 Valaistus

Jäähallin valaistuksen päätehtävänä on valaista tiloja siten, että käyttäjät pystyvät suoriutumaan näköä vaativista toimenpiteistä ja hahmottamaan tilaa ja ympäristöään. Toimiva valaistus ei häiritse käyttäjiä, taaten täten myös turvallisuutta, käyttömukavuutta ja tunnelman luomista. (Jäähallien valaistusohje, 2014, s. 4)

Kuten kuvassa 6 kerrottiin, suurin osa jäähallin valaistukseen kuluva sähköenergiasta kuluu kenttäalueen valaistukseen, sisältäen vaihtoaitioalueen ja rangaistusaition. Yleisvalaistukseen luokitellaan yleiset tilat, käytävät, pukuhuoneet ja katsomoalue. Muita valaistusta vaativia osa-alueita ovat ulkovalaistus, turvavalistus ja tapahtumavalistus. (Jäähallien valaistusohje, 2014, s. 3)

Valaistuksen energiankulutus jäähallissa riippuu paljolti hallityypistä, ja kenttäalueen valaisinmallista. Eri hallityypeille on määritelty Jääkiekkoliiton, SM-Liigan ja Opetusministeriön toimesta valaistusluokat, joissa annetaan ohjeelliset minimiarvot keskimääräiselle valaistusvoimakkuudelle, häikäisylle ja valon väriominaisuuksille. Hallityypit ja valaistusluokat on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Hallityyppien mukaiset valaistusluokat ja valaistusvoimakkuudet (lx). (Jäähallien valaistusohje, 2014, s. 6)

Hallityyppi	Valais- tusluokka	Vaakatason valaistus- voimakkuus (lx)	Pystytason valais- tusvoimakkuus (lx)
Suurhalli/Kilpai- luhalli	J1	1200	800
Kilpailu- halli/pieni kilpai- luhalli	J2	800	500
Pieni kilpailuhalli	J3	500	300
Harjoitushalli	J4	250	ei vaatimuksia

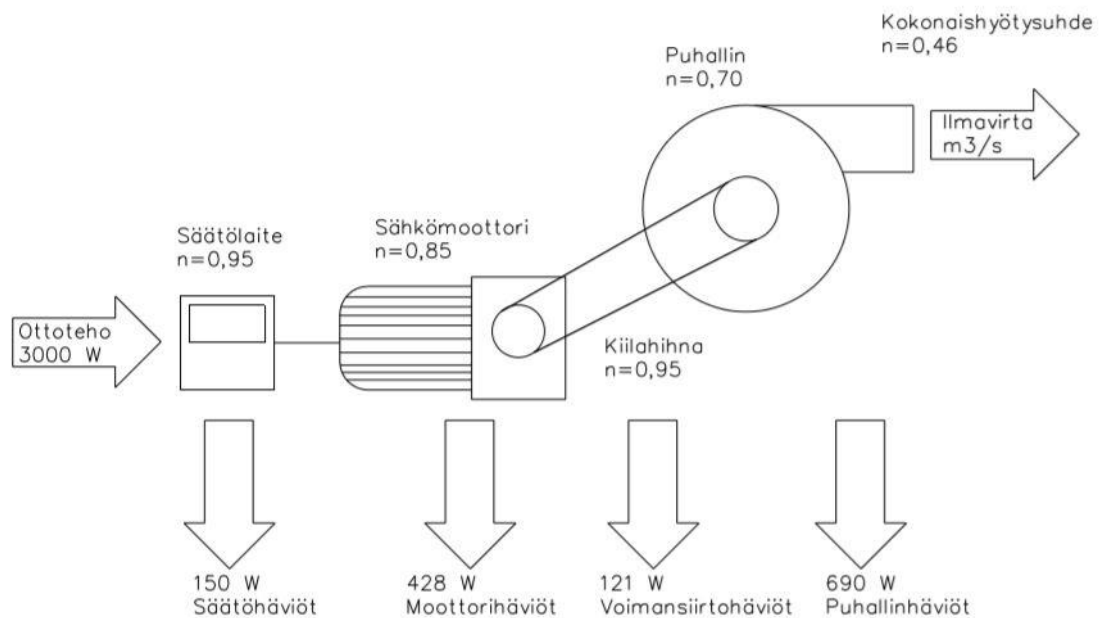
Valaistusvoimakkuudeksi kutsutaan pinnalle saapuvan valovirran tiheyttä neliometriä kohden. Valaistusvoimakkuuden yksikkö on lm/m^2 , eli luxi (lx). Vaakatason valaistusvoimakkuus lasketaan jääkentän pinnasta, ja pystytason valaistusvoimakkuus 1 m korkeudesta jään pinnasta. Mittauspisteet määrittyvät ohjeiden mukaisen laskentapisteverkoston mukaan. (Jäähallien valaistusohje, 2014, ss. 4,13)

Led-valaisinmalleilla ja ohjausjärjestelmällä voidaan tuottaa tiloihin riittävä valaistusvoimakkuus pienemmällä sähkönkulutuksella. Näin tehtiin esimerkiksi Pyhäjoen harjoitusjäähallissa, jossa valaistusmäärä kenttäalueella saatiin kaksinkertaistettua ja sähkön ottoteho vanhoihin monimetallilamppuihin verrattuna lähes puolitettyä. Ohjausjärjestelmällä voitiin säätää valaistusta tarpeenmukaiseksi huollolle, harjoituksiin ja peleihin. (Ledistys Oy, 2019)

3.5 Ilmanvaihto

Ilmanvaihdon tehtävänä on hallita jäähallin sisäilmastoa, vaikuttaen sisäilmaston kosteuteen, rakenteiden kestävyys, ihmisten terveyteen ja yleiseen viihtyvyyteen niin käyttäjillä, kuin katsojillakin. Ilmanvaihdon avulla voidaan toteuttaa myös tilojen lämmitys. (Rantala, 2015, s. 36)

Ilmanvaihto kuluttaa sähköenergiaa puhaltimien ja erilaisten apulaitteiden toiminnissa. Myös ilman kuivaus ja ulkoilman lämmitys vaativat energiaa. Puhaltimien vaatima sähköteho, ilman lämmityksen vaatima lämpöenergia, sekä kuivainmalista riippuvainen sähkö-, lämmitys- tai jäähdytysteho riippuvat sisäänpuhallettavan ilman määrästä, joka jäähallissa mitoitetaan henkilömäärän perusteella. Sähköenergian kulutukseen puhallinkäytössä vaikuttavat laitevalinnat, sekä säätö- ja ohjausjärjestelmät, jotka säätelevät ilmavirtoja tarpeenmukaisiksi. Paremmalla kokonaishyötysuhteella saavutetaan pienempi energiankulutus vastaavan ilmavirran liikuttamiseen. (Rantala, 2015, s. 37)



Kuva 10. Ilman liikuttamiseen tarvittavasta ottosähköstä osa kuluu laitteistokohdaisiin sähköhäviöihin. Energiatehokkaammilla laitevalinnoilla saavutetaan parempi kokonaishyötysuhde, millä saavutetaan pienemmät ottosähkön tarpeet. (kuvaa muutettu) (Rantala, 2015, s. 37)

Ilmanvaihdon sähkötehokkuutta kuvataan SFP-luvulla (Specific Fan Power) eli ominaissähköteholla, joka kertoo paljonko yhden ilmakeuution liikuttamiseen sekunnissa vaaditaan sähkötehoa. SFP-luvun yksikkönä on $kW/(m^3/s)$. (SFP-opas, 2009, s. 8)

SFP-luku ilmankäsittelykoneelle voidaan laskea kaavasta 6. Yksittäisen tulo- tai poistopuhaltimen kaava on samanlainen, mutta osoittajana on tällöin vain tämän yksittäisen puhaltimen ottoteho. (Mäkinen, 2017)

$$SFP = \frac{P_{tulo} + P_{poisto}}{qv} \quad (6)$$

jossa

SFP on ilmankäsittelykoneen ominaissähköteho, kW/(m³/s)

P_{tulo} on tulopuhaltimen ottama sähköteho, kW

P_{poisto} on poistopuhaltimen ottama sähköteho, kW

qv on koneen tulo- tai poistoilmavirroista suurempi, m³/s

SFP-luku saa uusien rakennusmääräysten mukaan olla yksittäisessä ilmanvaihtokoneessa tai puhaltimessa maksimissaan 1,8 kW/(m³/s). Yksittäinen ilmanvaihtokone- tai puhallin saa ylittää kyseisen arvon, jos koko laitoksen yhteenlaskettu ominaissähköteho, eli SFP-luku on 1,8. Tällöin kaikkien ilmanvaihtolaitteiden otosähkötehot lasketaan yhteen ja jaetaan yhteenlasketuilla ilmavirroilla, mistä saadaan koko ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho. (Mäkinen, 2017)

Komission asetus (EU) N:o 1253/2014 ilmanvaihtokoneiden ekologisen suunnittelun vaatimusten osalta on vuonna 2018 kiristynyt, ja ilmanvaihtokoneille otetaan käyttöön sisäinen ominaissähköteho SFP_{int}. Sisäinen ominaissähköteho ottaa kantaa ilmanvaihtokoneen sisäiseen painehäviöön, jossa huomioidaan suodattimien, lämmöntalteenoton ja puhaltimien painehäviöt, sekä puhaltimien hyötysuhteet. SFP_{int} lasketaan kaavasta 7. (Kyyhkynen, 2016, s. 10)

$$SFP_{int} = \frac{\Delta p_{tulosuodatin} + \Delta p_{tuloLTO}}{\eta_{tulopuhallin}} + \frac{\Delta p_{poistosuodatin} + \Delta p_{poistoLTO}}{\eta_{poistopuhallin}} \quad (7)$$

jossa

Δp_{tulosuodatin} tulosuodattimen painehäviö, Pa

Δp_{tuloLTO} tulopuolen lämmöntalteenoton painehäviö, Pa

η_{tulopuhallin} tulopuolen puhallinhyötysuhde

$\Delta p_{\text{poistosuodatin}}$ poistosuodattimen painehäviö, Pa

$\Delta p_{\text{poistoLTO}}$ poistopuolen lämmöntalteenoton painehäviö, Pa

$\eta_{\text{poistopuhallin}}$ poistopuolen puhallinhyötysuhde.

Asetuksessa on myös määrätty ilmanvaihtokoneiden lämmöntalteenottolaitteiden minimi hyötysuhteet. Vuoden 2016 ja 2018 arvot on esitetty taulukossa 4. (Mäkinen, 2017)

Taulukko 4. EU-asetuksen asettamat vaatimukset lämmöntalteenotolla varustetuissa ilmanvaihtokoneissa. (Mäkinen, 2017)

Vuosi	Nestekiertoinen lämmöntalteenotto	Muut, kuin nestekiertoiset (pyörivä lämmönsiirrin, levylämmönsiirrin)
2016	$\eta \geq 63 \%$	$\eta \geq 67 \%$
2018	$\eta \geq 68 \%$	$\eta \geq 73 \%$

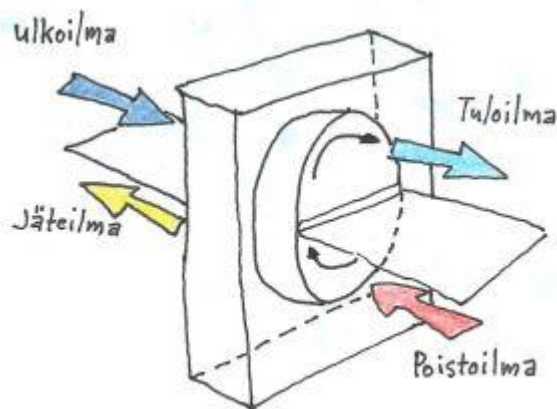
3.5.1 Lämmöntalteenotto

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta (2018) ei määrittele jäähallien lämmöntalteenoton hyötysuhteelle vaatimuksia E-lukua laskiessa. E-luku ($\text{kWh}_E/\text{m}^2 \text{ a}$) on energiamuodon kertoimella painotettu osatoenergian kulutus rakennuksen lämmitettyä nettoalaa kohden vuodessa. Jäähalleille ei ole myöskään asetettu E-luvun suhteen raja-arvoa. (Ympäristöministeriö, 2018)

Puolilämpimien tilojen lämmöntalteenottojärjestelmä ei ole yhtä tehokas puolilämpimässä tilassa, sillä poistoilman lämpötila on lämmityskaudella alle $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Lämmöntalteenotto soveltuu hyvin lämpimien tilojen ilmanvaihtoon, jolloin lämpötilaerot sisäänpuhallettavan ulkoilman ja poistoilman välillä ovat suuremmat. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 57).

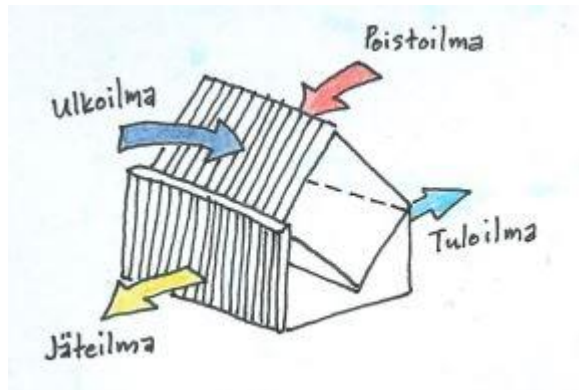
Eri lämmöntalteenottomalleja ovat pyörivä, ristivirta ja vastavirta lämmönsiirrin, sekä nestekiertoinen lämmöntalteenotto (Sandberg, 2014, s. 178)

Pyörivän lämmönsiirtimen toimintaperiaate perustuu kiekkomaiseen roottoriin, joka pyöriessään siirtää lämpöä sen läpi johdettavasta poistoilmasta tuloilmaan, joka myös johdetaan roottorin läpi. Roottorin pinnalle sitoutuu poistoilmasta lämpöä, joka vapautuu kylmempään ulkoilmavirtaan roottorin pyöriessä puoli kierrosta. Pyörivän lämmönsiirtimen hyötysuhde on luokkaa 75-85 %. (Sandberg, 2014, s. 178)

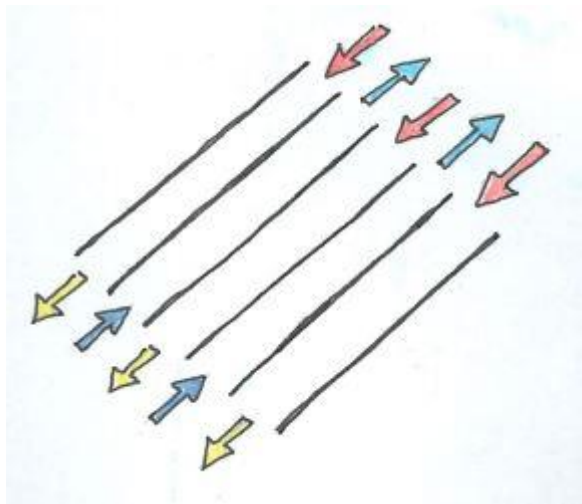


Kuva 11. Pyörivä LTO. (Sandberg, 2014, s. 178)

Ristivirtalevyllämmönsiirrin koostuu useista, yleisimmin alumiinista valmistetuista ohuista levyistä. Lämmin poistoilma ja kylmä ulkoilma kulkevat ristikkäin levyjen välistä niin, että joka toisessa levyvälissä kulkee lämmin ilma, ja joka toisessa kylmä. Lämpöenergia sitoutuu levyihin, jotka luovuttavat lämpöä kylmään ilmaan. Ristivirtalämmönsiirrin on altis huurtumiselle ja jäätymiselle kylmällä ilmalla, kun lämmin poistoilma kohtaa kastepisteensä kylmien levyjen pinnassa. Lämmönsiirrin on varustettava sulatuksella ja kondenssiveden poistolla. Ristivirtalämmönsiirtimen hyötysuhde on n. 60-65 %. (Sandberg, 2014, ss. 181,182)

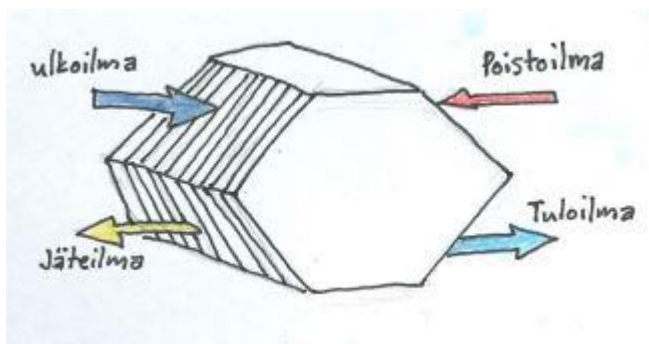


Kuva 12. Ristivirtalämmönsiirrin. (Sandberg, 2014, s. 181)



Kuva 13. Ristivirtalämmönsiirtimen joka toisessa levyvälissä kulkee poistoilma, ja joka toisessa tuloilma. Lämmönsiirto tapahtuu alumiinisten levyjen välityksellä.

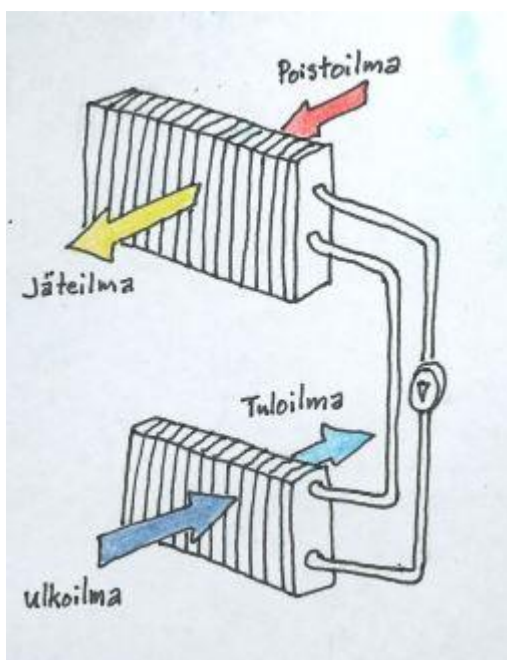
Vastavirtalevyvärilämmönsiirtimen koostumus on ristivirtalämmönsiirtimen mukainen, mutta ilmavirrat kulkevat toisiaan vastakkaisesti suuntiin enemmän. Lämmönsiirtimen hyötysuhde on ristivirtaa parempi, ollen jopa 80 %. Verrattuna ristivirtaan, vastavirtalämmönsiirrin on vieläkin herkempi jäätymiselle. Kooltaan vastavirtalämmönsiirrin on myös isompi, mikä pitää huomioida konehuonetta suunniteltaessa. (Sandberg, 2014, s. 183)



Kuva 14. Vastavirta lämmönsiirrin. (Sandberg, 2014, s. 183)

Nestekiertoisen lämmöntalteenoton toimintaperiaate perustuu nestemäisen väliaineen siirtämään lämpöenergiaan. Lämpimän ilmavirran kulkiessa patterin läpi, jossa nestemäinen väliaine kiertää, siirtyy lämpöenergiaa nesteeseen. Lämmenneestä nesteestä vapautuu lämpöä patterissa, jonka läpi kylmä ulkoilma virtaa. Lämmönsiirrossa on kyseessä pienet lämpötilaerot, mistä syystä lämmönluovutuspinta-alaa vaaditaan paljon.

Nestekiertoisen lämmöntalteenoton hyviä puolia ovat sen hygieenisuus, sijoittaminen toisistaan kaukana oleviin tulo- ja poistojärjestelmiin, ja asennuksen helpous saneerauskohteissa. (Sandberg, 2014, s. 184)

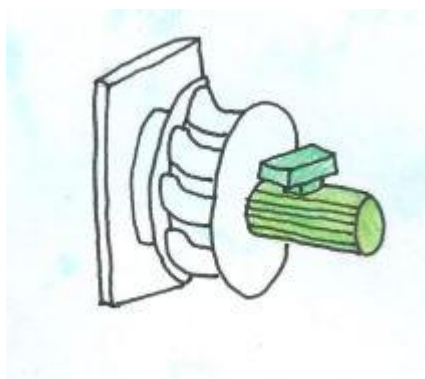


Kuva 15. Nestekiertoinen lämmönsiirrin. (Sandberg, 2014, s. 184)

3.5.2 Puhallinmallit

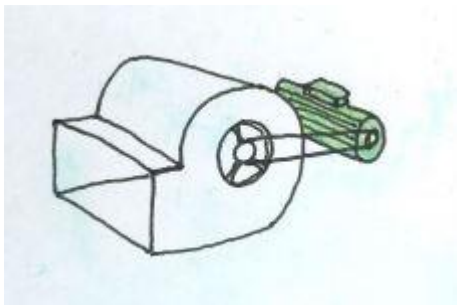
Erilaisia puhallinmalleja ovat kammio- ja radiaalipuhallin (keskipakoispuhallin). Puhaltimen tärkeimmät osat ovat moottori, ja sen sähkövoimalla pyörittämä siipipyörä, joka saa ilman liikkumaan. (Sandberg, 2014, s. 174)

Kammiopuhaltimessa siipipyörä on asennettu suoraa moottorin akselille, eli se on suoraikäyttöinen puhallin. Kammiopuhaltimessa ei yleensä ole vanhan malliseen radiaalipuhaltimeen verrattuna moottorin ja siipipyörän välistä hihnaa, mistä syystä se on huoltovapaampi, hygieenisempi ja muutenkin helpommin puhdistettavissa. Lisäksi suoraikäyttöinen kammiopuhallin on hihnallista puhallinta energiatehokkaampi, sillä hihnan pyöriminen aiheuttaa tehohäviöitä. Näiden syiden takia kammiopuhallin on syrjäyttänyt aiemmin lähes ainoan puhallinmallin, eli radiaalipuhaltimen. (Sandberg, 2014, s. 176)



Kuva 16. Kammiopuhaltimessa moottori on asennettu suoraa siipipyörän akselille. Puhallinmalli vaatii aina taajuusmuuntajan. (Sandberg, 2014, s. 175)

Hihnakäyttöinen radiaalipuhallin oli ennen kammiopuhaltimien yleistymistä lähes ainoa käytössä ollut puhallinmalli ilmanvaihtokoneissa. Spiraalinmallinen kaapu radiaalipuhaltimessa kasvattaa ilmavirran painetta, mistä syystä puhaltimen hyötysuhteet ovat korkeat (n. 85 %). Puhallinmalli toimii parhaiten suurilla ilmavirroilla. Puhallinmallissa syntyy kuitenkin tehohäviöitä moottorin ja puhaltimen välillä olevan hihnan voimansiirrossa. Myös hihnan aiheuttamat huoltotoimet ovat lisänneet kammiopuhaltimien yleistymistä radiaalipuhaltimien tilalle. (Sandberg, 2014, s. 177)

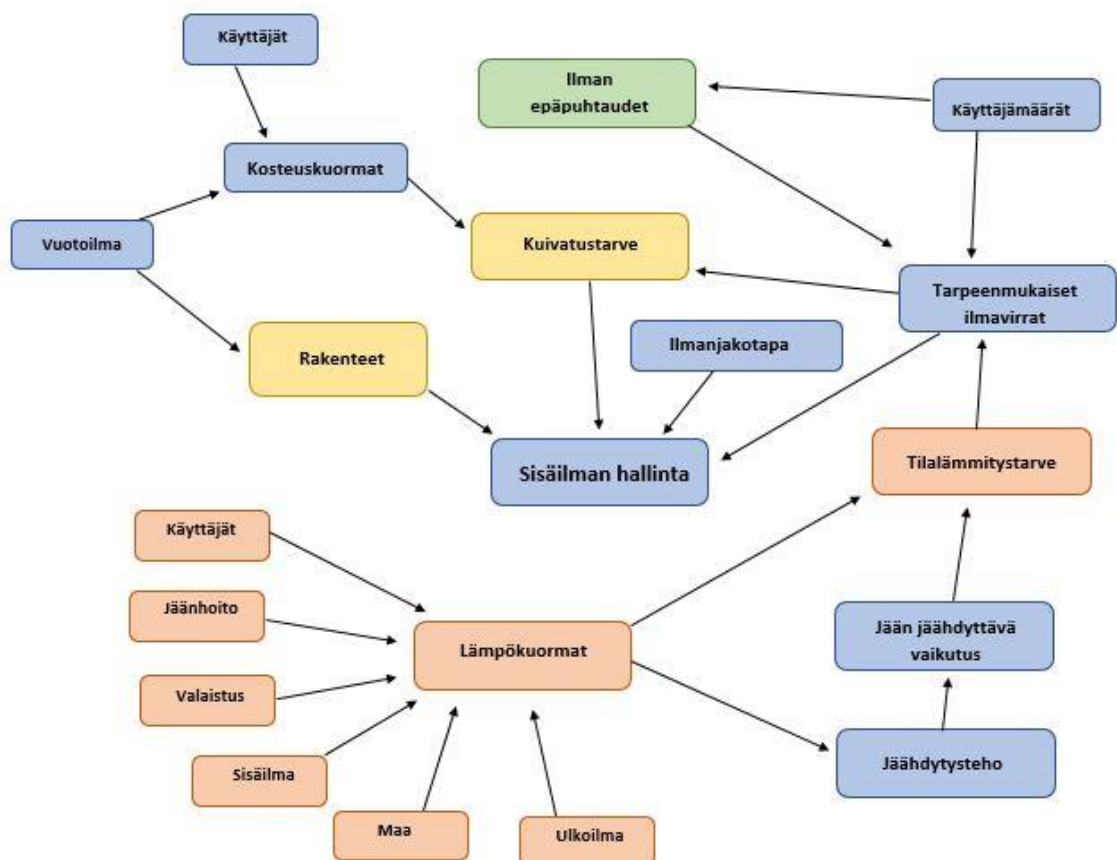


Kuva 17. Kaavullinen radiaalipuhallin. Hihnan voimansiirrossa tapahtuu tehohäviöitä. (Sandberg, 2014, s. 177)

4 SISÄILMAOLOSUHTEIDEN HALLINTA

Jäähallin ilmanvaihdolla on merkittävä asema sisäilman laadun ja kosteuden hallinnan osalta niin puolilämpimässä hallitilassa, kuin muissa lämpöisissä tiloissa. Puolilämpimän ja lämpimien tilojen väliset, sekä ulkoilmaa vasten olevien rakenteiden ilmanpitävyydellä ja eristävyydellä voidaan myös vaikuttaa sisäilman olosuhteisiin, ja niiden hallittavuuteen. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, ss. 82,101)

Olosuhteiden hallintaan vaikuttaa ilmanvaihto- ja rakenneratkaisujen lisäksi valittu sisälämpötila hallissa ja käyttökauden pituus vuoden aikana. Tavoitteena on ylläpitää jäähallissa hyvät sisäilmaolosuhteet jääurheilulle riippumatta lämpötilojen, kosteuskuormien ja ulkona vallitsevien olosuhteiden vaihtelusta. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 105)



Kuva 18. Sisäilman hallintaan vaikuttavat monien asioiden summat, jotka riippuvat osittain myös vuodenaikojen vaihteluista.

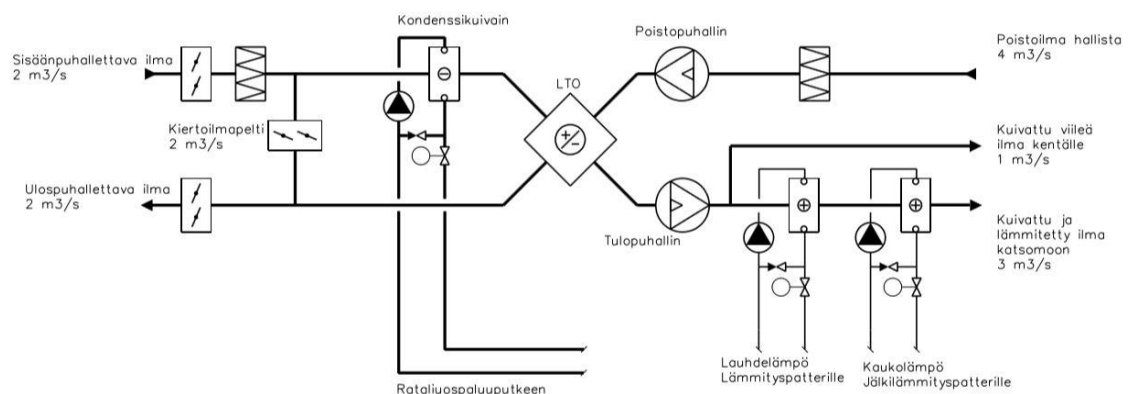
4.1 Ilmanvaihtokoneet ja tilojen ilmapvirrat

Sisäilmaolosuhteet lämpimien ja puolilämpimien tilojen osalta vaihtelee niin paljon, että kyseisissä tiloissa on toteutettava omat osastokohtaiset ilmanvaihtoratkaisut, jotka poikkeavat toisistaan niin kooltaan, kuin toimintaperiaatteeltaankin. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 8)

Taulukko 5. Lämpimät ja puolilämpimät tilat eroavat olosuhteiltaan niin paljon, että tilat on osastoitava omilla ilmanvaihtoratkaisuilla. Esimerkki Kangasalan jäähallin eri osastoihin kuuluvista tiloista ja niiden olosuhteista.

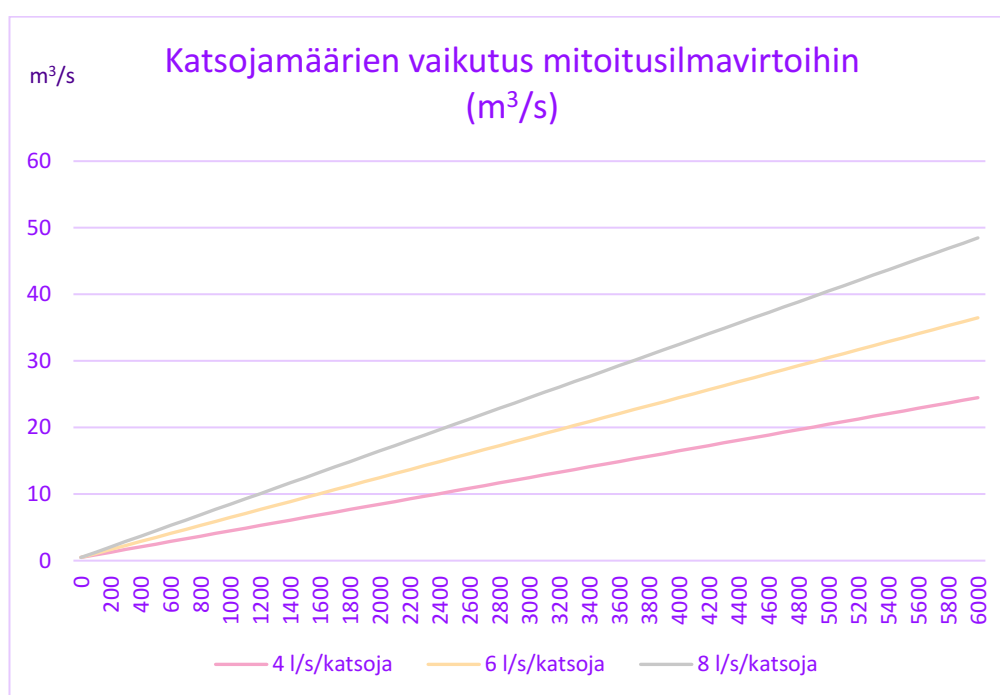
Tila	Lämpötila	Suhteellinen kosteus
Pukuhuone	21,8 °C	68 %
Jäähalli	5,5 °C	55 %

Jäärata-alueen halliosuudella on yleisesti käytetty ilmanvaihtokonetta, jossa on tulo- ja poistoilmajärjestelmän lisäksi myös kiertoilmajärjestelmä. Koneen ja järjestelmän koko määräytyy tarvittavan ilmamäärän mukaan, joka mitoitetaan henkilömäärän ja/tai ilmalämmityksen vaatiman tilavuusvirran perusteella. Harjoitushalleissa henkilömääräperusteisesti sisäänpuhallettavan ilman tilavuusvirta on luokkaa 0,18...0,24 m³/s, kun jäärata on harjoituskäytössä. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 103)



Kuva 19. Kiertoilmakoneen toimintakaavio. Osa poistoilmasta ohjataan ulkoilmavirtaan kiertoilmapellin avulla. Ilmanvaihtokoneen liittäminen jäähallin lauhdelämpöön ja jääradan kylmäputkistoon on esitettyinä liitteessä 2. (Oy Yleiskylmä-Findri Ltd., 2019)

Sisäänpuhallettava ilmavirta mitoitetaan ensisijaisesti henkilöperusteisesti maksimitarpeen mukaan. Henkilömäärien vaihtelu on jäähallissa runsasta, minkä takia ilmanvaihto tulee suunnitella siten, että se toimintoja voidaan ohjata ja säätää tarpeen mukaiseksi. Ilmanvaihtojärjestelmä tulee tällöin varustaa mitta-antureilla, -laitteilla ja ohjausyksiköllä. Aikaohjelmilla ja käsisäätöisillä järjestelmillä ei useinkaan päästä yhtä energiatehokkaaseen ja tarpeen mukaiseen ilmanvaihtoon, kuin automaatiojärjestelmällä, joka mittauksen perusteella ohjaa ilmamääriä tarpeiden mukaan. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 56)



Kuva 20. Alle 6000 katsomokapasiteetiltaan olevien jäähallien katsojamäärien vaikutus mitoitusilmamääriin. Arvoissa on käytetty ottelukohtaista tilannetta, jolloin pelaajia oletetaan olevan 40, pelaajakohtaisen tuloilmavirran ollessa 12 l/s.

Energiatehokkaassa ilmavirtojen tarpeenmukaisessa minimoinnissa tulee huomioida, että sisäilma pysyy puhtaana, eikä kosteudenhallinnassa esiinny ongelmia. Tällöin ilmanvaihdon ohjauksen tulee perustua ilmanlaadun mittaamiseen halliosassa, ja kosteuden mittaamiseen pukuhuoneissa, märkätiloissa ja varustekopeissa. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 60)

Sosiaalituloja ja muita lämpöisiä tiloja varten jäähallissa on oltava oma ilmanvaihtokoneistonsa. Täten jäähallissa on aina vähintään 2 ilmanvaihtokonetta. Lämpöisiä tiloja palveleva ilmanvaihtokone varustetaan useimmiten lämmöntalteenottolaitteella. Hallitilaa palvelevasta ilmanvaihtokoneesta se eroaa mm. siten, ettei sisäänpuhallettavaa ilmaa tarvitse kuivattaa. Sosiaalitulojen ilmanvaihdon on ohjauduttava hallitilan ilmanvaihdon mukaan, jos hallitilan ilmavirrat on suunniteltu tuottamaan halliin ulko-olosuhteiden mukaan ali- tai ylipaineen. Tilojen paineistuksesta on kerrottu kappaleessa 4.2.2. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, ss. 57,104)

Suomen LVI-liiton D2 hankkeessa (2018), on määritetty liikuntatilojen ilmanvaihdon vähimmäisvaatimukset, joilla riittävä ilmanlaatu voidaan toteuttaa. Ilmavirrat on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Pesuhuoneiden poistoilmavirta runsaalla käytöllä mitoitetaan pinta-alan mukaan (16 (l/s)/m^2). Ajoittaisella tai vähäisellä käytöllä poistoilmavirta määräytyy suihkujen lukumäärän mukaan. (SuLVI, 2018, s. 16)

Tila/käyttötarkoitus	Tuloilma (l/s)/hlö	Tuloilma (l/s)/m ²	Poistoilma (l/s)/m ²
Sisäliikuntatila (raskas liikunta: koripallo, salibandy, ryhmäliikunta)	30		
Katsomo	6		
Wc			20/paikka
Pesuhuone		5	16 l/s/suihku
Pukuhuone		3	

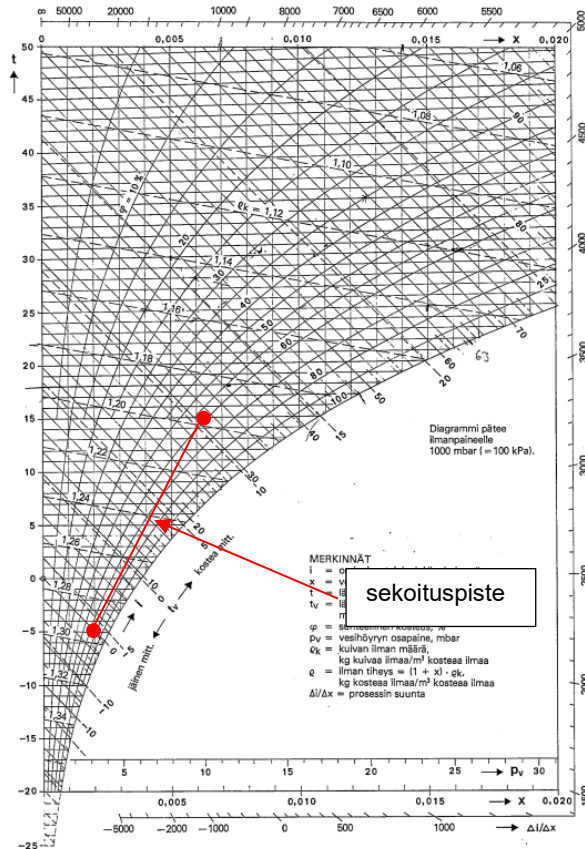
Kyseisen taulukon sisäliikuntatilan tuloilmamäärät voidaan olettaa olevan jäähallissa turhan suuret, sillä kyseinen arvo huomioi tilassa syntyvän lämpökuorman. Jäähallissa ilmavirrat määräytyvät henkilömääräperusteisesti, mutta toisinkuin taulukon mukaisessa liikuntatilassa, ilmavirroissa huomioidaan lämmitystehon tarve, mitä jääradan jäähdyttävä vaikutus aiheuttaa. Tästä syystä ilmavirrat pe-laajia kohden voivat olla 12 (l/s)/hlö , mitä jo kappaleessa 2.2 kerrottiin.

Vuonna 2018 voimaan astunut Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta, määrittää muiden, kuin asuinrakennusten sisäänpuhallettavaksi ilmavirraksi käytön ajan ulkopuolella $0,15 \text{ (l/s)/m}^2$. (Ympäristöministeriö, 2017, s. 4).

4.1.1 Kiertoilma ja ilmojen sekoittuminen

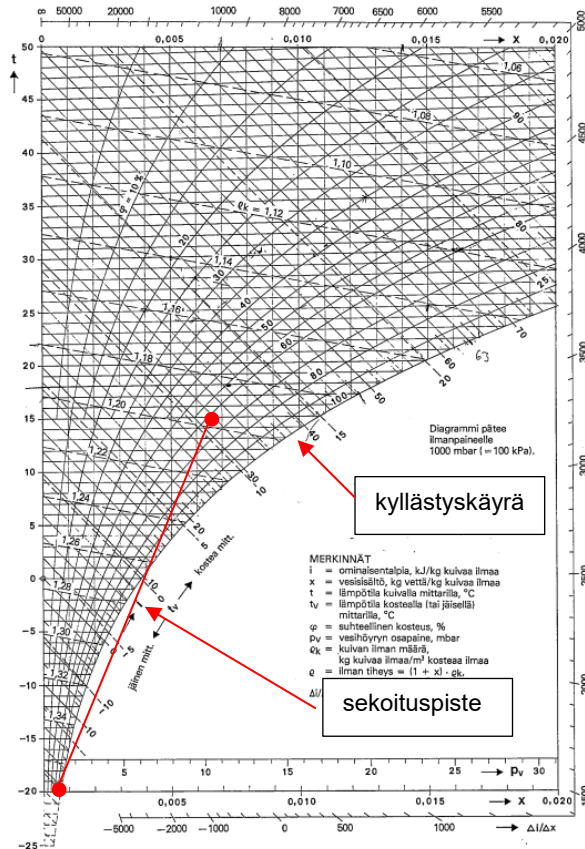
Kiertoilmaa käyttävissä ilmanvaihtokoneissa osa poistoilmasta ohjataan ennen ulos johtamista ns. kiertoilmapellin avulla sisäänpuhallettavaan ilmavirtaan. Sekoittuneen ilmavirran ominaisuudet, kuten lämpötila ja kosteus määrittyvät kierto- ja sisäänpuhallettavan ilmavirran suhteellisuudesta, sekä niiden keskinäisistä ominaisuuksista.

Kun kierto- ja sisäänpuhallettavan ilman lämpötila, suhteellinen kosteus ja ilmavirrat tunnetaan, voidaan sekoittunut ilmavirta määrittää Mollier-diagrammia käyttäen. Kierto- ja sisäänpuhallettavan ilman olosuhteiden välille piirretään suora jana, jolle sekoituspiste muodostuu. Sekoituspiste muodostuu lähemmäksi ilmavirtaa, kumpi on suurempi. (Sandberg, 2014, s. 136)



Kuva 21. Kun kierto- ja sisäänpuhallettava ilmavirta ovat yhtä suuret, sekoituspiste muodostuu keskelle näiden välistä janaa. (Sandberg, 2014, s. 136)

Sisäänpuhallettavan ilman ollessa talvella kylmää (-20 °C), voi sekoituspiste muodostua kyllästyskäyrän alapuolelle. Silloin sekoittuvassa ilmassa alkaa kondensoitua vettä, mistä muodostuu kylmän ilman virratessa vähitellen lunta. Seurauksena on suodattimen kastuminen, suodatuskyvyn heikentyminen ja lumen aiheuttamat tukkeumat suodattimessa. (Sandberg, 2014, s. 136)



Kuva 22. Sekoituspisteen jäädessä kyllästyskäyrän alapuolelle, alkaa sekoittuneessa ilmassa syntyä vettä, jota ei saisi päästä tapahtumaan. (Sandberg, 2014, s. 136) Kiertoilmavirtaa on vähennettävä, tai kiertoilmapelti on kokonaan suljettava.

Kiertoilman lämpötila ei ole sama, kuin poistoilman lämpötilan, sillä osa poistoilman sisältämästä lämmöstä siirtyy lämmöntalteenotossa tuloilmaan.

4.1.2 Ilman lämmitys

Kosteuden hallinnan ja viihtyvyyden takia sisäänpuhallettava ilma halliin on tarvittaessa lämmitettävä. Energiatehokkuuden kannalta hallissa tulee käyttää mahdollisimman alhaista lämpötilaa (3...6 °C), johon päästään oikein toteutetuilla kuivausmenetelmillä. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 63) Ilman kuivausta käsitellään kappaleessa 4.4.

Sisäänpuhallettavan ilman lämmitystarve voidaan laskea kaavalla 8 (D5 RakMK, 2012, s. 21).

$$\dot{Q}_{iv} = t_d \cdot t_v \cdot \rho_i \cdot c_{p_i} \cdot qv_{ulko} (T_s - \Delta T_{puhallin}) - T_{LTO}) \Delta t \quad (8)$$

jossa

\dot{Q}_{iv} on sisäänpuhallettavan ilman lämmitystehontarve, kWh

t_d on ilmanvaihtokoneen vuorokautinen käyntiaikasuhde, h/24

t_v on ilmanvaihtokoneen viikoittainen käyntiaikasuhde, vrk/7vrk

ρ_i on ilman tiheys, 1,2 kg/m³

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

qv_{ulko} on sisäänpuhallettava ilmavirta, m³/s

T_s on hallin sisälämpötila, °C

$\Delta T_{puhallin}$ on lämpötilan nousu puhaltimessa, °C

T_{lto} lämmöntalteenottolaitteen jälkeinen ilman lämpötila, °C

Δt on ajanjakson pituus, h

1000 on laatumuunnoskerroin W→kW

Lämmöntalteenottolaitteen jälkeisen ilman lämpötila voidaan laskea kaavalla 9. (D5 RakMK, 2012, s. 21)

$$T_{LTO} = T_u \frac{\dot{Q}_{LTO}}{t_d \cdot t_v \cdot \rho_i \cdot c_{p_i} \cdot qv_{ulko}} \quad (9)$$

jossa

\dot{Q}_{lto} on talteenotolla otettu kuukauden keskimääräinen teho, W

Lämmöntalteenotolla talteenotettava teho lasketaan kaavalla 10 (D5 RakMK, 2012, s. 21):

$$\dot{Q}_{lto} = \eta_{a,ivkone} \cdot t_d \cdot t_v \cdot \rho_i \cdot c_{p_i} \cdot qv_{poisto} (T_s - T_u) \quad (10)$$

jossa

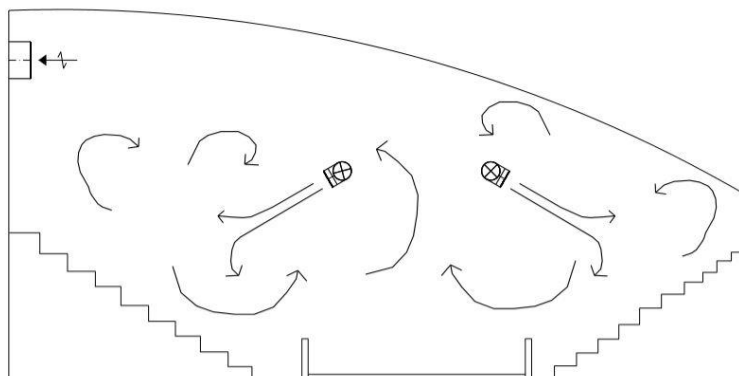
$\eta_{a,ivkone}$ on ilmanvaihtokoneen poistoilman vuosihyötysuhde

Kiertoilmaa käyttävissä ilmanvaihtokoneissa täytyy huomioida, että ennen lämmöntalteenottoa olevan ilmavirran lämpötila on sekoitus poistoilmaa ja sisäänpuhallettavaa ilmaa.

4.1.3 Ilmanjako

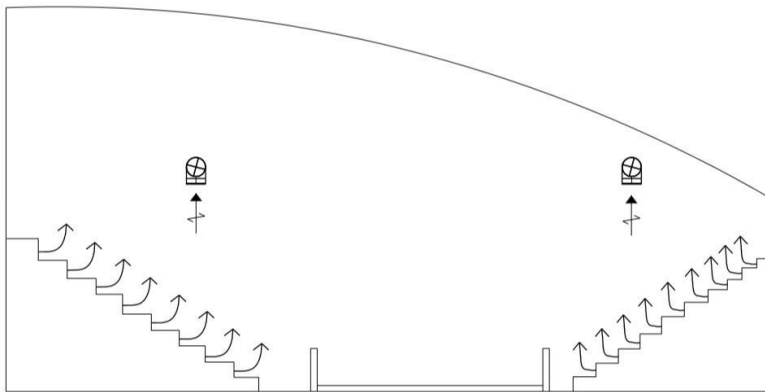
Ilmanjako tarkoittaa tuloilman johtamista tilaan, ja poistoilman johtamista tilasta pois. Ilmaa voidaan tuoda ja poistaa tilasta erilaisilla ilmanjakotavoilla, joilla voidaan vaikuttaa ilman vaihtuvuuteen, epäpuhtauksien poistamiseen ja lämpötilaolosuhteisiin. Ilmanjakotavan valintaan vaikuttaa tilan käyttötapa. Ilmanjakotavat voidaan luokitella neljään eri perustapaukseen, joita ovat sekoittava ilmanvaihto, syrjäyttävä ilmanvaihto, laminaarinen virtaus ja oikosulkuvirtaus. (Seppänen, 1996, s. 194) Jäähalleissa tyypilliset ilmanjakotavat ovat sekoittava, syrjäyttävä tai näiden yhdistelmä. (Jäähallit ja tekojääkentät, 1999, s. 119)

Sekoittavassa ilmanjaossa tuloilma pyritään sekoittamaan suurella ilman virtausnopeudella tilaan. Tilassa oleva ilma imeytyy tuloilmalaitteesta virtaavaan ilma-suuhkuun, jolloin ilmojen sekoittuminen saa aikaan tasaiset olosuhteet koko tilassa. Sekoittava ilmanjako soveltuu tiloihin, joissa ei ole voimakkaita epäpuhtauslähteitä, sillä muuten epäpuhtaudet leviäisivät koko tilaan. (Seppänen, 1996, s. 194)



Kuva 23. Sekoittava ilmanjakotapa on yleinen harjoitushalleissa. Tuloilman puhaltamista suoraa kenttäalueelle tulee välttää konvektiovirtausten välttämiseksi. (Jäähallit ja tekojääkentät, 1999, s. 119)

Syrjäyttävässä ilmanjaossa tuloilma tuodaan tilaan pienellä virtausnopeudella, syrjäyttäen vanhan ilman tieltään. Pienellä virtausnopeudella pyritään välttämään ilman sekoittumista tilassa. Tarkoituksena on luoda hyvät olosuhteet oleskeluvyöhykkeellä. Syrjäyttävä ilmanjako saa aikaan lämpötilojen ja epäpuhtauksien kerrostumisen, mistä syystä lämpötilojen nousu tilan muissa osissa täytyy olla sallittua. Tuloilman tulisi olla huoneilmaa hieman kylmempää, jotta ilmavirtauksien suunta pysyy toivottuna: Lämmin ilma nousee ylöspäin ja kylmempi ilma ”vaaluu” oleskeluvyöhykkeelle. Liian kylmä ilma voi aiheuttaa vedon tunnetta. (Seppänen, 1996, s. 198)



Kuva 24. Syrjäyttävä ilmanvaihto on yleisempi kilpailu- ja suurhalleissa. Tuloilma voidaan tuoda oleskeluvyöhykkeelle katsomon istuinten alta. Jäähallissa voidaan myös käyttää sekoittavan ja syrjäyttävän ilmanjaon yhdistelmää. (Jäähallit ja tekojäähallit, 1999, s. 119)

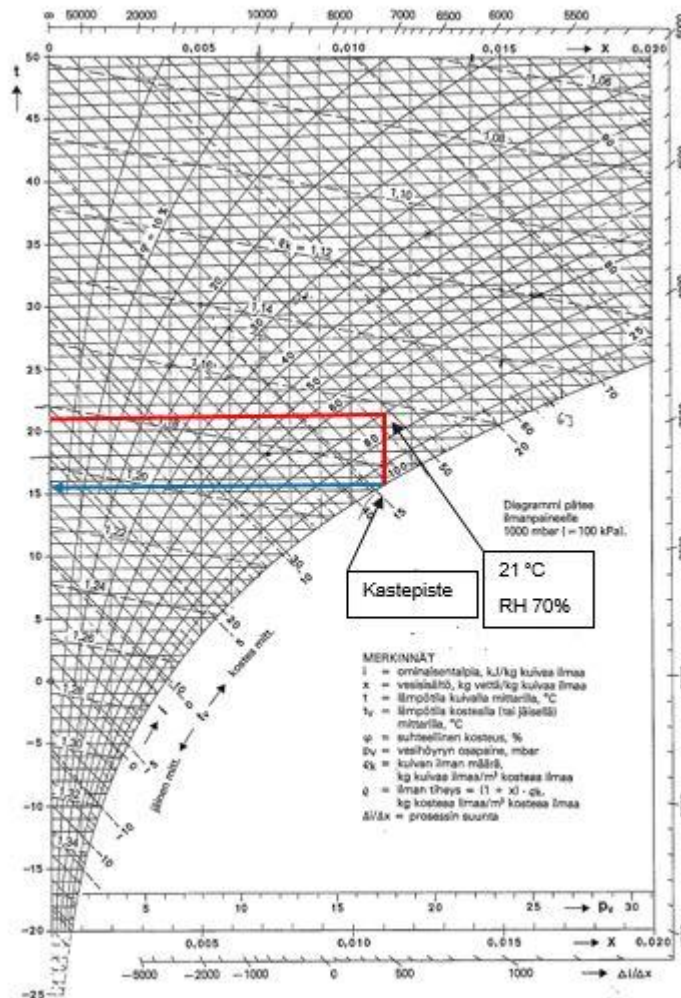
4.2 Kosteus

Jäähallien suhteellisen kosteuden enimmäisraja-arvona on pidetty 70 %, mikä ehkäisee homesienten kasvua rakenteissa. Korroosio kiihtyy suojaamattomissa metallipinnoissa, kun suhteellinen kosteus ylittää 50 %. Korroosion muodostumista voidaan estää pinnoituksilla. (Jäähallit ja tekojäähallit, 1999, s. 118)

Yleisimmät puutteet kosteuden hallinnassa ovat hallitsemattomat ilmavuodot, suorat kulkuyhteydet jäähallin puolilämpimästä tilasta ulkoilmaan ja kiertoilman sekoittaminen tuloilmaan ennen kuivatusta. Myös liian matala sisälämpötila on

usein syynä kosteuden muodostumiseen hallin puolilämpimässä tilassa. Kyseiset ongelmat ilmenevät pääasiassa kesäaikoina, jolloin ulkoilman kosteusmäärä on suuri. Ilmavuotoja hallin sisälle voidaan vähentää ulkovaipan ilmanpitävyyttä parantamalla ja uloskäynnin osastoinnilla tuulikaapin avulla (kosteus s.8,66)

Puku- ja pesuhuoneet ovat lämpöisistä tiloista hankalimmat hallita kosteutta. Kosteuskuormien vaihtelut ovat vuorokausien välillä ovat suuria, ja ne riippuvat paljon tilan käyttöasteesta. Sosiaalitilojen rajoittuminen puolilämpimän tilan vastakkaiselle seinälle kasvattavat kosteuden hallinnan haastavuutta, sillä lämpimän puolen seinälle voi muodostua kastepiste. Tällöin seinän pintalämpötila on riittävän matala tiivistämään sosiaalitilassa syntyneen kostean ilman vedeksi seinän pinnalle. Kyseisten seinärakenteiden eristävyys tulisi kylmäsillat huomioiden suunnitella siten, ettei kastepistettä pysty missään tilanteissa muodostumaan (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 102)



Kuva 25. Esimerkki: Pukuhuoneen lämpötilan ollessa 21 °C, ja suhteellisen kosteuden 70 %, muodostuu kastepiste kyllästyskäyrän (100%) mukaan jo 15,5 °C lämpötilassa. Kyseisen tilan rakenteiden pintalämpötilan ollessa kastepistelämpötilassa, tai sen alapuolella, alkaa ilman sisältämä kosteus kondensoitua rakenteiden pinnalle. (Liite 3)

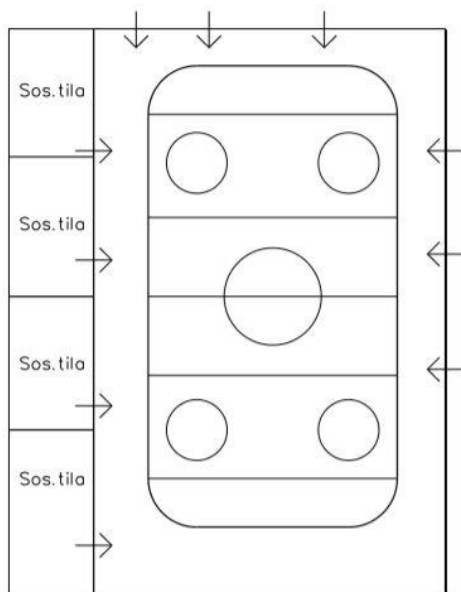
4.2.1 Kosteuden liikkuminen

Kosteus siirtyy ulkovaipan läpi yleisesti vesihöyryn diffuusiona, tai konvektiossa ulkoilmavuotojen mukana. Diffuusiossa vesihöyryn osapaineen ollessa lämpimässä ulkoilmassa jäähallitilan osapainetta suurempi, pyrkii kosteus siirtymään osapaineiden tasoittumisen yhteydessä ulkovaipan läpi hallitilaan. Jäähalleissa kosteuden liikkumissuunta riippuu siis paljon vuodenajasta: Kesällä lämpimän ulkoilman kosteus pyrkii sisätilaa, talvella hallitilan kosteus pyrkii ulkoilmaan. Vesihöyryn osapaine-ero on kuitenkin harvoin yhtä suuri, kuin tasalämpöisissä ja lämmitetyissä rakennuksissa. (Jäähallit ja tekojääkentät, 1999, s. 93)

Konvektiossa siirtyvään kosteusmäärään vaikuttaa vaipan tiiveys, sekä paineero, mikä ulkovaipan yli syntyy sisä- ja ulkolämpötilaeron takia. Ilmanvaihdolla ja jäähallin paineistuksella on myös vaikutusta konvektiovirtausten muodostumisessa. (Jäähallit ja tekojääkentät, 1999, s. 93) Tilojen paineistuksesta kerrotaan lisää kappaleessa 4.2.2.

Ilmavirtojen suunnittelussa lasketaan eri osastojen tulo- ja poistoilmavirrat yhteen, ja arvioidaan, mitä kautta ilmanvaihdon kokonaisilmavirrat tasapainottuvat. Alipaineisen hallitilan ulko-ovien ollessa suljettuna, vuotoilmavirtojen mukana tuoma kosteus siirtyy ulkovaipan läpi hallitilan, ja hallitilasta lämpimiin puku- ja märkätiloihin, jos kyseiset tilat ovat alipaineisia hallitilaan nähden.

Jäähallin ulko-oven aukaisun myötä kokonaisilmavirrat tasapainottuvat suurimmaksi osaksi kyseisen oven kautta, mikä lisää hallitilan kosteuskuormaa merkittävästi. Uloskäyntien osastoinnilla voidaan vähentää ulko-ovien kautta tulevaa kosteuskuormaa. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 101)



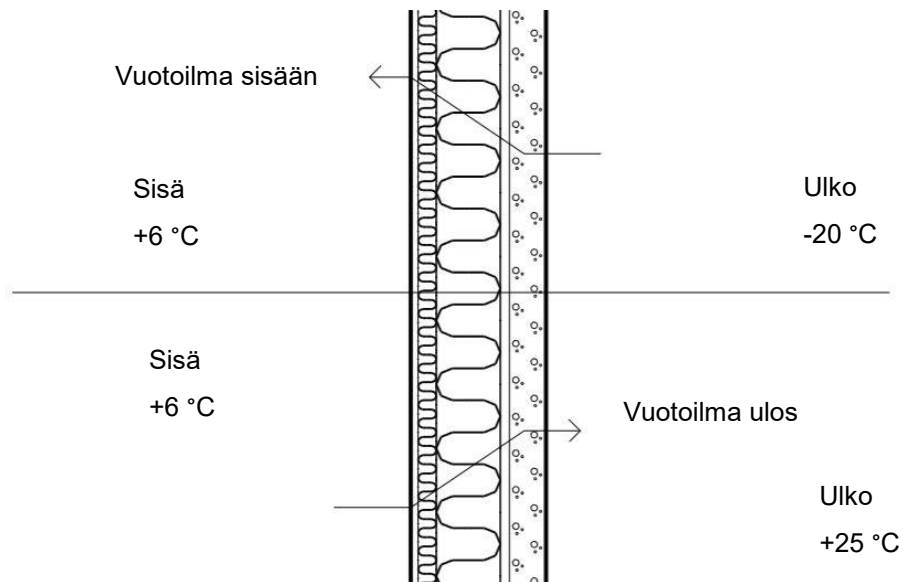
Kuva 26. Sosiaalityötilojen ollessa ylipaineisia hallitilaan nähden, siirtyy siellä syntyneet kosteuskuormat vuotoilmavirtana puolilämpimään tilaan ulkoilman vuotoilmavirtojen tavoin (kuva muutettu). (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 101)

4.2.2 Tilojen paineistaminen

Suoralla ulkoilman kuivatuslaitteistolla voidaan hallita tilojen kosteudenhallintaa säätelemällä tilaan puhallettavan ilmavirran määrää. Tällöin järjestelmä säätää ilmavirtoja ulkokosteuden mukaan: Kun ulkona on suurempi kosteus, kuin puolilämpimässä jäähallissa, järjestelmä ylipaineistaa kyseisen tilan. Vastaavasti ulkokosteuden ollessa pienempi, tila alipaineistetaan. Tilojen painetasojen vaihtelut voidaan toteuttaa ilman suoralla kuivatuslaitteistolla. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 104)

Tämä vaatii järjestelmältä automaatio-ohjausta ja säätötekniikkaa. Ulkokosteuden mukaan säätävässä järjestelmässä täytyy ottaa huomioon lämpöisten sosiaalitulojen ilmanvaihto ja sen ohjautuvuus hallitilan ilmanvaihdon käyttöasentojen mukaan: Ilmavirtauksen suunta tulee aina olla kylmemmästä tilasta lämpimämpään tilaan. Sosiaalitulojen tulee siis olla alipaineistettuja puolilämpimään tilaan nähden ja hallitilan alipaineinen kylmempään ulkoilmaan nähden. Kosteudenhallinnan kannalta ilman tulisi aina lämmitä virtaussuuntaansa nähden, mikä tilojen paineistamisella voidaan toteuttaa (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 104)

Kuten kappaleessa 4.2 kerrottiin, vaipan tiiveydellä on suuri vaikutus vuotoilma-
virtoihin rakenteiden läpi. Ulkolämpötilan ollessa hallitilaa korkeampi, pyrkii lämmin ulkoilma tulemaan rakenteiden läpi puolilämpimään jäähalliin. Talvella tilanne on päin vastainen. Huonosti lämmöneristetty tai tiivistetty vaippa päästää lämpöä lävitseen, ja kastelee vuodenajan mukaan jäähallin sisä- tai ulkorakenteita. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 82)



Kuva 27. Kuvassa olevat nuolet kuvaava vuotoilman lämpötilan nousua kulkiesaan seinärakenteen läpi kohti lämpimämpää ilmaa. Vuotoilman suunnan muutokset saadaan aikaan tiloja paineistamalla. Ilman lämpötilan noustessa sen suhteellinen kosteus laskee. (Havainnekuva)

Ympäristöministeriön asetus rakennusten lämmöneristyksestä (2010), määrittelee rakennuksien, kuten tässä tapauksessa jäähallien lämpimien- ja puolilämpimien tilojen rakenteille U-arvot. U-arvo kertoo, kuinka suuri lämpövirrantiheys rakenteen läpi pääsee kulkemaan sen erottavien tilojen välillä, joissa vallitsee eri lämpötila. Mitä pienempi U-arvo on, sitä pienempi on myös lämpövirran tiheys kyseisillä lämpötiloilla. U-arvon yksikkö on $W/(m^2/K)$. (C3 RakMK, 2010)

Taulukko 7. Rakenteiden lämmönläpäisykertoimet lämpimissä tiloissa. (C3 RakMK, 2010)

Rakenneosa	U-arvo $W/(m^2/K)$
Ulkoseinä	0,17
Yläpohja	0,09
Alapohja (maanvarainen)	0,16
Ikkuna, ovi	1,0

Taulukko 8. Rakenteiden lämmönläpäisykertoimet puolilämpimissä tiloissa. Arvoja saa ylittää erityisistä syistä. (C3 RakMK, 2010)

Rakenneosa	U-arvo $W/(m^2/K)$
Ulkoseinä	0,26
Yläpohja	0,14
Alapohja (maanvarainen)	0,24
Ikkuna, ovi	1,4

Taulukko 9. Rakenteiden lämmönläpäisykertoimet rakenteille, jotka rajoittuvat puolilämpimään tilaan. Kyseisiä arvoja ei saa ylittää. (C3 RakMK, 2010)

Rakenneosa	U-arvo $W/(m^2/K)$
Seinä	0,60
Välipohja	0,60
Ikkuna, ovi	2,8

4.2.3 Virtauskatve

Jäärata-alueen kaukalon laidan ja seinärakenteen väliin jäävään kapeaan väliin voi syntyä helposti virtauskatve, missä tuulettuvuus jää heikommaksi, lämpötila alenee, ja samalla kosteuspitoisuus nousee. Rakenteiden pintalämpötilat kylminä vuodenaikoina voivat laskea kastepistelämpötilaan, jolloin pintoihin alkaa muodostumaan jäätä. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, ss. 58,98)

Kiertoilmajärjestelmässä imupuoli on tyypillisesti sijoitettu pistemäisesti hallin jollekin sivustalle. Virtauskatve syntyy tyypillisesti tämän imupisteen vastakkaiselle sivustalle. Virtauskatveen riittävän tuulettumisen takaamiseksi on halliin puhallettavasta kokonaistuloilmamäärästä suunnattava 15-30 % imupuolen vastaiselle seinustalle. Tuloilman suuntaamisella voidaan täten ehkäistä lämpötilojen alenemista virtauskatveissa. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 98)

Virtauskatveiden ehkäiseminen voidaan varmistaa lattialämmityksellä rata-alueen ja hallin seinälinjojen välissä. Tällöin lämpötila ulkoseinän linjalla ei pääse

laskemaan alle kastepisteen. Ulkoseinän ja rata-alueen väliin jäävä lattialämmityskaistan leveys on tyypillisesti 0,5 m, lämmitysputkia ollen kaistalla vähintään 4. Lattialämmityksen ja jään pinnan näkökerroin 0, eli lattian säteilylämpö ei kohtaa jään pintaa, eikä aiheuta lämpökuormaa jäähän. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, ss. 58-59,99)

Virtauskatveiden ehkäisemiseen voidaan käyttää myös erillisiä kiertoilmalämmitimiä. Koteloimaton kiertoilmalämmitin on usein häiritsevän äänekäs, mistä syystä niiden käyttö rajoittuu aikaan, jolloin jäähallissa ei ole toimintaa. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 58)

4.2.4 Kosteuskuormat

Jäähalliin syntyy kosteutta käyttäjistä, ulkoilmasta, haihtuvasta vedestä, jonka jäänajokone jättää jäänpinnalle, sekä itse jäänajokoneesta. Kosteaa ulkoilmaa voi päästä jäähalliin ilmanvaihdon, ovien, ikkunoiden, rakenteiden tai vuotoaukkojen kautta. (IIHF 2016, s44). Suurin kosteuskuorma jäähalliin syntyy kuitenkin ulkoilmasta, joka tulee jäähalliin ulkovaipan läpi vuotoilmana, tai hallitsemattomana ilmanvaihtokoneen kautta. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 102)

Vuotoilman aiheuttama kosteuskuorma voidaan laskea kaavalla 11 (Laitinen, 2010, s. 70)

$$G_{vuoto} = qv_{vuotoilma} \cdot \rho_i(x_u - x_s) \quad (11)$$

jossa

G_{vuoto} on vuotoilman kosteusvirta, g/s

$qv_{vuotoilma}$ on vuotoilmavirta, m³/s

ρ_i on ulkoilman tiheys, 1,2 kg/m³

x_u on ulkoilman vesisisältö, g/kg

x_s on hallin sisäilman vesisisältö, g/kg

Vuotoilmavirta voidaan määrittää kaavalla 12. (Laitinen, 2010, s. 62)

$$qv_{vuotoilma} = \frac{n_{vuotoilma} \cdot V}{3600} \quad (12)$$

jossa

$n_{vuotoilma}$ on hallin vuotoilmakerroin, 1/h (kertaa tunnissa)

V on hallin ilmatilavuus, m^3

3 600 on laatumuunnoskerroin $m^3/h \rightarrow m^3/s$

Ellei vuotoilmakerrointa tunneta, voidaan laskelmissa käyttää arvoa 0,16 1/h. (Laitinen, 2010, ss. 62,70)

Vuotoilmakerroimen määrittämiseen tarvitaan vaipan ilmanvuotoluku q_{50} , joka kertoo vuotoilmavirran (m^3/h) suhteutettuna vaipan pinta-alaan (m^2), kun paine-ero on 50 Pa. Mitä ilmatiiviimpi rakenne on, sitä pienempi on ilmanvuotoluku. Ilmanvuotoluku tulee osoittaa kokeellisesti mittaamalla. Muuten ilmanvuotolukuna käytetään arvoa 4,0, joka on jo heikko tiiveys. (Vertia, 2019)

Vuotoilmakerroin voidaan laskea kaavasta 13, jos vuotoilmaluku tunnetaan (Laitinen, 2010, s. 62)

$$n_{vuotoilma} = \frac{n_{50}}{25} \quad (13)$$

jossa

$n_{vuotoilma}$ on hallin vaipan vuotoilmakerroin 1/h

n_{50} on rakennuksen vaipan ilmanvuotoluku 50 Pa:n paine-erolla, 1/h.

Jos ulkoilmaa ei erikseen kuivata ilmanvaihtokoneessa, on sisäänpuhallettavan ilman vesisisältö sama, kuin ulkoilmassa. Ilmanvaihdon tuloilmassa mukana tuleva kosteuskuorma halliin voidaan laskea kaavalla 14 (Laitinen, 2010, s. 69)

$$G_{iv} = qv \cdot g_i(x_u - x_s) \quad (14)$$

jossa

G_{iv} on ulkoilmavirran kosteuskuorma, g/s

qv on ulkoilmavirta, m^3/s

ρ_i on ulkoilman tiheys, 1,2 kg/m³

x_u on ulkoilmavirran vesisisältö maksimikäyttöjaksolla, g/kg (Liite 3)

x_s on hallin sisäilman vesisisältö maksimikäyttötilanteessa, g/kg (Liite 3)

Ulkoilman suhteellinen kosteus ja vesisisältö ovat jäähallin olosuhteisiin verrattuna korkeat, mistä syystä jäähalliin sisäänpuhallettava ilmaa on lähes välttämätöntä kuivata. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 9)

Kosteuskuormat luisteliijoista ja katsojista riippuvat hallin lämpötilasta ja henkilömäärästä. Henkilöistä kertyvät kosteuskuormat ovat esitettynä taulukossa 10. Kosteuden muodostumiseen vaikuttaa jäähallin sisälämpötila

Taulukko 10. Hallin lämpötilasta riippuvaiset kosteuskuormat (g/h) pelaajille ja katsojille. (Laitinen, 2010, s. 56)

Hallin lämpötila	Kosteuskuorma pelaaja g/h	Kosteuskuorma katsoja g/h
+4 °C	355	28
+6 °C	476	48
+8 °C	497	69
+10 °C	517	90
+12 °C	538	110
+14 °C	559	130
+16 °C	579	151

4.3 Ilman kuivatus

Sisäilman kuivatustarve jäähalleissa kohdistuu etenkin puolilämpimään halli-osaan. Lämpimissä tiloissa kuivatus perustuu sisäilman kuivaukseen, joka pääsääntöisesti toteutetaan riittävällä poistoilmalla ja tilan lämmityksellä. Pukuhuoneiden ja märkätilojen kuivatukseen ei ole kuitenkaan asetettu mitään erityisvaatimuksia (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 59)

Jäähalleissa on lähes välttämätöntä kuivattaa sisäilmaa. Jääradan käyttäminen kesäaikana lisää huomattavasti kuivatustarvetta, sillä lämpimän ilman vesisisältö

(g/kg) on suurempi, kuin jäähallissa, vaikka suhteellinen kosteus olisikin pienempi. Kuivatukseen käytetään sorptio- tai kondenssikuivainta, tai niiden yhdistelmää. Usein energiatehokkaimpaan lopputulokseen päästään, kun jäähallin ilman kuivatuksessa käytetään kumpaakin kuivaintyyppiä, soveltaen ulkoilman suoraa kuivatusperiaatetta. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, ss. 9,60,74)

Kuivatustarve määräytyy kosteuskuormien mukaan, joita sisäänpuhallettava ilma ja vuotoilma sisältävät, sekä henkilöt tuottavat. Kuivatustarvetta hallissa vähentää jäähän kondensoitua ilma. Kuivaimella poistettava vesivirta voidaan määrittää kaavalla 14. (Laitinen, 2010, s. 68)

$$G_{kuivaus} = G_{iv} + G_{vuoto} + G_{henkilö} - G_{jää,kond}. \quad (14)$$

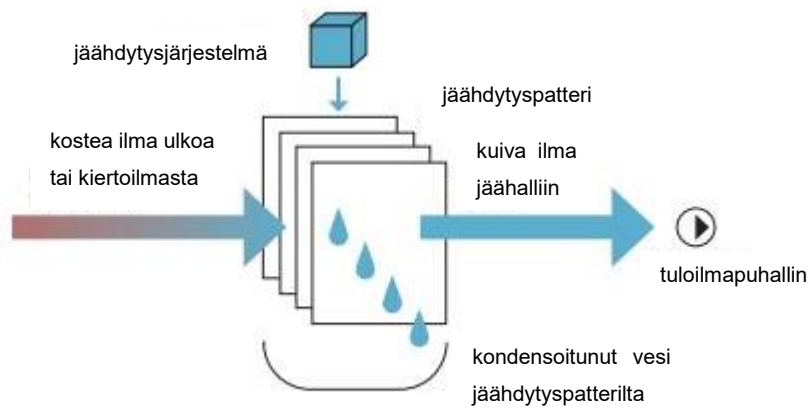
jossa $G_{jää,kond}$ on jäähän kondensoitua vesivirta, g/s.

Jäähän kondensoituvaa vesivirtaa on käsitelty tarkemmin kappaleessa 4.5.4. (Ilmasta jäähän kondensoituvan veden lämpökuorma.

4.3.1 Kondenssikuivain

Kondenssikuivain on käytännössä jäähdytyspatteri. Se voi olla sähkötoiminen, tai se voidaan liittää samaan kylmäkiertoon, kuin jääratakin. Liitettäessä kondenssikuivain jäähallin kylmäkiertoon, on se energiatehokkuudeltaan sorptiokuivainta parempi. (Leppä, 2016, s. 17)

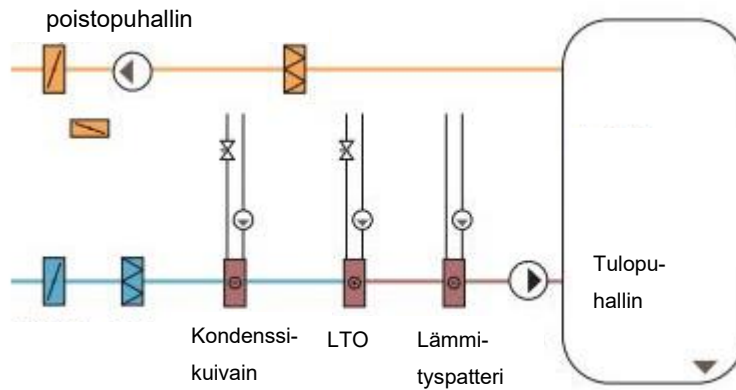
Kostea ja kuivattava ilma virtaa jäähdytyspatterin kennojen läpi suoraa ulkoa, tai ilmanvaihtokoneen kierrätysilmaan sekoitettuna, jolloin kosteus tiivistyy patterin jäähdytetyille levypinnoille. Kondenssikuivain voi olla yksittäinen laite suorassa tuloilman kuivatuksessa, tai se voidaan integroida ilmanvaihtokoneeseen. (IIHF, 2016, s. 45)



Kuva 28. Kondenssikuvaimen toimintaperiaate (kuvaa muutettu) (IIHF, 2016, s. 46)

Jäähdytyspatterin liitetyn liuospiirin nesteen lämpötila ei saisi olla liian alhainen, jotta patterin jäähdytyskennojen jäätymiseltä vältyttäisiin. Kennojen jäätyminen heikentää patterin kuivatustehoa, sillä sulattamisesta vapautuva kosteus palautuu sisäilmaan. Myös sulattaminen itsessään kuluttaa energiaa. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 74)

Kondenssikuvain toimii hyvällä hyötysuhteella, kun läpi virtaava ilma on kostea ja korkeassa lämpötilassa. Täten kuvainmalli toimii hyvin jäähallin suorassa tuloilman kuivatuksessa. Läpivirtaavan ilman lämpötilan laskiessa nollaan tai sen alapuolelle, kuvaimen teho kuitenkin laskee nopeasti. Tästä syystä eri mallisten kuvainten käyttö jäähallissa on suotavaa, jotta tuloilman kuivatus on tehokasta ulkoilmaolosuhteista riippumatta. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 74)

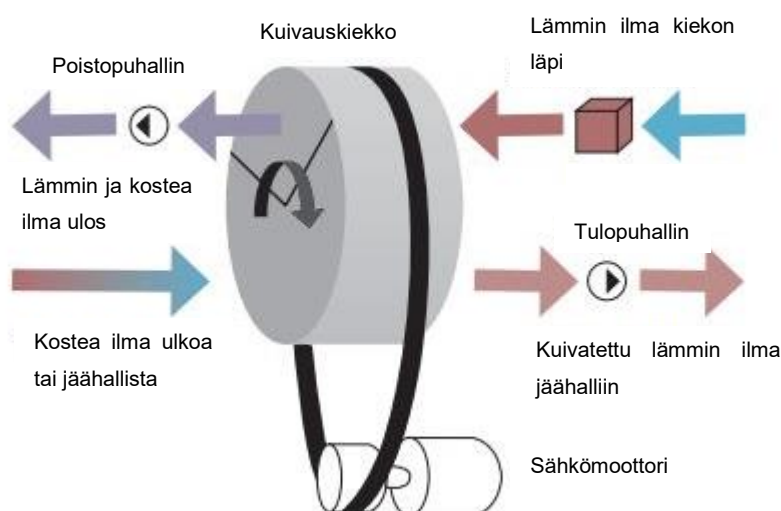


Kuva 29. Kondenssi-kuivaimen sijoitus halliosan ilmanvaihtokoneessa. Kierrätysilman käyttö heikentää kuivaimen kuivatustehoa. (kuvaa muutettu) (IIHF, 2016, s. 45)

4.3.2 Sorptiokuivain

Sorptiokuivain on sähkömoottorilla hitaasti pyörivä kiekko tai levy, jonka toiminta perustuu kosteutta sitovaan aineeseen, jolla pyörivä levy on täytetty. Usein käytetty aine on silikageeli. (IIHF, 2016, s. 45) Silika (SiO_2) on piin ja hapen yhdistelmä, ja sen kosteutta sitovia ominaisuuksia käytetään esim. tuotepakkauksissa. (Global Healing Center, 2016)

Kostea ilma virtaa sorptiokuivaimen pyörivän kiekon läpi, jossa kosteutta sitova aine sitoo siitä kosteutta. Samalla pyörivän kiekon läpi johdetaan lämmintä ilmaa, joka lämmittää ja samalla laskee sisäänpuhalletun ilman suhteellista kosteutta. Lämmitetty ja kuivatettu ilma voidaan tämän jälkeen puhaltaa jäähalliin, ja lämmin kostea ilma johtaa ulos rakennuksesta, tai hyödyntää lämmöntalteenotto järjestelmässä. (IIHF, 2016, s. 46) Sorptiokuivaimen vaatima lämpöenergia voidaan toteuttaa kylmäaineprosessissa syntyvällä lauhdelämmöllä. (Leppä, 2016, s. 9)



Kuva 30. Sorptiokuivaimen toimintaperiaate (kuvaa muutettu). (IIHF, 2016, s. 46)

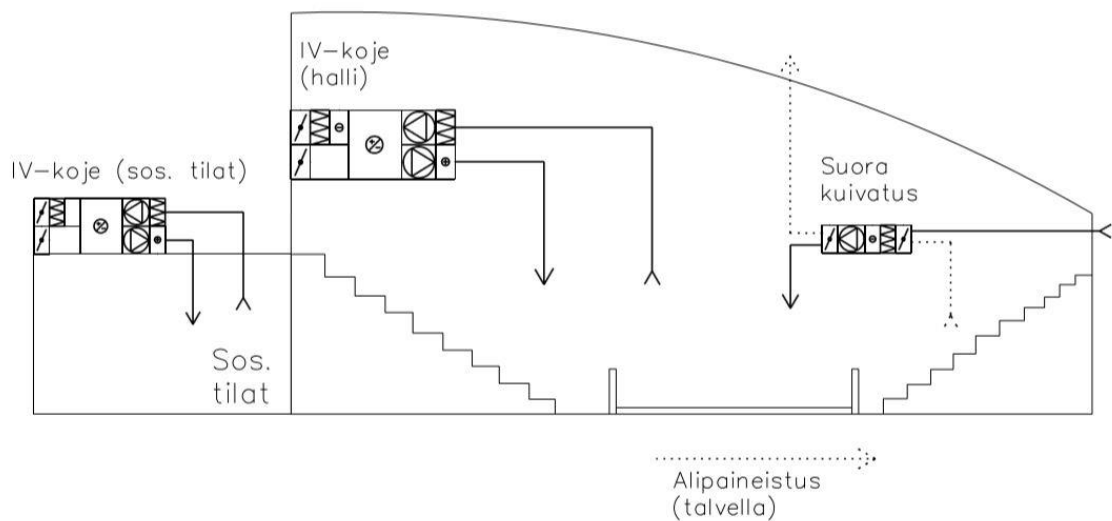
Sorptiokuivaimet soveltuvat ilman kuivatukseen matalissa tuloilman lämpötiloissa ja kosteuksissa. Tästä syystä kuivainmalli toimii parhaiten jäähallin kiertoilman kuivatukseen. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 74)

4.3.3 Suora ulkoilman kuivatus

Paras kuivatustulos saadaan, kun sisäänpuhallettavaa ilmaa kuivataan suoraa, eikä sekoiteta sitä ensin kiertoilmaan. Sekoittaminen kiertoilmaan ennen kuivatusta laskee kuivaimen läpi virtaavan ilman lämpötilaa, mikä laskee kuivaustehoa etenkin kondenssikuivaimella. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, ss. 9,,74)

Ulkoilman kuivattaminen suoraa vaatii oman kuivatuskoneikon. Koneikon ilmavirta mitoitetetaan vaadittavan tuloilman perusteella, jolloin se on harjoitushalleissa luokkaa 0,6 m³/s. Suorassa kuivauksessa saavutetaan parempi energiatehokkuus, ja kuivatus pystytään toteuttamaan edullisesti kondenssikuivaimella. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 104)

Suoran ulkoilman kuivatusjärjestelmän asentaminen kiertoilmalla toimivan ilmanvaihtokoneen rinnalle pienentää kyseisen kiertoilmakoneen kuivatustehovaatimusta, kun hallin tullutta sisäilmaa on jo valmiiksi kuivatettu. Kiertoilmakoneen kuivatettava ilma voidaan tällöin ohjata vain osittain sen kuivaimeen, millä säävytetaan pienemmät laitteistokoot ja tehovaatimukset. Suoralla ulkoilman kuivatuskoneella voidaan toteuttaa myös jäähallin painetasojen vaihtelu, millä välteään kosteuden siirtymisen virtaussuunnassa lämpimästä kylmään. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 104)



Kuva 31. Suora kuivatus osana jäähallin ilmanvaihtoa ja tilojen ali-/ylipaineistusta. (Kuvaa muutettu). (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 103)

4.3.4 Kondenssikuivaimen kuivatustarve ja energiakulutus

Kondensoivan kuivaimen läpi kulkeva ilmavirta määrätty tarvittavan vesimäärän poistamisen mukaan. Kondensoivan kuivaimen ilmavirta voidaan laskea kaavasta 15, jos kuivaimella poistettava vesimäärä (g/s) on tiedossa (Laitinen, 2010, s. 72)

$$qv = \frac{G_{kuivain}}{\rho(1 - \eta_{ok.kuivain}) \cdot (x_1 - x_p)} \quad (15)$$

jossa

qv on kuivaimen ilmavirta, m^3/s

$G_{kuivain}$ on kuivaimella poistettava vesivirta, g/s

ρ on ilman tiheys, kg/m^3

$\eta_{ok.kuivain}$ on kuivaimen ohituskerroin

x_1 on ilman vesisisältö ennen kuivainta, g/kg (Liite 3)

x_p on kuivainpatterin keskimääräistä pintalämpötilaa vastaavan kylläisen tilan vesisisältö, g/kg (Liite 3)

Kuivaimen ohituskerroin $\eta_{ok.kuivain}$ ottaa huomioon ilmavirran, joka ohittaa kuivaimen jäähdytyspatterin, jolloin patterin jälkeinen ilma on sekoitus kylläistä ja ohitse mennyttä ilmaa. Jos ohituskerrointa ei ole tiedossa, voidaan kertoimena käyttää arvoa 0,2.

Jos tarvittava ilmavirta on tiedossa, voidaan kaava 15 kääntää muotoon, josta saadaan kuivaimella poistettava vesimäärä (g/s) kaavalla 16. Muussa tapauksessa kuivatustarve saatiin jo aiemmin määritettyä kaavalla 14.

$$G_{kuivain} = qv \cdot \rho(1 - \eta_{ok.kuivain}) \cdot (x_1 - x_p) \quad (16)$$

Kondensoivan kuivaimen jäähdytystehontarve voidaan laskea kaavasta 17. (Laitinen, 2010, s. 72)

$$\dot{Q}_{kuivain} = qv \cdot \rho(1 - \eta_{ok.kuivain}) \cdot (h_1 - h_p) + \dot{Q}_{jää} \quad (17)$$

jossa

$\dot{Q}_{kuivain}$ on kuivaimen jäähdytystehontarve

h_1 on ilman entalpia ennen kuivainpatteria, kJ/kg (Liite 3)

h_p on kuivainpatterin pintalämpötilaa vastaavan kylläisen tilan entalpia, kJ/kg (Liite 3)

$\dot{Q}_{jää}$ on patterille kondensoituvan veden jäätymisen aiheuttama tehontarve, kW

Jos kuivainpatterin pintalämpötila T_p on > 0 °C, niin $\dot{Q}_{jää} = 0$. Pintalämpötilan ollessa alle 0 °C, jäätymisen aiheuttama tehontarve määritetään kaavasta 18. (Laitinen, 2010, s. 72)

$$\dot{Q}_{\text{jää}} = G_{\text{kuivain}}(I_j + cp_j(0\text{ °C} - T_p))/1000 \quad (18)$$

jossa

I_j on jään sulamislämpö, 334 kWs/kg

cp_j on jään ominaislämpökapasiteetti, 2,1 kWs/(kgK)

T_p on kuivainpatterin pintalämpötila, °C

1000 on muunnoskerroin, g/s → kg/s

Kuivainpatterin jälkeisen ilman vesisisältö määritetään kaavasta 19 (Laitinen, 2010, s. 72):

$$x_2 = x_p + \eta_{ok.kuivain}(x_1 - x_p) \quad (19)$$

jossa

x_2 on ilman vesisisältö patterin jälkeen, g/kg

x_p on patterin keskimäärästä pintalämpötilaa vastaavan kylläisen ilman vesisisältö, g/kg (Liite 3)

x_1 on ilman vesisisältö ennen patteria, g/kg (Liite 3)

Vastaavanlaisella kaavalla voidaan määrittää ilman lämpötila kuivauspatterin jälkeensä kaavalla 20. (Laitinen, 2010, s. 73)

$$T_2 = T_p + \eta_{ok.kuivain}(T_1 - T_p) \quad (20)$$

jossa

T_2 on ilman lämpötila patterin jälkeen, °C

T_p on patterin keskimääräinen pintalämpötila, °C

T_1 on ilman lämpötila ennen patteria, °C

Jäähdytetty ja kuivatettu ilma täytyy tarvittaessa lämmittää jäähallin tavoitteelliseen lämpötilaan. Jäähdytetyn ilman lämmitystehontarve voidaan määrittää kaavasta 21. (Laitinen, 2010, s. 73)

$$\dot{Q}_{\text{kuivain,läm.}} = qv \cdot \rho_i \cdot c_{p_i}(T_s - T_p - \eta_{\text{ok.kuivain}}(T_1 - T_p)) \quad (21)$$

jossa

$\dot{Q}_{\text{kuivain,läm.}}$ on kuivatun ilman lämmitystehontarve, kW

qv on kuivaimen ilmavirta, m³/s

c_{p_i} on ilman ominaislämpökapasiteetti 1,0 kW/(kgK)

T_s on hallin tavoitteellinen lämpötila, °C

$\eta_{\text{ok.kuivain}}$ on kuivaimenohituskerroin

T_1 on ilman lämpötila ennen ohituspatteria, °C

T_p on patterin keskimääräinen pintalämpötila, °C

Tapauksissa, jossa kondensoivan patterin pintalämpötila on alle 0 °C, täytyy patteriin muodostuva jää silloin tällöin sulattaa. Kertyvä jää heikentää ilmavirran kulua, ja huonontaa kuivatustehoa. Sulatukseen kuuluva lämpöteho voidaan arvioida kaavalla 22, olettaen, että kaikki kertynyt jää sulatetaan. (Laitinen, 2010, s. 73)

$$\dot{Q}_{\text{kuivain,sulatus}} = \frac{G_{\text{kuivain}}(I_j + c_{p_j}(0^\circ\text{C} - T_v))}{1000 \cdot \eta_{\text{sulatus}}} \quad (22)$$

jossa

G_{kuivain} on kuivaimella poistettava vesivirta, g/s

I_j on jään sulamislämpö, 334 kW/kg

c_{p_j} on jään ominaislämpökapasiteetti, 2,1 kW/(kgK)

T_v on sulamisveden lämpötila sulatuksen jälkeen, °C

η_{sulatus} on sulatuksen hyötysuhde

1000 on muunnoskerroin g/s → kg/s

4.3.5 Sorptiokuivaimen tehontarve

Sorptiokuivaimen energiankulutustiedot ja tehontarve voidaan tarkemmin selvittää laitetoimittajan antamien dokumenttien perusteella. Kuivattavan ilman lämpö-

tila ja kosteus vaikuttavat sorptiokuivamen tehontarpeeseen ja energiankulutukseen. Hallin sisälämpötilan ollessa 2-10 °C, suhteellisen kosteuden ollessa 60-80 %, voidaan sorptiokuivamen tehontarve arvioida kaavasta 23. (Laitinen, 2010, s. 74)

$$P_{kuivain} = G_{kuivain}(19,37 - 0,137 \cdot \varphi_s + (-1,015 + 0,0095 \cdot \varphi_s)T_s) \quad (23)$$

jossa

$P_{kuivain}$ on sorptiokuivaimen sähköteho, kW

$G_{kuivain}$ on kuivaimella poistettava ilmavirta, g/s

φ_s on hallin suhteellinen sisäilman kosteus, %

T_s on hallin sisäilman lämpötila, °C

4.4 Ilman epäpuhtaudet

Jäähallin sisäilman epäpuhtauksia ovat hiilidioksidi, häkä (hiilimonoksidi), sekä typpidioksidi. Hiilidioksidia syntyy ihmisten hengittäessä, ja se on kyseisistä epäpuhtauksista myös vaarattomin. Hiilimonoksidia ja typpioksidia syntyy lähinnä polttomoottorikäyttöisestä jäänhoitokoneesta, jos sitä ei ole vielä korvattu sähkökäyttöisellä koneella. (Leppä, 2016, s. 21)

Korkeat hiilidioksidipitoisuudet kertovat huonosta ilmanvaihdosta, jolloin tilan ilma koetaan tunkkaiseksi. Ihmisissä korkeat hiilidioksidipitoisuudet voivat aiheuttaa päänsärkyä, väsymystä ja keskittymisvaikeuksia. Hiilidioksidin yksikkönä käytetään mg/m^3 tai ppm (parts per million, miljoonasosaa). (Hengitysliitto, 2019)

Sisäilmastoluokitus 2018 luokittelee tilojen sisäilman laadun kolmeen luokkaan S1, S2 ja S3, joista S3 on heikoin. Luokituksessa on annettu hiilidioksidille laatuluokakohtaiset maksimiarvot, jotka riippuvat ulkoilman hiilidioksidipitoisuudesta.

Taulukko 11. Sisäilmaluokituksessa tilan hiilidioksidipitoisuus saa olla tietyn määrän suurempi, kuin ulkoilman hiilidioksidipitoisuus. (RT 07-11299, 2018)

	S1	S2	S3
Hiilidioksidipitoisuuslisä*	<350 ppm	<550 ppm	<800 ppm

Ulkoilmassa oleva hiilidioksidipitoisuus on n. 400 ppm, mikä tarkoittaa kyseisen luokituksen mukaan maksimissaan 1200 ppm hiilidioksidipitoisuutta sisätilassa S3-luokassa. Tyydyttävänä sisäilmantasona pidetään 1500 ppm hiilidioksidipitoisuutta. Mikäli sisäänpuhallettavan ilmavirran säätö tapahtuu hiilidioksidipitoisuuden mukaan, on säätöarvona käytetty pitoisuutta 800 ppm. (Sisäilmayhdistys ry, 2008)

Hiilidioksidiperusteinen ilmanvaihdon mitoitus lasketaan tilassa tapahtuvan hiilidioksidin tuoton ja sisäänpuhallettavan ilmavirran mukaan. Hiilidioksidin tuottoon vaikuttavat henkilömäärät, sekä henkilöiden toiminta tilassa. Sisätilan ja ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden erotus tulisi olla alle 800 ppm, ja se voidaan laskea kaavalla 24. (SuLVI, 2018)

$$\Delta CO_2 = 1000 \left(\frac{qk_{CO_2} \cdot k + ql_{CO_2} \cdot k}{qv_{iv}} \right) / 3,6 \quad (24)$$

jossa

ΔCO_2 on sisä- ja ulkoilman välinen hiilidioksidipitoisuuden erotus, ppm

qk_{CO_2} on tilassa vapautuva hiilidioksidin määrä (katsojat), dm^3/h (Taulukko 12)

ql_{CO_2} on tilassa vapautuva hiilidioksidin määrä (luistelijat), dm^3/h (Taulukko 12)

k on katsojien/luistelijoiden lukumäärä, hlö

qv_{iv} on tilaan johdettu tuloilma, dm^3/s

Taulukko 12. Toiminnasta riippuvaiset hiilidioksidituotot tilassa. Toiminnot ovat jäähallille tyypilliset. (SuLVI, 2018)

Toiminta	CO ₂ tuotto, dm ³ /h/hlö
Istuminen	15,4
Seisominen	18,5
Liikunta	107,8

Kiertoilmaan perustuvien ilmanvaihtojärjestelmien heikkoutena voidaan mainita epäpuhtauksien laimentamiskyky halliympäristössä. Jäähallissa muodostuneet epäpuhtaudet sekoitetaan sisäänpuhallettavaan ilmaan, jolloin tuloilmanlaatu heikkenee. Paremman ilmanlaadun takaamiseksi olisi luovuttava kiertoilmankäytöstä ainakin jäähalleissa, joissa käytetään polttomoottorilla toimivaa jäänhoitokonetta. (Jäähallit ja tekojääkentät, 1999, s. 39)

4.5 Lämpökuormat

Lämpökuormia käsiteltiin jo hieman kappaleessa 3.1.1, jossa kerrottiin lämpökuormien kohdistuvan ennen kaikkea kylmään jäärataan, jolloin jäähdytystehoa on lisättävä jään ylläpitämiseksi. Lämpökuormien määrittelyllä voidaan vähentää lämpökuormien osuus kokonaislämmitystarpeesta, mitä käsiteltiin kappaleessa 3.2.1. Alla olevissa kappaleissa käsitellään maksimikäyttöjakson lämpökuormia, jotka muodostuvat lähinnä kesäaikaan järjestettävissä turnauksissa, jolloin henkilömäärät ja hallin käyttöaste on korkeimmillaan. Tällöin hallin sisäilmaston hallinta vaatii suurien kosteus- ja lämpötilakuormien hallintaa.

4.5.1 Konvektion lämpökuorma

Konvektion lämpökuormaan vaikuttavat halliosan ilman lämpötila, jään lämpötila, sekä jään pinnalla tapahtuva ilman liikehdintä, joka aiheutuu jääradan käytöstä ja ilmanvaihdon ilmavirtauksista. Mitä suurempi ilman liikehdintä jään pinnalla tapahtuu, ja mitä suurempi lämpötilaero hallin sisäilman ja jään pinnan välillä on,

sitä suurempi on konvektiosta aiheutuva lämpökuorma jäähän. Konvektion lämpökuormaa voi vähentää hallin tuloilmasuihkujen suuntaamisella hallin muihin osiin, kuin suoraa jäähän. Konvektion lämpökuorma on yleensä öisin pienempi, kuin päivällä. (Laitinen, 2010, s. 51)

Konvektion aiheuttama maksimikäyttöjaksen lämpökuorma voidaan laskea kaavasta 25. (Laitinen, 2010, s. 80)

$$\dot{Q}_{jää,konv.} = A_{jää} \cdot \alpha_{konv.} (T_s - T_{jää}) \quad (25)$$

jossa

$\dot{Q}_{jää,konv.}$ on jäähän konvektiolla siirtyvä lämpökuorma, W/m²

$A_{jää}$ on jään pinta-ala, m²

$\alpha_{konv.}$ on konvektion lämmönsiirtokerroin, W/(m²K)

T_s on hallin ilman lämpötila keskellä hallia, °C

$T_{jää}$ on jään pintalämpötila, °C

Taulukko 13. Konvektion lämmönsiirtokertoimen harjoitushallin käytön ja sen ulkopuoliselle ajalle. Jäähallin muuttuvat olosuhteet vaikuttavat myös lämmönsiirtokertoimen muodostumiseen, mistä syystä kertoimen laskennallinen määrittely tarkasti voi on mahdotonta. Alla olevat lämmönsiirtokertoimet perustuvat asiantuntijan arvioon. (Laitinen, 2010)

Käyttöjaksolla	Käyttöjaksen ulkopuolella
$\alpha_{konv.}$ (W/m ² K)	$\alpha_{konv.}$ (W/m ² K)
1,0	0,5

4.5.2 Lämpösäteilyn lämpökuorma

Jäähallin ulkovaipan ja lämpimien tilojen välisiltä seinien sisäpinnoilta siirtyy lämpökuormia säteilynä. Lämpökuorma on sitä suurempi, mitä suurempi lämpötilaero seinärakenteiden sisäpinnan ja jään pinnan välillä on. Myös jääradan pinta-alan suhde vaipan ja lämpimien tilojen rajaamaan seinän pinta-alaan vaikuttaa lämpökuormaan. Ulkovaipan sisäpinnan lämpötilaan vaikuttaa vaipan eristys, ja säteilynä syntyvään lämpökuormaan pinnan emissiviteetti. (Laitinen, 2010, s. 52)

Emissiviteetti kuvaa pinnan säteilylämmönsiirto-ominaisuutta, jota kuvataan lukuarvoilla 0-1. Mitä pienempi emissiivisyys rakenteen pinnalla on, sitä vähemmän se siirtää lämpöä säteilynä eteenpäin. Matalaemissiiviset pinnat ovat usein metallisia ja kiiltäviä, ja niiden emissiivisyys voi olla alle 0,1. (Laitinen, 2010, s. 52)

Vaipan eristyksen vaikutukset lämpökuormaan vaihtelevat vuodenajan mukaan. Tehokas eristys estää talvipakkasilla kylmän ilman pääsyn ulkovaipan läpi, jolloin sisäpinta pysyy lämpimämpänä ja lämpökuorma on suurempi. Kesähelteillä eristys estää lämmön siirtymisen vaipan läpi, jolloin sisäpinta pysyy viileämpänä, ja lämpökuorma on pienempi. Hyvä eristys tasaa jään lämpökuormitusta vuodenaikojen vaihdellessa, mutta se ei välttämättä pienenä keskimääräistä lämpökuormitusta jälle. (Laitinen, 2010, s. 52) Hyvä eristävyys ja ilmanpitävyys ovat sisäilman kosteuden hallinnan kannalta kuitenkin oleellisia. (Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka, 2007, s. 82)

Lämpösäteilyn maksimikäyttökäytön lämpökuorma voidaan laskea kaavasta 26. (Laitinen, 2010, s. 80)

$$\dot{Q}_{\text{jää,sät.}} = A_{\text{jää}} \cdot \alpha_{\text{sät.}} (T_s - T_{\text{jää,pinta}}) \quad (26)$$

jossa

$\dot{Q}_{\text{jää,sät.}}$ on jäähän lämpösäteilyllä ympäröivistä pinnoista siirtyvä lämpökuorma, W/m²

$A_{\text{jää}}$ on jään pinta-ala, m²

$\alpha_{\text{sät.}}$ on säteilyn lämmönsiirtokerroin kuukausittain, W/(m²K)

T_s on ilman lämpötila keskellä hallia, °C

$T_{\text{jää,pinta}}$ on jään pintalämpötila, °C.

4.5.3 Jäänhoidon lämpökuorma

Jäänhoitovedestä syntyvä lämpökuorma jäälle riippuu käytetyn veden lämpötilasta, veden määrästä ja jään pintalämpötilasta. Jäänhoidossa syntyvä keskimääräinen lämpökuorma maksimikäyttöjaksolla lasketaan kaavalla 27. (Laitinen, 2010, s. 81)

$$\varnothing_{jää,hoito} = \frac{V_{jh} \cdot k_{jh} \cdot \rho_v}{3600 \cdot \Delta t \cdot A_{jää}} (cp_v(T_{jh} - 0) + I_j + cp_j)0 - T_{jää} \quad (27)$$

jossa

$\varnothing_{jää,hoito}$ on jäänhoidon keskimääräinen lämpökuorma käyttöjaksolla, W/m²

V_{jh} on jäänhoitoon käytettävä vesimäärä, m³ /ajokerta

k_{jh} on jäänhoitokertojen määrä käyttöjaksolla, ajokerrat

ρ_v on veden tiheys, 1 000 kg/m³

Δt on käyttöjakson pituus, h

$A_{jää}$ on jään pinta-ala, m²

cp_v on veden ominaislämpökapasiteetti, 4 190 Ws/(kgK)

T_{jh} on jäänhoitoon käytettävän veden lämpötila, °C

I_j on jäätymisen faasimuutoslämpö, 334 000 Ws/(kgK)

cp_j on jään ominaislämpökapasiteetti, 1 800 Ws/(kgK)

$T_{jää}$ on jään keskilämpötila käyttöjaksolla, °C.

4.5.4 Ilmasta jäähän kondensoituvan veden lämpökuorma

Jään pintalämpötilan ollessa useimmiten alle kastepistelämpötilan, tiivistyy ilman sisältämästä vesihöyrystä kosteutta jään pintaan. Kosteuden tiivistyessä ja jäätyessä aiheutuu jäälle lämpökuorma, joka riippuu hallin suhteellisen kosteuden ja ilman lämpötilan mukaisesta ilman vesisisällöstä, sekä ilman virtauksista jään pinnalla (konvektio). Halli ilman kosteuden kasvaminen ja ilman lisääntyvät virtaukset jäällä kasvattavat kondensoituvan veden lämpökuormaa. (Laitinen, 2010, s. 53)

Ilmasta jäähän kondensoituvan veden aiheuttama lämpökuormitus maksimikäyttöjaksolla lasketaan kaavalla 28. (Laitinen, 2010, s. 81)

$$\dot{Q}_{jää,kond.} = A_{jää} \cdot g_{kond.} (I_h + I_j + cp_j (0 - T_{jää})) \quad (28)$$

jossa

$\dot{Q}_{jää,kond.}$ on kondenssin lämpökuorma, W/m²

$A_{jää}$ on jääradan pinta-ala, m²

$g_{kond.}$ on jäähän kondensoituva vesivirta, g/(sm²)

I_h on vesihöyryn lauhtumisen (höyry -> vesi) faasimuutoslämpö, 2 501 000 Ws/(kgK)

I_j on jäätymisen faasimuutoslämpö, 334 000 Ws/(kgK)

cp_j on jään ominaislämpökapasiteetti, 2 100 Ws/(kgK)

$T_{jää}$ on jään keskilämpötila käyttöjaksolla, °C

Jäähän kondensoituvaa vesivirtaa $g_{kond.}$ voidaan arvioida kaavalla 29. (Laitinen, 2010, s. 81)

$$g_{kond.} = \frac{\alpha_{konv.}}{cp_i} (x_i - x_{jää}) \quad (29)$$

jossa

$\alpha_{konv.}$ on konvektion lämmönsiirtokerroin, 1,0 W/(m² K)

cp_i on ilman lämpökapasiteetti, 1 000 Ws/(kgK)

x_s on hallin sisäilman vesisisältö, g/kg (Liite 3)

$x_{jää}$ on jään pintalämpötilaa vastaavan kylläisen tilan vesisisältö (Liite 4), g/kg

Ilman lämpötiloja ja suhteellista kosteutta vastaavat vesisisällöt voidaan selvittää Mollier-diagrammista (Liite 3). Jään pintalämpötilaa vastaava kylläisen tilan vesisisältö on esitetty liitteessä 4.

4.5.5 Valaistuksen lämpökuorma

Ratavalaisituksen lämpökuormaan vaikuttaa valaisinmallista riippuvainen sähköteho, sekä valaisimien määrä rata-alueella. Ratavalaisituksen aiheuttama lämpökuorma jäälle voidaan laskea kaavalla 30. (Laitinen, 2010, s. 54)

$$\emptyset_{\text{jää, valaistus}} = \frac{0,42 \cdot P_{\text{valaistus}}}{A_{\text{jää}}} \quad (30)$$

jossa

$\emptyset_{\text{jää, valaistus}}$ on valaistuksen keskimääräinen lämpökuorma jäälle, W/m²

$P_{\text{valaistus}}$ on ratavalaisituksen keskimääräinen kokonaissähköteho, W

0.42 on kerroin, joka määrittelee jäätä kuormittavan osuuden

$A_{\text{jää}}$ on jääradan pinta-ala, m²

Ratavalaisituksen keskimääräinen kokonaisteho määrittyy radalla olevien valaisimien yhteenlasketulla sähköteholla.

4.5.6 Ihmisistä syntyvä lämpökuorma

Luistelijoista syntyvä lämpökuorma jäähän voidaan arvioida kaavalla 31. (Laitinen, 2010, s. 82)

$$\emptyset_{\text{jää, luistelija}} = 0,45 \cdot q_{\text{sät, luistelija}} \cdot k_{\text{luistelija}} / 1000 \quad (31)$$

jossa

$\emptyset_{\text{jää, luistelija}}$ on luistelijoiden säteilylämpökuorma jäähän, kW

$q_{\text{sät, luistelija}}$ on luistelijan säteilylämpökuorma (taulukko 13), W/hlö

$k_{\text{luistelija}}$ on luistelijoiden lukumäärä keskimäärin, hlö

0,45 on kerroin, jolla huomioidaan jäähän kohdistuvan lämpökuorman osuus

1 000 on laatumuunnoskerroin W → kW

Katselijoista syntyvä lämpökuorma voidaan arvioida kaavalla 32. (Laitinen, 2010, s. 82)

$$\dot{Q}_{\text{jää,katselija}} = 0,05 \cdot q_{\text{sät.katselija}} \cdot k_{\text{katselija}}/1000 \quad (32)$$

jossa

$\dot{Q}_{\text{jää,katselija}}$ on katselijoiden säteilylämpökuorma jäähän, kW

$q_{\text{sät,katselija}}$ on katselijan säteilylämpökuorma (taulukko 13), W/hlö

$k_{\text{katselija}}$ on katselijoiden lukumäärä keskimäärin, hlö

0,05 on kerroin, jolla huomioidaan jäähän kohdistuvan lämpökuorman osuus

1 000 on laatumuunnoskerroin W → kW

Taulukko 14. Hallin lämpötilasta riippuvaiset lämpökuormat pelaajaa ja katsojaa kohden. (Laitinen, 2010, s. 56)

Hallin lämpötila	Tuntuva lämpö yhteensä W/hlö	Konvektio W/hlö	Säteily W/hlö
+4 °C	190	114	76
+6 °C	176	106	70
+8 °C	162	97	65
+10 °C	148	90	60
+12 °C	134	80	54
+14 °C	120	72	48

4.5.7 Maan lämpökuorma

Maasta johtuva lämpökuorma jäähän lasketaan kaavalla 33. (Laitinen, 2010, s. 83)

$$\dot{Q}_{\text{maa,jää}} = A_{\text{jää}} \cdot q_{\text{maa}}/1000 \quad (33)$$

jossa

$\dot{Q}_{\text{jää,maa}}$ on maasta johtuva lämpökuorma jäähän, W/m²

$A_{\text{jää}}$ on jääradan pinta-ala, m²

q_{maa} on maan johtumislämpövirta, 5 W/m²

1 000 on laatumuunnoskerroin W → kW.

4.5.8 Kylmäliuospumppun lämpökuorma

Pumppauksessa syntyvä lämpökuorma jäähdytyslaitteistolle riippuu mm. valituista ja mitoitetuista komponenteista ja rataliuoksesta. Pumppauksen lämpökuorma voidaan ilman tarkentavia laskutoimituksia arvioida kaavalla 34. (Laitinen, 2010, s. 83)

$$\dot{Q}_{maa,jää} = A_{jää} \cdot q_{maa} / 1000 \quad (34)$$

jossa

$\dot{Q}_{pumppaus}$ on kylmäliuospumppun lämpökuorma käyttöjaksolla, kW

$A_{jää}$ on jään pinta-ala, m²

$q_{pumppaus}$ on kylmäliuoksen pumppauksen aiheuttama lämpökuorma käyttöjaksolla, 6 W/m²

1 000 on laatumuunnoskerroin W → kW.

4.5.9 Lämpökuormat lämpimistä tiloista

Hallia ympäröivistä lämpimistä tiloista (pukuhuneet, pesuhuoneet, kahvio, jne.) siirtyy rakenteista johtumalla lämpöä jäähallin puolilämpimään tilaan. Johtumalla siirtyvä lämpöteho voidaan laskea kaavalla 35. (Laitinen, 2010, s. 64)

$$\dot{Q}_{lämp.tilat} = U_{rakenne} \cdot A_{rakenne} (T_s - T_{ympäristö}) \quad (35)$$

jossa

$\dot{Q}_{lämp.tilat}$ on lämpimistä tiloista johtumalla siirtyvä teho halliin, kW

$U_{rakenne}$ on rakenneosan lämmönläpäisykerroin, W/(m²K)

$A_{rakenne}$ on rakenneosan pinta-ala, m²

$T_{ympäristö}$ on lämpimän tilan sisäilman lämpötila, °C

T_s on hallin sisäilman lämpötila, °C.

5 KANGASALAN JÄÄHALLI OY

5.1 Kohteen yleistiedot

Kohde sijaitsee Kangasalan kaupungissa, melko lähellä kaupungin keskustaa. Se on osakeyhtiö, jonka omistajina ovat mm. Kangasalan kaupunki, Pälkäneen kunta ja Kangasalan Kisa ry. Jäähalli on rakennettu vuonna 1996 Pikkolan yläasteen välittömään läheisyyteen. Jäähallissa on yksi kaukalo, jonka koko on 58 x 27 m. Rakenteeltaan jäähalli on puukaari. Istumapaikkoja jäähallin katsomossa on 600, seisomakatsomossa 200 paikkaa, ja kahviossa on tilaa 60 hengelle. (Kangasalan Jäähalli, 2019)..

Jäähallin kokonaispinta-ala on 2310 m², josta jääradan osuus on 1525 m². Jäähallin bruttotilavuus on 25410 m³. Kokoluokaltaan jäähalli on pieni kilpailuhalli. (Jäähalliportaali, 2019)

Se on ollut aktiivisessa käytössä päiväkotien, koulujen, harrastajien ja juniori- ja edustusjoukkueiden keskuudessa. Jäähallia on peruskorjattu vuonna 2011, jolloin kylmälaitteisto ja sisävalaistus uusittiin. (Janger, 2019)



Kuva 32. Kangasalan jäähalli on valmistunut vuonna 1996. Kokoluokitukseltaan se on pieni kilpailuhalli.

Puolilämpimiä tiloja jäähallissa ovat kaukalo, katsomo ja iv-konehuone. Lämpimiä tiloja ovat kahvio, pukuhuoneet, varustekopit, wc- ja suihkutilat, toimistotila, henkilökunnan taukotila ja lämmönjakuhuone.

Katsomo sijaitsee kaukalon toisella pitkällä sivulla, ja sen alla sijaitsee pukuhuoneet ja suihkutilat. Seisomakatsomo sijaitsee kahvion vieressä, ja sen alla on suurin osa hallissa käytössä olevista varustekopeista.



Kuva 33. Kangasalan jäähalli sisäänkäynnin suunnasta. Jäähallin päädyssä näkyvät IV-konehuoneesta lähtevät tuloilmakanavistot.



Kuva 34. Jäähalli toisesta päädyistä kuvattuna. Sisäänkäynnin yläpuolella näkyy jäähallin kahvio ja sen vieressä seisomakatsomo.

5.2 Käyttöolosuhteet

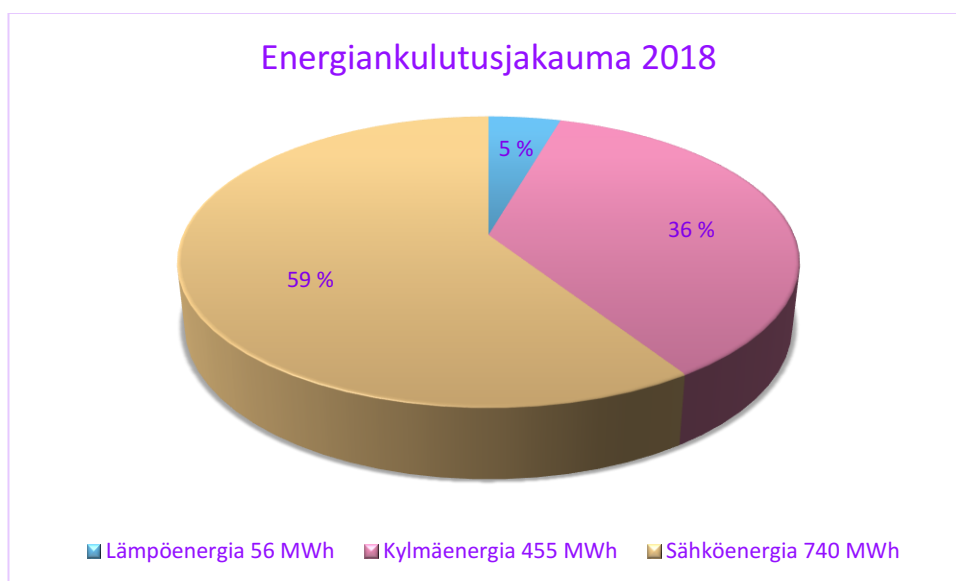
Jäähallin käyttöolosuhteet on ilmoitettu Jyväskylän yliopiston ylläpitämään Jäähalliportaaliin, josta löytyy tiedot monesta muustakin Suomen jäähallista. Kangasalan jäähallin käyttöolosuhteet on esitetty taulukossa 5. (Jäähalliportaali, 2019)

Taulukko 15. Kangasalan jäähallin käyttöolosuhteet. (Jäähalliportaali, 2019)

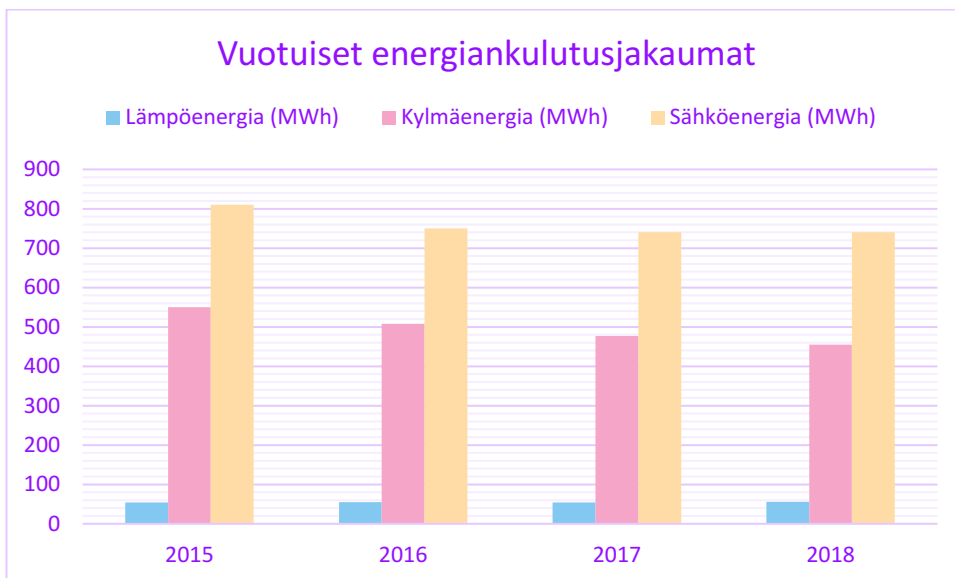
Aukiolokuukaudet kk/v	11
Käyttötunnit h/pvä	11
Ilman suhteellinen kosteus % min	50 %
Ilman suhteellinen kosteus % max	60 %
Jään pinnan lämpötila	-5 °C
Luistelualueen lämpötila 1 m korkeudelta	5 °C
Katsomon tavoiteltu keskilämpötila ottelun aikana	8 °C

5.3 Energiankulutus

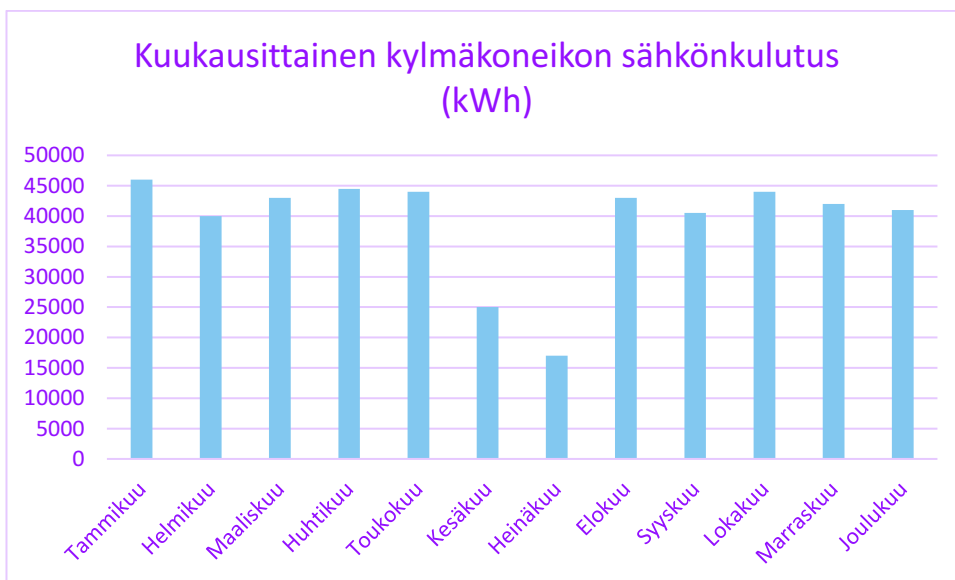
Jäähallin kokonaisenergiankulutus vuonna 2018 oli 1251 MWh. Jäähallin energiankulutusjakaumat on jäähalliportaalista kerätyn tiedon perusteella esitetty kuvissa 6-7. (Jäähalliportaali, 2019)



Kuva 35. Jäähallin energiankulutuksesta suurin osa on valaistukseen ja sähkölaitteisiin kuluva sähköenergiaa. Lämpöenergian pientä osuutta selittää lauhdelämmön tehokas hyödyntäminen.



Kuva 36. Jäähallin vuotuisissa energiankulutuksissa ei ole tapahtunut suuria muutoksia. Hallin käytön voidaan olettaa säilyneen samanlaisena.



Kuva 37. Kangasalan jäähallin kylmäkoneikon sähkönkulutuksesta nähdään, milloin jäähalli on aktiivisessa käytössä. Luvut havainnon perusteella suuntaa antavia. (Janger, 2019)

5.4 Valaistus

Jäähallin valaistus uusittiin vuonna 2011. Vanhat monimetallilamput vaihdettiin Purso Linear SI 840 110W LED-lamppuihin koko jäähallin osalta, ja samalla uusittiin myös valaistuksen ohjaus, jonka ohjausasennot ovat harjoitus-, ottelu- ja huoltokäyttö. Pukuhuoneiden valaistukset ovat myös vaihdettu liiketunnistimilla toimiviksi. (Janger, 2019)

Led-valaisimien määrä kenttäalueella on 65 kpl. Kaavaa 30 käyttäen valaisimien aiheuttama lämpökuorma jäähän ottelutilanteen mukaisella valaistuksella on

$$\varnothing_{\text{jää, valaistus}} \frac{0,42(110 \text{ W} \cdot 65)}{1525 \text{ m}^2} = 2 \text{ W/m}^2 \quad (36)$$

5.5 Lämmitysjärjestelmä

Kohteen lämmitysjärjestelmänä on kaukolämpö. Puolilämpimät tilat lämpiävät ilmalämmityksellä. Sosiaalitilojen lämmönjakomuotona on vesikiertoinen lattialämmitys. Kahviossa on sähköpatterilämmitys. Jäähalli saa lähes kaiken tarvitsemansa lämmitysenergian lauhdelämmöstä.

5.6 Kylmäjärjestelmä

Jäähallin kylmäkoneikko ja sille varattu tila sijaitsee jäähallin ulkopuolella erillisessä kylmäkonetilassa. Kylmäkoneen sähköteho on 150 kW. Koneistossa on 2 kpl ruuvikompressoreita rinnakkain, joiden kummankin sähköteho on 75 kW. Kylmäaineena on R717, ja jään alla kulkee H₂O/NH₃ (vesi/ammoniakki) rataliuos.



Kuva 38. Kylmäkonetila jäähallin vieressä.



Kuva 39. Kylmän tuotto tapahtuu kahden rinnakkain kytketyn ruuvikompressorin avulla.

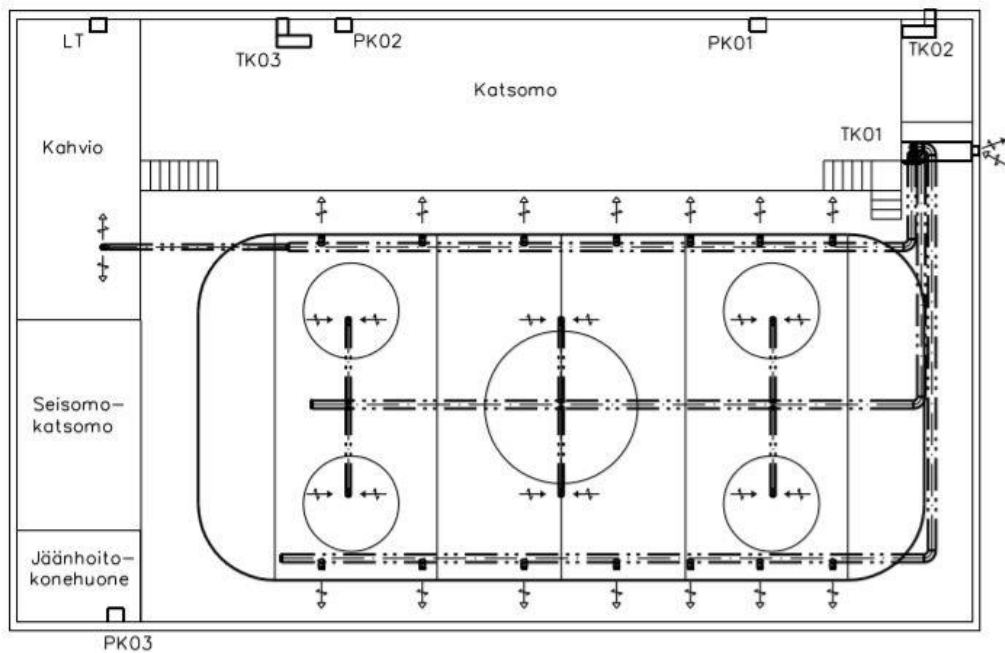
Jäähallissa hyödynnetään lauhdelämmöstä saatavaa lämpöenergiaa hallin ilmalämmitykseen ja käyttöveden lämmittämiseen. Lauhdelämpö osana käyttöveden lämmitystä toteutettiin kylmäkoneiden uusimisen yhteydessä vuonna 2011, jolloin lauhdelämpö liitettiin remontin yhteydessä uuteen lämminvesivaraajaan. (Janger, 2019)



Kuva 40. Kylmäkonehuoneessa sijaitseva 3 m³ lämminvesivaraaja hyödyntää lauhdelämmöstä saatavaa lauhdelämpöä käyttöveden lämmittämiseen.

5.7 Ilmanvaihtojärjestelmä

Jäähallin ilmanvaihto on jaettu osastoittain siten, että puolilämpimiä tiloja sekä kahviota palvelee 1 pääilmanvaihtokone, ja sosiaalitylöjä katsomon ala puolella palvelevat erilliset tulo- ja poistoilmakoneet, joita kumpiakin on kaksi kappaletta. Jäänhoitokonehuoneessa on 1 poistopuhallin.



Kuva 41. Jäähallin ilmanvaihto on osastoitu siten, että katsomon alla olevia sosiaalitiloja palvelee omat erilliset tulo- ja poistokoneet, ja hallitilaa palvelee oma isompi kone.

5.7.1 Hallitilan ilmanvaihtokone

Jäähallin kaukaloa, katsomoa ja kahviota palvelee kiertoilmalla toimiva ilmanvaihtokone. Kone on malliltaan Findri Adej 4000. Ilmanvaihtokone ottaa raitisilmansa jäähallin ulkoseinästä, jota vasten konehuone myös sijaitsee. Poistoilmansa kone ottaa pistemäisesti konehuoneen seinästä hallitilan puolelta, ja kanavoituna kenttäalueelta. Koneesta ei ollut olemassa teknisiä tietoja.

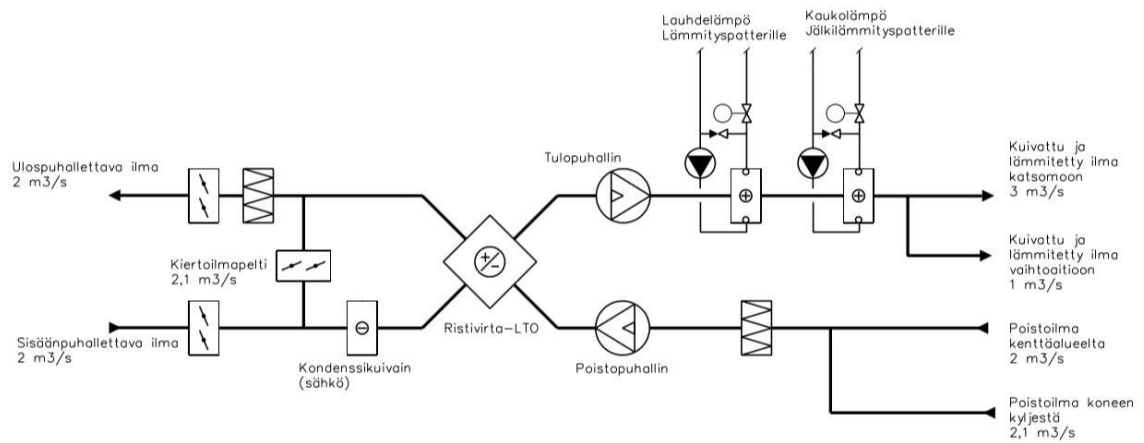


Kuva 42. TK01 Findri Adej 4000 IV-konehuoneesta katsottuna. IV-koneen sisään- ja ulospuhallussäleiköt sijaitsevat jäähallin ulkoseinällä. Kuvassa näkyvät lauhdelämpö- ja lämmityspatterin putkistot. Taka-alalla kondenssikuivaimelle menevät sähkökaapelit.



Kuva 43. Poistoilma otetaan pistemäisesti ilmanvaihtokoneen sivusta. Poistoilmakanavisto ja 2 tuloilmakanavistoa nousevat ilmanvaihtokoneen päältä katon rajaan.

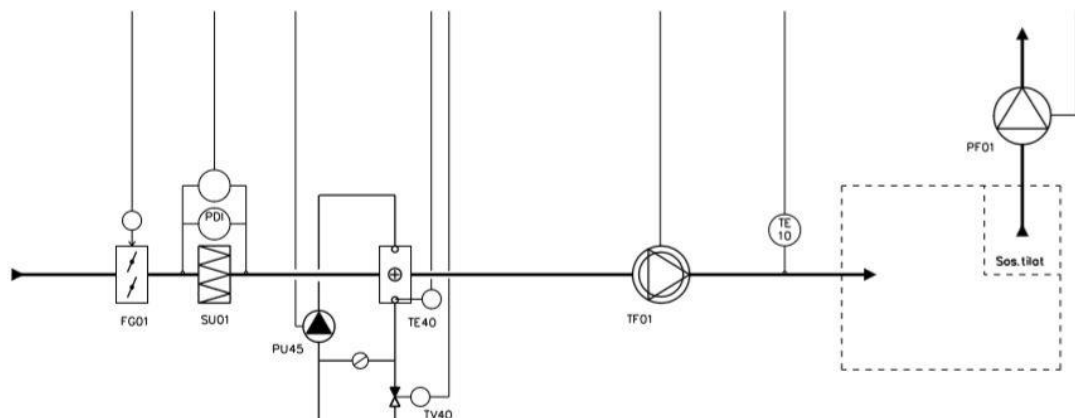
Osa poistoilma sekoitetaan raitisilmaan ilmanvaihtokoneen kiertoilmapelillä. Tuloilmaa puhalletaan katsomon ja vaihtopenkkien suuntaan, ja ilmamäärät hallitilassa ohjautuvat katsomossa sijaitsevien hiilidioksidianturien antamien pitoisuuksien mukaan. Ilmanvaihtokoneen mitoitusilmamäärä (maksimi) on vuoden 1996 suunnitelmissa $\pm 4 \text{ m}^3/\text{s}$. Hallitilaan tuotetaan alipaine, joka on tähän asti toiminut hyvin. (Janger, 2019)



Kuva 44. Hallitilaa palvelevan ilmanvaihdon toimintakaavio. Kuva perustuu omiin havaintoihin, jäähallin henkilökunnan antamiin tietoihin, sekä Oy Yleiskylmä-Findrieltä saatuihin tietoihin. Ilmamäärät ovat suuntaa antavia. (Janger, 2019) (Oy Yleiskylmä-Findri Ltd., 2019)

5.7.2 Sosiaalitulojen tulo- ja poistoilmakoneet

Katsomon alapuolella sijaitsevia lämpöisiä sosiaalituloja palvelee yksittäiset tulo- ja poistopuhaltimet, joita kumpiakin on 2 kappaletta. Yksi tuloilmakone sijaitsee lämmönjakohuoneessa, ja toinen katsomon alla olevassa huoltotilassa. Sosiaalituloja palvelevat kaksi huippuimuria sijaitsevat jäähallin katolla. Puhaltimet ovat malliltaan radiaalipuhaltimia.



Kuva 45. Sosiaalitulojen ilmanvaihdon periaate. Kuva vuoden 1996 suunnitelmista. Kuvaa muutettu. (CF-Sanex Oy, 1996)



Kuva 46. Hihnäkäyttöinen radiaalipuhallin TK02.

Tulo- ja poistopuhaltimet ovat $\frac{1}{2}$ ja $\frac{1}{1}$ teho-ohjattavia. Tulopuhaltimet ovat aika-ohjattuja siten, että suurempaa tehoa ja ilmavirtaa käytetään lähinnä viikonloppuisin useiden otteluiden vuoksi tai turnauksissa. Poistopuhaltimien ohjaus tapahtuu täysin käsikäyttöisesti, myös teho-ohjauksilla $\frac{1}{2}$ ja $\frac{1}{1}$. Tulo- ja poistopuhaltimien ilmavirrat ja sähkötehot vuoden 1996 suunnitelmista on esitetty taulukoissa 14 ja 15.



Kuva 47. Puhaltimien ohjaus tapahtui käsikäyttöisesti Siemensin ohjausjärjestelmällä, mikä on ollut käytössä jäähallin alusta asti.

Taulukko 16. Sosiaalituloja palvelevat tulopuhaltimet.

Tulopuhallin	Ilmavirta (l/s)		Sähköteho (kW)	
	1/1	1/2	1/1	1/2
TK02	240	120	0,55	0,09
TK03	440	220	0,75	0,12

Taulukko 17. Sosiaalituloja palvelevat poistopuhaltimet.

Poistopuhallin	Ilmavirta (l/s)		Sähköteho (kW)	
	1/1	1/2	1/1	1/2
PK01	330	165	0,22	0,03
PK02	610	305	0,45	0,06

6 MITTAUKSET

Kangasalan jäähallissa mitattiin lämpötiloja, kosteutta, hiilidioksidiarvoja, valais- tusvoimakkuuksia, valaistuksesta syntyviä lämpökuormia sekä poisto- ja tuloil- mamääriä. Lämpökameralla tarkasteltiin mahdollisia lämpövuotoja rakenteissa. Mittauksia tehtiin eri puolilla jäähallia, keskittyen jäähallin kaukalo- ja katsomo- alueeseen, sekä pukuhuoneisiin. Kyseisissä tiloissa myös käyttöaste on suurin. Mittauksia tehtiin jäähallin käytön ja kiinniolon aikana, jotta voitiin havaita, miten nopeasti olosuhteet muuttuivat käytön lisääntyessä tai loppuessa.

Mittalaitteiden tarkkuusarvot mitatuista suureista ovat esitettyinä liitteessä 4.

6.1 Lämpötila-, kosteus- ja hiilidioksidimittaukset

Lämpötila-, kosteus- ja hiilidioksidimittaukset tehtiin Netatmo Weather Station- sensoreilla. Sensorit olivat liitettyinä langattomasti verkkoon, ja olosuhteita voitiin seurata reaaliajassa älypuhelimesta. Sensoreita oli yhteensä 4 kappaletta, joista yksi sijoitettiin ulos, ja loput 3 sijoitettiin hallin eri tiloihin.



Kuva 48. Netatmo-sensorit mittasivat samaan aikaan lämpötilaa, suhteellista kos- teutta ja hiilidioksidipitoisuuksia.

6.1.1 Katsomo

Katsomoon sijoitettu sensori sijaitti katsomon keskiosassa, ylimmästä penkkirivistä n. 2,5 metrin korkeudella olevan valaisinkiskon päällä. Katsomo-osan valaisimet eivät olleet käytössä, joten niistä ei syntynyt lämpökuormaa mittauksessa. Mittaus aloitettiin 27.2.2019 illalla ennen jääkiekko-ottelun alkua, ja lopetettiin 28.2 illalla. Olosuhdemittauskäyrät ovat esitettynä liitteessä 5.

Katsomon lämpötila ottelun aikana oli keskimäärin 12,8 °C, katsojamäärän ollessa n. 100 henkilöä. Ottelun alussa katsomon lämpötila oli 12,7 °C, ja loputtua 13,2 °C. Ottelun jälkeen jäähalli suljettiin.

Lämpötila jatkoi nousuaan vielä 1,5 h ottelun loputtua, jonka jälkeen se alkoi hitaasti laskea. Katsomon lämpötila oli seuraavaan keskipäivään mennessä laskeutunut 12,2 °C, jonka jälkeen se nousi iltapäivän ja illan aikaisen käytön myötä 12,9 °C. Muussa käytössä ja jäähallin ollessa suljettuna katsomon lämpötila vaihteli välillä 12,2-12,9 °C.

Katsomon suhteellinen kosteus pysyi tasaisena koko mittausjakson ajan. Huomioiden mittarilukemien asettumisen aloilleen, suhteellinen kosteus katsomossa oli 43-44 %. Alhaista kosteuspitoisuutta selittänee muihin hallitiloihin nähden korkeampi lämpötila. Suhteellisen kosteuden käyrä on esitetty liitteessä.

Ottelun alussa hiilidioksidipitoisuus katsomossa oli 393 ppm. Pitoisuus ottelun loputtua oli 603 ppm, ja se jatkoi nousuaan vielä 1,5 h ajan ottelun jälkeen, ollen huipussaan 746 ppm. Hiilidioksidipitoisuus laski seuraavaan aamuun mennessä 352 ppm. Iltakäytön aikana (klo 17-21) hiilidioksidipitoisuus oli keskimäärin 450 ppm.

6.1.2 Pukuhuonekäytävä

Pukuhuonekäytävälle sijoitettu sensori asetettiin pukuhuoneen seinustalla olevan mailatelineen päälle, jossa se mittasi olosuhteita ennen ottelua, ottelun aikana ja

ottelun jälkeen hallin sulkeutumiseen asti. Mittaus suoritettiin 27.2.2019. Olosuhdemittauskäyrät ovat esitettynä liitteessä 6.



Kuva 49. Pukuhuonekäytävä.

Pukuhuonekäytävältä mitattu lämpötila ottelun aikana oli 10,1-10,8 °C. Jääradan läheisyydestä huolimatta suhteellisen korkea lämpötila selittynee lämpimien pukuhuonetilojen, käyttäjäliikenteen ja käytävävalaistuksen synnyttämästä lämpökuormasta.

Suhteellinen kosteus käytävällä oli ottelun alussa 44%, ja jäähallin sulkeuduttua ottelun jälkeen 48 %. Suhteellinen kosteus nousi tasaisesti ottelun aikana. Kosteuspitoisuus oli kuitenkin maltillinen, eikä se aiheuttane kondensoitumisriskiä tilan rakenteisiin. Katsomoa korkeampi kosteuspitoisuus selittynee alhaisemmalla lämpötilalla, pelaajien tuottamalla kosteudella sekä huonolla tuulettuvuudella, mikä huomattiin hiilidioksidimittauksesta.

Käytävän hiilidioksidipitoisuus oli ottelun alussa 381 ppm. Pitoisuus nousi ottelun edetessä, ja oli pelaajien poistuessa jäähallista huipussaan 1022 ppm. Käytävän tuulettuvuutta heikentävät seinä- ja kaukalon laitarakenteet, sekä käytävän päälle ulottuva katsomo, mitkä osaltaan vaikuttavat hiilidioksidipitoisuuksien kasvuun. Mittausaika oli lyhyt, mistä syystä pitoisuudet olisivat voineet vielä olla korkeammat, mikäli mittauksia olisi jatkettu vielä jäähallin sulkeutumisen jälkeen.

6.1.3 Kaukalon pääty ja vaihtoaitio

Mittaukset kaukalon päädyssä ja vaihtoaitiossa aloitettiin 27.2. 2019 aamulla, ja lopetettiin yön yli kestäneiden mittausten jälkeen seuraavana aamuna. Kaukalon pääty oli ilmanvaihtokoneen puoleinen. Vaihtoaition sensori sijaitsi keskellä vaihtoaitioita. Molempien sensoreiden korkeus jäältä oli n. 1,5 m. Olosuhdemittauskäyrät ovat esitetty liitteessä 7.

Kaukalon päätyalueen lämpötila vuorokauden aikana oli 5,3-6,9 °C. Lämpötila oli suurimmillaan iltapäivän ja illan välisenä aikana, kun jääradan käyttö oli aktiivisimmillaan. Tällöin lämpötila oli 6,9 °C. Yön aikana lämpötila laski takaisin 5,3 °C.

Vaihtoaition keskeltä mitatuissa lämpötila-arvoissa havaittiin, että lämpötilojen vaihtelu oli paljon suurempaa, kuin kaukalon muissa osissa. Käytön aikana lämpötila oli käyttäjien lämpökuormasta huolimatta maksimissaan 6,3 °C. Lämpötila laski yön aikana 4,3 °C, joka mitattiin seuraavana aamuna.

Suhteellinen kosteus kaukalon päädyssä oli vuorokauden aikana keskimäärin 53 %. Suhteellinen kosteus nousi käytön aikana arvosta 47 % arvoon 55%, missä se pysyi tasaisena koko yön yli seuraavaan aamuun asti.

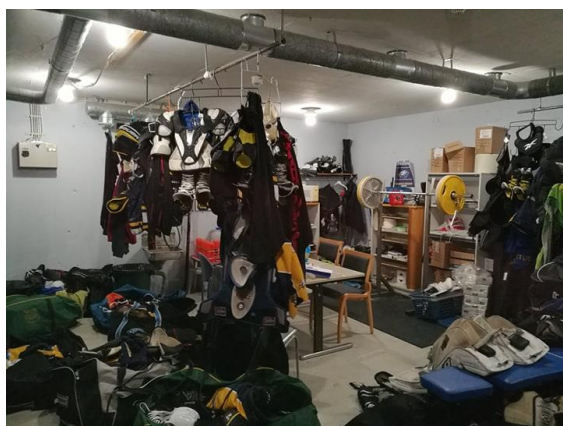
Vaihtoaition suhteellinen kosteus oli lähes sama, kuin kaukalon päädyssä. Suhteellinen kosteus oli 4,3 °C lämpötilasta huolimatta korkeimmillaan vain 57 %. Virtauskatveen muodostumista estää tuloilman suuntaaminen vaihtoaitioiden suuntaan. Kosteuden nouseminen ja ilman kondensoituminen tilan rakenteisiin voisi näin alhaisissa lämpötiloissa olla mahdollista, jos tuulettuvuus olisi huono.

Kaukalon päädyssä mitatut hiilidioksidiarvot pysyivät melko tasaisina vuorokauden aikaisesta käytöstä huolimatta, ollen keskimäärin 393 ppm, ja korkeimmillaan 527 ppm. Jääradan aktiivinen käyttö päivällä ja seuraavana aamuna ei näkynyt hiilidioksidipitoisuuksissa yhtä paljon, kuin vaihtoaition osalta. Tähän syynä on ilmanvaihtokoneen poistoilma-aukon sijainti päädyn läheisyydessä.

Vaihtoaition hiilidioksidipitoisuudet olivat keskimäärin 433 ppm. Aktiivinen jääradan käyttö nosti hiilidioksidipitoisuudet korkeimmillaan arvoon 979 ppm. Hiilidioksidipitoisuudet vaihtoaitiossa olivat kuitenkin iltapäivä- ja iltakäytössä kaukalon päätyä pienemmät.

6.1.4 Varustekoppi

Kangasalan edustusjoukkueen varustekopista mitattiin lämpötila-, kosteus- ja hiilidioksidiarvot 27.2-28.2.2019 välisenä aikana. Mittaukset aloitettiin, kun varusteet vietiin illalla ottelun jälkeen kuivumaan, ja lopetettiin, kun varustekopista haettiin seuraavana iltana varusteita. Sensori sijoitettiin n. 1,8 m korkeuteen varustekopin reunalla sijainneelle hyllylle. Olosuhdemittauskäyrät ovat esitettynä liitteessä 8.



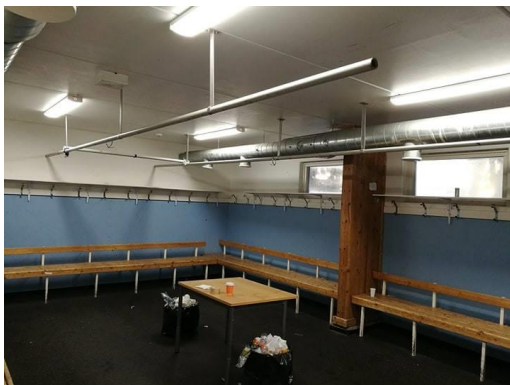
Kuva 50. Varustekoppi.

Varustekopin lämpötila nousi yön ja seuraavan päivän aikana 24,9 °C lämmityspuhaltimen avulla. Lämpötilan noustessa suhteellinen kosteus laski, ja oli lopulta vain 28 %.

Hiilidioksidipitoisuus varustekopissa oli suurimmillaan, kun varustekoppi oli ollut jo suljettuna 1,5 h. Pitoisuus varustekopissa oli tällöin 1577 ppm. Käyttäjien oleskeltua varustekopissa seuraavana iltana, hiilidioksidipitoisuus nousi arvosta 822 ppm arvoon 897 ppm.

6.1.5 Pukuhuone

Pukuhuoneen lämpötila-, kosteus- ja hiilidioksidimittaus aloitettiin ennen illalla alkanutta jääkiekko-ottelua 27.2.2019. Sensori sijoitettiin penkkien yläpuolella olleelle hattuhyllylle. Mittaus lopetettiin vuorokauden kestäneiden mittausten jälkeen seuraavana iltana. Olosuhdemittauskäyrät ovat esitettynä liitteessä 9.



Kuva 51. Pukuhuone

Ottelun aikana pukuhuoneen lämpötila oli välillä 20,2-20,9 °C. Ottelun jälkeisen peseytymisen jälkeen lämpötila oli 21,8 °C, jonka jälkeen lämpötila laski yöajaksi 20,6 °C.

Lämpötilan ja kosteuden nousussa havaittiin aamulla klo 6 aikaan käytönajan ulkopuolella yllättävä nousu, jolloin lämpötila nousi hetkellisesti 22 °C. Päivän ja iltapäivän aikana lämpötila oli käytön ulkopuolisella ajalla keskimäärin 21 °C, olleen suurempi, kuin iltakäyttöön ajoittunut lämpötila keskimäärin (20,6 °C). Pukuhuoneen lämpötila oli käyttöajan ulkopuolella keskimäärin 20,6 °C.

Pukuhuoneen suhteellinen kosteus ottelun jälkeisen peseytymisen jälkeen oli 68 %. Suhteellisen suuri kosteuspitoisuus aiheutuu ennen kaikkea avoimena pidetyistä pesuhuoneen ovista, mutta myös jonkin verran varusteista haihtuvasta vedestä. Puolilämpimään tilaan rajoittuneeseen seinään havaittiin käytön jälkeen kondensoituneen vettä. Kyseisellä lämpötilalla ja suhteellisella kosteudella kastepiste saavutetaan jo 15 °C lämpötilalla.

Yön aikana suhteellinen kosteus pukuhuoneessa laski 33 %, mutta nousi seuraavan päivän käytössä korkeimmillaan vain 55 %.

Pukuhuoneen hiilidioksidimittauksista havaittiin korkeita hiilidioksidipitoisuuksia ottelun aikana. Ottaen huomioon pelaajien saapumisen pukuhuoneeseen tuntia ennen ottelua, ja poistumisen tunnin ottelun jälkeen, oli keskimääräinen pitoisuus pukuhuoneessa 1100 ppm. Lukemassa on huomioitu ottelun aikaiset erät, jolloin pukuhuoneessa ei ollut pelaajia. Tällöin pitoisuus oli alhaisimmillaan 525 ppm.

Käytönajan ulkopuolella hiilidioksidipitoisuus oli keskimäärin 408 ppm. Seuraavan päivän käytössä hiilidioksidipitoisuudet olivat reippaasti yli 1000 ppm, ja korkeimmillaan jopa 1951 ppm.

6.2 Ilmavirtamittaukset

Sosiaalitiloista mitattiin tulo- ja poistoilmavirtoja LCA-301 siipipyöränemometrillä. Ilmavirrat mitattiin yleisimmin käytössä olevista pukuhuoneesta (4 kpl), niiden wc-tiloista, sekä pukuhuoneiden välisistä pesuhuoneista (2 kpl) ½ puhaltimien teholla. Virtausmittausten tekoa 1/1 puhaltimien teholla yritettiin tehdä eri päivinä, mitä ½ teholla mitattiin, mutta paikalla olleella henkilökunnalla ei ollut kyseisinä päivinä ymmärrystä, miten puhaltimien tehoa voidaan manuaalisesti ohjata.



Kuva 52. Ilmavirtamittauksissa käytetty siipipyörämittari, jolla mitattiin ilmavirtauksia tilojen tulo- ja poistoventtiileistä. Siipipyörämittarin mittatarkkuudet ovat esitettyinä liitteessä 4.

Tilavuusvirrat mitattiin mittalaitteen ohjeiden vastaisesti suoraa mittalaitteen osoittamalla tilavuusvirralla. Ohjeiden mukaan tilavuusvirta tulisi määrittää virtausnopeuden (m/s) ja kanavakoon pinta-alan mukaan (m²). Molempia menetelmiä testattiin, ja huomattiin, ettei ilmavirroissa ollut juurikaan eroavaisuuksia.

Venttiilien määrä mitatuista sosiaali-tiloista oli runsas, ja kanavakoot vaihtelivat, mistä syystä työn sujuvuuden kannalta oli kannattavampaa toteuttaa ilmavirtamittaukset kyseisellä menetelmällä. Kyseinen siipipyörämittari soveltuu huonosti tuloilmavirtojen mittaamiseen, sillä ne eivät täysin pidä paikkansa. Syy tälle voi johtua ilmavirran suuntautumisesta tuloilmaventtiilistä siten, ettei ilma virtaa optimaalisesti siipipyörämittariin nähden. (Juvela, 2019) Mittauksilla voitiin kuitenkin havaita, mikäli sosiaali-tilojen ilmavirrat olisivat tarpeeseen nähden selvästi alhaisemmat tai korkeammat.

Virtausmittauksista havaittiin, että poistoilmavirrat osassa pukuhuoneista olivat suunnitelmiin verrattaessa huomattavasti alhaisempia. Poistoilmavirrat olivat suunnitelmien mukaiset 2:ssa pukuhuoneessa, ja 2:ssa muussa pukuhuoneessa poistoilmavirrat poikkesivat hieman tai huomattavasti. Pesuhuoneiden poistoilmavirrat olivat suunnitelmiin verrattuna huomattavasti alhaisemmat.

Tuloilmavirrat olivat 2:ssa pukuhuoneessa huomattavasti alhaisemmat ja 2:ssa muussa lähes suunnitelmien mukaiset. Taulukossa on esitetty kahden pukuhuoneen ja näiden välisen pesuhuoneen mitatut- ja suunnitellut arvot puhaltimien ollessa ½ teholla. Suunnitelmien mukaiset ja mitatut tulo- ja poistoilmavirrat pukuhuoneissa ja suihkutiloissa ovat tarkemmin esitettynä liitteessä 11.

Taulukko 18. Mitatut tulo- ja poistoilmamäärät pukuhuoneista 5-6, sekä niiden välisestä pesuhuoneesta ja pukuhuoneiden wc-tiloista.

Tila	Poistoilma	Tuloilma
Pukuhuone 5	-32 l/s	+26 l/s
Wc 5	-3 l/s	
Pesuhuone	-11 l/s	
Pukuhuone 6	-5 l/s	+29 l/s
Wc 6	-3 l/s	

Olosuhdemittausten perusteella tulo- ja poistopuhaltimien ohjaus käsikäyttöisesti ei selvästikään ole toimiva ratkaisu puku- ja pesuhuoneiden ilmavirtojen säätämiseen. ½ tehoinen ohjaus takaa riittävät ilmavirrat käytön ulkopuolella, mutta käytön aikana etenkin hiilidioksidipitoisuudet nousevat yli sallittujen raja-arvojen. Kosteuden kondensoitumista puolilämpimää tilaa vasten olevalle seinustalle voitaisiin ehkäistä suuremmilla poistoilmavirroilla varsinkin pesuhuoneissa, mistä suurin kosteuskuorma syntyy.

Aika- ja käsikäyttöinen ohjaus työllistävät henkilökuntaa, jos sosiaalitulojen ilmanvaihtoa on jatkuvasti erikseen säädettävä tarpeenmukaiseksi. Tilanne ajautuu helposti siihen, että puhaltimet toimivat jatkuvasti vajaalla teholla myös energian säästämiseksi.

6.3 Valaistusmittaukset

Kenttäalueen vaakatason valaistusvoimakkuutta (lx) mitattiin BF-05 luksimittarilla. Mittaukset suoritettiin jäänpinnalta Jäähallien valaistusohjeen (2014) mukaan. Valaistusvoimakkuusmittauksia ei kuitenkaan suoritettu ohjeen mukaisella laskentapisteverkostolla, vaan useilla mittausarvoilla satunnaisilta kenttäalueen osilta. Luksimittarin mittaustarkkuudet ovat esitettyinä liitteessä 4.



Kuva 53. Luksimittari BF-05.

Valaistusvoimakkuudet mitattiin jäähallin harjoitus- ja ottelukohtaisilla valaistuksenohjausasetuksilla. Kenttäalueelta mitattu keskimääräinen valaistusvoimakkuus eri käyttötilanteissa on esitettyinä taulukossa 18, jossa on esitettyinä myös vuoden 1999 ja 2014 valaistusohjeistuksien mukaiset valaistusvoimakkuudet vaakatasolta mitattuna.

Taulukko 19. Vuoden 2014 valaistusohje asettaa pienen kilpailuhallin minimi valaistusvoimakkuudeksi 500 lx käyttötavasta riippumatta. (Jäähallit ja tekojäähallit, 1999) (Jäähallien valaistusohje, 2014)

Hallityyppi	1999 ohjeistus		2014 ohjeistus
	Harjoitus	Ottelu	Huoltoraja
Pieni kilpailuhalli	300 lx	500 lx	500 lx
Kangasalan jäähallista mitatut valaistusvoimakkuudet	414 lx	594 lx	

Vaikka Kangasalan jäähallin harjoitustilanteen mukainen valaistusvoimakkuus oli alle 2014 ohjeissa annetun minimi valaistusvoimakkuuden, ei kenttäalueella ollut aistinvaraisesti havaittavissa valaistuksen puutetta.

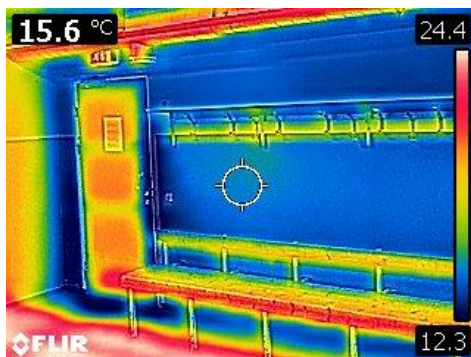
6.4 Lämpökameramittaukset

FLIR C2 mallisella lämpökameralla tarkkailtiin mahdollisia vuotokohtia jäähallin vaipassa 21.3.2019. Ulkolämpötilojen ollessa lähes jäähallin mukaiset, ei minikäänlaisia vuotokohtia ulkovaipasta löytynyt.

Mittauksessa havaittiin kuitenkin hallitilaan rajoittuvien sosiaalitilojen välisien seinien eristämättömyys, mikä on päätekijä sille, että pukuhuoneissa havaittiin ilman kondensoitumista tälle kyseiselle seinäosuudelle. Betonisseinät ovat homesuoja-maalilla pinnoitettuja, mistä syystä homeetta ei havaittu rakenteissa. Muita vuotokohtia lämpöisten tilojen osalta havaittiin kahvion ja lämpöisen jäänhoitokonehuoneen rakenteissa.



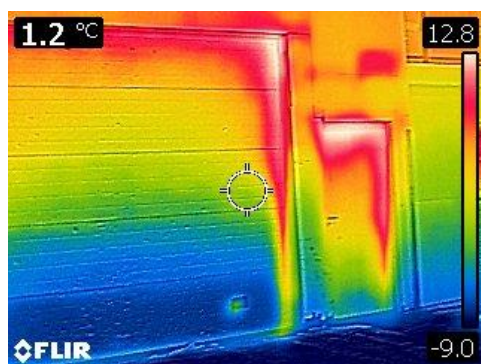
Kuva 54. Puolilämpöiseen tilaan rajoittuvat pukuhuoneiden seinustat näkyvät muihin rakenteisiin verrattuna selkeästi lämpöisempinä.



Kuva 55. Pukuhuoneen puolella puolilämmintä tilaa vasten oleva seinä muodostaa kondensoitumisriskin pukuhuoneessa syntyvien kosteuskuormien aikana, kun eristämättömän seinän pintalämpötila on riittävän alhainen.



Kuva 56. Jäähallin kahvioista havaittiin lämpimien ikkunapintojen lisäksi lämpövuotoja saumakohtista.



Kuva 57. Jäänhoitokonehuoneesta havaitut lämpövuodot ovien saumakohtista. Konehuoneesta vapautuva lämpö jäädalle on suurimmillaan jäänajon aikana, kun tilan ovet ovat auki.

7 ENERGIANSÄÄSTÖ- JA PARANNUSEHDOTUKSET

Kangasalan jäähallissa merkittävä energiansäästömahdollisuus olisi kaikkien järjestelmien liittäminen valvontajärjestelmään, josta niiden toimintaa voitaisiin seurata, sekä ohjata tarpeenmukaiseksi. Etenkin ilmanvaihdon osalta valvonta ja ohjaaminen olisi tärkeää vaihtelevien käyttöjaksojen vuoksi, ja optimaalisten ilmavirtojen säätämiseksi sisäilmasto-olosuhteita seuraten. Valvontajärjestelmän hankinta voitaisiin toteuttaa ilmanvaihtokoneiden uusinnan yhteydessä

Sosiaalitilojen käyttöajat ja kuormat vaihtelevat paljon, eikä manuaalinen tai aikaohjelmilla toimiva ilmanvaihto ole kyseisten tilojen kannalta toimiva ratkaisu. Mittauksissa havaittiin korkeita hiilidioksidipitoisuuksia, mitkä johtuivat virtausmittauksista todetuista alhaisista ilmavirroista. Sosiaalitilojen ilmanvaihdon nykyaikaistaminen automaatiojärjestelmillä ja tarpeenmukaisilla ilmavirroilla on toinen selkeä energiansäästö- ja etenkin olosuhteiden parantamismahdollisuus.

7.1 Sosiaalitilojen ilmanvaihto

Tällä hetkellä sosiaalitilojen ilmanvaihto toimii aika- ja käsiohjausperusteisesti $\frac{1}{2}$ ja $\frac{1}{1}$ teholla. Vanhojen tulo- ja poistopuhaltimien ohjaaminen portaattomasti sosiaalitilojen tarpeen mukaan, olisi tilojen kosteuden ja hiilidioksidin hallinnan kannalta toimivampi ratkaisu. Puku- ja pesuhuoneiden käyttöajat vaihtelevat paljon ja kuormitukset ovat erilaisia, jolloin tarpeenmukaista ilmanvaihtoa on lähes mahdoton toteuttaa nykyisillä ohjausmenetelmillä. Esimerkiksi poistopuhaltimet tulisi ohjata manuaalisesti aina täysteholle silloin, kun tulopuhaltimet käynnistyvät täysteholle aikaohjauksella. Muutoin tiloissa muodostuu ylipaine, jolloin lämpö- ja kosteuskuormat pyrkivät siirtymään ovien ja rakenteiden läpi hallitilaan.

Pukuhuoneiden, ja samassa yhteydessä olevien pesuhuoneiden ilmanvaihto suositellaan toteutettavaksi hiilidioksidi- ja kosteusperusteiseksi. Tämä siksi, että tiloissa oleskelee useita ihmisiä, tyypillisesti 1-2 h ennen harjoituksen tai ottelun alkamista, jolloin kosteuskuormat eivät ole kovin suuria, toisinkuin hiilidioksidin osalta.

Tällä hetkellä tulopuhaltimien sisäänpuhallettavan ilman lämmitykseen käytetään lauhdelämpöä. Jos tilatarpeet mahdollistaisivat sosiaalitilojen ilmanvaihdon yhdellä lämmöntalteenotolla varustetulla ilmanvaihtokoneella, voitaisiin lämmöntalteenotolla otettavalla lämpöteholla säästää lämmityspattereiden tehossa, ja kohdistaa lauhdelämpöä johonkin muuhun kohteeseen.

7.2 Hallitilan ilmanvaihto

Hallitilaa palveleva ilmanvaihtokone on toiminut moitteettomasti jäähallin käyttöönotosta asti. Puukaarirakenteissa, tai muissakaan osissa hallitilaa ei havaittu mikrobikasvustoa, mistä syystä kosteus lienee olevan hallittavissa. Myös tehdyistä mittauksista osoitettiin, ettei suhteellinen kosteus noussut korkealle hallitilan osissa. Hiilidioksidiperusteinen ilmapurkauksen ohjaus todettiin toimivaksi, sillä pitoisuudet katsomossa ja vaihtoaitiossa eivät nousseet käytön aikana haitallisen suuriksi.

Tällä hetkellä ilmanvaihto tuottaa hallitilaan alipaineen. Alipaineinen hallitila toimii hyvin talviolosuhteissa. Kesäaikainen alipaineisuus on hallin olosuhteisiin nähden haitallisempi, kun vuotoilma rakenteista ja oviaukoista on lämmintä. Tällöin se aiheuttaa lämpö- ja kosteuskuormia tilaan, mikä kasvattaa kuivatus- ja kylmätehontarvetta, jotta jäähallin kosteus ja jääradan ylläpitäminen saadaan pidettyä hallinnassa. Rakenteiden eristävyys ja tiiveys suositellaan varmistettavan, jos hallissa ylläpidetään vuodenajasta riippumatta alipainetta. Ulkoilman kosteuteen perustuvalla hallitilan paineistuksella voitaisiin toteuttaa kesäaikainen ylipaineistus, mikä edellyttäisi kiertoilmakoneen rinnalle hankittavan suoran tuloilman kuivauslaitteiston.

Mahdollisen uuden ilmanvaihtokoneen hankintaa varten suositellaan harkitsevan kondenssikuivaimen liittämistä jääradan kylmäainepiiriin. Toinen vaihtoehto ilmankuivatukseseen olisi lauhdelämmön liittäminen sorptiomalliseen kuivaimen, mikä soveltuisi paremmin ilmanvaihtokoneeseen, jossa käytetään kiertoilmaa.

Ilman kuivatusta ja olosuhteiden hallintaa jäähallissa voitaisiin toteuttaa vieläkin paremmin, mikäli sorptiokuivaimen rinnalle hankittaisiin suora tuloilman kuivatuslaitteisto. Kuivatustehojen jakaantuminen kahden eri kuivatuslaitteiston välillä pienentäisi kuivatustarvetta hallitilan ilmanvaihtokoneessa, ja muutenkin jakaisi kuivatustehontarpeen lauhde- ja kylmäenergian välille, jolloin tehon tarve on pienempi, kuin yksittäisellä kuivaimella. Lisäksi eri mallisten kuivainten käyttö varmistaisi hallitilan kuivatuksen riippumatta ulko-olosuhteista.

7.3 Muut

Lämpimien tilojen ja puolilämpimän tilan välinen betoniseinä voidaan lisäeristää tarkoitukseen soveltuvalla saneerauslevyllä. Lisäeristys tulisi ensi sijaisesti asentaa pukuhuoneita vasten oleville seinäosuuksille, millä vältetään ilman kondensoituminen puolilämpimää tilaa vasten olevalla seinällä.

Ilmanvaihtokoneen lämmityspattereille menevät lämmitysjohdot suositellaan eristettävän puolilämpimässä tilassa, jotta niissä ei syntyisi ylimääräisiä lämpöhäviöitä.



Kuva 58. IV-koneen lämmityspattereille menevät lämmitysjohdot ovat vain osittain eristettyjä

Järjestelmien ja laitteiden jatkuva seuranta on edellytyksenä energiatehokkaalle jäähallille. Tällöin olosuhteet voidaan optimoida täsmälleen tarpeenmukaisiksi, mikä etenkin jäähallin käyttöjaksojen vaihdellessa olisi merkittävää. Mahdolliset vikatilat järjestelmissä tai haitalliset poikkeamat hallin sisäilman olosuhteissa paikannetaan nopeammin, ja niitä voidaan ennakoida, jolloin niihin voidaan myös vaikuttaa ajoissa. Valvontajärjestelmän käyttöönotto edellyttää myös hallihenkilökunnan kouluttamista sen käyttämiseen.

8 POHDINTA

Jäähallien sisäilmastolla on luotava tiloihin käyttäjäystävälliset ja -turvalliset olosuhteet, joilla turvataan samalla myös rakenteiden hyvinvointia ja kestävyyttä. Energiatehokkailla ja onnistuneesti valituilla laitteilla, voidaan käyttöön soveltuvat olosuhteet luoda energiaa, kustannuksia ja luontoa säästäen.

Opinnäytetyössä tutustuttiin jäähallien sisäilmaston hallitsemiseen energiaterhokkailla ratkaisulla. Työ havainnollistaa monelta eri kantilta sisäilman hallinnassa huomioon otettavia seikkoja, jotka ovat koottu useasta ei lähteestä. Työn avulla voidaan arvioida tarpeellisia menetelmiä etenkin kosteuden hallinnan osalta, kun jäähallia ollaan rakentamassa tai saneerattaessa.

Opinnäytetyössä asetetut tavoitteet energiansäästö- ja parannusehdotuksista Kangasalan jäähallissa toteutuivat osittain. Energiansäästö- ja parannuskohteet paikannettiin, mutta mahdollisista toteutuksista seuraavia olosuhteidenmuutoksia, tai energiansäästöä syntyviä rahallisia säästöjä on vaikea määrittää. Syitä tähän ovat puutteelliset tekniset tiedot, ilmanvaihdon valvontajärjestelmän puutteellisuus ja muuttuvat käyttäjaksot ja ulko-olosuhteet. Tutkimuksen ajankohdaksi ulkoilma oli melko suotuinen sisäilman hallinnan kannalta, mistä syystä mittaukset voisi suorittaa myös kesäaikaan, jolloin kosteus ja lämpökuormat ovat suurimmillaan.

Kangasalan jäähalli on ollut toimintakuntoinen jo yli 20 vuotta. Kylmälaitteiston ja valaistuksen uusiminen, sekä lauhdelämmön hyödyntäminen ovat tuoneet jäähallille merkittäviä säästöjä. Suurin säästöpotentiaali on vielä olemassa ilmanvaihdon nykyaikaistamisessa, pitäen sisällään mm. automaation, jatkuvan mittausdatan keräämisen ja valvontajärjestelmän. Se mitä ei voida mitata ja valvoa, ei voida myöskään säästää.

LÄHTEET

A&E Television Networks. 2018. First indoor game of ice hockey. Luettu 15.3.2019 <https://www.history.com/this-day-in-history/first-indoor-game-of-ice-hockey>

C3 RakMK. 2010. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. Asetus rakennusten lämmöneristyksestä.

CF-Sanex Oy. 1996. Mäkelä, H. Ilmanvaihtokuva. Säättökaavio. Kangasalan Jäähalli.

D5 RakMK. 2012. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta.

Ferrantelli, A. M., Melóis, P., Räikkönen, M., Viljanen, M. 2014. Energy optimization in ice hockey halls. The system COP as a multivariable function, brine and design choices. Luettu 30.1.2019 https://www.researchgate.net/publication/233409598_Energy_optimization_in_ice_hockey_halls_I_The_system_COP_as_a_multivariable_function_brine_and_design_choices

Global Healing Center. 2016. What Is Silica and How Can it Support Your Health? Luettu 10.2.2019 <https://www.globalhealingcenter.com/natural-health/what-is-silica-support-health/>

Hartwall Arena. 2019. Kuva. Lupa kuvan käyttöön. Luettu 23.3.2019. <https://hartwallarena.fi/fi/vierailijat/arenan-palvelut>

Hengitysliitto. 2019. Kaasumaiset epäpuhtaudet. Hiilidioksidi. Luettu 30.3.2019 <https://www.hengitysliitto.fi/fi/sisailma/sisailma-asiat-sisailmaongelmat/kaasumaiset-epapuhtaudet/hiilidioksidi>

IIHF. 2016. IIHF Ice Rink Guide. Luettu 2.2.2018. <https://www.iihf.com/en/static/5890/iihf-ice-rink-guide>

Ilves. 2019. Hakametsän jäähalli. Luettu 15.3.2019. <https://www.ilves.com/hakametsan-jaahalli/>

Janger, H. 2019. Hallimerstari. Haastattelu 21.3.2019

Jokerit Hockey Club Oy. 2019. Hartwall Arena. Luettu 23.3.2019.
<https://www.jokerit.com/hartwall-arena>

Juvela, J.P. 2019. Lehtori. Tamk. Rakentaminen ja ympäristötekniologia. Haastattelu 3.4.2019.

Jyväskylän Yliopisto. 2019. Jäähalliportaali. Luettu 20.3.2019. <https://jaahallit.lipas.fi/#/jaahalliportaali/hallit/89907>

Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka. 2007. Opetusministeriö, Teknillinen korkeakoulu ja Suomen Jääkiekkoliitto. Rakennustieto Oy. Tammer-Paino Oy.

Jäähallien valaistusohje. 2014. Suomen Jääkiekkoliitto Ry, Jääkiekon SM-Liiga Oy, Opetus- ja kulttuuriministeriö. Luettu 25.2.2019. https://liiga.fi/media/filer_public/d7/04/d70437bf-e439-4886-91f3-d33b76ad7d64/jaahallienvalaistusohje.pdf

Jäähallit ja tekojääkentät. 1999. Opetusministeriö ja Suomen Jääkiekkoliitto. Rakennustieto Oy. Tammer-Paino Oy.

Kangasalan Jäähalli. 2019. Jäähallin esittely. Luettu 17.3.2019. https://kangasalanjaahalli.sporttisaitti.com/jaahallin_esittely/

Kansiareena.fi. 2019. Tampereen kansi ja arena. Luettu 23.3.2019.
<https://www.kansiareena.fi>

Kyyhkynen, M. 2016. Ekosuunnitteludirektiivin vaikutus ilmanvaihtokoneiden mitoitukseen. SFPint-luku. Luettu 29.3.2019. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/111203/Kyyhkynen_Miia.pdf?sequence=1

Laitinen, A. N., Nykänen, V., Paihio, S. 2010. VTT. Jäähallin kylmäkoneistojen hankintaopas. Luettu 13.3.2019. <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/T2548.pdf>

Ledistys Oy. 2019. Valoa ydinvoiman pitäjään. Pyhäjoen jäähallin uusi valaistusratkaisu. Luettu 12.3.2019 <https://www.ledistys.fi/pf/pyhajoen-jaahalli/>

Leppä, L. 2016. Jäähallien olosuhteiden, teknisten järjestelmien ja energiatehokkuuden seuranta. Aalto Yliopisto. Luettu 20.3.2019. <https://aalto-doc.aalto.fi/handle/123456789/23653>

Liiga. 2019. Joukkueet. Luettu 27.1.2019. <https://liiga.fi/fi/>

Lipasinfo. 2019. Mäntän Pihlajalinna Areena on energiatehokas jäähalli. Video. Luettu 5.4.2019. <https://www.youtube.com/watch?v=-tIpUzQXZB8>

Moreall Oy. 2019. Siipipyöräänemometrit. LCA301. tekniset tiedot. Luettu 1.4.2019. http://www.moreall.fi/admin/PDF/LCA301_LCA501.pdf

Mäkinen, P. 2017. FINVAC. Ominais sähköteho. Luettu 29.3.2019. https://asiakas.kotisivukone.com/files/finvac.kotisivukone.com/tiedostot/CE2017_8_Makinen.pdf

Netatmo. 2019. Specifications Additional Smart Indoor Module. Sensors and measurements. Luettu 1.4.2019. <https://www.netatmo.com/en-us/weather/weatherstation/specifications>

Oy Yleiskylmä-Findri Ltd. 2019. Jarno Harju.

Podnieks, A., Szymon, S. 2008. Jääkiekon maailma. Readme.fi.

Rantala, M. 2015. Tikkakosken jäähallin energiakatselmus. Luettu 20.2.2019. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/95373/Rantala_Matias.pdf?sequence=1

Rauman Kylmä rakenne Oy. 2015. Mikä on kylmäainepiiri? Luettu 17.3.2019.
<http://www.kylmarakenne.fi/Sivusto/Kylmaainepiiri.html>

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

Russel-Ausley, M. 2019. How Ice Rinks Work. HowStuffWorks. Luettu 25.3.2019. <https://entertainment.howstuffworks.com/ice-rink6.htm>

Sandberg, E. 2014. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Perustietoa ilmastointitekniikasta rakentamisen ja rakennusten käytön asiantuntijoille. Tammerprint 2014.

Santala, H. Isku-Areena. Lupa kuvan käyttöön.

SFP-opas. 2009. LVI-talotekniikkateollisuus ry. Opas ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähkötehon määrittämiseen, laskentaan ja mittaamiseen. Luettu 29.3.2019. https://filtech.fi/data/sfpopas3_060709.pdf

Seppänen, O., Seppänen M. 1996. SIY Sisäilmasto Oy. Rakennusten sisäilmasto ja LVI-tekniikka. Gummerus Kirjapaino Oy.

Sisäilmayhdistys ry. 2008. Terveelliset tilat. Kemialliset epäpuhtaudet. Luettu 30.3.2019. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Sisailmasto/Kemialliset-epapuhtaudet>

SuLVI. 2018. D2 Hanke. Opas ilmanvaihdon mitoittamiseen muissa kuin asuinrakennuksissa. FINVAC ry. Luettu 4.4.2019. https://sulvi.fi/wp-content/uploads/2018/01/Opas-ilmanvaihdon-mitoittamiseen-muissa-kuin-asuinrakennuksissa_2017-11-30.pdf

Suomen ympäristökeskus SYKE. 2016. HCFC-yhdisteet, ohjeita kiinteistön omistajalle. HCFC-kylmäaineiden käyttö kielletty 1.1.2015 alkaen. Luettu 17.3.2019. <https://www.ymparisto.fi/HCFC>

Talouselämä. 2015. Hurjia energiasyöppöjä, mutta niiden energiankulutus on mahdollista puolittaa. Luettu 30.1.2019. [https://www.talouselama.fi/uutiset/hur-
jia-energiesyoppoja-mutta-niiden-energiankulutus-on-mahdollista-puolit-
taa/29f082bf-0610-31f0-8cf5-9397f8d9df53](https://www.talouselama.fi/uutiset/hurjia-energiesyoppoja-mutta-niiden-energiankulutus-on-mahdollista-puolit-
taa/29f082bf-0610-31f0-8cf5-9397f8d9df53)

Trotec. 2019. BF05. Luettu 1.4.2019. [https://fi.trotec.com/filead-
min/user_upload/transferdata/TRO-TR-BA-BF05-HS-001-INT.pdf](https://fi.trotec.com/filead-
min/user_upload/transferdata/TRO-TR-BA-BF05-HS-001-INT.pdf)

Tuhohockey. 2017. Tampere University Hockey. Kuva. Lupa kuvan käyttöön.

Vertia. 2019. Ilmanvuotoluku. Luettu 20.3.2019. [https://vertia.fi/tiiveysmittaus/il-
manvuotoluku/](https://vertia.fi/tiiveysmittaus/il-
manvuotoluku/)

Ympäristöministeriö. 2018. Asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Luettu 8.4.2019. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010>

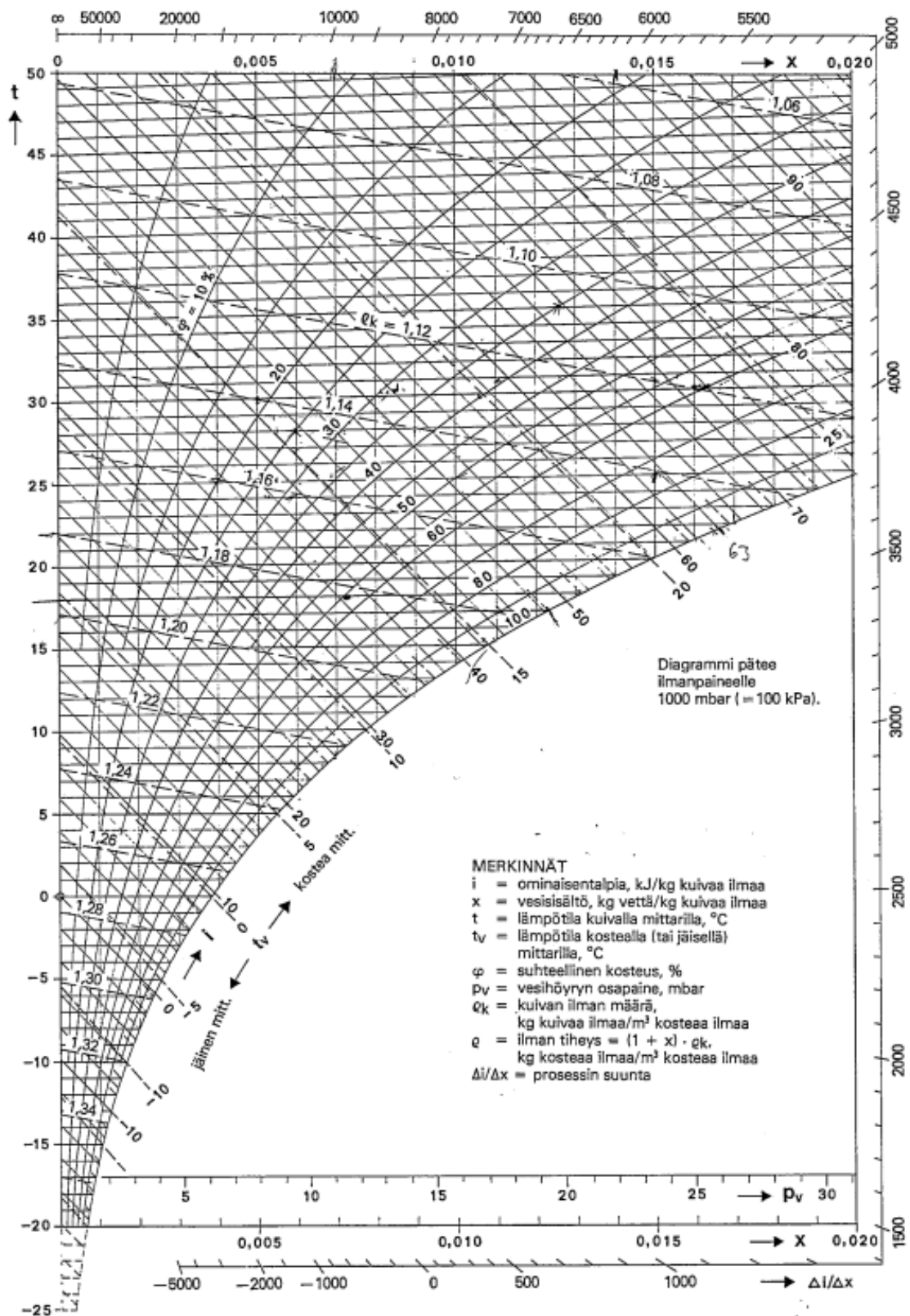
Ympäristöministeriö. 2018. Asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilman-
vaihdesta. Luettu 20.3.2019. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171009>

LIITTEET

Liite 1. Liiga-joukkueiden jäähallit. (Liiga, 2019)

Joukkue	Jäähalli (rak.vuosi)	Kentän koko (m)	Katsomokapasiteetti (hlöä)
HIFK	Helsingin jäähalli (1966)	60,08 x 27,67	8200
HPK	Ritari-Areena (1979)	58 x 30	5360
Ilves/Tappara	Hakametsä (1965)	60 x 28	7300
Jukurit	Ikioma Areena (1982)	59 x 29	4200
Jyp	Lähitapiola Areena (1982)	60 x 29	4437
Kalpa	Niiralan Monttu (1979)	60 x 28	5300
KooKoo	Lumon Areena (1982)	60 x 30	6200
Kärpät	Oulun Energia Areena (1974)	60 x 29	6614
Lukko	Kivikylän Areena (1970)	59 x 28	4700
Pelicans	Isku-Areena (1973)	58 x 28	5371
Saipa	Kisapuisto (1972)	60 x 28	4820
Sport	Vaasan Sähkö Areena (1971)	58 x 28	4164
TPS	Gatorade Center (1990)	60 x 28	11820
Ässät	Isomäki Areena	58 x 28	6350

Liite 3. Mollier-diagrammi



Liite 4. Jään pintalämpötilaa vastaavan kylläisen tilan vesisisältö. (Laitinen, 2010)

Jään pintalämpötila °C	Vesisisältö, g/kg
-4	2,48
-3	2,70
-2	2,94
-1	3,20
0	3,47
2	4,36

Liite 5. Mittalaitteiden tarkkuustiedot

Taulukko 20. Netatmo Weather Station-sensorien tarkkuustiedot. (Netatmo, 2019)

Netatmo Smart Indoor Module	
Mitattava suure	Tarkkuus \pm
Lämpötila	$\pm 0,3$ °C
Suhteellinen kosteus	± 3 %
Hiilidioksidi	± 50 ppm (0-1000 ppm) ± 5 % (1000-5000 ppm)

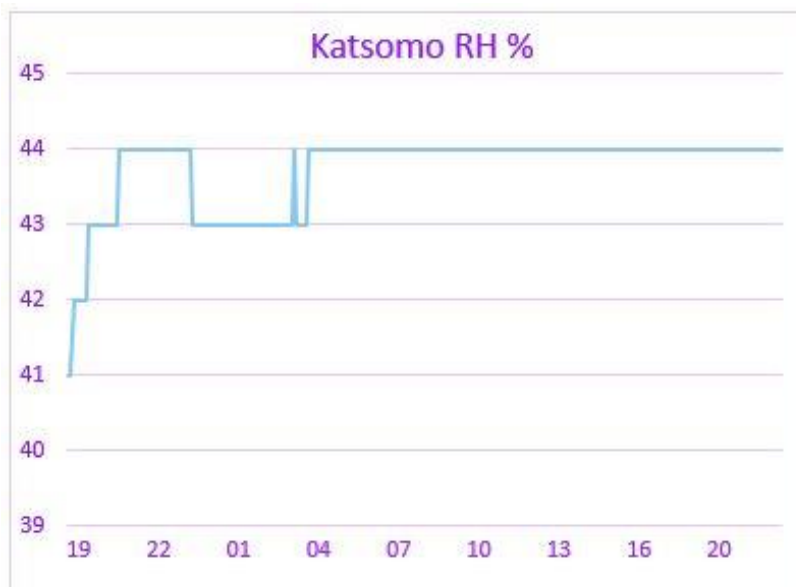
Taulukko 21. LCA301 siipipyöräänemetrin tarkkuustiedot. (Moreall Oy, 2019)

Siipipyöräänemetri LCA301	
Mitattava suure	Tarkkuus \pm
Ilmannonpeus	± 1 % tai $\pm 0,02$ m/s
Ilmavirta	Määräytyy virtausnopeuden ja kanavakoon funktiona

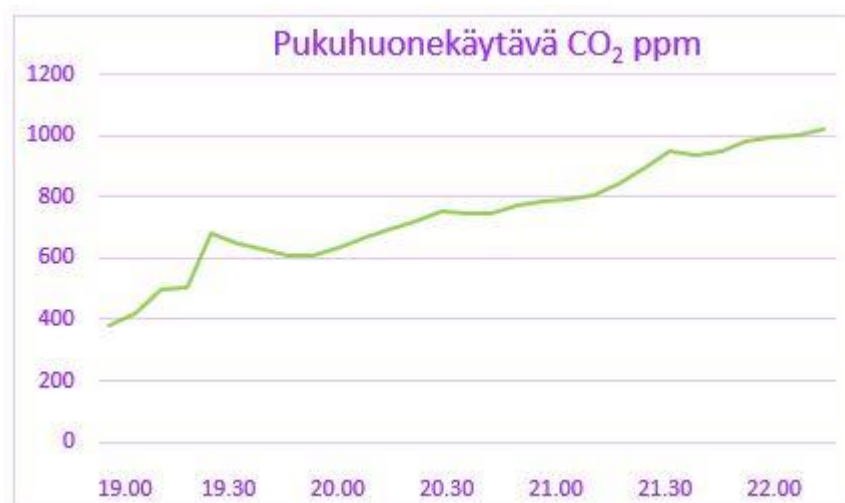
Taulukko 22. BF05 luksimittarin tarkkuustiedot. (Trotec, 2019)

Luksimittari BF05	
Mitattava suure	Tarkkuus \pm
Valaistusvoimakkuus	± 5 % (<10 000 lx) ± 10 % (>10 000 lx)

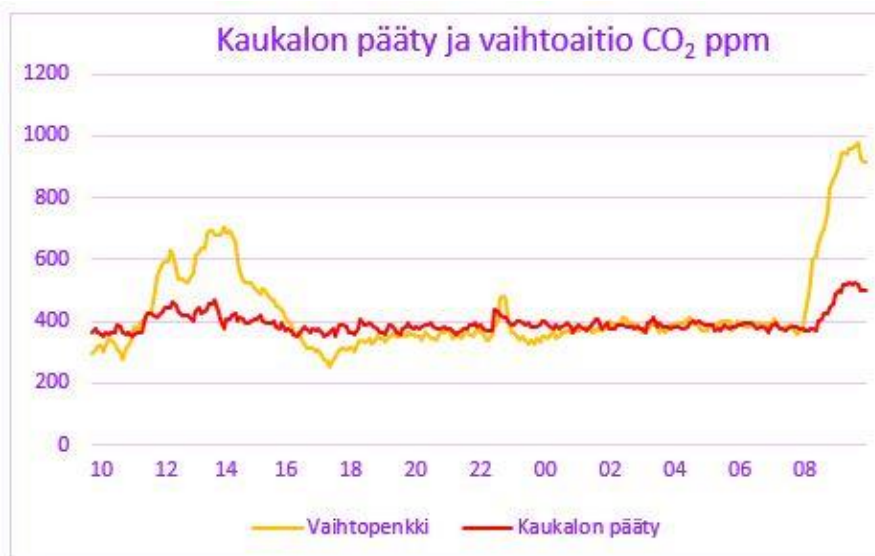
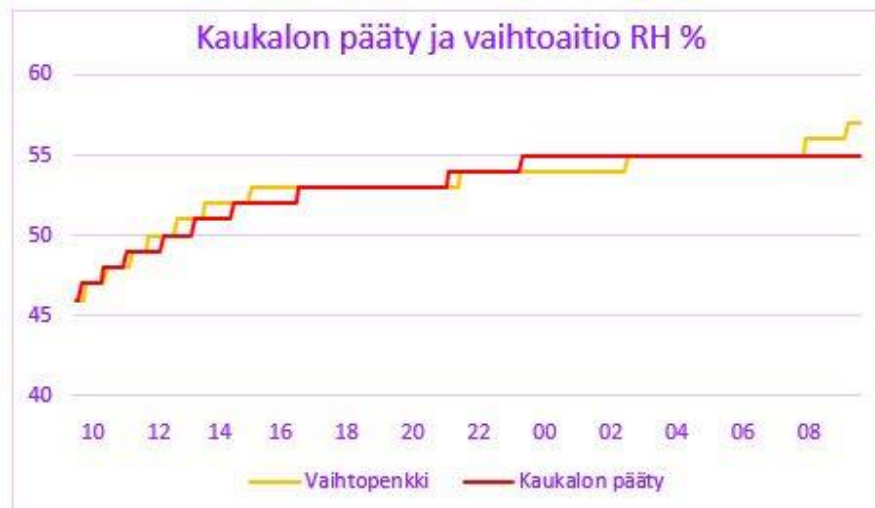
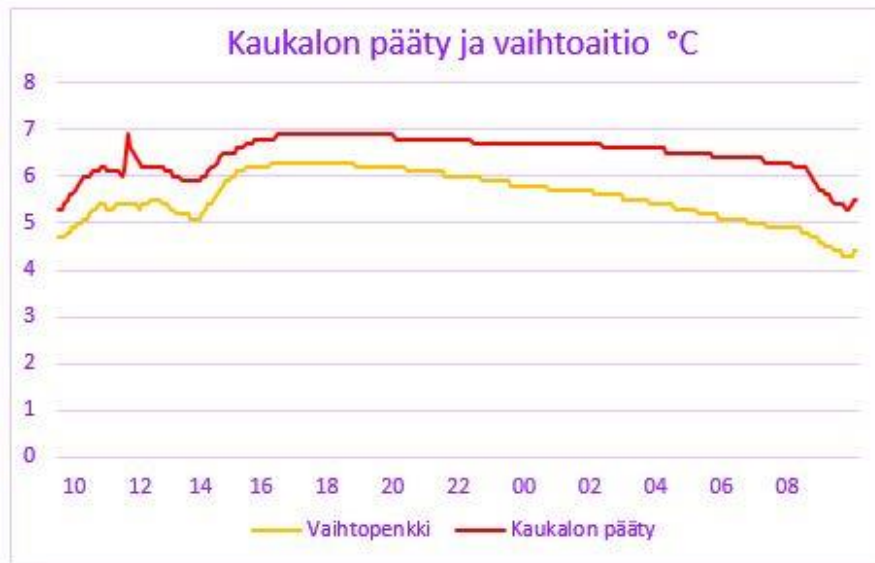
Liite 6. Katsomon mittaukset (27.-28.2.2019)



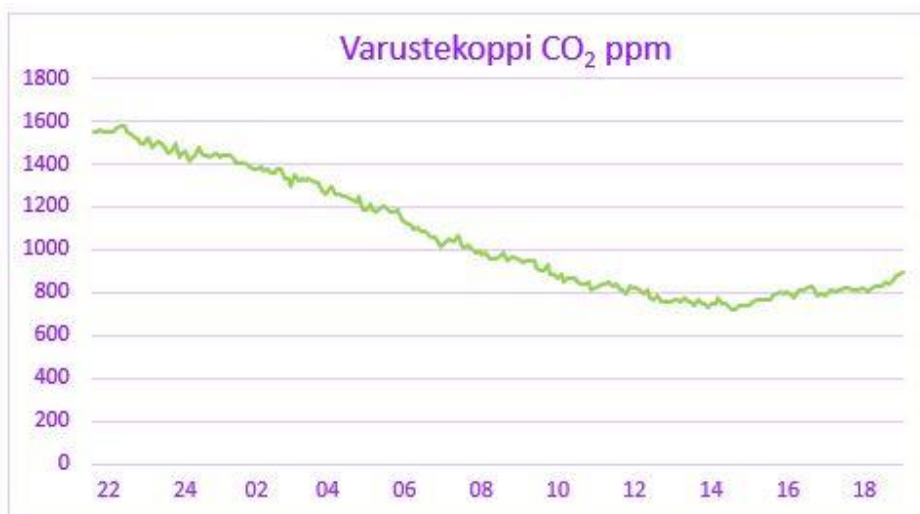
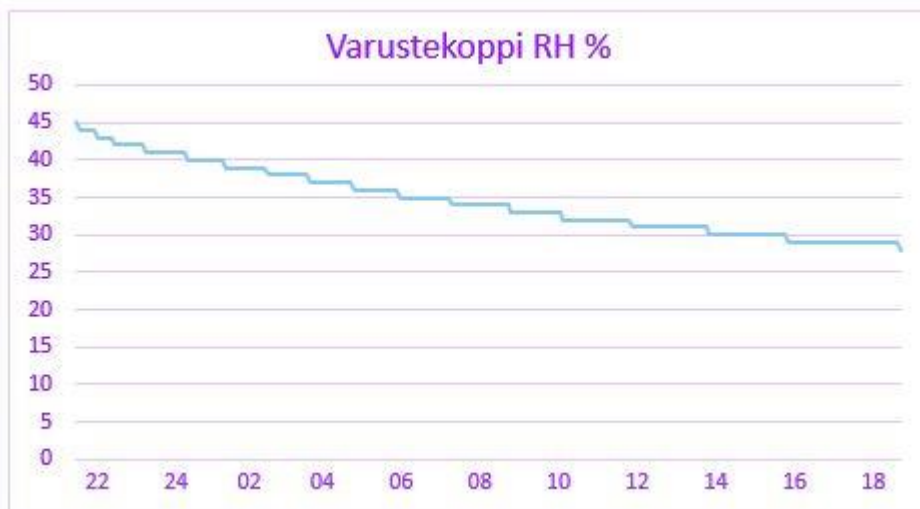
Liite 7. Pukuhuonekäytävän mittaukset (27.-28.2.2019)



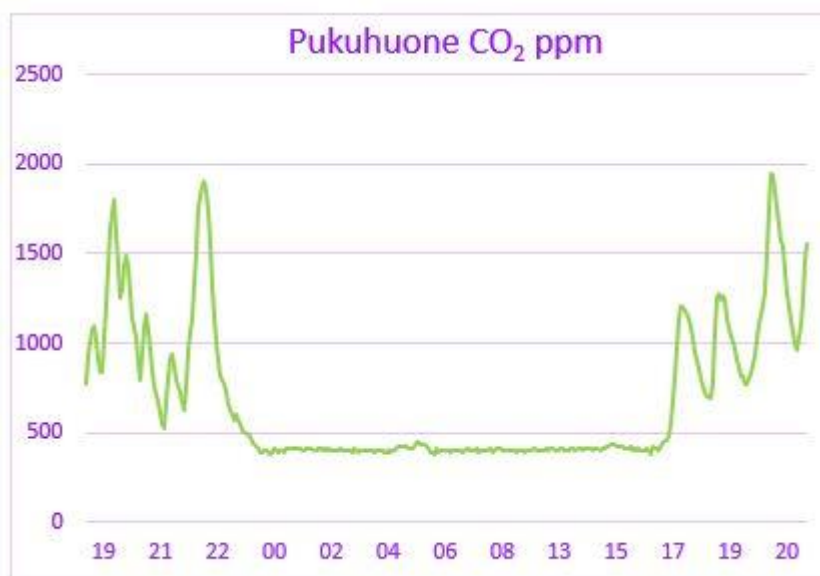
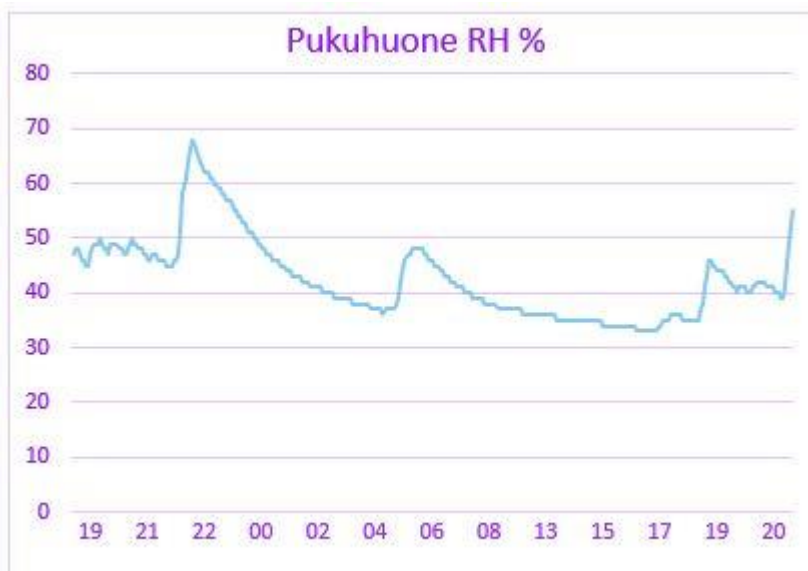
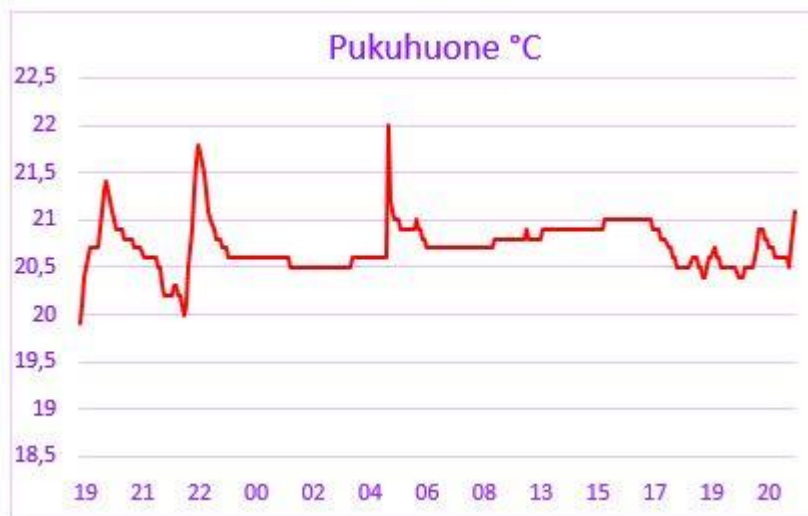
Liite 8. Kaukalon päädyn/vaihtoaition mittaukset (2.-3.2.2019)



Liite 9. Varustekopin mittaukset (27.-28.2.2019)



Liite 10. Pukuhuoneen mittaukset (27.-28.2.2019)



Liite 11. Sosiaalitulojen ilmvirtamittaukset

Tila	Puhallinteho 1/2	
	Tuloilma l/s (suunniteltu)	Poistoilma l/s (suunniteltu)
Pukuhuone 3	58 (50)	22 (30)
Wc3		2 (10)
Pesuhuone 3-4		17 (40)
Pukuhuone 4	45 (50)	33 (30)
Wc4		6 (10)
Pukuhuone 5	26 (50)	32 (30)
Wc5		3 (10)
Pesuhuone 5-6		11 (40)
Pukuhuone 6	29 (50)	6 (30)
Wc6		3 (10)