



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Hermann Vierimaa

Kulttuurirakennuksen auditorion olo- suhdeselvitys ja korjaussuunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

5.2.2021

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Hermann Vierimaa Kulttuurirakennuksen auditorion olosuhdeselvitys ja korjaus- suunnittelu 63 sivua + 3 liitettä 5.2.2021
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Ammatillinen pääaine	LVI-suunnittelu
Ohjaajat	ryhmäpäällikkö Kauri Salminen yliopettaja Rauno Holopainen
<p>Tämä opinnäytetyö käsittelee erään pääkaupunkiseudulla sijaitsevan modernin kulttuurirakennuksen auditoriotilalle toteutettua sisäilmaolosuhteiden selvitystyötä. Tilan käyttäjät ovat kokeneet sisäilmaolosuhteet kyseisessä tilassa ajoittain erittäin heikoiksi. Työn tavoitteena oli selvittää syitä heikoiksi koetuille olosuhteille ja kehittää ratkaisumalli, jolla olosuhteita saadaan parannettua. Selvitystyönkohteena olevan kiinteistön sisäilmastolle on asetettu hyvin tarkat ja vaativat olosuhdetavoitteet.</p> <p>Tämä opinnäytetyö muodostuu teoreettisesta sekä toiminnallisesta osasta. Työn teoriaosuus on toteutettu kirjallisuuskatsauksen pohjalta, ja sen tavoitteena on antaa lukijalle perustietoa sisäilmateknisestä selvitystyöstä. Teoriaosuudessa käsitellään myös ilman kostutusta, sen ollessa keskeinen tekijä auditorion olosuhdeselvityksen kannalta. Toiminnallinen osuus työstä käsittelee kiinteistössä toteutettua selvitystyötä, sen eri vaiheita ja lopputuloksia.</p> <p>Tehdyllä selvitystyöllä onnistuttiin löytämään joitakin epäkohtia kiinteistön taloteknisten järjestelmien toiminnasta, jotka voivat osittain selittää tilan käyttäjien kokemia heikkoja sisäilmaolosuhteita. Havaittujen epäkohtien korjaamiseksi laadittiin myös tämän opinnäytetyön yhteydessä korjaussuunnitelma.</p>	
Avainsanat	sisäilmasto, ilmanvaihto, sisäilmatutkimus, ilmankostutus

Author Title	Hermann Vierimaa Survey of Indoor Climate and Design of Renovation of Auditorium in Cultural Building
Number of Pages Date	63 pages + 3 appendices 5 February 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Professional Major	HVAC Design
Instructors	Kauri Salminen, Group Manager Rauno Holopainen, Principal Lecturer
<p>This thesis aimed at investigating the reasons of poor indoor air quality experienced by the users in an auditorium in a modern cultural building in the Helsinki Metropolitan Area. Furthermore, a goal of the thesis was to develop a solution to improve indoor air quality conditions of the building with demanding and strict goals for the air quality.</p> <p>This thesis based on, first, a literature review, providing a background on the technical aspects of investigating indoor air quality. The theoretical framework also addressed air humidification, it being a central part of the investigation of the conditions in the auditorium. Second, the final year project included a survey of the case building. The results and conclusions of the survey were discussed in the thesis.</p> <p>The survey discovered some faults in the functions of the property's building services systems, which may partially explain the poor indoor air quality experienced by the users of the auditorium. The results of the survey done during the final year project were used to draw a plan to adjust the faults.</p>	
Keywords	indoor climate, ventilation, indoor climate survey, air humidification

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sisäilman laatuun vaikuttavat tekijät	2
2.1	Yleistä	2
2.2	Sisäilmaston vaikutukset	3
2.3	Sisäilmasto ja LVIA-tekniikka	5
3	Sisäilmaston tutkiminen	5
3.1	Yleistä	5
3.2	Sisäilmateknisen selvityksen kulku	6
3.3	Sisäilmaston mittaukset	8
4	Ilmanvaihtojärjestelmän tekninen tarkastelu	10
4.1	Ilmanvaihtojärjestelmän toimivuuden ja puhtauden tarkastaminen	11
4.1.1	Ilmanvaihtojärjestelmän toimivuuden tarkastaminen	11
4.1.2	Ilmanvaihtojärjestelmän puhtauden ja tiiviyyden tarkastus	14
4.2	Ilmavirtamittaukset	19
4.3	Rakennuksen painesuhteiden mittaaminen	24
5	Sisäilman kostutus- ja kuivaustarve	27
5.1	Yleistä	27
5.2	Kostutustavat	29
5.2.1	Sumutuskostutus	29
5.2.2	Kontaktikostutus	31
5.2.3	Höyrykostutus	32
5.3	Ilman kuivaus jäähdytyspatterilla	35
5.4	Ilman kosteuden vaikutus sisäilmastoon	37
6	Auditorion olosuhdeselvitys	39
6.1	Lähtötiedot	39

6.1.1 Auditorion olosuhdetavoitteet	41
6.2 Ilmanvaihto- ja kostutusjärjestelmän kuvaus	42
6.3 Toteutetut mittaukset ja selvitykset	50
6.4 Yhteenveto tehdyistä selvityksistä	59
7 Korjaustoimenpiteiden suunnittelu	60
8 Yhteenveto	62
Lähteet	64
Liitteet	
Liite 1. Käyttäjätyytyväisyyskyselylomake	
Liite 2. Absoluuttisen- ja suhteellisen kosteuden kuukausikeskiarvot	
Liite 3. Auditorion sisäilman mikrobiselvityksen laboratoriotulokset	

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää syitä heikoiksi koetuille sisäilmaolosuhteille pääkaupunkiseudulla sijaitsevan 2010-luvulla valmistuneen kulttuurirakennuksen auditoriotilassa. Rakennuksen käyttäjät ovat kokeneet olosuhteet tilassa ajoittain erittäin heikoiksi. Tilan käyttäjien keskuudessa koettuja oireita ovat olleet epämiellyttävät hajut, ilman tunkkaisuus, väsymyksen tunne ja silmien kutina.

Tilojen käyttäjiltä saadun palautteen perusteella käynnistettiin selvitystyö, jonka tarkoituksena oli selvittää syitä auditorion heikoiksi koetuille olosuhteille ja mahdollisuuksien mukaan löytää ratkaisu, jolla sisäilmaolosuhteita saadaan parannettua.

Tämä opinnäytetyö koostuu teoreettisesta sekä toiminnallisesta osasta. Teoriaosa keskittyy käsittelemään sisäilmastoa, siihen liittyviä tekijöitä ja sisäilmaston tutkimusmenetelmiä. Teoriaosuus sisäilmaston tutkimusmenetelmistä painottuu vahvasti ilmanvaihtojärjestelmien toiminnan tarkasteluun sisäilmateknisestä näkökulmasta. Teoriaosassa käsitellään myös ilmastointiprosesseja kuten ilmastokostutusta. Tarkka sisäilman kosteudenhallinta on keskeinen osa selvitystyönkohteen sisäilmastolle asetettuja tavoitteita.

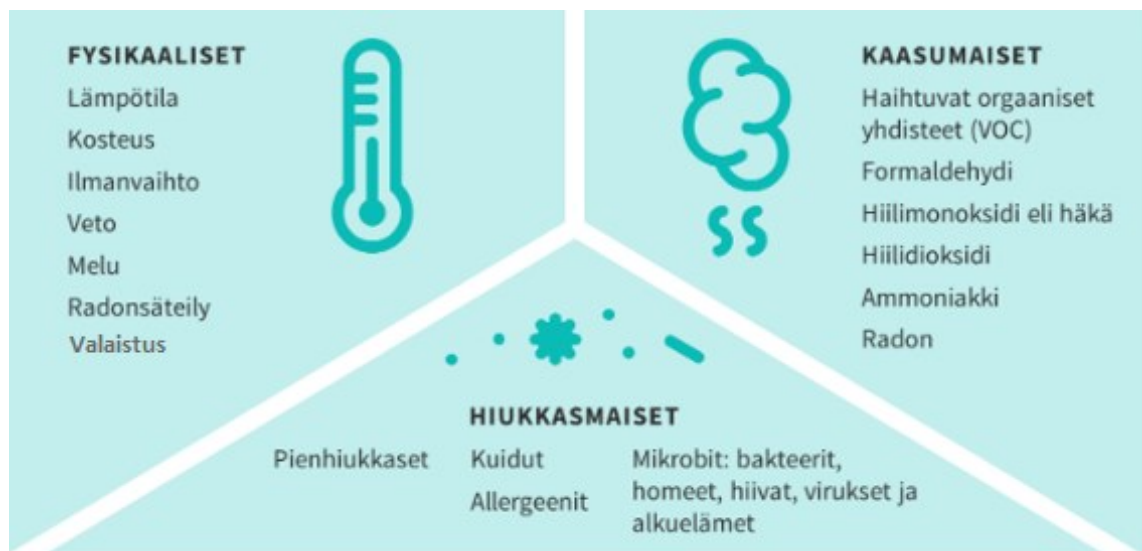
Työn toiminnallinen osuus vuorostaan käsittelee selvitystyönkohteen olevan kiinteistön auditorion sisäilmaolosuhteisiin liittyvää selvitystyötä. Tässä osiossa perehdytään kiinteistön taloteknisiin järjestelmiin, suunnittelutavoitteisiin, tehtyyn selvitystyöhön, selvitystyön lopputuloksien analysointiin ja korjaustoimenpiteiden suunnitteluun.

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Granlund Oy, joka on suomalainen kiinteistö- ja rakennusalan asiantuntijakonserni. Yritys on perustettu vuonna 1960, ja se työllistää noin 1 000 henkilöä Suomessa, Aasiassa, Lähi-idässä ja Iso-Britanniassa. [1.]

2 Sisäilman laatuun vaikuttavat tekijät

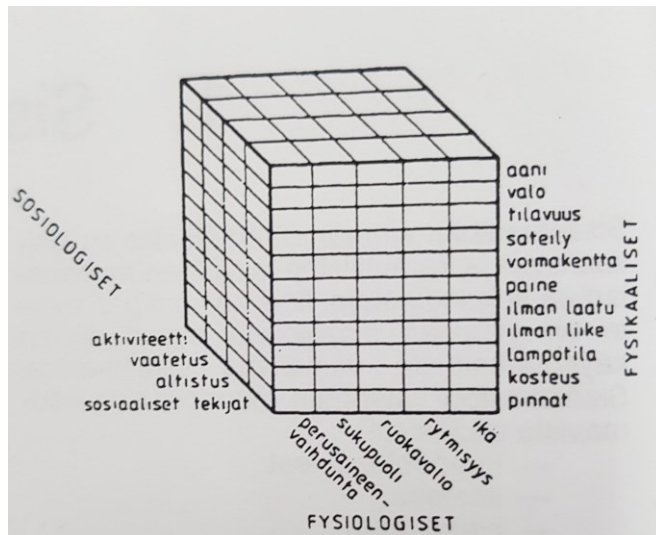
2.1 Yleistä

Sisäilmalla tarkoitetaan sisätiloissa hengitettävää ilmaa, jossa perusosien lisäksi saattaa olla eri lähteistä peräisin olevia kaasumaisia ja hiukkasmaisia epäpuhtauksia. Sisäilmasto on kokonaisuus, joka muodostuu fysikaalisista ja kemiallisista tekijöistä. Sisäilman laatu riippuu lukuisista kemiallisista yhdisteistä, hiukkasista, mikrobeista ja fysikaalisista tekijöistä. [2.] Sisäilmaston voidaan katsoa muodostuvan kuvassa 1 osoitetuista tekijöistä.



Kuva 1. Sisäilman laatuun vaikuttavia fysikaalisia tekijöitä ja epäpuhtauksia. Kuvaa mukailtu lähteestä: THL.

Näiden tekijöiden lisäksi koettuihin olosuhteisiin voivat vaikuttaa myös psykologiset ja psykososiaaliset tekijät. Viime vuosikymmenten aikana rakennusten homeongelmat ja sisäilma-asiat ovat olleet julkisuudessa paljon esillä. Huonoksi koettu sisäilma yhdistetään usein kosteusvaurioihin ja homeongelmiin, vaikka olemassa on useita muitakin syitä heikolle sisäilman laadulle. Psykososiaaliset tekijät, kuten yleinen tyytyväisyys, työilmapiiri ja johtaminen liittyvät erityisesti työpaikoilla koettuihin sisäilmaongelmiin. [3.]



Kuva 2. Viihtyvyyteen vaikuttavien tekijöiden muodostama kolmiulotteinen malli [4, s. 7].

Yleisellä tasolla voidaan todeta, että sisäilmasto on hyvä, kun suurin osa kiinteistön käyttäjistä on tyytyväisiä sisäilmanlaatuun, eivätkä sisäilman haittatekijät eivät aiheuta terveydelle vaaraa. Terveellinen sisäilma on hajutonta, pölytöntä, vedotonta, lämpötilaltaan miellyttävää ja melutonta. [2.]

2.2 Sisäilmaston vaikutukset

Suomalaiset työikäiset ihmiset viettävät ajastaan noin 90 % sisätiloissa, joten laadukas ja viihtyisä sisäympäristö on terveyden ja hyvinvoinnin kannalta hyvin tärkeä. Sisäilman laadulla on suora vaikutus ihmisten viihtyvyyteen, terveyteen ja työtehoon. Huonon sisäilman on arvioitu aiheuttavan Suomessa vuositasolla kolmen miljardin euron kustannuksen. Arvio pitää sisällään kaikkien sisäilmasta aiheutuneiden sairauksien kustannukset. [4, s.10; 5.]

Sisäilmasto vaikuttaa ihmiseen monella tavalla. Tavallisimmin vaikutus käy ihon, limakalvojen ja hengityselinten kautta. Iho ja limakalvot ovat rajapintaa ihmisen ja ympäristön välillä. Siksi oireet esiintyvät useimmiten niissä. Ideaalitalanteessa eri sisäilmastotekijät vaikuttavat positiivisesti tilan käyttäjien viihtyvyyteen ja terveyteen. Jos olosuhteet poikkeavat tavoitelluista, vaihtelee vaikutus eri sisäilmastotekijän mukaan. Edellytyksenä

epäviihtyvyyden tunteelle on se, että ihminen aistii kyseisen epäviihtyvyyttä aiheuttavan tekijän hajun kautta tai vedon tunteena. Monelle epäpuhtaudelle hajukynnys on kuitenkin niin korkea, että epäpuhtauden terveydelliset vaikutukset alkavat ennen kuin se koetaan epäviihtyvyytenä. Tämä pätee erityisesti huoneilmassa esiintyvien kemiallisten aineiden seoksien osalta. Huomioitavan arvoista on kuitenkin muistuttaa, että erilaiset ihmiset kokevat sisäilmaston eri tavalla ja voivat täten reagoida herkemmin epäviihtyvyyttä aiheuttaviin tekijöihin kuin toiset. [4, s. 11-12.] Taulukossa 1 on esitetty yleisimmät sisäilman laatua heikentävät tekijät ja niiden aiheuttamat haitat ja oireet.

Taulukko 1. Yleisimmät sisäilman laatua heikentävät tekijät ja niiden aiheuttamat haitat ja oireet [6].

Epäpuhtaus tai muu haittatekijä	Tavanomainen lähde/syy	Haitta / oire
Allergeenit	Koti- ja lemmikkieläimet, siitepölyt, kemikaalit, pöly- ja varastopunkit, mikrobikasvustot	Allerginen nuha, silmä-, astma- ja iho-oireilu
Ammoniakki	Materiaalien kosteusvauriot, viemärit, lemmikkieläimet, tupakointi	Hajuhaitat, ärsytysoireet
Asbestikuidut	Useat eri rakennusmateriaalit	Syöpäriskin kasvu, asbestoosi
Formaldehydi	Lastulevyn ym. materiaalien kosteusvauriot, sisustustuotteet, tekstiilit ja pesuaineet	Hajuhaitat, ärsytysoireet, kosketusihottuma, syöpäriskin kasvu.
Hiilidioksidi (CO ₂)	Ihmiset, lemmikkieläimet, heikko ilmanvaihto	Suuri pitoisuus viittaa tilojen käyttöön nähden riittämättömään ilmanvaihtoon. Erittäin korkeissa pitoisuuksissa väsymys, päänsärky.
Hiilimonoksidi (häkä, CO)	Tulisiijat, liikenne	Häkämyrkytys, tukehtumiskuolema
Häiritsevät hajut	Materiaalien kosteusvauriot, ilmavuodot rakenteista, materiaalit, kemikaalit, käyttäjät	Ärsytysoireet, epämukavuus
Vähäinen ilmanvaihtuvuus	Heikkotehoinen ilmanvaihto, IV-järjestelmän viat, ilmanjaon puutteet	Epäpuhtauksien kertymisestä aiheutuva oireilu ja epämukavuus
Liiallinen alipaineisuus rakennuksen ulkovaipan yli	Ulkoilmavirtoihin nähden liialliset poistoilmamäärät	Epäpuhtauksien kulkeminen rakenteista sisäilmaan
Kuiva sisäilma	Kylmä ja kuiva ulkoilma	Ihon ja limakalvojen ärsytysoireet, oireiluerkkyyden kasvu
Lämpötila, liian matala tai korkea, vetoisuus	LVI-järjestelmän puutteet ja säätövirheet, pintasäteily, ilmavuodot	Epämukavuus, sairastavuuden lisääntyminen
Mikrobit ja niiden aineenvaihdintuotteet	Kosteus- ja mikrobivauriot, ilmavuodot rakenteista, IV-kanaviston epäpuhtaudet kosteissa järjestelmissä	Hengitystieärsytys, astma, allergiset sairaudet, hengitystieinfektioiden lisääntyminen, yleisoireet
Otsoni	Ilmanpuhdistimet, kopiokoneet	Hengitysteiden ärsytysoireet. Voimistaa allergeenien vaikutusta
PAH-yhdisteet	Vanhat kosteuseristeet, kivihiilipiki, polttotapahtumat	Hajuhaitat, syöpäriskin kasvu
PCB	Rakennusmateriaalit, mm. elementtisaumausmassat ja maalit, lämmönsiirtonesteet	Syöpäriskin kasvu
Pienhiukkaset	Ulkoilma (teollisuus, liikenne), tupakan savu, kopiokoneet, kosteusvauriot, pienpoltto, kynttilät ja tulisiijat	Viihtyvyyshaitat, sydän- ja hengityselinsairaudet, astma
Radon	Maaperä, rakennuksen alustäyttö	Keuhkosyöpäriskin kasvu
Teolliset mineraalivillakuidut	Lämmön- ja ääneneristysmateriaalit rakenteissa ja IV-järjestelmissä	Silmien ja hengitysteiden ärsytysoireet
VOC-yhdisteet (haihtuvat orgaaniset yhdisteet, engl. volatile organic compounds)	Kosteusvauriot, rakennusmateriaalit, sisustusmateriaalit, tekstiilit, pesuaineet, kosmetiikka, ihmiset ja lemmikkieläimet	Ärsytysoireet, astma
Öljyhiilivedyt	Rakennusmateriaalit (mm. valuasfaltti), öljyvahingot rakenteisiin ja maaperään rakennuksen alla	Hajuhaitat

2.3 Sisäilmasto ja LVIA-tekniikka

Hyvän sisäilmaston luominen ja ylläpitäminen on hyvin keskeinen LVI- ja rakennusautomaatiojärjestelmien tehtävä. LVIA-tekniikalla vaikutetaan sisäilmastoon esimerkiksi seuraavasti

- Ilmanvaihto- ja lämmitysjärjestelmien avulla ylläpidetään haluttuja lämpöolosuhteita.
- Ilmanvaihdolla ylläpidetään hyvää ilmanlaatua poistamalla epäpuhtauksia tiloista ja tuomalla tilaan käyttötarkoituksen nähden riittävästi puhdasta ilmaa.
- Ilmastoinnilla voidaan ilmaa lämmittää, jäähdyttää, kostuttaa ja kuivata.
- Rakennusautomaatiolla ohjataan ja valvotaan rakennuksen olosuhteita ja LVI-laitteiden toimintaa. [4, s. 7.]

3 Sisäilmaston tutkiminen

3.1 Yleistä

Tarve sisäilman laadun tutkimiselle syntyy usein rakennuksen käyttäjien tekemien havaintojen perusteella. Jos tiloissa on koettu sisäilmastoon liittyviä ongelmia, pyritään tutkimuksilla selvittämään, missä ongelmat esiintyvät, sekä mahdollista syytä niiden takana. Sisäilmastoa voidaankin tutkia huomattavan monella tavalla. Sisäilmaston tutkiminen vaatii vahvaa ymmärrystä ja ammattitaitoa, jotta pystytään saatujen lähtötietojen perusteella valitsemaan oikeat tutkimuksen kohteet ja tutkimusmenetelmät. Rakennuksen käyttäjiltä saatu subjektiivinen tieto on tutkimuksen lähtötietona hyvin tärkeää, mikä osaltaan ohjaa selvitystyön alussa käytettäviä tutkimusmenetelmiä ja laajuutta.

Ympäristöministeriön julkaisemassa oppaassa *Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus (2016)* on ohjeet tutkimuksen tilaajalle, kun tilaaja haluaa varmistua laadukkaasti ja luotettavasti tehdystä sisäilmatutkimuksesta. Oppaassa on esitetty muun muassa lainsäädäntöä ja asetuksia, jotka ohjaavat rakennusten terveellisyyttä ja turvallisuutta, sekä pätevyysvaatimuksia, joita tutkimuksen tekijältä vaaditaan. Opas toimii myös hyvänä esimerkkinä laajamittaisen kosteus- ja sisäilmateknisen kuntotutkimuksen tutkimussuunnitelmana.

3.2 Sisäilmateknisen selvityksen kulku

Tyypillisesti rakennuksessa heikoiksi koettuihin olosuhteisiin liittyvä selvitystyö lähtee liikkeelle rakennuksen käyttäjiltä saadun palautteen perusteella. Käyttäjiltä saatu palaute voi olla peräisin esimerkiksi rakennuksen käyttäjille tehdystä tyytyväisyyskyselystä. On kuitenkin mahdollista, että olosuhdepoikkeamat noteerataan esimerkiksi rakennusautomaatiojärjestelmästä ennen kuin käyttäjät kokevat olosuhteiden heikentyneen. Käyttäjätyytyväisyyskysely on kuitenkin hyvä tapa kartoittaa koettua sisäympäristöä. Rakennuksen käyttäjien kuuleminen ja mukana oleminen sisäilmasto-ongelmien ratkaisuprosessissa lisää ympäristön hallinnan tunnetta, mikä on tärkeää hyvinvoinnin kannalta.

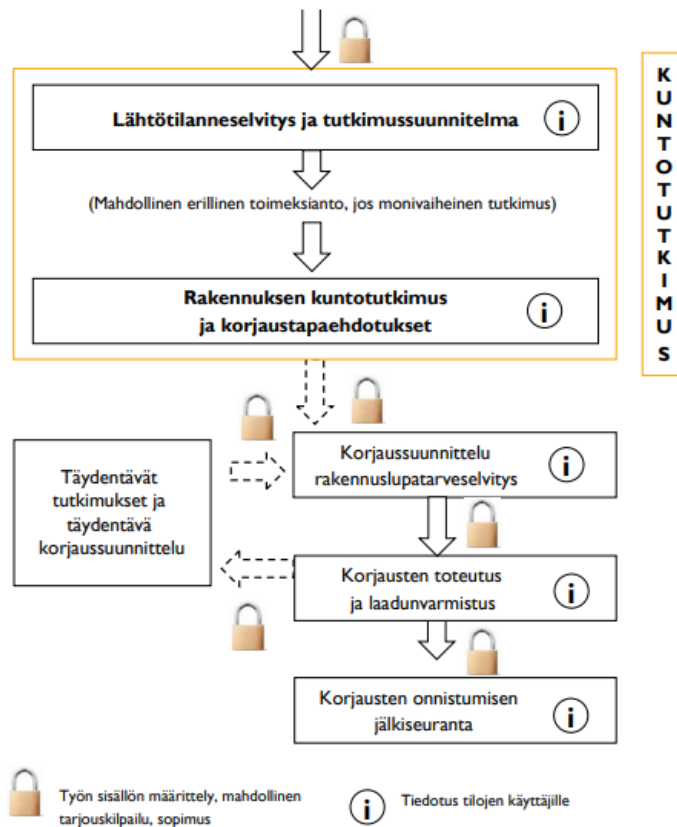
Suppean käyttäjätyytyväisyyskyselyn, joka painottuu käyttäjien ja huoltohenkilökunnan rakennuksessa tekemiin teknisiin havaintoihin, voi selvityksen tekijä tehdä itse. Sellaiset sisäilmastokyselyt, joilla kartoitetaan rakennuksen käyttäjien sairastavuutta ja rakennukseen liitettyjä oireita, tulee teettää organisaatiolla, jossa tuloksia käsittelee terveydenhuollon ammattilainen. [4, s. 23.] Liitteessä 1 on esitetty käyttäjätyytyväisyyskyselylomake, joka on YM:n *Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus* -oppaassa esimerkkinä käytetty lomakemalli suppeasta kyselystä.

Ensimmäisenä työvaiheena sisäilmateknisessä selvityksessä voidaan pitää lähtötietojen keräämistä ja kohteeseen tutustumista. Tämä vaihe pitää sisällään kiinteistössä tehtävän katselmuksen ja suunnitelmien ja muiden mahdollisten lähtötietojen katselmoinnin silmämääräisesti havainnoimalla. Kohdekatselmus on hyvä tehdä henkilön kanssa, joka tuntee kiinteistön. Tällainen henkilö löytyy yleensä kiinteistönhuolto-organisaatiosta. Kohdekatselmuksessa kartoitetaan mahdolliset epäpuhtauslähteet, LVI-järjestelmät ja niiden kunto, rakennuksen yleinen kunto, rakennuksen tai yksittäisten tilojen soveltuminen käyttötarkoitukseensa ja suunnitelmien paikkansa pitävyys.

Mikäli sisäilmahaitan syy ei varmistu lähtötietojen ja katselmuksen avulla, laaditaan suunnitelma tarvittavista lisäselvityksistä perustuen tehtyihin havaintoihin. Tällaisia selvityksiä voi olla esimerkiksi rakennuksen kuntotutkimus ja siihen liittyvät mikrobimääritykset, ilmanvaihdon toiminnan tarkempi tarkastelu ja sisäilman epäpuhtauksien ja fyysikaalisten olosuhteiden mittaukset. [7.]

Seuraava vaihe on teettää suunnitellut tutkimukset, joista laaditaan selkeät raportit ja arvioinnit. Tutkimuksien lopputuloksena laaditaan toimenpide-ehdotukset, joka voi pitää sisällään lisätutkimuksien suorittamista tai jos jo tehdyillä tutkimuksilla löydettiin epäkohdita, näiden pohjalta laaditaan toimenpide-ehdotukset ongelmien korjaamiseksi. Selvityksen tulosten ja raportin valmistuttua tehdyt tutkimukset ja saadut tulokset sekä toimenpide-ehdotukset on suositeltavaa käydä läpi tilaajan kanssa. Tällä varmistetaan, että tutkimustulokset, tulkinat ja niihin liittyvät epävarmuuden siirtyvät tilaajalle tiedoksi.

Kun havaitut epäkohdat on korjattu, tulee korjauksen vaikutuksia seurata, jotta voidaan todeta korjaustoimenpiteen onnistuneen. Hyvä keino seurata korjauksen vaikutuksia on tehdä seurantamittauksia, jos tehdyn korjaustoimenpiteen vaikutusta on mahdollista konkreettisesti mitata. Seurantamittaus voi olla esimerkiksi pidempiaikaista lämpötilojen seurantaa tallentavilla mittalaitteilla. Korjaustoimenpiteen vaikutusta voidaan lisäksi myös seurata teettämällä uusi käyttäjätyytyväisyyskysely, jos sellainen oli tehty ennen tehtyjä toimenpiteitä. YM:n oppaassa *Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kunto-tutkimus* on kuntotutkimuksen kulku esitetty kuvan 3 mukaisesti.



Kuva 3. Sisäilmaongelmaisen rakennuksen korjaushankkeen kulku [4]

3.3 Sisäilmaston mittaukset

Sisäilman laatuun vaikuttavia fysikaalisia ja kemiallisia tekijöitä ja niiden vaikutusta koetuihin olosuhteisiin voidaan selvittää erilaisilla mittauksilla. Sisäilmastoa voidaan mitata myös koetun sisäilmaston kautta. Koettua sisäilmastoa voidaan mitata käyttäjätyytyväisyyskyselyillä tai haastatteluilla. Tilojen käyttäjien kuuleminen sisäilmastoon liittyvissä selvityksessä on tärkeää, koska mitattu ja koettu sisäympäristö eivät aina vastaa toisiinsa. [8.] Taulukossa 2 on esitetty yleisiä sisäilmaston mittauksia. [9, s. 69.]

Taulukko 2. Yleisimpiä sisäilmaston mittauksia lajiteltuna kategorioittain.

Ilmanvaihdon- ja painesuhteiden mittaukset	Lämpötilamittaukset	Kosteusmittaukset	Melumittaukset	Ilman laadun mittaukset
o Tulo- ja poistoilmavirrat	o Huoneilman lämpötila	o Huoneilman kosteus	o Laitteiden aiheuttama äänitaso	o Hiukkasmittaukset
o Huoneilman virtausnopeus ja ilmanvaihdon tehokkuus	o Pintalämpötila	o Rakenteiden kosteus	o Huonevaimennus ja puheensiirto	o Kaasujen mittaukset
o Painesuhteet				o Mikrobin mittaukset

Sisäilmaston mittausten tavoitteena on yleensä selvittää toteutuuko tiloissa sisäilmas-
tolle asetut tavoitetasot ja vaatimukset. Tavoitetasoina voidaan pitää esimerkiksi Sisäil-
mayhdistyksen julkaiseman Sisäilmastoluokitus 2018 -ohjekortin tavoitearvoja. Ohjekor-
tissa on käytössä kolme sisäilmastoluokkaa S1, S2 ja S3, josta viimeisimmän luokan
tavoitearvot täyttävät vähintään maankäyttö- ja rakennuslain nojalla annetut säädökset
ja terveydensuojelulain perusteella asetetut vähimmäisvaatimukset. [10.]

Suorittaessa vertailua mittaustulosten ja Sisäilmaluokituksessa esitettyjen tavoitearvojen
välillä on hyvä muistaa, että mitatut arvot eivät välttämättä täytä viimeisimmän Sisäil-
mastoluokituksen tavoitearvoja, jotka voivat olla muuttuneet rakennuksen rakentamisl-
van aikaisista vaatimuksista. Sisäilmastoluokitus toimiikin näin hyvänä vertailukohtana
suorittaessa vertailua nykyisiin vaatimuksiin, suoritettaessa kriittisempää vertailua tulisi
mittaustuloksia verrata rakentamisen aikana voimassa olleisiin vaatimuksiin, määräyk-
siin ja ohjearvoihin.

Jotta mittauksia voidaan pitää luotettavina ja toistettavina, tulee ammattitaitoisen mittaa-
jan lisäksi käytettävien mittalaitteiden olla huollettuja ja kalibroituja. Yksinkertaisimmillaan
kalibrointi terminä tarkoittaa mittalaitteen näyttämän tuloksen vertaamista tarkempaan
mittaan esimerkiksi mittanormaaliin, joka on referenssi johon mittaustulosta verrataan.
Mittanormaali voi olla mitattavan suureen mukaan kiintomitta (esimerkiksi punnus). Kan-
sallisia mittanormaaleja verrataan kansainvälisen mittanormaalijärjestelmän referenssei-
hin, ja kussakin maassa on sitten virallisia mittanormaalilaboratorioita, joissa voidaan
suorittaa vertailumittauksia. Kalibroinnin lopputuloksena saadaan mittalaitteen virhe,
joka voidaan korjata korjauskertoimella tai virittämällä. [11.]

Asianmukaisesti tehdystä mittalaitteen kalibroinnista tulee olla kalibroitodistus, joka on tarvittaessa voitava esittää. Ilman kalibroitodistusta on mittaus juridisesti mitätön. [12, s. 31.] Mittalaitteiden kalibrointi- ja huolto tulee suorittaa säännöllisin väliajoin mittalaittevalmistajan ohjeiden mukaisesti.

4 Ilmanvaihtojärjestelmän tekninen tarkastelu

Ilmanvaihtojärjestelmän tehtävä on poistaa sisäilman epäpuhtauksia ja tuoda rakennukseen käyttötarkoitukseensa nähden riittävästi puhdasta ilmaa. Ilmanvaihtojärjestelmän toimintaa on aiheellista tarkastella, jos on syytä epäillä, että koetut sisäilmaongelmat ovat mahdollisesti peräisin ilmanvaihtojärjestelmästä, tai jos ilmanvaihtojärjestelmän toiminnan epäillään edesauttavan haittojen esiintymistä.

Ilmanvaihtojärjestelmä saattaa myös itsessään toimia sisäilman epäpuhtauksien lähteenä. Tyypillisiä epäpuhtauslähteitä ovat mineraalivillakuidut, joita irtoaa mineraalivillamateriaaleista, joita on käytetty yleisesti äänenvaimennusmateriaalina, rakentamisen aikaiset tai muut pölykertymät sekä kastuneista suodatin- ja äänieristemateriaaleista ja likaantuneista kanavapinnoista irtoavat kemialliset ja mikrobiperäiset epäpuhtaudet.

Myös riittämätön ilmanvaihto voi voimistaa epäpuhtauksien aiheuttamia terveys- ja viihtyvyshaittoja, sekä edesauttaa ihmisistä, toiminnoista sekä vaurioituneista ja vaurioittomista materiaaleista ja irtaimistosta peräisin olevien epäpuhtauksien sekä kosteuden kertymistä huoneilmaan. Ilmanvaihto vaikuttaa myös rakennuksen painesuhteisiin. Huonosti säädetty ilmanvaihtojärjestelmä voi aiheuttaa epäedullisia paine-eroja rakennuksen sisäisesti tai ulkoilman välillä, joka voi myös johtaa epäpuhtauksien leviämiseen rakennuksessa.

Ilmanvaihtojärjestelmän toimivuuden, puhtauden ja kunnon tarkastaminen muodostuu neljästä päävaiheesta:

1. Ilmanvaihtojärjestelmän toimivuuden tarkastaminen

2. Ilmanvaihtojärjestelmän puhtauden tarkastaminen
3. Ilmavirtojen mittaaminen
4. Painesuhteiden mittaaminen. [6, s. 82.]

4.1 Ilmanvaihtojärjestelmän toimivuuden ja puhtauden tarkastaminen

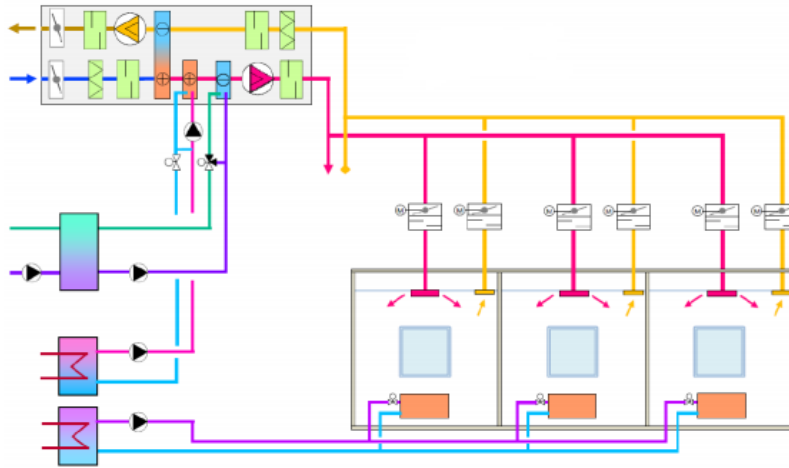
Ilmanvaihtojärjestelmän toimivuuden ja puhtauden tarkastaminen sisäilmateknisestä näkökulmasta on lähtökohtaisesti kentällä tehtävä selvitystyö, jossa kartoitetaan ilmanvaihtojärjestelmä ja siinä mahdollisesti olevat ongelmakohdat, jotka voivat aiheuttaa terveys- ja viihtyvyyshaittoja.

Ilmanvaihtojärjestelmä muodostuu ilmanvaihtokoneesta, mahdollisista erillispuhaltimista, kanavistosta, kanava- ja päätelaitteista ja ilmanvaihtojärjestelmää ohjaavasta automaatiosta, joka on yleensä rakennusautomaatiojärjestelmä. Järjestelmän toimivuutta tarkasteltaessa on siis huomioitava nämä kaikki osatekijät ja niiden vaikutus kokonaisuuteen.

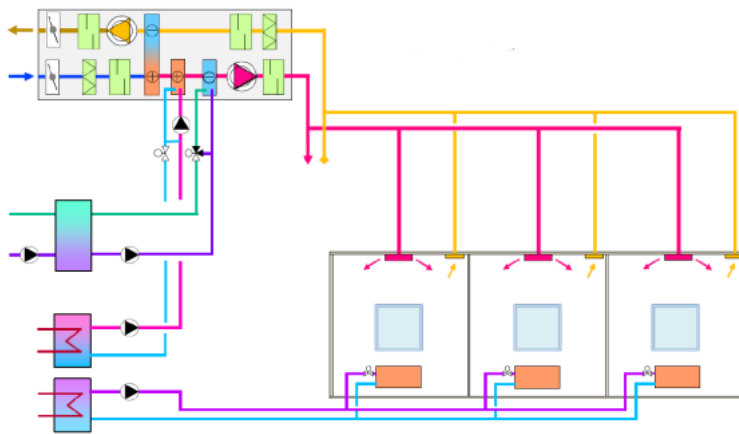
4.1.1 Ilmanvaihtojärjestelmän toimivuuden tarkastaminen

Ilmanvaihtojärjestelmän toimivuutta tarkasteltaessa selvitetään ilmanvaihtojärjestelmän tyyppi, ilmanvaihtokoneiden ja erillispuhaltimien ohjaustapa, laitteiden ikä ja kunto sekä ilmanjakotapa ja sen toimivuus huonetiloissa. [6, s. 82.]

Ilmanvaihtojärjestelmän tyyppi ja sen vaikutus toimivuuden tarkastelun vaatimaan laajuuteen on merkittävä. Muuttuvailmavirtaisen järjestelmän (VAV) toimivuuden tarkastelu vaatii huomattavasti enemmän järjestelmään perehtymistä kuin vakioilmavirtaisen järjestelmän (CAV). CAV- ja VAV-järjestelmien periaate on esitetty kuvissa 4 ja 5.



Kuva 4. Periaatekuva VAV-järjestelmästä huonekohtaisesti toteutettuna. [9, s. 126.].



Kuva 5. Periaatekuva CAV-järjestelmästä. [9, s. 127.].

Muuttuvailmavirtaisessa järjestelmässä voi olla merkittävä määrä ilmavirtojen säätöön liittyviä komponentteja sekä näiden ohjaukseen liittyviä rakennusautomaation kenttälaitteita. Erona näiden järjestelmien toiminnan tarkastelussa on, että VAV-järjestelmissä pitää pystyä todentamaan, että järjestelmä toimii erilaisissa kuormitustiloissa. Mahdollisissa ongelmatilanteissa VAV-järjestelmän kanssa on myös huomattavasti enemmän tarkasteltavia muuttujia kuin CAV-järjestelmissä.

Ilmanvaihtokoneiden ohjaustapojen ja säätöautomaatiikan tarkastelu myös kuuluu osaksi ilmanvaihtojärjestelmän toimivuuden tarkastelua. Ilmanvaihtojärjestelmälle voi olla asetettuna esimerkiksi erilaisia aikaohjelmia, jotka eivät vastaa rakennuksen käyttöaikaprofiilia, tai ulkolämpötilasta riippuvia ilmavirtasäätöjä. Esimerkiksi vanhemmissa rakennuksissa voi olla käytössä ulkolämpötilasta riippuva ilmavirtasäätö, eli niin sanottu ”pakkaspuolitus”, jolloin ilmanvaihtokoneen käyntinopeutta on pudotettu esimerkiksi puoleen, kun ulkoilman lämpötila laskee tietyn asetusarvon alle. On myös mahdollista, että rakennuksen käyttöajan ulkopuolinen ilmanvaihto on toteutettu rakennuksen kannalta epäedullisella tavalla, esimerkiksi pelkillä erillispoistoilla ilman, että korvausilman saannista on huolehdittu. Nämä edellä mainitut säätötavat voivat aiheuttaa epätasapainoa rakennuksen painesuhteisiin.

Rakennusautomaatiojärjestelmässä voi olla muitakin ohjelmointivirheitä tai vääriä asetusarvoja, jolloin järjestelmä ei toimi oikein. Rakennusautomaation toimintaan vaikuttaa oleellisesti kentällä sijaitsevien erilaisten antureiden kunto. Viallinen anturi aiheuttaa häiriöitä järjestelmän toimintaan. Anturien tekninen käyttöikä on yleisesti ottaen lyhyempi kuin esimerkiksi ilmanvaihtokoneen, joten vaikka ilmanvaihtojärjestelmän muut komponentit olisivat muuten hyvässä kunnossa, voi anturi olla jo elinkaarensa päässä. Tämän vuoksi antureiden kunto on myös hyvä selvittää.

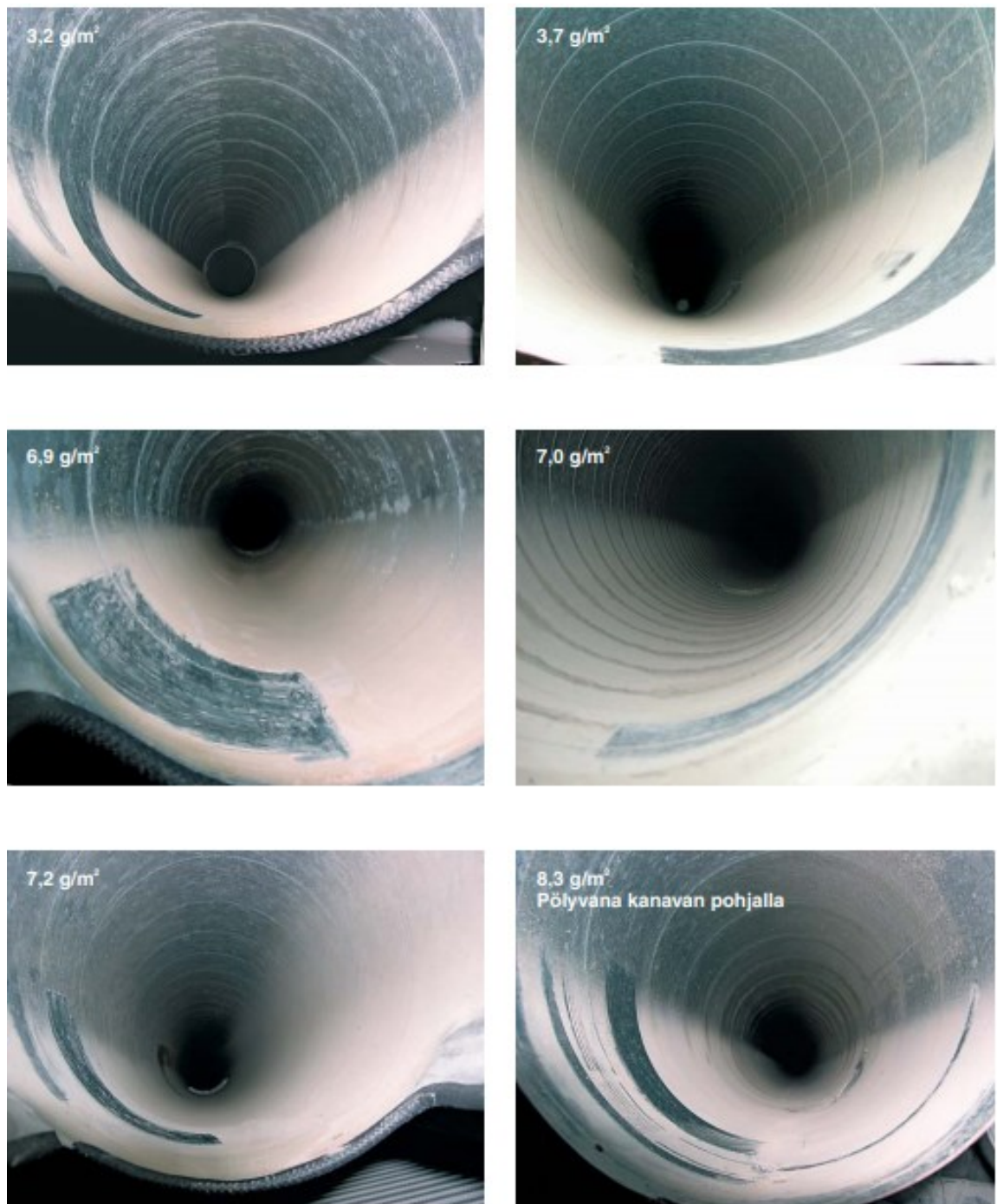
Rakennuksen tai sen tilojen käyttötarkoitus on saattanut myös muuttua ajan kuluessa. Ilmanvaihtojärjestelmän toiminnan tarkastelussa tämä on huomioitava tarkastamalla, vastaavatko ilmanjakotapa ja ilmavirrat nykyistä käyttötarkoitusta. Erilaiset tilamuutokset, joiden yhteydessä käyttäjämäärät ja tilajaon periaate ovat muuttuneet merkittävästi ilman, että ilmanvaihtoa on huomioitu kokonaisuutena voi johtaa epäviihtyisiin olosuhteisiin. Vaikka tarvittava ilmavirtojen kasvattaminen olisi huomioitu tapauksessa, jossa käyttäjämäärät kasvavat, on syytä myös kiinnittää huomiota siihen, että kasvaneilla ilmavirroilla eivät olemassa olevat ilmanjakolaitteet toimi välttämättä optimaalisesti. Tämä voi näkyä esimerkiksi ilmavirtauksien keskinopeuksien kasvamisella oleskeluvyöhykkeellä, mikä voi lisätä käyttäjien kokemaa vedontunnetta ja tämän myötä myös koettua epäviihtyisyyttä. [6, s.82–83.]

4.1.2 Ilmanvaihtojärjestelmän puhtauden ja tiiviyn tarkastus

Kanavien puhtaus

Ilmanvaihtokanavien puhtaustarkastus tehdään ensisijaisesti silmämääräisellä tarkastelulla ja sormipyyhkäisyllä. Sormipyyhkäisyllä tarkoitetaan kanavan pintaan tehtävää vanaa, jonka tarkoituksena on helpottaa arvioimaan lian tai pölyn kiinnittymistä, pinttyneisyyttä, tiheyttä ja pölykerroksen paksuutta kanavan pinnalla. Sormipyyhkäisyllä saadaan myös puhdistettua kanavan pinta, mikä helpottaa vertailua likaisen- ja puhtaan pinnan välillä. Apuna puhtaustarkastuksessa voidaan käyttää myös videokuvauslaitteita, jos kanavistoa ei pystytä muuten tarkastamaan. Kanavien pinnoilla oleva pölykertymä voidaan myös mitata, jos silmämääräisellä tarkastelulla ei pystytä arvioimaan järjestelmän puhdistustarvetta. Riippumatta ilmanvaihtojärjestelmän koosta tulee kanaviston puhtautta arvioida vähintään viidestä tarkastuspisteestä. Tarkastukset tulisi ensisijaisesti tehdä vaakatasossa olevista runkokanavista mahdollisimman pitkien suorien kanavaosuuksien kohdalta. Ilmanvaihdon puhtauden tutkiminen on ohjeistettu ohjekortissa LVI 39-10409. *Ilmanvaihtojärjestelmän puhtauden tarkastus. Ilmanvaihdon parannus- ja korjausratkaisut (Rakennustietosäätiö RTS ja LVI-Keskusliitto ry, 2007).*

Ilmanvaihtokanaviston silmämääräisen puhtaustason arvioinnissa voidaan käyttää apuna visuaalisia puhtausasteikkoja. Puhtausasteikkojen avulla voidaan arvioida pöly- tai likakertymän määrää pyöreissä kierresaumakanavissa tai tasopinnoilla. Visuaalisen puhtausasteikon raja-arvot perustuvat käytössä oleviin puhtausluokkiin P1- ja P2. P1-puhtausluokassa likakertymän tulee olla alle $2,0 \text{ g/m}^2$ ja P2-puhtausluokassa alle $5,0 \text{ g/m}^2$. Visuaaliset puhtausasteikot on laadittu ilmanvaihtokanavien sisäpinnoilta otettujen pölynäytteiden ja näytteenottokohdista otettujen valokuvien perusteella. [6, s. 84]. Kuvasta 6 on nähtävissä visuaalinen puhtauden arviointiasteikko kierresaumakanavalle, kun pölykertymä on yli $3,0 \text{ g/m}^2$



Kuva 6. Visuaalinen puhtauden arviointiasteikko kierresaumakanaville, kun pölykertymä on yli 3,0 g/m². Kuva: Rakennustietosäätiö RTS ja LVI-keskusliitto ry.

Ilmanvaihtojärjestelmän osat ja laitteistot

Ilmanvaihtokanaviston puhtauden arvioinnin lisäksi tulee tarkistaa silmämääräisesti ilmanvaihtojärjestelmään kuuluvien osien ja laitteistojen puhtaus. Erityistä huomiota tulee kiinnittää ulkoilmasäleikköjen ja -kammioiden, suodattimien, lämmönsiirtimien, puhaltimien, kondenssivesialtaiden ja kostutuslaitteiden puhtauteen ja viemäroinnin toimintaan sekä äänenvaimentimien ja muiden mahdollisten kuitulähteiden pintojen kuntoon.

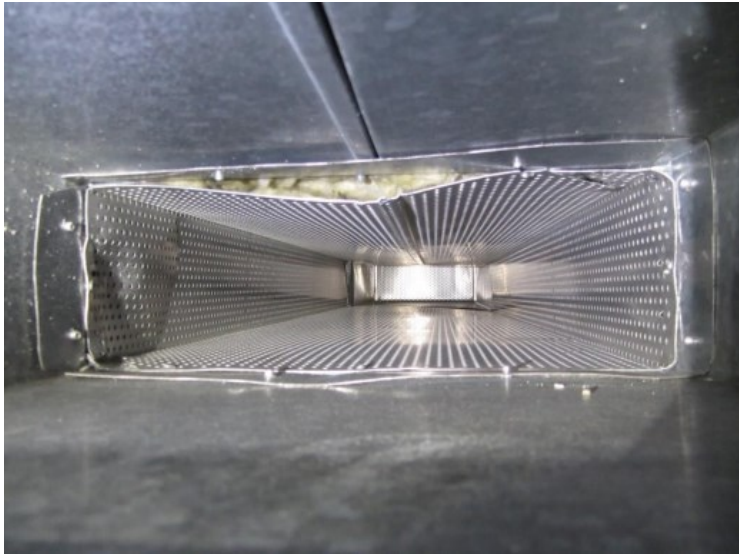
Suodattimen kuntoa voidaan arvioida joko silmämääräisellä arvioinnilla tai suodattimen yli olevan paine-eromittauksen perusteella. Rakennusautomaatiojärjestelmällä on tyypillistä seurata suodattimen yli vaikuttavaa paine-eroa. Kun paine-ero kasvaa tietyn asettun rajan yli, tästä seuraa hälytys. Kasvanut paine-ero kertoo, että suodatin on likaantunut tai suodattimen paine-ero on ylittänyt asetusarvon, jolloin suodatin on viimeistään vaihdettava. Silmämääräisellä arvioinnilla voidaan kuitenkin varmistua siitä, että suodatin on ehjä ja tiiviisti kiinni kehyksissään, eikä ohivirtauksia pääse tapahtumaan. Suodattimen kuntoa arvioidessa on hyvä varmistaa myös onko suodatustaso ilmanvaihtokoneen palvelualueen käyttötarkoituksen mukainen.

Mikäli rakennuksessa on lämmitykseen tai jäähdytykseen käytettäviä puhallinkonvektoreita, on näidenkin suodattimien puhtaus syytä tarkistaa. Puhallinkonvektorin toiminta lämmitys- tai jäähdytyslaitteena perustuu ilman kierrättämiseen laitteen läpi, jossa se lämmitetään tai jäähdytetään ja puhalletaan takaisin huonetilaan. Puhallinkonvektori voi näin tehostaa epäpuhtauksien levittämistä, mikäli suodattimien säännöllisestä puhdistuksesta tai vaihdosta ei ole huolehdittu.

Mahdollisten teollisten mineraalikuitulähteiden varalta on syytä tarkistaa ilmanvaihtojärjestelmän äänenvaimennus- ja päätelaitteet. Mineraalivillapohjaisia äänieristysmateriaaleja käytettiin erityisesti 1990-luvulla päätelaitteiden tasauslaatikoiden äänenvaimennuksessa. Ilmanvaihtojärjestelmissä voi esiintyä mineraalivillaisia eristemateriaaleja myös ilmanvaihtokoneen ulkoilmakammioissa, jolloin on syytä kiinnittää huomiota kammion pellityksen tiiviyyteen. Mahdollisten kuitulähteiden kartoituksessa helpottaa, jos pystytään todentamaan, että rakennuksessa käytetyt ilmanvaihtotuotteet ovat puhtausluokkaa M1.

M1-puhtausluokituksen saaneet ilmanvaihtotuotteet eivät saa lisätä terveyden tai viihtyvyyden kannalta haitallisia epäpuhtauksia tuloilmaan.

Mikäli on syytä epäillä, että ilmanvaihtojärjestelmästä vapautuu kuituja tuloilmaan, voidaan tämä todentaa kuitumittauksilla. [14.] Kuvassa 7 on esitetty vaurioitunut kanavaäänenvaimennin, jonka vaimennusmateriaalina on mineraalivilla ja pinnoitteena reikälevy. Reikälevypinnoite on vaurioitunut mikä mahdollistaa kuitujen vapautumisen tuloilmaan.



Kuva 7. Vaurioitunut kanavaäänenvaimennin. Kuva: SuLVI ry.

Yhdistetystä tulo- ja poistoilmanvaihtokoneesta tulee tarkastaa koneen rakenneosien välisten tiivisteiden kunto, etteivät tulo- ja poistoilmavirrat pääse sekoittumaan keskenään. Mikäli ilmanvaihtokoneessa on pyörivä lämmöntalteenotto (LTO) -laite, on syytä tarkastaa lämmöntalteenottokiekon tiivisteiden kunto ja tiiviys (kuva 8). Vuodot tiivisteessä voivat aiheuttaa poistoilman kulkeutumista tuloilman sekaan varsinkin, jos poistoilmapuoli on ylipainainen tuloilmapuoleen nähden.



Kuva 8. Pyörivän LTO-kiekon harjatiivisteiden tarkistus. Tiivisteissä havaittavissa merkittävä vuotorako. Kuva: SuLVI ry.

Ilmanvaihtojärjestelmässä kosteudelle alttiimpia osia ovat ulkoilmakammio, mahdollinen kostutuskammio, jäähdytyspatteri ja lämmöntalteenottolaite. Näistä tulee tarkastaa, esiintyykö näiden komponenttien yhteydessä kosteusesiintymiä ja mahdollista mikrobikasvustoa. Erityistä huomioita tulee kiinnittää näiden komponenttien viemäröinnin toimintaan. [6, s. 84–85.]

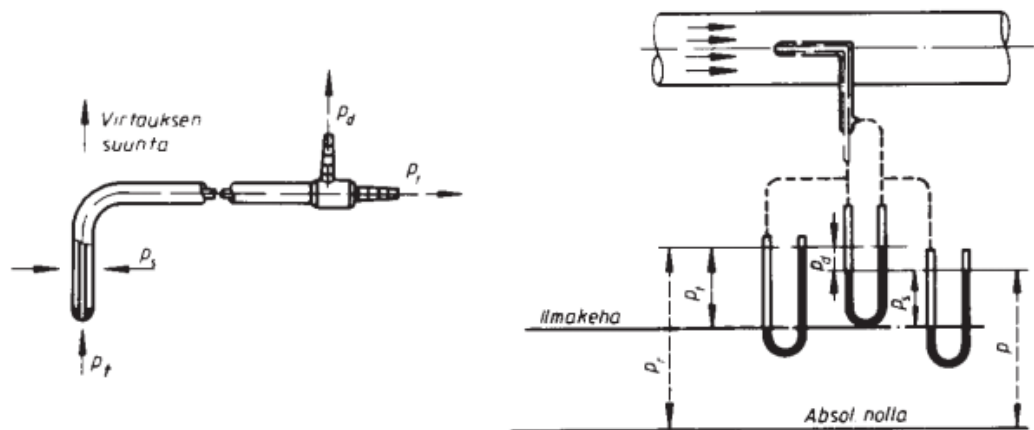
Ilmanvaihtojärjestelmän tiiviys

Ilmanvaihtojärjestelmän tiiviyttä on aiheellista tarkastella, mikäli on syytä epäillä, että järjestelmässä on vuotoja. Merkittävät vuodot ilmanvaihtojärjestelmässä voivat aiheuttaa vajausta ilmavirroissa järjestelmän palvelualueella, meluhaittoja sekä vaikuttaa rakennuksen painesuhteisiin, ja tämän myötä edesauttaa epäpuhtauksien leviämistä rakennuksessa. Ilmanvaihtojärjestelmän tiiviyttä voidaan tutkia paine- ja merkkiainekokeilla. [15, s. 92.]

4.2 Ilmavirtamittaukset

Ilmavirtamittauksilla voidaan selvittää, joko kokonaisen ilmanvaihtojärjestelmän, yksittäisen tilan, tai päätelaitteen ilmavirran suuruus. Ilmavirran mittaus voidaan tehdä joko kanavasta, päätelaitteesta tai kiinteästä mittalaitteesta, joka voi olla esimerkiksi mittayhteillä varustettu kertasäätöpelti.

Suoraan ilmanvaihtokanavasta tehtävä ilmavirtamittaus tehdään yleensä painemittarilla ja Pitot-putkella tai kuumalanka-anemometrillä. Ilmavirran mittaus Pitot-putkella perustuu kanavan dynaamisen paineen mittaukseen. Dynaaminen paine mitataan Pitot-putken päässä olevaan mittausaukkoon kohdistuvan kokonaispaineen ja putken sivulta mitatun staattisen paineen välisenä paine-erona (kuva 9).



Kuva 9. Pitot-putken periaate ja Pitot-putki ylipaineisessa kanavassa. Kuva: Suomen Standardoimisliitto, SFS ry.

Mitatun dynaamisen paineen perusteella voidaan laskea virtausnopeus kanavassa kaavan 1 mukaisesti.

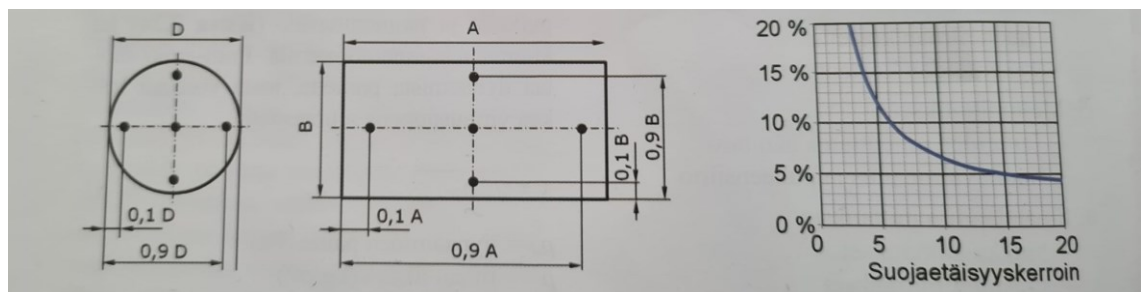
$$v = \sqrt{2 p_d / \rho} \quad (1)$$

v on virtausnopeus, m/s

p_d on dynaaminen paine, Pa

ρ on ilman tiheys, kg/m³

Koska virtausnopeus kanavassa ei ole vakio, on keskinopeuden määrittämiseksi tehtävä useita mittauksia. Tyypillisesti käytetään niin sanottua 5-pistemenetelmää, jolloin kanavassa olevien mittauspisteiden tulee olla kuvan 10 mukaiset. Tällöin mittauksien keskiarvona saadaan oikea keskinopeus häiriöttömässä kanavavirtauksessa. Kanavistossa olevat mutkat, haarat, ja muut kanavalaitteet kuitenkin aiheuttavat häiriöitä virtaukseen. Tämän vuoksi mittauspisteiden tulisi sijaita riittävän pitkällä suoralla kanavaosuudella, jotta häiriölähteen aiheuttama mittausepävarmuus minimoituu. Tarvittavaa suojaetäisyyttä ja sen vaikutusta mittauksen tarkkuuteen voidaan arvioida kuvan 10 mukaisesti, jossa suojaetäisyyskerroin ilmoittaa häiriölähteen etäisyyden mittauspisteeseen kanavan halkaisijan monikertoina



Kuva 10. Mittauspisteiden sijainti 5-pistemenetelmässä ja mittauksen tarkkuus suojaetäisyyden funktiona [9].

Kuvassa 10 esitetystä kuvaajasta nähdään, että esimerkiksi kun kanavaan, jonka halkaisija on 0,2 m, tehdään mittaus metrin päästä kanavistossa olevasta mutkasta on tällöin häiriölähteen aiheuttama mittausepävarmuus noin 12 %. Suojaetäisyydet on syytä huomioida myös tehdessä mittauksia kiinteästä mitta- tai päätelaitteesta. Laittevalmistajat ilmoittavat tuotteilleen tarvittavat suojaetäisyydet luotettavan mittaustuloksen varmistamiseksi. [9, s. 69–70].

Tilavuusvirta kanavassa voidaan laskea kertomalla mitattu keskimääräinen virtausnopeus kanavan poikkipinta-alalla kaavan 2 mukaisesti.

$$q_v = Av \quad (2)$$

q_v on tilavuusvirta, m³/s

A on kanavan poikkipinta-ala, m²

v on virtausnopeus, m/s

Sosiaali- ja terveysministeriön laatiman Asumisterveysohjeen soveltamisoppaassa on maininta, että kanavasta tehtävässä ilmapirran mittauksessa tulisi käyttää kuumalankaanemometriä Pitot-putken sijaan, jos virtausnopeus kanavassa on alle 3 m/s [16, s. 62]. Tämä ohjeistus perustuu todennäköisesti pienen mittauspaine-eron aiheuttamaan mittausepävarmuuteen. Mitä pienempi virtausnopeus kanavassa on, sitä pienempi on myös dynaaminen paine kanavassa.

Nykyisin kuitenkin ilmanvaihtojärjestelmät pyritään suunnittelemaan niin sanotusti tarpeenmukaisesti ohjatuksi. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että puhaltimet moottoreineen eivät käy koko ajan vakioteholla vaan niiden pyörimisnopeutta ohjataan epäpuhtaus- tai lämpökuormituksen mukaan. Kanavakoot valitaan niin, että virtausnopeudet kanavistossa pysyvät alhaisina. Tämä perustuu energiatehokkuuteen ja ilmanvaihtojärjestelmän äänitekniikkaan. Matalilla kanavanopeuksilla virtauksen aiheuttama kitkapainehäviö on pyritty minimoimaan, mikä vaikuttaa suoranaisesti ilmanvaihtokoneen puhaltimelta vaadittuun paineentuottoon, ja tämän myötä energiatehokkuuteen ja melutasoon

[17]. Pienillä kanavanopeuksilla Pitot-putkella suoritettujen ilmapvirtamittauksien tuloksien tarkastelu vaatii hieman kriittisyyttä ja ymmärrystä mittausepävarmuuden vaikutuksesta mittaustulokseen.

Syy miksi pieni mittauspaine-ero aiheuttaa epävarmuutta voidaan perustella ainakin tavanomaisten ilmapvirtamittauksissa käytettävien mittalaitteiden mittaustarkkuudella. Mittalaitteen valmistajan ilmoittama mittaustarkkuus on yleensä luokkaa ± 1 pascalia mittarin näyttämästä lukemasta. Mittalaitteen aiheuttama epävarmuus mittaustulokseen on laskettavissa kaavan 3 mukaisesti.

$$m = \left(\frac{\Delta p_{m+x}}{\Delta p_m} - 1 \right) \times 100 \quad (3)$$

m on mittalaitteen epävarmuus, %

Δp_m on mitattu paine-ero, Pa

x on mittalaittevalmistajan laitteelleen ilmoittama epätarkkuus, %

Esimerkiksi, jos mitataan kahden pascalin paine-ero mittalaitteella, jonka tarkkuudeksi on ilmoitettu ± 1 pascalia, on tällöin mittalaitteen aiheuttama epävarmuus 50 %.

Mittalaitteen epävarmuus on yksi useasta tekijästä, jotka vaikuttavat mittauksen kokonaisepävarmuuteen. Kaikissa mittauksissa esiintyy epävarmuutta, joka aiheutuu mittausjärjestelyistä ja mittausmenetelmästä. Mittauksen luotettavuuden arvioinnin perustaksi epävarmuuksien aiheuttamaa vaikutusta mittaustulokseen on syytä tarkastella, jotta lopputuloksena saadaan mittaustulos virherajoineen. Mittauksiin liittyvää epävarmuutta ja sen laskentaa on käsitelty laajemmin standardissa *SFS-EN 12599* (Suomen Standardoimisliitto, SFS ry, 2013).

Useimpien pääte- ja säätölaitteiden ilmapvirta voidaan myös mitata paine-eroon perustuvalla mittausmenetelmällä. Paine-eroon perustuvan mittaamisen mukaan ilmapvirta lasketaan kaavan 5 mukaisesti.

$$q_v = k\sqrt{\Delta p_m} \quad (5)$$

q_v on tilavuusvirta, dm³/s

k on pääte- tai säätölaitevalmistajan määrittelemä kerroin (k -arvo)

Δp_m on pääte- tai säätölaitevalmistajan ohjeen mukaan mitattu paine-ero, Pa

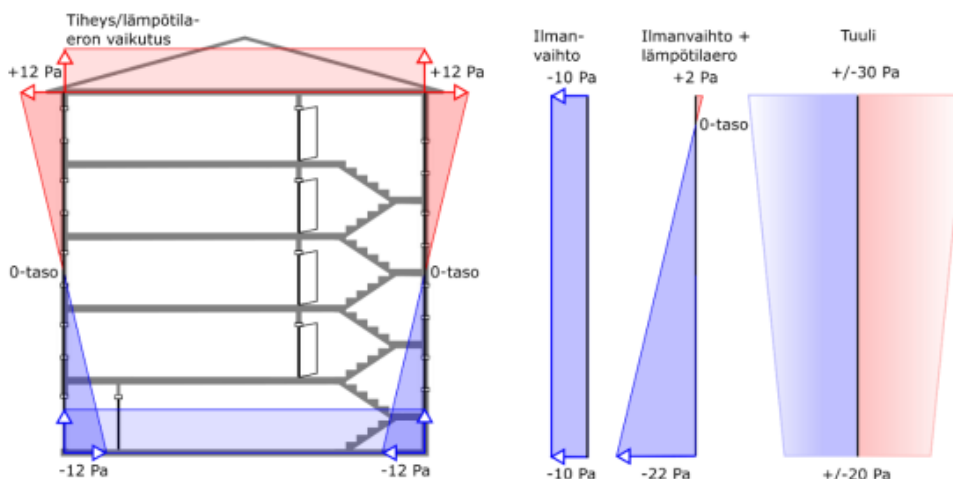
Joissakin tapauksissa ilmavirtamittausta ei ole mahdollista tehdä pääte- tai säätölaitteesta tai suoraan kanavasta paine-eroon perustuvalla mittauksella. Tällainen tilanne voi olla, jos päätelaitteelle, joka voi olla esimerkiksi säleikkömallinen poistoilmalaite, ei löydy säätöohjetta, tai laitetta ei ylipäättänsä tunnisteta. Tällöin on mahdollista ilmavirta mitata esimerkiksi huppumittarilla, kuimalanka-anemometrillä tai siipyöräänemometrillä. Ilmavirran paikallisen nopeuden ja kanavan pinta-alan mittaamiseen perustuvat menetelmät ovat kuitenkin yleensä huomattavasti epäluotettavampia kuin paine-eroon perustuva mitaus [16, s. 62].

Ilmavirtamittauksessa on syytä myös huomioida ilmanvaihtojärjestelmän tyyppi, eli onko kyseessä vakio- vai muuttuvailmavirtainen järjestelmä. Muuttuvailmavirtaisessa järjestelmässä on syytä tarkistaa puhaltimien ja säätölaiteiden, kuten ilmavirtasäätimien käyntitilatiieto ennen mittauksia. Muuttuvailmavirtaisessa järjestelmässä mittaukset on syytä toteuttaa minimi, normaali, ja tehostustilanteen ilmanvaihdolla. Näin selviää toimiiko järjestelmä suunnitellusti kaikissa käyttötilanteissa. [16, s. 61.] Ilmavirtamittausmenetelmiä ja ohjeita on kuvattu tarkemmin standardissa *SFS-EN 12599*.

4.3 Rakennuksen painesuhteiden mittaaminen

Rakennuksen painesuhteilla tarkoitetaan rakennuksen sisä- ja ulkoilman tai rakennuksen eri osien välisiä ilmanpaine-eroja. Ilma pyrkii virtaamaan painesuhteiden vuoksi korkeammasta paineesta alhaisempaan. Rakennuksen tai rakennusosan ollessa alipaineinen ilmavirta on sisälle päin ja vastaavasti rakennuksen ollessa ylipaineinen on ilmavirta ulospäin. Rakennuksen tai tilan ollessa alipaineinen ympäristöönsä nähden on mahdollista, että alipaineiseen tilaan kulkeutuu korvausilman mukana epäpuhtauksia rakenteista, tai muista ympäröivistä tiloista. Vastaavasti rakennuksen tai tilan ollessa ylipaineinen ympäristöönsä nähden voi rakennuksen käytöstä aiheutuva kosteus kulkeutua ja tiivistyä rakenteisiin muodostaen mahdollisen kosteusvaurion riskin. Sisäilmasta peräisin oleva kosteus voi tiivistyä rakenteeseen erityisesti silloin, kun sisäilman kosteuslisän määrä ja sisä- ja ulkoilman lämpötilaero ovat suuret ja rakenteet kylmiä. Rakenteeseen tiivistyy kosteutta, jos vesihöyryn osapaine on yhtä suuri kuin kylmäisen ilman vesihöyryn osapaine.

Rakennukseen muodostuviin painesuhteisiin vaikuttavat ulko- ja sisäilman välisestä tiheyseroista syntyvä savupiippuvaikutus, tuuli sekä rakennukseen johdettavan tulo- ja poistoilmavirtojen suuruus eli ilmanvaihto (kuva 11). Ilmanvaihtojärjestelmän vaikutus painesuhteisiin on sitä suurempi, mitä tiiviimpi rakennusvaippa on. [6, s. 82.]



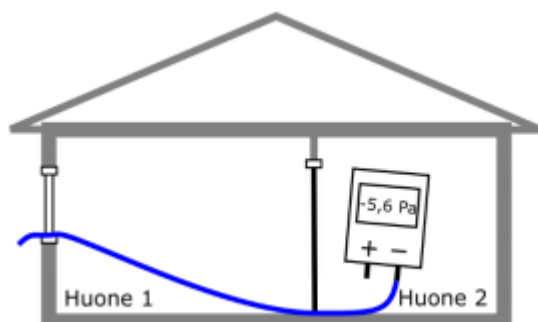
Kuva 11. Termisen paine-eron, ilmanvaihdon, tuulen ja lämpötila/tiheyseron yhteisvaikutus, teoreettinen malli [19].

Paine-eromittauksilla selvitetään rakennuksen sisäisiä painesuhteita eri tilojen/rakenteiden välillä, tai rakennuksen sisä- ja ulkoilman välistä paine-eroa. Paine-eroa mitataan tyypillisesti sähköisellä painemittarilla tai nestemanometrillä. Käytettävien mittalaitteiden tulee olla riittävän tarkkoja, koska rakennuksen sisäiset ilmanpaine-erot ovat yleensä pieniä, luokkaa 0–50 pascalia. Rakennuksen sisäisiä painesuhteita ja näistä aiheutuvia ilmavirtauksia voidaan tutkia myös merkkisavujen ja jälkiainemittauksien avulla. [18.]

Paine-eromittaus voidaan toteuttaa hetkellisenä tai jatkuvana pitkäaikaisena seurantamittauksena. Painesuhteiden pysyvyyttä pidemmällä aikavälillä voidaan seurata tallentavilla sähköisillä paine-eromittareilla. Hetkellinen mittaus soveltuu lähtökohtaisesti rakennuksen sisäisten paine-erojen mittaamiseen, kun tuulen vaikutus on huomattavasti vähäisempi, kuin sisä- ja ulkoilman välisessä mittauksessa. Mikäli mittaustuloksessa havaitaan merkittävää vaihtelua, on luotettavampi tapa painesuhteiden mittaukseen pidempiaikainen seurantamittaus 1–2 viikon mittausjaksona, jolloin mittausdataa saadaan kaikkina vuorokauden aikoina. Näin voidaan seurata esimerkiksi miten painesuhteet muuttuvat, jos esimerkiksi ilmanvaihtojärjestelmää käytetään osateholla rakennuksen käyttöajan ulkopuolella. [19, s. 23.]

Mittauksen suoritus

Mitattaessa paine-eroa sähköisellä painemittarilla varustetaan painemittari painemittaukseen soveltuvalla mittausletkulla, joka liitetään mittarin miinus- tai referenssiliittimeen. Ylipaineen mittaukseen tarkoitettu plusmerkkinen liitin jätetään tyhjäksi. Mittalaitteen miinuspuolelle liitetty letku johdetaan tämän jälkeen joko ulkoilmaan, jos halutaan mitata paine-eroa ulkoilmaan nähden, tai toiseen tilaan rakennuksen sisällä, jos halutaan mitata rakennuksen sisäisiä paine-eroja. Tällä järjestelyllä positiivinen mittaustulos ilmaisee tilan olevan ylipaineinen ja negatiivinen alipaineinen ulkoilmaan tai muuhun vertailtavaan tilaan nähden (kuva 12).



Kuva 12. Periaatekuva paine-eromittauksesta sähköisellä painemittarilla. Huone 2 on alipaineinen ulkoilmaan nähden [19, s. 25].

Sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron välistä mittausta ei ole suositeltavaa suorittaa kylmän (ulkolämpötila alle -15°C) tai tuulisen (keskinopeus yli 6 m/s , puuskat yli 10 m/s) sään vallitessa, ellei tarkoituksena ole selvittää ääriolojen vaikutusta painesuhteisiin. Mikäli tilassa, jossa mittaus suoritetaan, on tiiviitä väliseiniä- ja ovia, on tällöin huomioitava missä tilanteessa mittaus suoritetaan. Hyvänä käytäntönä voidaan pitää mittauksen suorittamista väliovien ollessa sekä auki, että kiinni, ellei tilan käyttäjiltä saada tietoa normaalista käyttötilanteesta, eli pidetäänkö väliovet normaalisti avoinna vai suljettuina. [19, s. 25.]

Ulko- ja sisäilman välisessä paine-eromittauksessa tulee huomioida myös termisen paine-eron vaikutus mittaustulokseen. Ulko- ja sisäilman välistä paine-ero tulisi mitata noin metrin korkeudella lattiatasosta, mikäli mittausletkun läpiviennin korkeusasema poikkeaa tästä tavoitearvosta, voi olla tarpeen korjata mittaustulos vastaamaan paine-eroa metrin korkeudella. [19, s. 27.] Korkeusaseman poikkeavuuden ja termisen paine-eron aiheuttamaa vaikutusta mittaustulokseen ja sen kompensointia on ohjeistettu Ympäristöministeriön julkaisemassa oppaassa *Rakennusten paine-erojen mittausohje* (2019).

5 Sisäilman kostutus- ja kuivaustarve

5.1 Yleistä

Kostutus ja kuivaus ovat ilmastoinnin prosesseja, joilla hallitaan tuloilman kosteutta ja lämpötilaa. Tarpeen tarkalle sisäilman kosteuden hallinnalle määrittää rakennuksen tai sen tilojen käyttötarkoitus. Tavanomaisissa tiloissa Pohjoismaissa ei ilmaa kostuteta nykyisin kuin erityisestä syystä. Teollisuudessa on paljon prosesseja, jotka vaativat toimia-akseen sopivat lämpö- ja kosteusolosuhteet. Elintarvikkeiden, juuresten ja vihannesten varastoinnissa sopivan suhteellisen kosteuden merkitys on suuri. Museoissa taideteosten takia ja tiloissa, joissa säilytetään soittimia, täytyy myös ylläpitää tiettyä suhteellista kosteutta. Esimerkiksi museoesineiden säilyvyyden kannalta ihanteellinen lämpötila on 18–20°C ja ilman suhteellinen kosteus noin 50 %RH. [9, s. 82; 1 s. 96.]

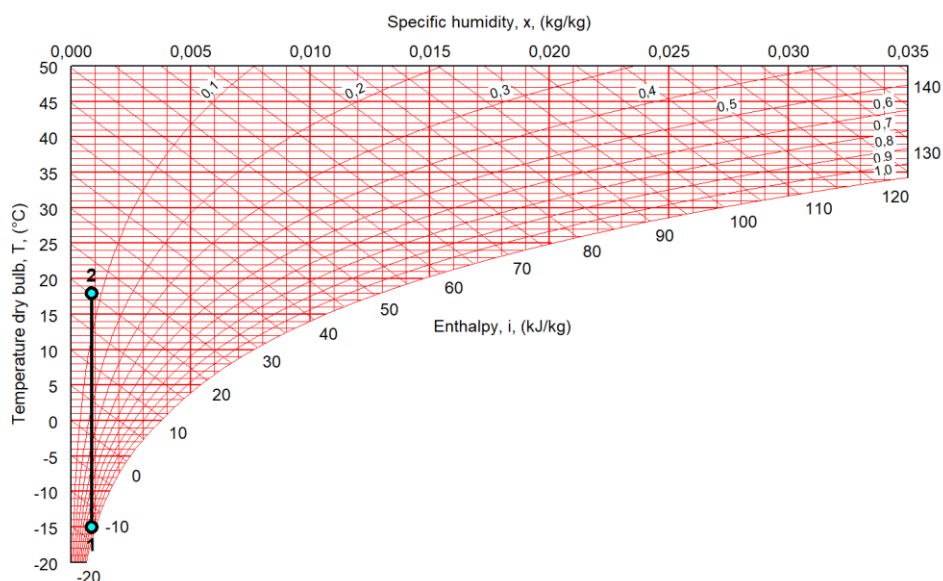
Kosteuden määrää ilmassa eli ilman kosteutta ilmaistaan lähinnä kahdella tavalla:

- 1) Suhteellinen kosteus [%RH] (*Relative humidity*), joka ilmoittaa ilman tilaa vastaavan vesihöyryn osapaineen suhteessa kylläisen ilman vesihöyryn osapaineeseen.
- 2) Absoluuttinen kosteus (*Absolute humidity*), joka ilmoittaa, paljonko vesihöyryn määrä on kuivaa ilmaa kiloa [$\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{k.i.}}$ tai $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{k.i.}}$] tai ilma kuutiota [$\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^3$ tai $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^3$] kohden.

Suomessa ulkoilman suhteellinen kosteus on suurimman osan vuodesta korkea, myös talvella. Kesällä vesihöyryn määrä ulkona on tyypillisesti suurempi kuin talvella, koska lämmin ilma voi sitoa suuremman määrän kosteutta. Ulkoilman vesihöyryn määrä vaihtelee talven keskimäärin noin 1 g:sta/kg kesän noin 10 g:aan/kg. Suhteellisen kosteuden kuukausikeskiarvo vaihtelee talven keskimäärin noin 90 %:sta kesän 65 %:iin. Lyhyellä aikavälillä ulkoilman suhteellisen kosteuden vaihtelu voi olla huomattavasti suurempaa. Liitteessä 2 on esitetty absoluuttisen ja suhteellisen kosteuden kuukausikeskiarvot eräiltä paikkakunnilta. [4, s. 48.]

Huolimatta korkeasta ulkoilman suhteellisesta kosteudesta talvella, voi tuloilman kostutustarve olla hyvinkin merkittävä, jos tavoitellaan esimerkiksi 50 %:in suhteellista kosteutta sisätiloissa.

Esimerkiksi jos -15°C :n lämpöinen ulkoilma, jonka suhteellinen kosteus on 85 % (piste 1 kuvassa 13), lämmitetään kosteutta lisäämättä lämpötilaan $+18^{\circ}\text{C}$ (piste 2 kuvassa 13), laskee sen suhteellinen kosteus noin 7 %:iin.



Kuva 13. Ilman lämmitys Mollier-piirroksessa, kun kosteutta ei lisätä.

Ilman varsinaista lisäkostutusta voidaan tuloilman kosteuteen kuitenkin vaikuttaa erilaisilla lämmöntalteenottoratkaisuilla tai käyttämällä poistoilmaa osittain palautusilmana, mikäli rakennuksen käyttötarkoitus sen sallii. Sisäilman kosteuspitoisuuteen vaikuttaa ulkoilman kosteuspitoisuuden lisäksi rakennuksessa ihmisten ja erilaisten toimintojen aiheuttama kosteus. Poistoilmasta kosteutta voidaan siirtää tuloilmaan pyörivällä regeneratiivisellä LTO-laitteella (LTO-kiekko). Regeneratiivisiä pyöriviä LTO-kiekoja ovat mm. kondensaatoroottori, sorptioroottori ja hygroskooppinen roottori. Kondensaatoroottori on tavanomainen ilmanvaihtokoneissa käytetty regeneratiivinen lämmönsiirrin. Kondensaatoroottorissa kosteuden siirtoa tapahtuu kuitenkin vain, kun lämmönsiirtimelle tuleva ulkoilma on tarpeeksi kylmää viilentääkseen lämmönsiirtopinnan alle poistoilmavir-

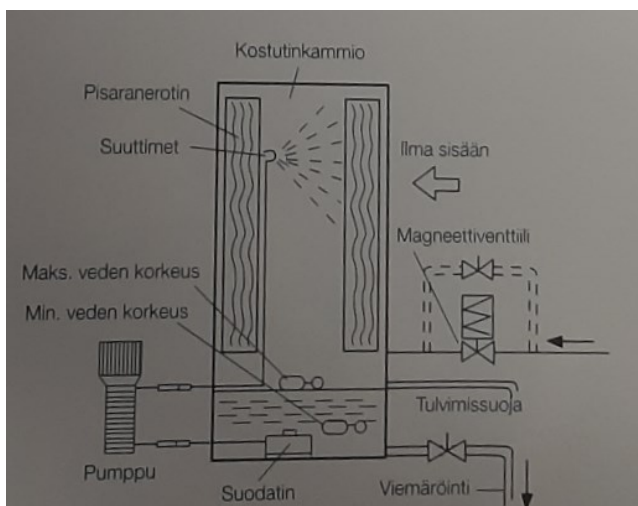
ran kastepisteen. Tällöin poistoilmasta tiivistyy kosteutta lämmönsiirtopinnalle, joka raikastilman lämmitessä sitoutuu vesihöyrynä tuloilmaan. Sorptioroottorilla ja hygroskooppi-sella roottorilla voidaan kosteutta siirtää adsorption avulla ilman, että lämmönsiirtimessä tapahtuu kondensaatiota. Lämmönsiirtimen kykyä siirtää kosteutta poistoilmasta tuloilmaan voidaan ilmaista lämmönsiirtimen kosteushyötysuhteen avulla. [21, s.133–135.]

5.2 Kostutustavat

Ilmavirran kostuttaminen voidaan toteuttaa lisäämällä siihen vesihöyryä (höyrykostutus), tai haihduttamalla ilmavirran sekaan vettä (haihdutuskostutus). Ilmankäsittelykoneissa käytetään kolmea kostutintyyppiä: sumutuskostutinta, kontaktikostutinta ja höyrykostutinta. Sumutus- ja kontaktikostutin ovat toimintaperiaatteeltaan haihdutuskostuttimia. [22, s. 130].

5.2.1 Sumutuskostutus

Sumutuskostuttimessa kostutus tapahtuu vesipisaroiden välityksellä. Sumutuskostuttimessa on kostutinkammiossa joukko suuttimia, jotka ruiskuttavat hienoja suihkuja ilmavirtaa vasten, päin veden erotuskennoa. Suuttimen paineen tulee olla riittävä, jotta vesi leviää pieninä pisaroina. Korkea paine suuttimille voidaan synnyttää voimakkaalla pumpulla tai sekoittamalla vettä ja paineilmaa. Kuvassa 14 on esitetty kiertovedellä toimivan sumutuskostuttimen rakenne, jossa kostutusveden paineistaminen on toteutettu pumpulla.



Kuva 14. Kiertovesikäyttöinen sumutuskostutin [22, s. 133].

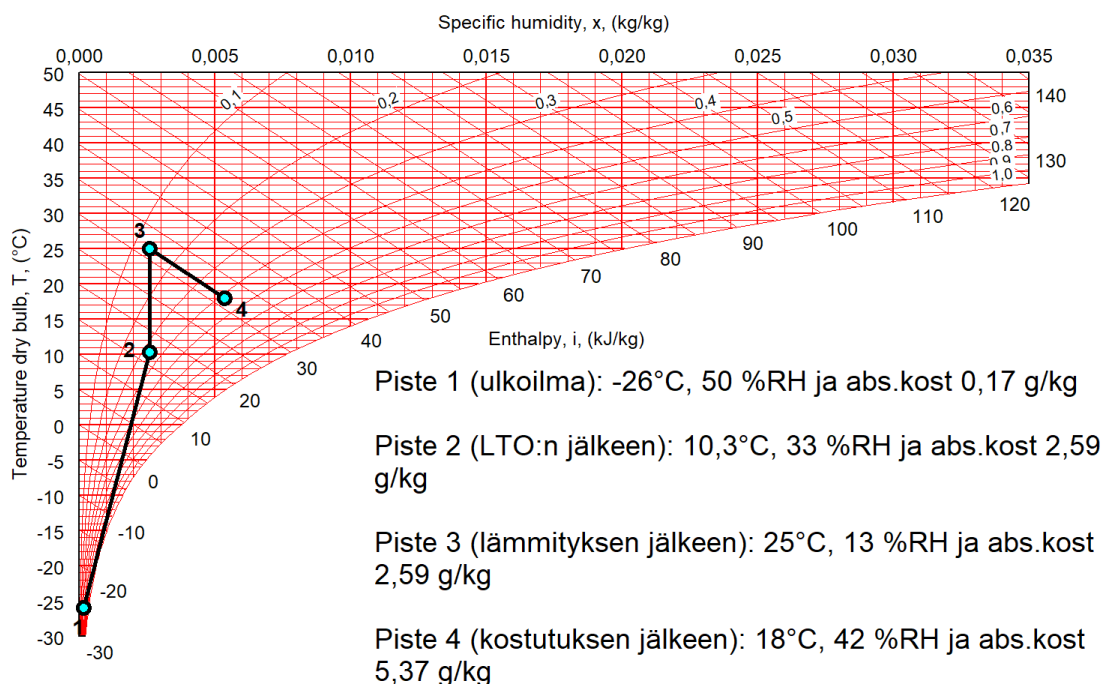
Käytettäessä sumutuskostuttimessa kiertovesiallasta on kostuttimen huoltoon kiinnitettävä erityistä huomiota, sillä vesiallas tarjoaa hyvän kasvualustan bakteereille, leville ja sienille, jotka voivat sumutuksen yhteydessä levitä tuloilmaan. Kiertovesialtaan veden vaihtuvuuteen täytyy myös kiinnittää huomiota, sillä veteen kertyy mineraaleja- ja suoloja ajan mukana. Veden vaihtuminen voidaan järjestää joko siten, että allas tyhjenetään sopivin välein ja täytetään puhtaalla vedellä, tai järjestämällä altaaseen jatkuva ylivuoto esimerkiksi kiertopumpun painepuolelle, jolloin ylijouksun kautta poistettu vesi korvataan uudella. Kun ilmastointikone on poissa päältä pidempiä ajanjaksoja tai kun kostutukselle ei ole tarvetta, on kostutusallas syytä tyhjentää vedestä, sillä paikallaan oleva vesi luo bakteereille otollisen kasvualustan. [22, s. 133.]

Hygieenisten syiden vuoksi kiertovesikäyttöisten sumutuskostuttimien käyttöä tulisi kuitenkin välttää [23, s. 141]. Sumutuskostutus voidaan kuitenkin toteuttaa hygieenisemmin, mikäli kostutusvetenä käytetään asianmukaisesti puhdistettua vettä ns. kertakäyttöisesti ilman kiertovesiallasta. Vettä on mahdollista käsitellä esimerkiksi veden pehmenyksellä, käänteisosmoosisuodatuksella, UV-säteilytyksellä tai hopeaionisoinnilla. Näillä toimenpiteillä estetään kalkin pääsy ilmanvaihtokanavistoon ja mikrobien syntyminen kostutusalueella. [22, s. 132; 23, s. 4.]

5.2.2 Kontaktikostutus

Kontaktikostuttimessa eli haihdutuskostuttimissa ilmavirta tuodaan kosketukseen märän pinnan kanssa, niin, että vesi höyrystyy märältä pinnalta ilmaan. Ilmankäsittelykoneissa kontaktikostutus toteutetaan kennokostuttimilla. Kostutuskennon tehtävä on muodostaa suuri kosketuspinta veden ja ilman välille. Kostutuskenno pidetään märkänä kastelemalla kennoa ylhäältäpäin suihkuputkien avulla. Tavallisesti vain pieni osa vedestä höyrystyy, ja pääosa valuu kennon alla olevaan kiertovesialtaaseen tai viemäriin. Kontaktikostutus voidaan toteuttaa niin ikään kiertovesijärjestelmänä tai kertakäyttöisesti suora-kastelujärjestelmänä, jossa höyrystymätön kostutusvesi johdetaan viemäriin. Kiertovesijärjestelmänä toteutettuun kennokostutukseen pätevät samat periaatteet hygienian suhteen kuin sumutuskostutuksessa. Kennokostutusta voidaan kuitenkin pitää sumutuskostutusta hygieenisempänä kostutustapana, sillä veden pintahaihtumisen ansiosta taudinaiheuttajien leviäminen ilmaan on vähäisempää kuin sumutuskostutuksessa. [22, s. 132.]

Haihdutuskostuttimissa tulee huomioida kostutuksessa tapahtuva ilman lämpötilan lasku, sillä energia veden höyrystymiseen otetaan kostutettavasta ilmasta. Kostutettava ilma pitää yleensä lämmittää ennen kostutusta, jotta ilmaan saadaan tarpeeksi kosteutta, sekä mahdollisesti vielä kostuttamisen jälkeenkin, jotta ilmalle saadaan aikaiseksi sopiva sisänpuhalluslämpötila. Kuvassa 15 on esitetty yhdistetty kosteutta siirtävän lämmöntalteenoton, adiabaattisen haihdutuskostutuksen ja lämmityksen prosessisuora Mollier-piirroksessa. Tässä esimerkissä esitetty prosessi perustuu tämän opinnäytetyön selvitystyönkohteen kostutusprosessiin lämmöntalteenottojärjestelmän mitoitusolosuhteissa.

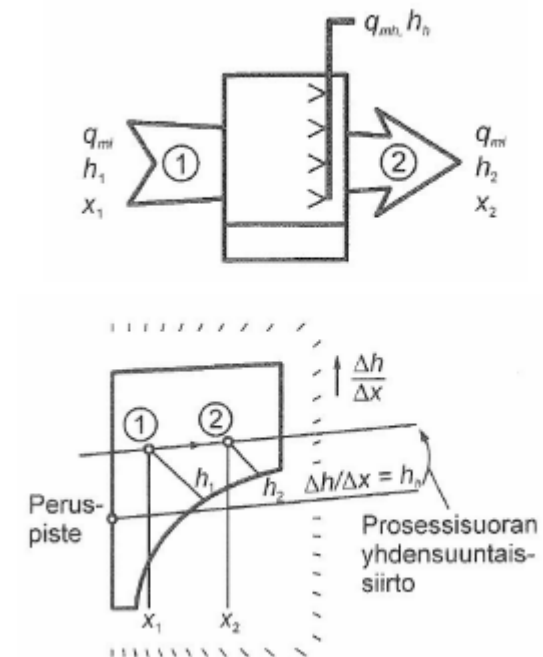


Kuva 15. Kosteutta siirtävä lämmöntalteenotto, lämmitys ja ilman haihdutuskostutus Mollier-piirroksessa.

Kuvasta nähdään, että kostutuksen aikana (pisteet 3–4) ilman lämpötila laskee 7°C , mikä tarkoittaa $2,5^{\circ}\text{C}$:n laskua jokaista ilmaan tuotua vesihöyrygrammaa kohden. Lämpötilan lasku on vakio, mikäli prosessi on adiabaattinen, eli lämpöeristetty ympäristöstään. Käytännössä prosessi ei kuitenkaan ole kokonaan eristetty ympäristöstä, sillä lisäveden ja lämpövuotojen vuoksi ilmaan siirtyy jonkin verran lämpöä. Todellisuudessa prosessisuora ei siis seuraa täsmälleen vakioentalpiasuoraa, kuten kuvassa on esitetty.

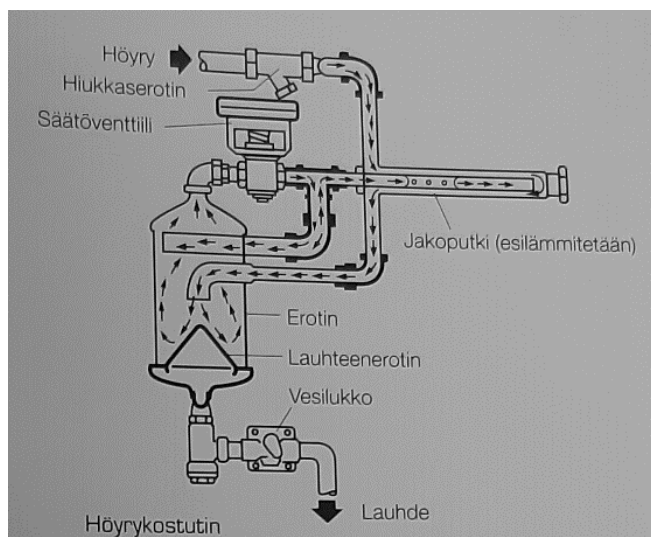
5.2.3 Höyrykostutus

Höyrykostutuksessa ilmaan sekoitetaan vesihöyryä. Kostutukseen käytettävä höyry voidaan tuottaa paikallisesti ilmastointiprosessin yhteydessä tai, jos höyryä saadaan jonkin muun prosessin yhteydessä, esimerkiksi sairaaloissa ja tehtaissa, on suoraan höyryn käyttö tällöin perusteltua. Käytettäessä kostutukseen höyryä siirtyy ilmaan samalla lämpöä ja vettä. Kostutuksessa käytetään yleensä matalapaineista höyryä, jolloin ilman lämpötila ei muutu merkittävästi kostutuksen aikana. Kuvassa 16 on esitetty höyrykostutuksen periaate ja prosessisuora Mollier-piirroksessa



Kuva 16. Höyrykostuttimen periaate ja prosessisuora [15, s. 194].

Kuvasta nähdään, että prosessisuora seuraa likimääräisesti vakiolämpötilasuoria, kun höyryn lämpötila on noin 100 °C. Lämpötilan muutos ilmassa on hyvin pieni, vaikka ilman lämpösisältö eli entalpia kasvaa kostutuksen aikana. Prosessisuoran kulmakertoimeen vaikuttaa käytettävän höyryn entalpia. Matalapaineisella höyryllä lämpötilan muutos kostutusprosessissa on edellisen kuvan mukainen tai lähellä sitä. [15, s. 194.] Seuraavassa kuvassa on esitetty tavanomaisen höyrykostuttimen rakenne (kuva 17).



Kuva 17. Rakennekuva hörykostuttimesta [22, s. 134].

Hörykostutuksessa on tärkeää huomioida, että ilma ei tule höyrystä ylikylläiseksi, niin että kanavistoon pääsee tiivistymään lauhdevettä. On myös tärkeää, että höyryn jakoputken jälkeen on riittävän pitkä suora etäisyys ilmankäsittelykoneen seuraavaan komponenttiin, muuten vettä voi päästä tiivistymään aiheuttaen mahdollisia hygieniaoongelmia. Mikäli kostutukseen käytettävä höyry tuotetaan hörykostuttimen yhteydessä, tulee käytettävän veden laatu huomioida ja tarvittaessa vesi on esikäsiteltävä. Mikäli vettä ei esikäsitellä, niin vettä keitetäessä vedessä olevat ainesosat saostuvat ja muodostavat niin sanottua kattilakiveä, joka lisää hörykostuttimen huolto- ja puhdistustarvetta [23, s. 6] Hörykostutus on kuitenkin kostutustavoista hygieenisin, sillä höyryn korkea lämpötila estää bakteerien, sienten ja levien kasvumahdollisuudet. Sairaaloissa ja puhdastiloissa käytetäänkin vain hörykostutusta. [22, s. 138.]

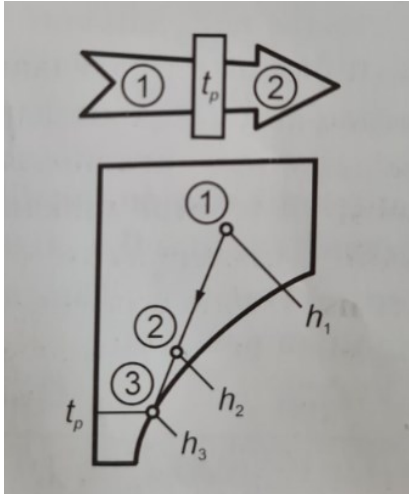
Vaikka hörykostutus onkin hygieenisempi kostutustapa kuin sumutus tai kennokostutus, voivat hörykostutuksen käyttökustannukset vaikuttaa kostutustavan valintaan, mikäli kostutettavien tilojen käyttötarkoitus sen sallii. Hörykostutuksen käyttökustannuksiin vaikuttaa oleellisesti se, tuotetaanko höyry kostuttimien yhteydessä vai saadaanko höyryä kiinteistössä tapahtuvista muista prosesseista sivutuotteena. Kostutusprosessin yhteydessä käytettävät höyrynkehittimet vaativat usein suuren sähkötehon, mikä tulee huomioida energiankulutuksen lisäksi sähköliittymän tehossa.

Tämän opinnäytetyön selvitystyönkohteena olevassa kiinteistössä oli vertailtu suunniteluvaiheessa höyry- ja sumutuskostutuksen elinkaarikustannuksia tapauksessa, jossa höyrykostutuksen höyry tuotettaisiin höyrynkehittimillä kostutuksen yhteydessä. Sumutuskostutuksen elinkaarikustannukset osoittautuivat laskennallisesti noin 22 % höyrykostutusta alhaisemmaksi.

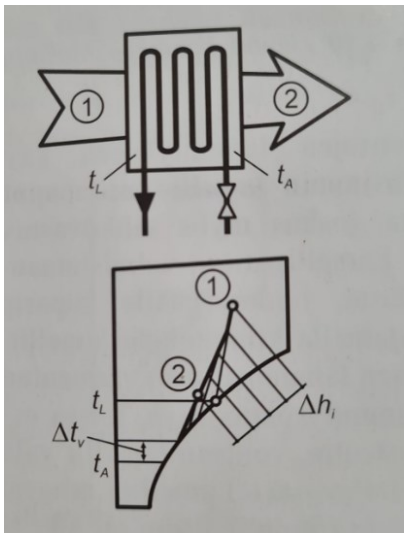
Merkittävimmän eron näiden kostutustapojen välisissä elinkaarikustannuksissa muodosti juurikin energiakustannukset. Huolimatta siitä, että energiaa kuluu kostutusprosesseissa itsessään yhtä paljon, kun huomioidaan myös sumutuskostutuksessa tarvittava ilman jälkilämmitykseen kuluva energia, muodostui ero elinkaarikustannuksissa höyryn tuottamiseen käytettävästä sähköenergian määrästä ja sen korkeammasta hinnasta kaukolämpöön verrattuna. Laskelmissa oli huomioitu investointikustannukset, käyttö- ja ylläpitokustannukset sekä energian ja veden hinta.

5.3 Ilman kuivaus jäähdytyspatterilla

Ilman kuivaus jäähdytyspatterilla perustuu kondensaatiokuivaamiseen. Jäähdytysprosesseissa, jossa tapahtuu kuivausta, eli ilmasta poistetaan kosteutta, kutsutaan märkää jäähdytykseksi. Märkääjäähdytyksessä ilmavirtaa jäähdyttävän pinnan lämpötilan on oltava alhaisempi kuin jäähdytettävän ilman kastepiste, jotta kuivausta tapahtuu. Jäähdytys voidaan toteuttaa suora- ja nestekiertoisella tai nestekiertoisen patterin avulla. Suora- ja nestekiertoisella toteutetussa jäähdytyksessä patterissa virtaa kylmää vettä. Välillisessä eli nestekiertoisessa jäähdytyksessä patterissa virtaa väliaine, esimerkiksi vesi, jota jäähdytetään esimerkiksi kaukokylmällä. Suora- ja nestekiertoisella toteutetussa jäähdytyksessä patterin pintalämpötila pysyy lähes vakiona, kun taas välillisessä jäähdytyksessä pintalämpötila muuttuu ilmavirran mukana. [15, s. 194–196] Kuvissa 18 ja 19 on esitetty märkääjäähdytyksen prosessisuorat Mollier-piirroksessa, kun patterin pintalämpötila pysyy vakiona tai muuttuu.

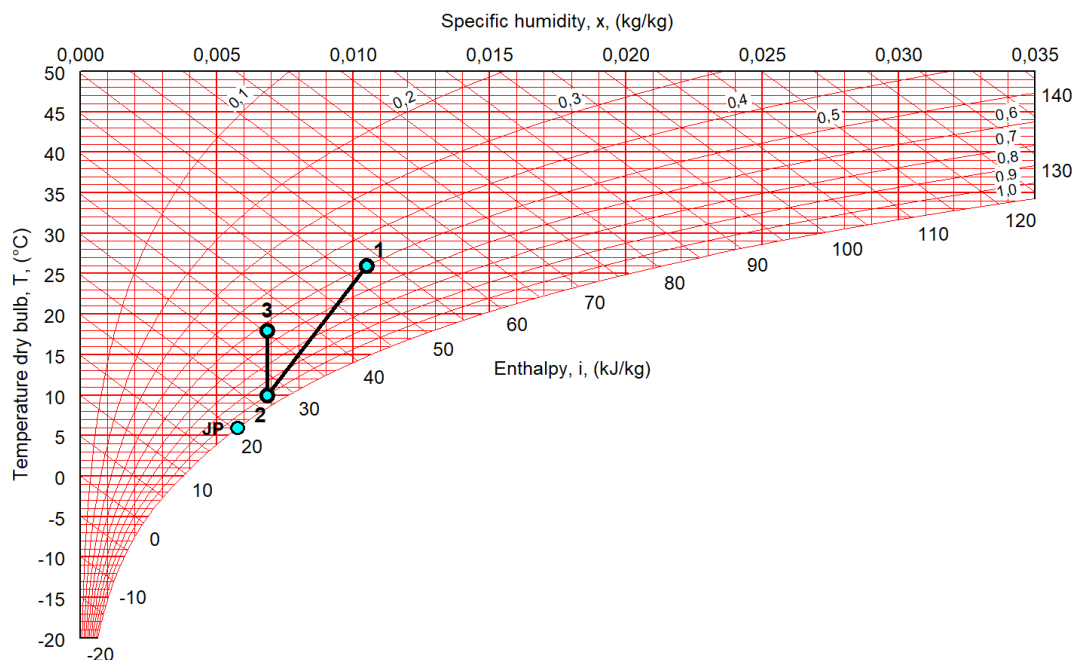


Kuva 18. Ilman jäähdytyskuivaus jäähdytyspatterissa, jonka pintalämpötila on vakio [15, s. 195].



Kuva 19. Ilman jäähdytyskuivaus jäähdytyspatterissa, jonka pintalämpötila ei ole vakio [15, s. 195].

Ilman kuivauksen tarve on suurinta kesäkuukausina ulkoilman lämpötilan sekä absoluuttisen kosteuden ollessa korkealla. Tällöin tuloilmavirtaa joudutaan samanaikaisesti jäähdyttää, kuivattamaan ja edelleen jäähdytyksen jälkeen lämmittämään, jotta tavoiteltu esimerkiksi 50 %:n suhteellinen kosteus ja tietyt lämpöolosuhteet saadaan tiloissa ylläpidettyä. Kuvassa 20 esitetty on tällaisen prosessin prosessisuora Mollier-piirroksessa, kun jäähdytyskuivaus toteutetaan suoraanhöyrysteisellä jäähdytyspatterilla, jonka pintalämpötilan oletetaan pysyvän vakiona.



Kuva 20. Yhdistetty ilman jäähdytyskuivaus ja lämmitys Mollier-piirroksessa.

Mollier-piirrokseen on merkattu tekstillä "JP", mikä kuvaa jäähdytyspatterin pintalämpötilaa. Prosessisuora kulkee tilapisteestä 1 kohti jäähdytyspatterin pintalämpötilaa. Ilman tila jäähdytyspatterin jälkeen (Tilapiste 2) ei koskaan ole sama kuin patterin pinnalla vallitseva tila. Tilapisteen 2 etäisyys prosessisuoralla jäähdytyspatterin pintalämpötilaa kuvaavasta tilapisteestä riippuu patterin ominaisuuksista ja sen lämmönsiirtopinta-alasta. [15, s. 195.]

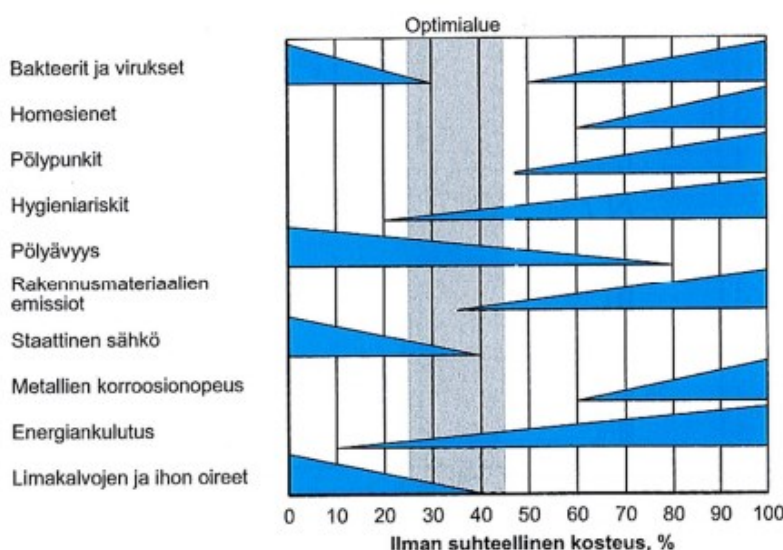
5.4 Ilman kosteuden vaikutus sisäilmastoon

Sisäilman kosteudella on vaikutus ihmiseen, vaikka varsinaista kosteutta tuntevaa aistia ei ihmisellä ole. Etenkin hyvin korkeat ja alhaiset suhteellisen kosteuden arvot ovat aistittavissa epämääräisinä tuntemuksina iholla, limakalvoilla ja hengityselimissä. Sisäilman alhainen suhteellinen kosteus edistää limakalvojen kuivumista ja sen mukanaan tuomaa ärsytysoireilua. Ilman suhteellisella kosteudella on myös välillisiä vaikutuksia. Alhainen huoneilman suhteellinen kosteus edistää ilman pölyisyyttä, kun taas korkea suhteellinen

kosteus vähentää huoneilman pölyisyyttä, sillä ilmassa leijuvat hiukkaset muodostavat tällöin suurempia partikkeleita, jotka laskeutuvat pinnoille.

Ilman korkealla suhteellisella kosteudella on myös haitallisia vaikutuksia. Yli 45 %:n suhteellinen kosteus edistää pölypunkkien, sienten ja muiden mikrobien elinmahdollisuuksia. Bakteereiden ja homesienien lisääntymisraja vaihtelee lajin mukaan, ja on yleensä 60–70 %. Homekasvusto voi kuitenkin levittää itiöitään huomattavasti tätä kuivemmassakin ilmassa. Ilman ja rakenteiden pitkäaikainen korkea kosteus aiheuttaa aina terveysriskejä. Vaikka kostean ilman on todettu olevan miellyttävää ja terveellisempää tulee sisäilman kostuttamiseen suhtautua varauksella huomioiden edellisessä kappaleissa esitetyt kostutukseen liittyvät riskitekijät. Mikäli ilmaa halutaan kostuttaa, voidaan hygieenisestä näkökulmasta turvallisimpana kostutustapana pitää höyrykostutinta, jossa käytetään puhdasta vettä. [4, s. 23–25.]

Kuvassa 21 on esitetty huoneilman suhteellisen kosteuden vaikutus erilaisten epäpuhtauksien ja oireiden esiintyvyyden kannalta.



Kuva 21. Huoneilman suhteellisen kosteuden vaikutus erilaisten epäpuhtauksien ja oireiden esiintyvyyteen. Viivan paksuus on verrannollinen tekijän suuruuteen [4, s. 24].

6 Auditorion olosuhdeselvitys

Auditorion olosuhdeselvityksen tavoitteena oli löytää erilaisten mittauksien ja tarkasteluiden kautta syitä auditoriossa heikoiksi koetuille sisäilmaolosuhteille. Tilan käyttäjiltä saatu palaute on pitänyt sisällään seuraavanlaisia havaintoja: epämiellyttävät hajut, ilman tunkkaisuus, väsymyksen tunne ja silmien kutina. [25.] Tässä luvussa esitellään tutkimuksen kannalta keskeiset lähtötiedot, tutkimuksen kohteena olevat talotekniset järjestelmät ja suoritettut selvitykset ja mittaukset analysointineen.

6.1 Lähtötiedot

Tutkimuksen lähtötietoina oli tilojen käyttäjiltä saadun palautteen lisäksi rakennuksen suunnitteluasiakirjat, ajantasaiset LVIA-piirustukset ja vuosina 2018 ja 2019 kiinteistössä toteutetun sisäilmatutkimuksen tutkimusmateriaali. Tämän sisäilmatutkimuksen tavoitteena oli ollut selvittää mahdollisia sisäilman mikrobien- ja yhdisteiden pitoisuuksia ja laskeutuneen pölyn koostumusta laboratorioanalyysien avulla. Tutkittavia tiloja oli kokonaisuudessaan noin kymmenen kappaletta auditorion ollessa yksi näistä. Tilat, joissa tutkimuksia suoritettiin, oli valikoitu kiinteistössä suoritettun käyttäjätyytyväisyyskyselyn tulosten perusteella. [25.]

Auditoriossa mitattiin teollisten mineraalikuitujen esiintymistä pinnoille laskeutuneesta pölystä. Mittaukset toteutettiin geeliteippinäytteinä ja tulokset analysoitiin laboratorioolosuhteissa. Mittaukset suoritettiin kolmessa eri mittausjaksossa (taulukko 3).

Taulukko 3. Auditorion laskeumanäytteiden tulokset 11/2018-04/2019.

Näytteotto-kohta	Laboratorio-tulokset 20.11.2018	Laboratorio-tulokset 13.2.2019	Laboratorio-tulokset 22.2.2019	Laboratorio-tulokset 27.2.2019	Laboratorio-tulokset 2.4.2019
	kuituja/cm ²	kuituja/cm ²	kuituja/cm ²	kuituja/cm ²	kuituja/cm ²
auditorio taulun syvennys	0,4		1,9		0,4
auditorio tulo-iv riitän päältä	0,1		0,9		0,4
auditorio katsomo 1. penkkirivi edestä			0,1		
auditorio katsomo 2. ylin penkkirivi			0,4		

Taulukosta 3 nähdään, että mitatut kuitupitoisuudet vaihtelevat mittauspaikasta ja näytteenoton ajankohdasta riippuen välillä 0,1–1,9 kuitua/cm². Asumisterveysasetuksen mukaan teollisten mineraalikuitujen toimenpideraja kahden viikon pölylaskeumassa on 0,2 kuitua/cm² (Asumisterveysasetus 2015). Tulosten vaihtelua voi selittää esimerkiksi tehdyt siivoustoimenpiteet mittausjaksojen välillä. Teollisten mineraalikuitujen tiedetään aiheuttavan silmien ja hengitysteiden ärsytysoireita. [6, s. 16.]

Kuitumittausten lisäksi auditoriossa tutkittiin erilaisten mikrobien esiintymistä sisäilmassa. Mikrobimittaukset toteutettiin ilma- ja pyyhintänäytteinä samoina ajankohtina kuin kuitumittaukset. Helmi- ja huhtikuussa 2019 pyyhintänäytteinä toteutetuissa mittauksissa havaittiin auditoriossa sädesienipesäkkeitä, joita ei esiintynyt marraskuussa 2018 suoritetuissa mittauksissa. Sädesieniesiintymiä havaittiin esimerkiksi auditorion tuloilmalaitteen pinnasta otetuista näytteistä. Sädesienet eli aktinomykeetit tulkitaan kosteusvaurioindikaattoriksi, koska ne kasvavat vain kosteissa olosuhteissa. Sädesienet tuottavat yhtenä aineenvaihduntatuotteenaan geosmiinia, joka saa aikaan maakellari-maisen hajun [26]. Sädesieni voikin olla mahdollinen osasy tilan käyttäjien kokemiin epämiellyttäviin hajuihin. Sädesienten ja muiden mikrobien ja niiden aineenvaihduntatuotteiden aiheuttamat tyypilliset haitat ja oireet on esitetty taulukossa 1.

Huhtikuussa otetuissa ilmanäytteissä ei sisäilmassa havaittu normaalia poikkeavaa määrää home- tai bakteerikasvustoa. Kiinteistön muissa tiloissa suoritetuissa mittauksissa ei havaittu normaalista poikkeavia tai toimenpiderajoja ylittäviä kuitu- tai mikrobipitoisuuksia. Tutkittavien tilojen joukossa oli yksi tila, jota palvelee sama ilmanvaihtojärjestelmä kuin auditoriota. Tarkemmat mikrobimittausten laboratoriotulokset on esitetty liitteessä 3.

Tuloilmalaitteen yhteydestä havaitun sädesieniesiintymän vuoksi selvitystyötä lähdettiin suorittamaan tilaa palvelevan ilmanvaihto- ja kostutusjärjestelmän toiminnan ja puhtauden tarkastelun kautta. Sädesienen esiintyminen tuloilmalaitteen pinnalla viittaa kosteuden esiintymiseen ilmanvaihtojärjestelmässä.

6.1.1 Auditorion olosuhdetavoitteet

Kiinteistössä on käytetty sisäilmaston laatutasotavoitteena sisäilmastoluokkaa S1 sovellettuna kohteen erityispiirteisiin. Kiinteistön suunnittelun aikana voimassa ollut Sisäilmastoluokitus on peräisin vuodelta 2001. Auditoriolle asetetut olosuhde- ja suunnittelutavoitteet on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Auditorion olosuhde- ja suunnittelutavoitteet.

Lämpötila	Tuloilmavirta	Ilman kosteus	Henkilöt
min. 21,0 °C	min. 2,0 dm ³ /s/m ²	min. 35 %	
maks. 22,0 °C	maks. 8,0 dm ³ /s/m ²	maks. 75 %	maks. 84 hlö

Vaikka varsinaista kostutustarvetta ei auditorion sisäilmalle ole, määräytyy auditorion ilman kosteus yhteisen ilmanvaihto- ja kostutusjärjestelmän palvelualueeseen kuuluvien muiden tilojen mukaan, joissa kostutustarve on perusteltu. Ilman suhteellinen kosteus pyritään näissä tiloissa pitämään 42 %:ssa. Näiden tilojen ilmankosteudelle on esitetty vaatimus, ettei kosteuspitoisuus saisi vaihdella eri vuodenaikojen välillä kuin maksimissaan kymmenen prosenttiyksikköä.

Näiden edellä mainittujen olosuhdetavoitteiden lisäksi auditorio on pyritty pitämään lievästi ylipaineisena ympäröiviin tiloihin nähden. Auditorio sijaitsee rakennuksen maanalaisessa pohjakerroksessa. Auditorion ulkoseinät rajoittavat tilan osittain rakennusta ympäröivästä ryömintätilasta. (Kuva 22) Rakennuksen käyttöönoton jälkeen auditoriossa havaittiin hajuhaittoja, joiden syyksi epäiltiin painesuhteiden vaihtelun aiheuttamaa vuotoilmavirran kulkeutumista ryömintätilasta auditorioon. Tämän jälkeen auditoriota on pyritty pitämään hieman ylipaineisena ympäröiviin tiloihin nähden ja paine-eroa ryömintätilan ja auditorion välillä on seurattu rakennusautomaatioon liitetyn painemittauksen avulla. [25.] Ryömintätilassa on aistinvaraisesti havaittavissa vuodenaikojen riippumatta vahva maaperän haju, joka voi välittyä vuotoilmavirtauksien mukana auditorioon, mikäli auditorio on alipaineinen ryömintätilaan nähden.



Kuva 22. Ryömintätila rakennuksen perusmuurin ympärillä. Vasemmanpuoleinen kuva on otettu auditorion ulkoseinältä ryömintätilaan päin ja oikeanpuoleinen kuva ryömintätilasta auditorion ulkoseinää kohti. Osa auditorion ulkoseinästä on rajattu kuvassa punaisella.

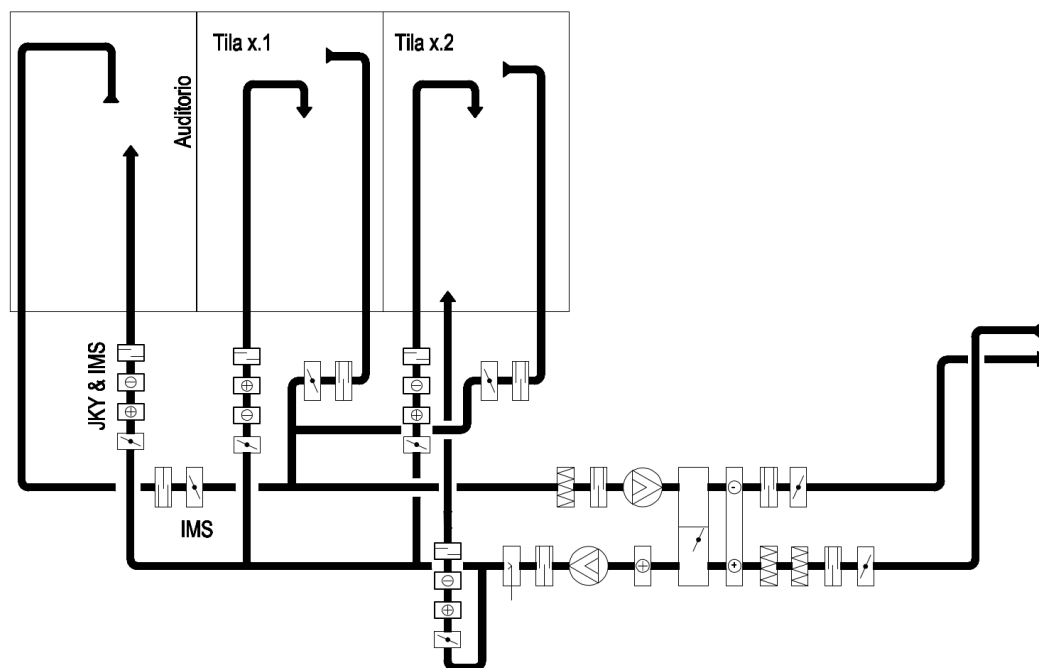
Ryömintätilan perimmäisenä tarkoituksena on toimia vesi- ja äänieristeenä rakennuksen perusmuurin ympärillä, mutta tilaa on käytetty hyväksi esimerkiksi taloteknisten järjestelmien asennusreittinä.

6.2 Ilmanvaihto- ja kostutusjärjestelmän kuvaus

Ilmanvaihtojärjestelmän kuvaus

Auditoriota palvelee muuttuvilmavirtainen koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä, joka on varustettu sumutuskostuttimella. Ilmanvaihtokoneen kokonaisilmavirta on $5 \text{ m}^3/\text{s}$, josta auditorion osuus on noin $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenotto-laitteena toimii kondensaatioroottori, jonka kosteudensiirto-ominaisuuksia ei ole tehos-

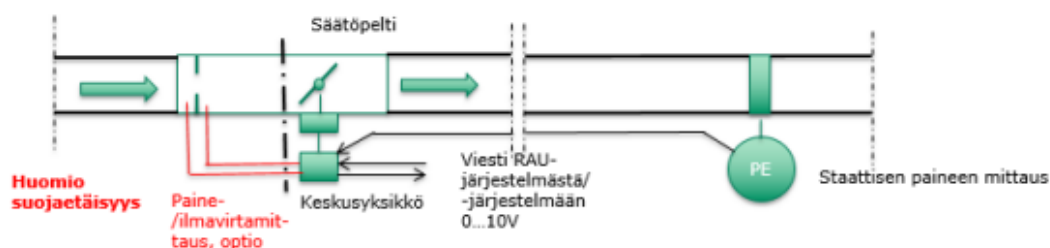
tettu. Tuloilmanvaihtojärjestelmässä on myös kolmetasoinen suodatus, jossa esisuodatus tapahtuu ulkoilmakammiossa. Ilmanvaihtokone on myös varustettu kiertoilmatoiminnolla, jota käytetään rakennuksen käyttöajan ulkopuolella. Kiertoilman käytöllä saadaan tiloissa ylläpidettyä haluttu ilmankosteus, ilman kostutusjärjestelmän ympärivuorokautista käyttöä. Tällä säästetään kostutuksen ja ilman lämmitykseen kuluviissa energiakustannuksissa. Kuvassa 23 on esitetty tämän ilmanvaihtojärjestelmän toimintakaavio.



Kuva 23. Auditoriota palvelevan ilmanvaihtojärjestelmän toimintakaavio.

Ilmanvaihtojärjestelmä on toteutettu muuttuvilmavirtaisena siten, että yksittäisten tilojen tulo- ja poistoilmakanaviin on asennettu ilmavirtasäätimet, jotka ohjaavat tilojen ilmanvaihtoa mitatun hiilidioksidipitoisuuksien perusteella. Ilmavirtasäätimien (IMS) toimintaperiaatetta on kuitenkin jouduttu muuttamaan rakennuksen käyttöönoton jälkeen. Ilmavirtasäätimet toimivat alun perin paine-eron mittaukseen perustuvalla säätötavalla, mutta johtuen riittämättömistä suojaetäisyyksistä mittausosan ympärillä ei paine-eroon perustuva säätö toiminut optimaalisesti. Tämän lisäksi kostutettu ilma oli tukkinut ilmavirtasäätimien mittayhteitä, mikä oli myös vaikuttanut säätimen toimintaan.

Ilmavirtasäätimet on muutettu nykyisin toimimaan vakiopainesäätiminä. Vakiopainesäätimillä ylläpidetään ilmanvaihtokanavassa tiettyä painetasoa, jolla normaali- ja tehostustilanteen ilmanvaihto toteutuu. Tehostusilmanvaihto siirtyy päälle, kun hiilidioksidipitoisuus ylittää tilassa arvon 650 ppm. Kuva 24 on esitetty periaatekuva vakiopainesäätimen toiminnasta.



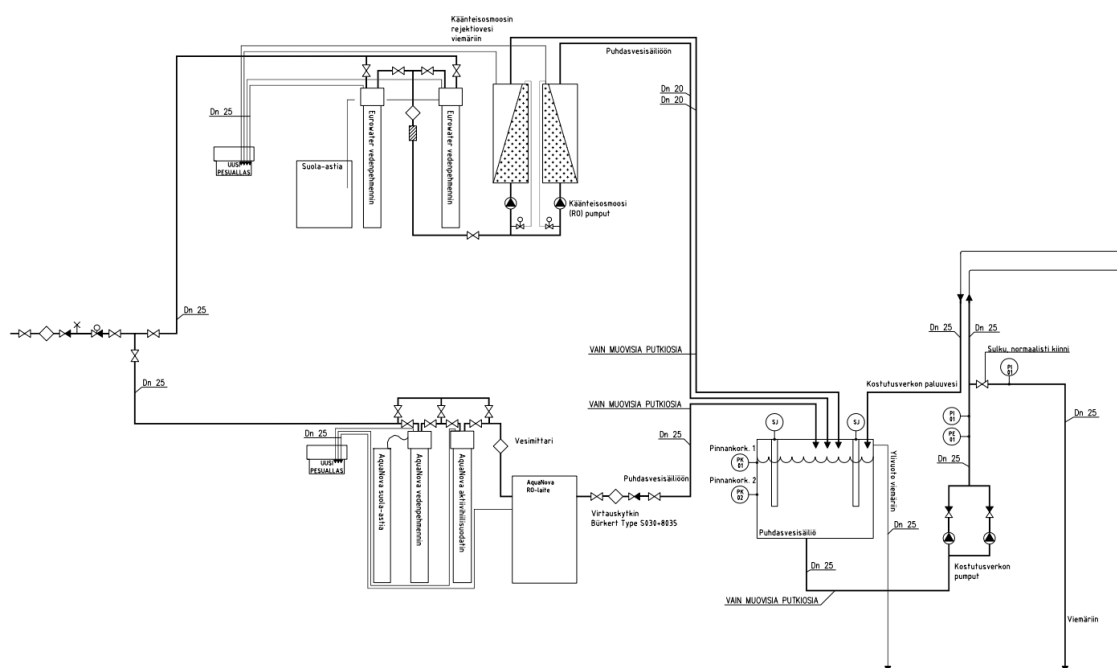
Kuva 24. Periaatekuva vakiopainesäätimen toiminnasta. Kuva: Granlund Oy.

Vakiopainesäätimen toiminta perustuu vakiopaineen ylläpitämiseen ilmanvaihtokanavassa. Säätöpellin asento määräytyy kanavistoon asennetun staattisen paineen mittausturinin mittausarvon perusteella. Säätimen keskusyksikkö vertaa mittausarvoa rakennusautomaatiojärjestelmästä saatuun ohjausviestin arvoon ja muuttaa säätöpellin asentoa siten, että tarvittava vakiopaine pysyy jatkuvasti kanavistossa. [27, s. 16.]

Ilmanvaihtojärjestelmän tilakohtaiset tuloilmakanavat on varustettu jälkilämmitys- ja jäähdytyspattereilla, joiden tarkoituksena on mahdollistaa tilakohtainen lämpöolosuhteiden- ja ilman kosteuden hallinta. Tämän ilmanvaihtojärjestelmän palvelevien tilojen lämmitys ja jäähdytys onkin toteutettu ainoastaan ilmanvaihtojärjestelmän välityksellä. Järjestelmäkaaviossa (kuva 23) on käytetty jälkilämmitys- ja jäähdytyspatterille nimitystä JKY, joka tarkoittaa tässä yhteydessä jälkikäsitteily-yksikköä.

Kostutusjärjestelmä

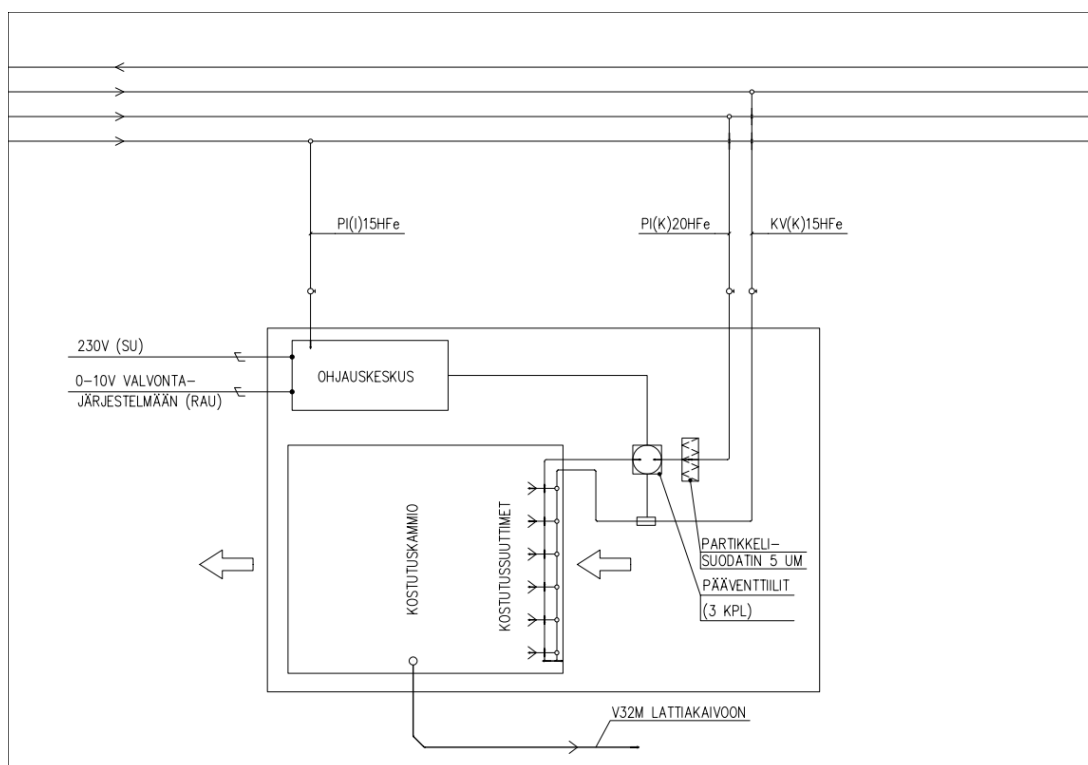
Auditoriota palvelevassa ilmanvaihtokoneessa on kostutus toteutettu sumutuskostutuksella. Kostutusvetenä käytetään käänteisosmoosilla puhdistettua vettä (DI-vettä), eli deionisoitua vettä. Kostutusveden käsittelyprosessiin kuuluu käänteisosmoosipuhdistuksen lisäksi veden pehmennys ja puhdistus aktiivihiiisuodatuksella. Näillä toimenpiteillä talousvedestä saadaan poistettua valtaosa mineraaleista ja mahdollisista epäpuhtauksista. Kuvassa 25 on esitetty vedenkäsittelyprosessin kytkentäkaavio.



Kuva 25. Vedenkäsittelyjärjestelmän kytkentäkaavio, josta on nähtävissä järjestelmän keskeisimmät komponentit.

Vedenkäsittelyjärjestelmä koostuu edellä mainittujen veden puhdistukseen liittyvien komponenttien lisäksi puhdasvesisäiliöstä, johon on järjestetty jatkuva kostutusveden kierto ja ylivuoto. Järjestelmään kuuluu kaksi käänteisosmoosilaitteistoa, joista kaaviossa (kuva 25) alempana esitetty laitteisto on käytössä ja toinen käänteisosmoosilaitteisto toimii varajärjestelmänä vikatilanteissa tai huoltojen aikana.

Ilmanvaihtokoneessa kostutus tapahtuu tuloilmapuhaltimen jälkeisessä kostutuskammiossa. Kostutuskammiossa on suuttimia, joiden kautta kostutusveden ja paineilman seos suihkutetaan tuloilmavirtaan. Kostutus on toteutettu kertakäyttövedellä, eli vettä ei kierätetä kostuttimessa kiertovesialtaassa, vaan haihtumaton vesi johdetaan viemäriin. Kostutusprosessissa käytetään öljyttömällä ruuvikompressorilla tuotettua paineilmaa. Kuvassa 26 on esitetty kostutusosan kytkentäkaavio.

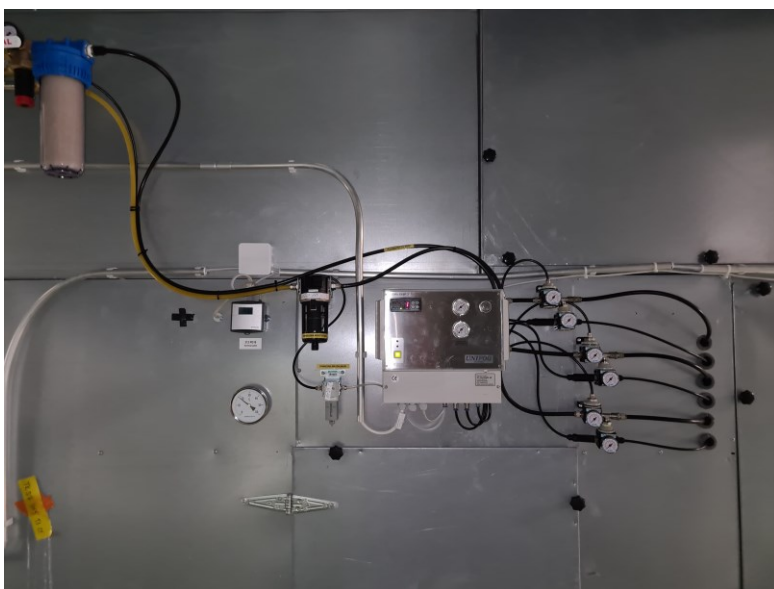


Kuva 26. Sumutuskostuttimen kytkentäkaavio.

Kostutusjärjestelmää ohjataan niin, että tiloissa toteutuu tavoiteltu ilmankosteus 42 %. Kostutuksen säätö tapahtuu ilmanvaihtojärjestelmän palvelevissa tiloissa ja poistoilman kanavistossa olevien kosteusantureiden mittausarvojen perusteella. Kostuttimeen kuuluva ohjauskeskus ohjaa näiden mittausarvojen perusteella veden ja paineilman syöttöä suuttimille. Kostutinosassa olevia suuttimia avataan ja suljetaan vallitsevan kostutustarpeen mukaan. Näin saadaan ylläpidettyä riittävä paine suuttimissa ja varmistettua, että suuttimelta lähtevä pisarakoko pysyy riittävän pienenä silloinkin, kun kostutustarve on vähäinen.



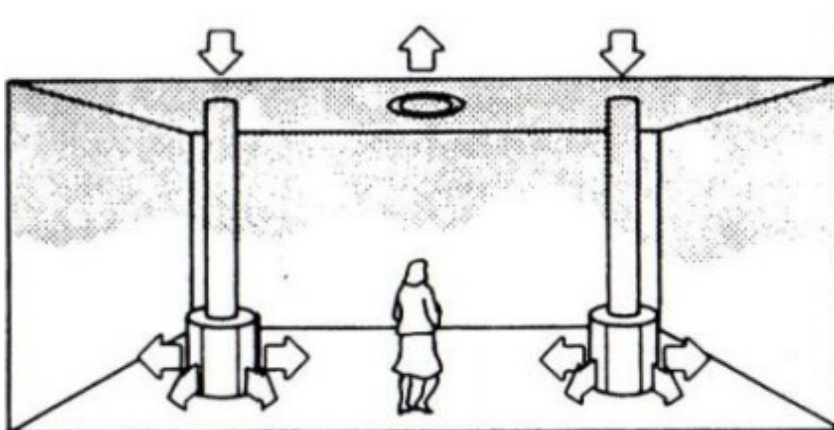
Kuva 27. Auditoriota palvelevan ilmanvaihtokoneen sumutuskostutusjärjestelmän kostutinosaa. Ilmavirran suunta on kuvanottosuuntaa vasten.



Kuva 28. Sumutuskostuttimen ohjausyksikkö.

Auditorion ilmanjakotapa

Ilmanjako on toteutettu auditoriossa syrjäyttävällä ilmanjaolla. Syrjäytysilmanvaihto perustuu lämpötilaeroista aiheutuviin tiheyseroihin, joiden avulla huoneilma jaetaan kahden eri vyöhykkeeseen: ylempään, jossa on likaista ilmaa ja alempaan, jossa on puhdasta ilmaa. Tämä saadaan aikaan johtamalla alilämpöistä ilmaa matalalla nopeudella alemmalle vyöhykkeelle ja poistamalla se ylemmältä vyöhykkeeltä. [15, s. 154.] Kuvassa 29 on esitetty syrjäytysilmanvaihdon periaate.



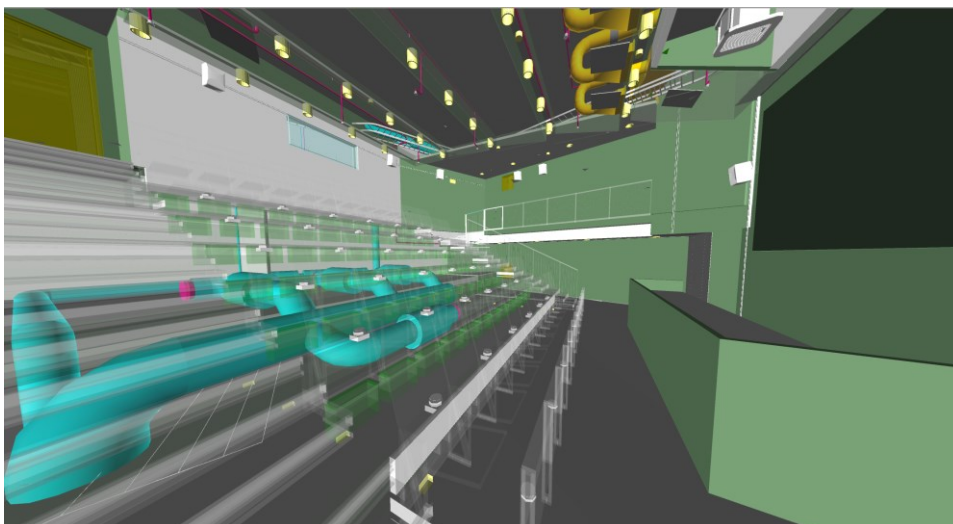
Kuva 29. Syrjäyttävä ilmanjako [15, s. 154].

Auditoriossa valtaosa tuloilmasta tuodaan penkkirivien alapuolella sijaitsevaan tuloilmakammioon, josta se johdetaan oleskeluvyöhykkeelle istuinten alla sijaitsevien siirtoilmäsäleiköiden kautta (kuva 30). Pieni osa tuloilmasta kuitenkin tuodaan auditorioon tilan etuosaan lattiatasossa sijaitsevasta tuloilmahajottajasta. Ilmanpoisto tilasta on toteutettu kauttaaltaan tilan etuosassa katonrajassa sijaitsevilla poistoilmalaitteilla.



Kuva 30. Auditorion tuloilmakammio. Istuinten alapuolella sijaitsevia siirtoilmasäleiköitä on nähtävissä kuvan yläosassa.

Kuvassa 31 on esitetty auditorion ilmanjakolaitteiden sijoitus tilan 3D-mallissa. Tilan etuosassa sijaitseva tuloilmalaite ei näy kuvassa.



Kuva 31. Auditorion ilmanjakolaitteiden sijoitus tilan 3D-mallissa.

6.3 Toteutetut mittaukset ja selvitykset

Tässä luvussa käsitellään toteutettuja mittauksia, selvityksiä ja näiden tuloksia. Mittaukset ja selvitykset on suoritettu vaiheittain aikavälillä 03/2020–10/2020. Tämän työn yhteydessä suoritettiin seuraavat mittaukset ja tarkastelut:

- ilmanvaihto- ja kostutusjärjestelmän pääkomponenttien toiminnan ja kunnon tarkastus
- ilmanvaihto- ja kostutusjärjestelmän puhtauden tarkastus
- ilmavirtojen mittaukset
- ilmanjaon toimivuuden tarkastelu savukokeella
- painesuhteiden seurantamittaus
- lämpötilan ja ilmankosteuden seurantamittaukset.

Ilmanvaihto- ja kostutusjärjestelmän toiminnan ja puhtauden tarkastus

Järjestelmille suoritetuissa aistinvaraisissa tarkasteluissa ei havaittu järjestelmien puhtauteen tai keskeisten komponenttien toimintakuntoon liittyvää huomautettavaa. Tässä tarkastelussa keskityttiin erityisesti teollisten mineraalikulutlähteiden kartoittamiseen, sekä kosteudelle alttiiden komponenttien tarkasteluun. Sisäilmatutkimuksessa havaitut kuidut- ja mikrobikasvustot auditorion tuloilmalaitteessa viittaisivat epäpuhtauksien olevan ainakin osittain peräisin ilmanvaihtojärjestelmästä.

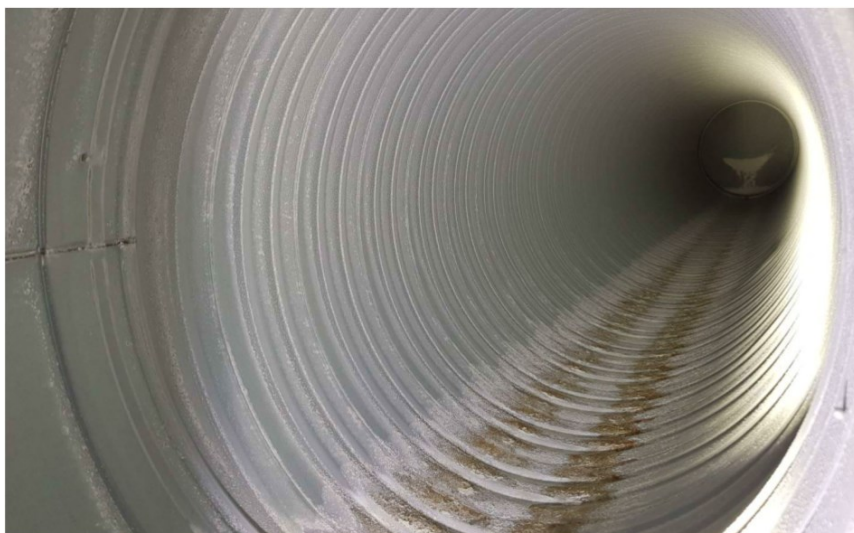
Potentiaallinen kuitulähde paikallistettiin auditoriossa sijaitsevasta tuloilmakammioista. Tuloilmakammion seinämien äänieristemateriaalina on käytetty mineraalivillaa ja pinnoitemateriaalina huopalevyä (kuva 32).



Kuva 32. Auditorion tuloilmakammion äänieristys.

Huopapinnoitteen havaittiin olevan osittain huonossa kunnossa. Pinnoitteessa on havaittavissa paikoittain selkeitä reikiä, sekä pieniä pinnoittamattomia osuuksia. Onkin todennäköistä, että kuitumittauksissa havaitut kuidut ovat peräisin täältä, sillä ilmanvaihtojärjestelmän muissa osissa ei havaittu mineraalivillaa sisältäviä eristemateriaaleja.

Tämän selvityksen yhteydessä ei havaittu kosteusesiintymiä ilmanvaihtojärjestelmässä. Kosteudelle alttiiden komponenttien viemärointi on toteutettu asianmukaisella tavalla, joten kosteuden kertyminen näihin vaikuttaa epätodennäköiseltä. Auditorion tuloilmakanavan alkupäässä kuitenkin havaittiin jälkiä korroosiosta, mikä viittaa kosteuden esiintymiseen kanavassa (kuva 33).



Kuva 33. Korroosioesiintymä auditorion tuloilmakanavassa. Tuloilmakanavan materiaalina on sinkitty teräs.

Todennäköistä on, että ilmanvaihtokanavaan on kertynyt kostutuksesta peräisin olevaa vettä, joka ei ole haihtunut tuloilmavirran sekaan. Tämän tutkimuksen aikana saatujen lisätietojen mukaan on tiedossa, että kiinteistön sumutuskostuttimien säätöjen kanssa on aikanaan ollut ongelmia, sillä kostutuksen säätöä oli vaikea saada huojumattomaksi. Tämän lisäksi on todettu, että ilmanvirtauskenttä kammiopuhaltimen ja äänenvaimentimen jälkeen ei ole sumutuskostutukselle otollinen ja ilman virtaus oli myös lisäksi epätasaista. [25.] Tiedossa ei kuitenkaan ole millaisia korjaustoimenpiteitä näiden edellä mainittujen epäkohtien korjaamiseksi on tehty. Tämän selvitystyön aikana kostutusjärjestelmän ollessa käytössä ei kuitenkaan havaittu kosteuden esiintymistä tuloilmakanavassa.

Ilmavirta- ja paine-eromittaukset

Auditorion ilmavirtamittaukset toteutettiin kanavamittauksina sekä osittain päätelaitekohtaisena mittauksena. Kanavamittauksissa käytettiin mittausvälineenä sekä Pitot-putkea että kuumalanka-anemometriä. Mittaukset suoritettiin normaali- ja tehostustilanteen ilmanvaihdolla. Taulukossa 5 on esitetty huhtikuussa suoritettujen ilmavirtamittauksen tulokset.

Taulukko 5. Auditorion runkokanavista suoritettujen ilmavirtamittausten tulokset 04/2020.

Auditorion ilmavirtamittaukset 04/2020			
Normaalitilanteen ilmanvaihto			
Mitattu tuloilmavirta	630	dm ³ /s	
Suunniteltu tuloilmavirta	235	dm ³ /s	
Mitattu poistoilmavirta	590	dm ³ /s	
Suunniteltu poistoilmavirta	220	dm ³ /s	
Tulo-/poistosuhde	1,07		
Tehostustilanteen ilmanvaihto			
Mitattu tuloilmavirta	850	dm ³ /s	
Suunniteltu tuloilmavirta	770	dm ³ /s	
Mitattu poistoilmavirta	640	dm ³ /s	
Suunniteltu poistoilmavirta	755	dm ³ /s	
Tulo-/poistosuhde	1,33		

Näiden ilmavirtamittausten yhteydessä huomattiin, että normaali/poissaolotilanteen ilmanvaihdon, kun hiilidioksidipitoisuus on tilassa alle raja-arvon 650 ppm:n, ylittävät suunnitellut ilmavirrat huomattavasti. Selitystä tälle ei tämän selvitystyön aikana löytynyt, mutta epäilen tämän johtuvan mahdollisesti virheellisesti määritellyistä vakiopainesäätimien painetasojen asetusarvoista. On toisaalta myös mahdollista, että normaalitilanteen ilmanvaihdon ilmavirtoja on syystä tai toisesta haluttu kasvattaa suunnitteluista.

Tehostustilanteen ilmanvaihdon on havaittavissa huomattava muutos tuloilmavirran suuruudessa, mutta poistoilmavirta kuitenkin pysyy lähes normaalitilanteen ilmavirran mukaisella tasolla. Mittausten yhteydessä seurattiin rakennusautomaatiojärjestelmän toimintaa valvomografiikan kautta. Valvomografiikasta kävi ilmi, että järjestelmän siirtyessä tehostusilmanvaihdolle ei poistoilmanvaihtokanavan vakiopainesäätimen ylläpitämän kanavapaineen asetusarvo nouse kuin noin viidellä pascalilla. Tuloilmakanavassa nousu oli kymmeniä pascalleita. Tämä vahvistaa epäilystä siitä, että vakiopainesäätimille määritetyt painetasojen asetusarvot ovat määritetty väärin.

Rakennusautomaatiojärjestelmän kautta ei päästy muuttamaan painetasojen asetusarvoja, jotta olisi voitu kokeilla asetusarvon muuttamisen vaikutusta auditorion poistoilmavirtaan. Vakiopainesäätimien tarkempaan toiminnan tarkasteluun ei enää ryhdytty, sillä

olemassa olevat vakiopainesäätimet päätettiin uusia ultraäänitoimisiksi ilmavirtasäätimiksi. Tähän palataan tarkemmin edempänä korjaustoimenpiteiden suunnittelun yhteydessä.

Auditorion ilmavirrat mitattiin vielä uudemman kerran kesäkuussa toisesta mittauspisteestä, joka sijaitsi lähempänä auditoriota ja jossa oli edellistä mittauspisteeseen verrattuna noin kaksinkertainen pituus suoraa kanavaa ennen mittauspistettä (kuva 32). Tällä haluttiin minimoida ilmavirtausta häiritsevien tekijöiden vaikutus mittaustulokseen. Ilmavirtamittaukseen liittyvien häiriötekijöiden vaikutusta mittaustulokseen on käsitelty luvussa 4.2.



Kuva 34. Auditorion Ø400:n runkokanavien ilmavirtamittaus ryömintätilassa. Mittauspisteissä toteutui noin 20-kertainen kanavan halkaisijan pituinen suojaetäisyys häiriölähteistä.

Mittauspaikan valinnalle lähempää auditoriota oli myös toinen syy, sillä tällä haluttiin varmuutta myös siitä, ettei kanavistossa ole vuotoja ennen auditoriota. Tämä vaikuttaisi ilmavirtojen suuruuteen auditoriossa. Ilmavirtamittaukseen käytettiin tällä mittauskerralla eri mittauslaitteistoa kuin huhtikuussa suoritettussa mittauksessa, mutta mitatut ilmavirrat

vastasivat suuruusluokaltaan huhtikuussa mitattuja. Taulukossa 6 on esitetty kesäkuussa ryömintätilassa suoritettujen ilmavirtamittausten tulokset.

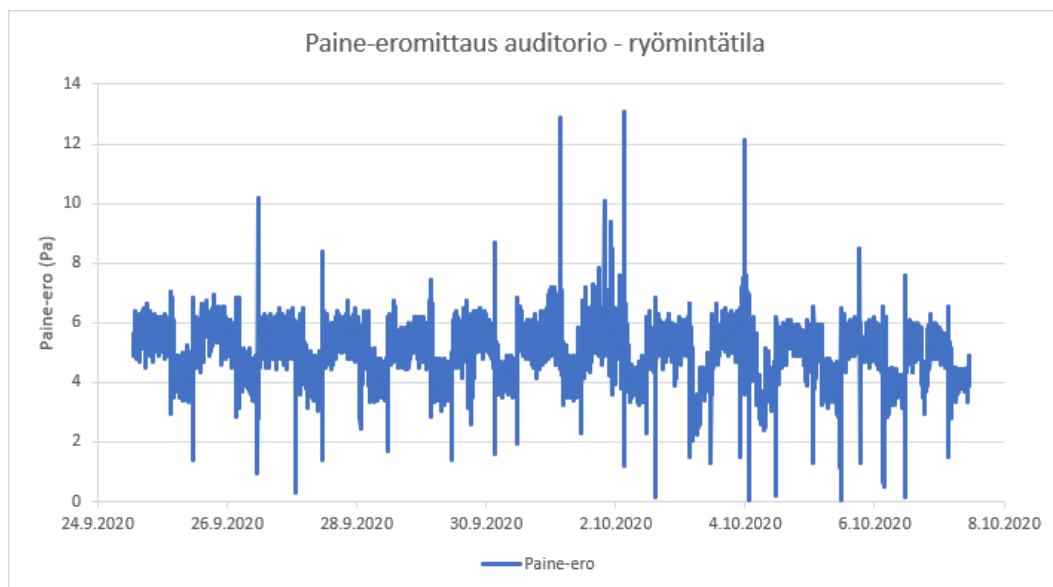
Taulukko 6. Auditorion ilmavirtamittausten tulokset 06/2020.

Auditorion ilmavirtamittaukset 06/2020			
Normaalitilanteen ilmanvaihto			
Mitattu tuloilmavirta	670	dm ³ /s	
Suunniteltu tuloilmavirta	235	dm ³ /s	
Mitattu poistoilmavirta	595	dm ³ /s	
Suunniteltu poistoilmavirta	220	dm ³ /s	
Tulo-/poistosuhde	1,13		
Tehostustilanteen ilmanvaihto			
Mitattu tuloilmavirta	850	dm ³ /s	
Suunniteltu tuloilmavirta	770	dm ³ /s	
Mitattu poistoilmavirta	600	dm ³ /s	
Suunniteltu poistoilmavirta	755	dm ³ /s	
Tulo-/poistosuhde	1,42		

Tavoitteena oli saada ilmavirrat mitattua auditoriossa myös päätelaitekohtaisesti, mutta tämä onnistui vain tuloilmalaitteiden osalta, johtuen poistoilmalaitteiden vaikeasti saavutettavasta sijainnista tilan katossa. Päätelaitekohtaisesti mitattu kokonaistuloilmavirta ei poikennut merkittävästi kanavamittausten tuloksesta.

Ilmavirtamittaukset osoittivat, että auditorion suunnitellut ilmavirrat eivät vastaa suunniteltuja, eikä tulo- ja poistoilmavirtojen suhde ole optimaalinen. Varsinkin tehostusilmanvaihdolla on tuloilmavirta huomattavasti poistoilmavirtaa suurempi. Ilmavirtamittausten perusteella tavoite tilan ylipaineisuudesta ryömintätilaan nähden kuitenkin toteutuu.

Auditorion ja ryömintätilan välistä paine-eroa mitattiin hetkellisinä mittauksina kesäkuussa ilmavirtamittausten yhteydessä sekä pidempiaikaisena seurantamittauksena syys-lokakuussa. Hetkelliset mittaukset osoittivat, että auditorio oli keskimäärin noin seitsemän pascalia ylipaineinen ryömintätilaan nähden tilanteessa, jossa ilmanvaihto toimi normaalitilanteen mukaisesti. Ilmanvaihdon toimiessa tehostuksella, oli ylipaine ryömintätilaan nähden noin 20 pascalia. Kuvassa 35 on esitetty syys-lokakuussa suoritettujen pidempiaikaisen seurantamittauksen tulokset.

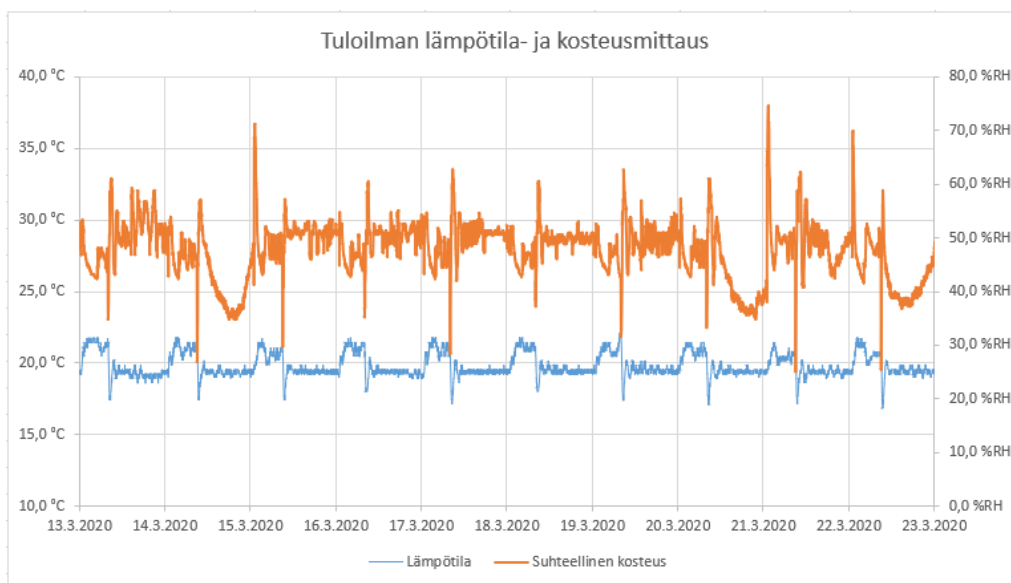


Kuva 35. Auditorion ja ryömintätilan välisen paine-eron seurantamittauksen tulokset.

Mittausjaksolla auditorio oli keskimäärin noin viisi Pascalia ylipaineinen ryömintätilaan nähden. Mittauksessa käytetty mittaustiedon rekisteröintiväli oli kaksi minuuttia. Mittausdatassa nähtävissä oleville äkillisille paine-eron nousuille- ja laskuille ei ole tiedossa tarkkaa syytä. Muutoksia painesuhteisiin ja mittaustuloksiin voi kuitenkin aiheuttaa tilan ovien availu ja käyttäjien toiminta. Tiedossa kuitenkin on, että tilassa on ollut olematon käyttöaste mittausjakson aikana. Myöskään ilmanvaihto ei rakennusautomaatiojärjestelmän mukaan ole ollut tehostustilassa kertaakaan mittausjaksolla.

Lämpötila- ja kosteusmittaukset

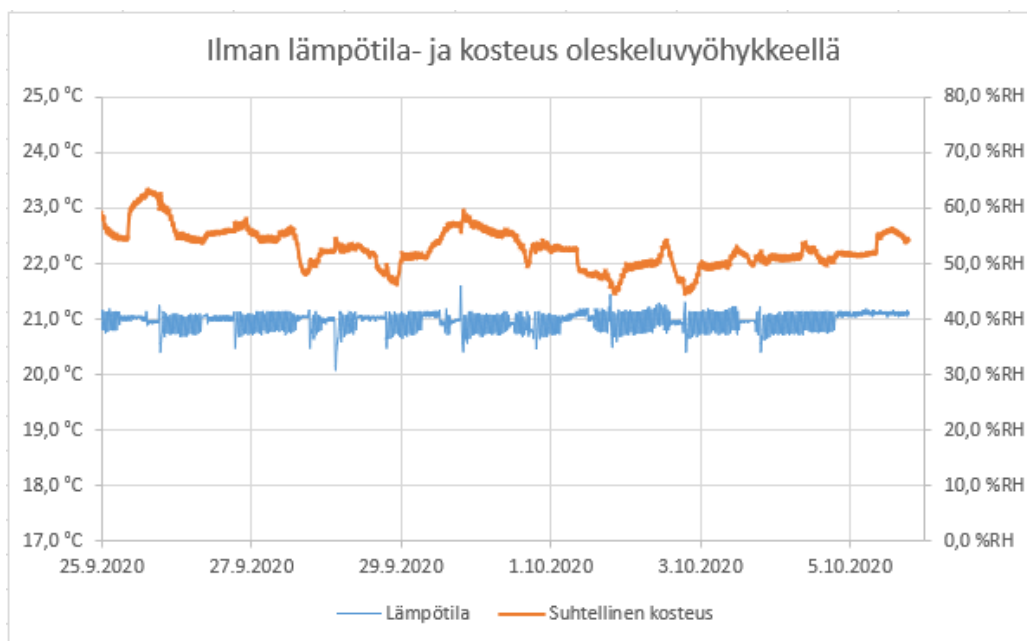
Auditorion ilman lämpötilaa- ja suhteellista kosteutta seurattiin kahden seurantamittauksen avulla. Ensimmäisellä seurantamittauksella, joka suoritettiin maaliskuussa, mitattiin kahden viikon ajan auditorion tuloilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta. Tämän mittauksen tavoitteena oli selvittää kuinka, hyvin tuloilman kosteus- ja lämpötila pysyvät asetusarvoissaan ja esiintyykö näiden suhteen merkittävää huojuntaa. Kuvassa 36 on esitetty tämän seurantamittauksen tulokset.



Kuva 36. Auditorion tuloilman lämpötilan- ja suhteellisen kosteuden seurantamittauksen tulokset keväällä 2020.

Mittausjaksolla keskimääräinen mitattu tuloilman suhteellinen kosteus oli 48 % ja lämpötila 19,8 °C. Lämpötilan mittausdatassa ovat nähtävillä säännölliset jaksot, jolloin tuloilman lämpötilaa nousee tapahtuvat rakennuksen käyttöajan ulkopuolella, kun ilmanvaihtokone käy kiertoilmatoiminnolla. Rakennuksen käyttöaikana tuloilman lämpötila on kuitenkin pysynyt hyvin tasaisena, ja lähellä asetusarvoaan. Tuloilman kosteudessa on kuitenkin havaittavissa ajoittain selkeämpää huojusta mittausjaksolla.

Toinen seurantamittaus toteutettiin syys-lokakuussa, jolloin auditorion ilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mitattiin auditoriossa oleskeluvyöhykkeeltä. Tämän seurantamittauksen tulokset on esitetty kuvassa 37.



Kuva 37. Auditorion huoneilman lämpötilan- ja suhteellisen kosteuden seurantamittauksen tulokset syksyllä 2020.

Mittausjaksolla keskimääräinen mitattu huoneilman suhteellinen kosteus oli 53 % ja lämpötila 21 °C. Lämpöolosuhteet ovat pysyneet tasaisina ja lähellä tavoitearvoa koko mittausjakson ajan. Ilman suhteellinen kosteus kuitenkin ylittää tavoitearvon keskimäärin noin kymmenellä prosenttiyksiköllä. Huomioitavaa tässä mittauksessa kuitenkin, että tila on ollut olemattomalla käytöllä mittausjakson aikana. Mittauksen suorittaminen tilan ollessa käytössä olisi antanut tietoa käyttäjien vaikutuksesta lämpöolosuhteisiin ja ilman kosteuteen.

Tulo- ja huoneilman lämpötila- ja kosteusmittauksien tuloksia vertailtiin rakennusautomaatiojärjestelmään liitettyjen kosteuden- ja lämpötilan mittausantureiden mittaustuloksiin. Seurantamittauksien tulokset vastasivat hyvin pitkälti kiinteiden mittalaitteiden mittaustuloksia. Tämän toimenpiteen tarkoituksena oli varmistaa antureiden toimintakunto.

6.4 Yhteenveto tehdyistä selvityksistä

Suoritetut selvitystyöt eivät antaneet yksiselitteistä syytä auditorion huonoksi koetuille olosuhteille. Tämä vaikeutti korjaustoimenpiteiden suunnittelua, sillä ei havaittu mitään selkeää korjaustoimenpidettä, joka varmasti vaikuttaisi koettuihin olosuhteisiin. Ilmanvaihto- ja kostutusjärjestelmän toimiminen nykytilanteessa epäpuhtaudenlähteenä tai olosuhteita itsessään heikentävänä tekijänä vaikuttaa epätodennäköiseltä, sillä muissa tiloissa, jota nämä järjestelmät palvelevat, ei ole raportoitu heikoista olosuhteista. Tämä ei itsessään vielä poista kuitenkaan sitä mahdollisuutta, etteikö näin kuitenkaan voisi olla.

Selvitystöiden aikana huomio kuitenkin kiinnittyi erityisesti auditorion tulo- ja poistoilmavirtojen epätasaiseen suhteeseen. Tämän pohjalta heräsi ajatus siitä, olisiko auditoriossa ylläpidetty ylipaineisuus ryömintätilaan nähden aiheuttanut kosteusrasituksen kautta mahdollisia kosteusvaurioita rakenteisiin. Auditorion ja ryömintätilan erottavan ulkoseinän rakenteesta ei tämän selvityksen aikana saatu tietoa siitä, onko rakenne suunniteltu kestävänsä siihen kohdistuvaa kosteusrasitusta. Myöskään varmaa tietoa ryömintätilassa vallitsevista lämpöolosuhteista ei tätä selvitystä tehdessä ollut. Mikäli ryömintätila kylmenisi talvella niin, että auditorion ulkoseinän lämpötila laskisi alle sisäilman kastepisteen, voisi tämä aiheuttaa ongelmia, mikäli seinärakennetta ei ole suunniteltu tätä huomioiden. Esimerkiksi ilman, jonka lämpötila on 21 °C ja suhteellinen kosteus 55 %, kastepistelämpötila on noin 11,5 °C. Mikäli ulkoseinän lämpötila laskee kastepistelämpötilaan tai sen alapuolelle, tapahtuu seinärakenteessa kosteuden tiivistymistä ja sitä kautta mahdollinen kosteusvaurio.

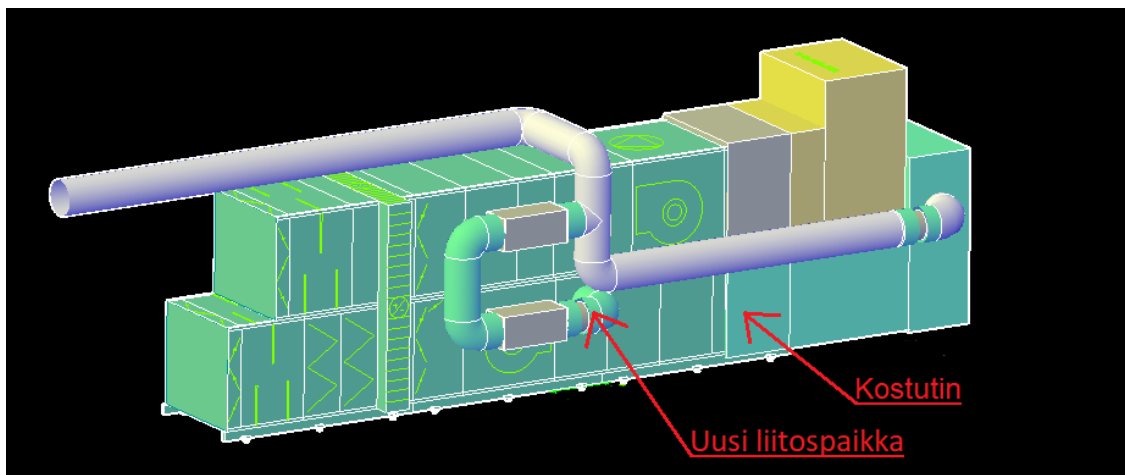
Epätasapainossa olevien ilmavirtojen lisäksi huomio kiinnittyi auditorion sisäilman perusteettomaan kostuttamiseen. Tilan käyttö auditoriona ei aseta tilalle erityisiä vaatimuksia kosteusolosuhteiden hallintaa, kun taas ilmanvaihtojärjestelmän palvelualueeseen kuuluvien muiden tilojen käyttötarkoitus asettaa vaatimuksen tietynlaisten kosteusolosuhteiden hallinnalle.

7 Korjaustoimenpiteiden suunnittelu

Korjaustoimenpiteiden suunnittelua lähdettiin toteuttamaan sillä ajatuksella, että auditorion ilmavirrat saadaan vastaamaan suunnitteluja. Tämän lisäksi haluttiin tarkastella mahdollisuutta luopua auditorion tuloilman kostuttamisesta. Ilmavirtojen tasapainottamisella ja kostutuksesta luopumisella vähennettäisiin rakenteille aiheutuvaa kosteusrasitusta. Tämän lisäksi näillä toimenpiteillä olisi energiansäästöpotentiaalia. Energiansäästö syntyy auditorion ilmavirtojen pienentämisestä normaalitilanteen ilmanvaihdoilla, sekä pienentyneestä kosteuden tuoton tarpeesta. Auditorio on merkittävän osan rakennuksen käyttöajasta tyhjillään, jolloin ilmavirtojen pienentäminen suunnitelmien tasolle pienentää energian kulutusta. Energiansäästö näkyy ilmanvaihtokoneen puhaltimien käyttämän energian lisäksi ilman lämmitykseen ja jäähdytykseen kulutetussa energiassa.

Auditorion tulo- ja poistoilmakanavien olemassa olevat vakiopainesäätimet päätettiin uusia ultraäänitoimisiksi ilmavirtasäätimiksi. Ultraääni-ilmavirtasäätimen toiminta perustuu ilmavirran mittauksessa käytettävään ultraäänitekniikkaan. Ultraääni-ilmavirtasäätimen etuja verrattuna paine-eron mittaukseen perustuvaan ilmavirransäätöön on esimerkiksi matalampi äänitaso ja painehäviötön ilmavirranmittaus ilman tukkeutuvia mittayhteitä [28]. Ultraäänitoiminen ilmavirtasäädin on toimintaperiaatteeltaan kanavapaineesta riippumaton ilmavirtasäädin, mikä mahdollistaa ilmavirtojen ylläpitämisen auditoriossa halutulla tasolla rakennuksen käyttöaikana ja sen ulkopuolella.

Ratkaisuksi auditorion tuloilman kostuttamisen lopettamiseksi laadittiin suunnitelma, joka pitää sisällään uuden tuloilmakanavahaaran rakentamisen ilmanvaihtokoneeseen ennen koneessa olevaa kostutusosaa. Kuvassa 35 on esitetty 3D-mallinnus suunnitellusta muutoksesta.



Kuva 38. Auditorion uusi tuloilmakanava mallinnettuna MagiCADilla. Muutosten havainnollistamisen helpottamiseksi uudet kanavaosuudet on esitetty turkoosilla värillä ja olemassa olevat harmaalla värillä.

Uusi tuloilmakanava tullaan yhdistämään olemassa olevaan tuloilmakanavaan ilmanvaihtokonehuoneessa. Uusi ja vanha tuloilmakanava varustetaan moottoroiduilla säätöpelleillä. Tämä mahdollistaa vaivattoman paluun kostutetun tuloilman käyttöön auditoriossa, mikäli tämä nähdään tarpeelliseksi. Rakennusautomaatioon ohjelmoidaan säätöpeltien osalta myös ilman sekoitustoiminto, jolla voidaan halutessa sekoittaa kostuttamattomaan tuloilmaan kostutettua ilmaa. Ilman sekoitus tapahtuu ohjaamalla kostuttimen jälkeisen kanavahaaran säätöpeltiä niin, että haluttu ilman kosteus auditoriossa saavutetaan. Tämä toiminto mahdollistaa alhaisemman ilman kosteuden ylläpitämisen auditoriossa kuin muissa ilmanvaihtojärjestelmän palvelemissa tiloissa. Sekoitettua ilmaa voidaan käyttää esimerkiksi kylminä vuodenaikoina, kun ulkoilma on erityisen kuivaa.

Uusi tuloilmakanava varustetaan säätöpellin lisäksi äänenvaimentimilla, sillä tämän uuden tuloilmakanavan lähtö on ilmanvaihtokoneessa ennen ilmanvaihtokoneen omia äänenvaimentimia, jotka sijaitsevat koneen puhallinkammion ja kostuttimen välissä. Rajallisen asennustilan vuoksi tässä ratkaisussa joudutaan käyttämään kahta äänenvaimenninta, jotta saavutetaan vastaava äänenvaimennus kuin ilmanvaihtokoneen omien äänenvaimentimien kanssa olisi. Uusi kanavaosuus kasvattaa hieman painehäviötä kanavistossa olemassa olevaan tilanteeseen verrattuna. Suunnittelun yhteydessä suoritettiin

kanaviston painehäviölaskenta olemassa olevalla kanavistolla sekä uudella kanavaliitoksella. Tällä varmistettiin, että puhaltimen paineentuotto riittää kattamaan kasvaneen painehäviön. Puhaltimessa osoittautui olevan riittävän paljon kapasiteettia jäljellä, jolloin kasvava painehäviökään ei muodostu ongelmaksi.

Edellä esitellyt suunnitellut muutokset oli tarkoitus toteuttaa loka-marraskuun aikana, mutta johtuen vallitsevasta koronaviruspandemiasta ei turvallisuussyistä ilmanvaihtokoneita voitu pysäyttää muutostöiden vaatimaksi ajaksi. Ilmanvaihtokone palvelee auditorion lisäksi muita tiloja, joissa on päivittäin käyttäjiä. Ilmanvaihtokoneen pysäyttäminen voisi kasvattaa mahdollisuutta altistua koronavirukselle. Riittävän ilmanvaihdon on todettu pienentävän riskiä ilmapälitteisesti tapahtuville tartunnoille [29].

Tähän työhön oli alun perin tarkoitus sisällyttää muutostöiden jälkeinen seuranta, jolla on tarkoitus varmistaa korjaustoimenpiteiden onnistuminen, mutta aikataulullisten haasteitten vuoksi tästä ajatuksesta jouduttiin luopumaan. Muutostyöt on kuitenkin tarkoitus aloittaa vielä kuluvan vuoden aikana.

8 Yhteenveto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli löytää selitys kulttuurirakennuksen auditoriossa heikoiksi koetuille sisäilmaolosuhteille ja kehittää ratkaisu, jolla olosuhteita saadaan parannettua. Vaikka yksiselitteistä syytä olosuhdeongelmille ei tämän selvityksen aikana löydetty, voidaan kuitenkin tästä huolimatta todeta, että selvitystyö itsessään oli onnistunut. Selvitystyön tuloksena löydettiin epäkohtia, jotka voivat osaltaan selittää koettuja olosuhdeongelmia tai edesauttaa niiden esiintymistä. Tämän lisäksi näihin havaittuihin epäkohtiin löydettiin korjaustoimenpiteet, joilla on myös energiansäästöpotentiaalia.

Selvitystyötä pohjustanut työn teoriaosuus onnistui luomaan katsauksen keskeisiin teijoihin, joita tällaisessa sisäilmaston tutkimiseen liittyvissä selvityksissä on hyvä huomioida. Teoriaosuus toimikin ikään kuin tutkimussuunnitelmana suoritettulle selvitykselle. Työn teoriaosuutta varten tehty kirjallisuuskatsaus osoitti, että sisäilmaston ja ilmanvaihtojärjestelmien tutkimusmenetelmistä on alan kirjallisuudessa ja erilaisissa julkaisuissa

saatavilla runsaasti tietoa. Selvitystyön suorittamista ajatellen toteutettu tiedonhaku ilman kustutuksesta ja kustutusjärjestelmistä kuitenkin osoitti, että aiheesta on saatavilla hyvin suppeasti tietoa alan kirjallisuudesta. Teoriaosuudessa pyrittiin tämän vuoksi luomaan tätä silmällä pitäen katsaus ilman kustutukseen, jossa on yhdistetty eri julkaisuiden keskeisimmät tiedot aihepiiristä.

Auditorion olosuhdeongelmien selvitystä tullaan jatkamaan vielä tämän opinnäytetyön jälkeenkin, jolloin tämä tehty selvitystyö toimii tärkeänä pohjatietona tulevaisuutta ajatellen. Keskeisenä tutkittavana asiana voidaan nostaa esille auditorion ulkoseinän rakenteellisen kunnon selvittämisen ja ryömintätilan lämpötilan seurantamittauksen järjestämisen talven ajaksi.

Pidän itse tämän opinnäytetyön tärkeimpänä opetuksena sitä, että sisäilmasto muodostuu hyvin monesta tekijästä ja siitä, että sen tutkiminen voi vaatia laaja-alaista ymmärrystä LVI-järjestelmätuntemuksen lisäksi esimerkiksi rakennusfysiikasta ja sisäilman mikrobiologiasta. Sisäilmaongelmat ovat hyvin monimuotoinen asia, ja onkin muistettava, että erilaiset ihmiset kokevat sisäilmaston eri tavoin. Tällä haluan sanoa ja muistuttaa siitä, että vaikka sisäilmaolosuhteet olisivat todettu ihanteellisiksi ja ne täyttäisivät esimerkiksi Sisäilmaluokituksen mukaiset S1-luokan tavoitetasot, voi silti jokin henkilö kokea olosuhteet epämiellyttäväiksi.

Haluaisin vielä kiittää tämän opinnäytetyön toimeksiantajaa Granlund Oy:tä ja esimiestäni Kauri Salmista mielenkiintoisesta ja haastavasta aiheesta sekä saadusta tuesta tämän työn eri vaiheissa. Kiitokset kuuluvat tämän lisäksi vielä yliopettaja Rauno Holopaiselle asiantuntevasta ja aktiivisesta ohjauksesta tämän opinnäytetyön parissa.

Lähteet

- 1 Meistä. Verkkoaineisto. Granlund Oy. <<https://www.granlund.fi/granlund/meista/>>. Luettu 04.08.2020.
- 2 Perustietoa sisäilmasta. 2008. Verkkoaineisto. Sisäilmayhdistys ry. <<https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Sisailmasto/Perustietoa>>. Luettu 04.08.2020.
- 3 Psykologiset tekijät. 2008. Verkkoaineisto. Sisäilmayhdistys ry. <<https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Sisailmasto/Psykologiset-tekijat>>. Luettu 04.08.2020.
- 4 Seppänen, Olli. Seppänen, Matti. 1996. Rakennusten sisäilmasto ja LVI-tekniikka. Helsinki. Sisäilmayhdistys ry.
- 5 Sisäilman vaikutukset. 2008. Verkkoaineisto. Sisäilmayhdistys ry. <<https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Sisailmasto/Sisailman-vaikutukset>>. Luettu 04.08.2020.
- 6 Pitkäranta, Miia. 2016. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Helsinki. Ympäristöministeriö.
- 7 Miten toimia, jos sisäilmaongelman syy on epäselvä? 2019. Verkkoaineisto. Terveiden ja hyvinvoinnin laitos. <<https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/sisailma/epailletko-sisailmaongelmaa-/miten-toimia-jos-sisailmaongelman-syy-on-epaselva->>. Luettu 13.08.2020.
- 8 Ohje työpaikkojen sisäilmasto-ongelmien selvittämiseen. 2016. Verkkoaineisto. Työterveyslaitos. <https://ttk.fi/files/4715/Ohje_tyopaikkojen_sisailmasto-ongelmien_selvittamiseen.pdf>. Luettu 18.08.2020.
- 9 Sandberg, Esa. 2014. Ilmastointitekniikka Osa 1. Talotekniikka-julkaisut Oy.
- 10 Sisäilmastoluokitus 2018. 2018. Espoo. Sisäilmayhdistys ry.
- 11 Kalibroinnit. 2016. Verkkoaineisto. FINAS-akkreditointipalvelu. <<https://www.finas.fi/akkreditointi/jaljitettavyys/Sivut/Kalibroinnit.aspx>>. Luettu 28.08.2020.
- 12 Heikkinen, Joel. 2015. Talotekniikan toimintatapojen yhtenäistäminen ja vakiointi. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

- 13 Sisäilmastoluokitus 2008. 2008. Espoo. Sisäilmayhdistys ry.
- 14 Mineraalikutupäästöt. 2008. Verkkoaineisto. Sisäilmayhdistys ry. <<https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kunnossapito-ja-korjaaminen/LVI-tekniikka-ja-muut-sisailmaongelmat/Mineraalikutupaastot>>. Luettu 30.09.2020.
- 15 Seppänen, Olli. 1996. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Helsinki. Suomen LVI-liitto ry.
- 16 Välikylä, Tapio. 2009. Sosiaali- ja terveysministeriön Asumisterveysohjeen soveltamisopas. Pori. Ympäristö ja Terveys -lehti.
- 17 Lehtoranta, Iiro. 2018. Koneellisen ilmanvaihdon käyttöajan ulkopuolinen toiminta. Insinöörityö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 18 Ilmavirtaus- ja paine-ero. Verkkoaineisto. Sisäilmayhdistys ry. <<https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Ongelmien-tutkiminen/Rakennustekniset-tutkimukset/Ilmavirtaus-ja-paine-ero>>. Luettu 05.10.2020.
- 19 Björkroth, Marko. Eskola, Lari. 2019. Rakennusten paine-erojen mittausohje. Ympäristöministeriö.
- 20 Mattila, Mirva. Kaukonen, Marianna. Salmela, Ulla. 2005. Opas paikallismuseon hoitoon. Helsinki. Museovirasto.
- 21 Tekninen käsikirja, ilmankäsittelykoneet. 2010. Turku. Fläkt Woods Oy.
- 22 Sandberg, Esa. 2014. Ilmastointitekniikka Osa 2. Helsinki. Talotekniikka-julkaisut Oy.
- 23 TalotekniikkaRYL 2002. Talotekniikan rakentamisen yleiset laatuvaatimukset osa 1. 2003. Rakennustietosäätiö RTS.
- 24 Kauppinen, Saku. 2015. Kuopion musiikkikeskuksen ilmastoinnin kustutusmenetelmien vertailu. Opinnäytetyö. Mikkelin Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 25 Tutkimuskohteen kiinteistön ylläpidosta vastaava henkilö. 2020. Haastattelut.
- 26 Sädesienet. Verkkoaineisto. Hengitysliitto ry. <<https://www.hengitysliitto.fi/fi/sisailma/kosteus-ja-homevauriot/nain-homevaurio-syntyy/sadesienet>>. Luettu 2.11.2020.

- 27 Löffman, Janne. 2018. Muuttuvailmavirtaisten ilmastointijärjestelmien ohjaus ja säätö toimistorakennuksessa. Insinöörityö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 28 OPTIVENT® ULTRA KÄYTTÖOPAS. Verkkoaineisto. Fläktgroup. <<http://resources.flaktwoods.com/Perfion/File.aspx?id=590128e7-45dd-4641-9961-8f6b9467f953>>. Luettu 10.11.2020.
- 29 REHVA COVID-19 guidance document, August 3. 2020. Verkkoaineisto. REHVA. <https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_V3_03082020.pdf>. Luettu 05.12.2020.

Liite 1. Käyttäjätyytyväisyyskyselylomake

Lomake 1: Käyttäjäkysely

1. Kuinka kauan olette työskennelleet tässä rakennuksessa? _____

2. Missä huonetilassa työskentelette pääasiallisesti? Tarkastakaa tilan numerointi raportin lopussa olevasta pohjapiirroksesta. _____

3. Työpisteenne sisäilman laatu:

Oletteko havainneet työpisteellänne:

- liian kylmää tai kuumaa lämpötilaa:

- ☐ Ei
☐ Kyllä, satunnaisesti
☐ Kyllä, jatkuvasti

- kylmiä lattia- tai seinäpintoja:

- ☐ Ei
☐ Kyllä, satunnaisesti
☐ Kyllä, jatkuvasti

- vedon tunnetta:

- ☐ Ei
☐ Kyllä, satunnaisesti
☐ Kyllä, jatkuvasti

- riittämätöntä ilmanvaihtoa:

- ☐ Ei
☐ Kyllä, satunnaisesti
☐ Kyllä, jatkuvasti

- tunkkaista huoneilmaa:

- ☐ Ei
☐ Kyllä, satunnaisesti
☐ Kyllä, jatkuvasti

- poikkeuksellisen kuivaa huoneilmaa:

- ☐ Ei
☐ Kyllä, satunnaisesti
☐ Kyllä, jatkuvasti

- poikkeuksellisia hajuja huoneilmassa:

- ☐ Ei
☐ Kyllä, satunnaisesti
☐ Kyllä, jatkuvasti

4. Oletteko havainneet ilmanvaihdossa muita puutteita?

- ☐ Ei
☐ Kyllä, missä? _____

5. Oletteko havainneet tiloissa vesivuotoja tai mahdollisia merkkejä kosteusvaurioista? Merkit voivat olla esimerkiksi tummumia, värimuutoksia tai pintamateriaalien irtoamista. Missä tiloissa merkkejä on havaittu? Ilmoittakaa tilan numero oheisen pohjapiirroksen mukaisesti. Voitte myös merkitä havainnot suoraan pohjapiirrokseen.

6. Oletteko havainneet tiloissa poikkeuksellisia hajuja sisäilmassa, kuten maakellarin hajua, viemäriin tai kemiallisiin materiaalipäästöihin viittavaa hajua? Missä tiloissa? Ilmoittakaa tilan/tilojen numerot oheisen pohjapiirroksen mukaisesti. Voitte myös merkitä havainnot suoraan pohjapiirrokseen.

7. Epäilettekö sisäilman aiheuttavan teille haittaa?

Mitä tiloja epäily koskee? Ilmoittakaa tilan/tilojen numerot oheisen pohjapiirroksen mukaisesti. Voitte myös merkitä havainnot suoraan pohjapiirrokseen.

8. Liittyvätkö sisäilman laadun ongelmat mielestänne johonkin erityiseen sääolosuhteeseen tai vuodenaikaan? Mihin? _____

9. Haluatteko antaa muuta palautetta lämpöolosuhteisiin, ilmanvaihtoon, kosteusvaurioihin tai sisäilman laatuun liittyen? _____

Kiitos vastauksistanne.

[Kyselyn loppuun liitetään rakennuksen pohjapiirros, johon kaikki tilat on numeroitu yksiselitteisesti.]

Liite 2. Absoluuttisen ja suhteellisen kosteuden kuukausikeskiarvot eräillä paikkakunnilla

Paikka-kunta		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I-XII
Helsinki-Vantaa	x_V	2,9	2,8	3,3	4,3	5,9	8,2	10,0	10,0	8,1	6,0	4,6	3,5	5,8
	φ	88	87	82	75	65	64	72	78	84	86	89	89	80
Pori	x_V	3,0	2,8	3,3	4,3	5,9	8,1	9,8	9,8	7,9	6,0	4,5	3,5	5,8
	φ	87	85	81	76	67	66	73	78	83	85	88	87	80
Turku	x_V	3,1	3,0	3,4	4,4	5,9	8,1	9,9	9,9	8,1	6,2	4,7	3,7	5,9
	φ	89	88	82	76	66	64	72	77	84	87	90	90	80
Tampere	x_V	2,8	2,6	3,1	4,1	5,7	7,9	9,5	9,5	7,7	5,8	4,4	3,3	5,5
	φ	87	85	80	74	65	64	70	76	83	85	89	88	79
Lahti	x_V	2,7	2,5	3,1	4,3	6,0	8,4	10,1	10,0	7,9	5,8	4,4	3,3	5,7
	φ	88	85	81	76	67	67	74	80	86	88	91	89	81
Lappeenranta	x_V	2,5	2,5	3,1	4,1	5,7	8,0	9,7	9,8	7,8	5,7	4,3	3,1	5,5
	φ	88	86	81	75	64	64	70	77	84	87	91	89	80
Jyväskylä	x_V	2,5	2,4	3,0	3,9	5,5	7,8	9,4	9,4	7,3	5,5	4,1	3,0	5,5
	φ	89	87	81	74	66	65	72	80	85	88	91	89	81
Vaasa	x_V	2,9	2,7	3,2	4,2	5,6	7,9	9,5	9,5	7,6	5,7	4,3	3,3	5,5
	φ	88	86	83	78	68	67	73	79	84	86	89	89	81
Kuopio	x_V	2,4	2,3	2,9	3,8	5,4	8,0	9,7	9,6	7,5	5,4	4,0	2,5	5,3
	φ	80	80	81	74	64	64	69	76	83	86	90	89	79
Joensuu	x_V	2,2	2,2	2,8	3,8	5,3	7,8	9,6	9,5	7,3	5,3	3,9	2,8	5,2
	φ	87	86	81	74	64	65	70	78	84	86	90	89	79
Kajaani	x_V	2,2	2,1	2,7	3,6	5,1	7,5	9,1	9,4	6,9	5,0	3,7	2,6	5,0
	φ	86	85	81	74	66	66	69	78	84	87	90	88	79
Oulu	x_V	2,3	2,2	2,8	3,7	5,2	7,6	9,2	9,2	7,0	5,1	3,7	2,8	5,1
	φ	86	85	81	75	66	65	69	77	82	85	88	87	79
Rovaniemi	x_V	2,0	2,0	2,6	3,4	4,6	6,9	8,5	8,3	6,5	4,5	3,2	2,4	4,6
	φ	88	87	83	75	66	64	68	76	84	89	92	90	80

Liite 3, osa 1/2. Auditorion sisäilman mikrobiselvityksen laboratoriotulokset

Näyte	Näytteotto-kohta	laboratorio- tutkimukset	Laboratorio-tulokset					
Pyyhintänäytteet 11/18								
P1	Auditorio poistumistie kytlin päältä	M2, THG, DG18	steriilit	3	1	144	-	144
			Aspergillus-ryhmä Nigri	31	8			
			Alternaria sp.	-	3			
			Cladosporium sp.	-	2			
			Penicillium sp.	1	1			
			Mucor sp.	-	1			
KAIKKI LAJIKKEET YHTEENSÄ:				35	16	144	-	144
P2	Auditorio tulo-iv kanavan kohdalla	M2, THG, DG18	Aureobasidium sp.	80	3	246	-	246
			Cladosporium sp.	-	4			
			hiivat	4	1			
			Penicillium sp.	3	-			
			Sphaeropsidales ryhmä	-	1			
			steriilit	-	1			
KAIKKI LAJIKKEET YHTEENSÄ:				87	10	246	-	246
P3	Auditorio taulun syvennyksen vaakapinta	M2, THG, DG18	Aspergillus-ryhmä Nigri	6	2	106	-	106
			steriilit	-	3			
			Cladosporium sp.	-	2			
			hiivat	1	2			
			Ulocladium sp.	-	1			
			Alternaria sp.	1	-			
Aspergillus versicolor	1	-						
KAIKKI LAJIKKEET YHTEENSÄ:				9	10	106	-	106
P4	Auditorio H112, seinän akustikkalevy, rihlauksen vaakataso	M2, THG, DG18	-	-	-	16	-	16
KAIKKI LAJIKKEET YHTEENSÄ:				-	-	16	-	16
Näyte	Näytteotto-kohta	laboratorio- tutkimukset	Laboratorio-tulokset					
Pyyhintänäytteet 02/19								
P1	Auditorio poistumistie kytlin päältä	M2, THG, DG18	hiivat	1	9	malja täynnä pesäkkeitä	1	malja täynnä pesäkkeitä
			Aspergillus-ryhmä Nigri	2	3			
			steriilit	2	-			
			Penicillium sp.	1	-			
			Cladosporium sp.	1	-			
KAIKKI LAJIKKEET YHTEENSÄ:				7	12	malja täynnä pesäkkeitä	1	malja täynnä pesäkkeitä
P2	Auditorio tulo-iv kanavan kohdalla	M2, THG, DG18	Penicillium sp.	1	69	12	1	13
			Aureobasidium sp.	34	-			
			hiivat	6	20			
			Penicillium sp.	3	-			
			Sphaeropsidales ryhmä	2	-			
			Acremonium sp.	1	-			
Phoma sp.	1	-						
KAIKKI LAJIKKEET YHTEENSÄ:				45	89	12	1	13
P3	Auditorio taulun syvennyksen vaakapinta	M2, THG, DG18	hiivat	2	4	malja täynnä pesäkkeitä	-	malja täynnä pesäkkeitä
			Aspergillus-ryhmä Nigri	4	1			
			Aureobasidium sp.	-	2			
			Penicillium sp.	1	1			
			Ulocladium sp.	-	1			
steriilit	1	-						
KAIKKI LAJIKKEET YHTEENSÄ:				8	9	malja täynnä pesäkkeitä	-	malja täynnä pesäkkeitä
P4	Auditorio seinän akustikkalevy, rihlauksen vaakataso	M2, THG, DG18	-	-	-	56	-	56
KAIKKI LAJIKKEET YHTEENSÄ:				-	-	56	-	56

Liite 3, osa 2/2. Auditorion sisäilman mikrobiselvityksen laboratoriotulokset

Näyte	Näyteetokohta	laboratorio- tutkimukset	Laboratorio-tulokset					
Pyyhintänäytteet 04/19								
		Ilmanäyte, kasvatusalustat	lajikkeet	M2 (homesienet) [pmy/g]	DG18 (homesienet) [pmy/g]	THG (bakteerit) [pmy/g]	THG (sädesienet) [pmy/g]	bakteerit, kokonaispitoisuus [pmy/g]
P1	Auditorio H112, poistumistie kytlin päältä	M2, THG, DG18	-	-	-	76	-	76
KAIKKI LAJIKKEET YHTEENSÄ:				-	-	76	-	76
P2	Auditorio H112, tulo-iv kanavan kohdalta	M2, THG, DG18	Penicillium sp.	1	2	58	1	59
			Aureobasidium sp.	2	-			
			hiivat	1	-			
KAIKKI LAJIKKEET YHTEENSÄ:				45	89	58	1	59
P3	Auditorio H112, taulun syvennyksen vaakapinta	M2, THG, DG18	-	-	-	68	-	68
KAIKKI LAJIKKEET YHTEENSÄ:				8	9	68	-	68
P4	Auditorio H112, seinän akustiikkalevy, rihlauksen vaakataso	M2, THG, DG18	Aspergillus versicolor	-	1	malja täynnä pesäkkeitä	-	malja täynnä pesäkkeitä
			Aureobasidium sp.	-	1			
			Scopulariopsis sp.	-	1			
KAIKKI LAJIKKEET YHTEENSÄ:				-	3	malja täynnä pesäkkeitä	-	malja täynnä pesäkkeitä

Näyte	Näyteetokohta	laboratorio- tutkimukset	Laboratorio-tulokset					
Ilmanäyte 04/19								
		Ilmanäyte, kasvatusalustat	lajikkeet	M2 (homesienet) [pmy/m³]	DG18 (homesienet) [pmy/m³]	THG (bakteerit) [pmy/m³]	THG (sädesienet) [pmy/m³]	bakteerit, kokonaispitoisuus [pmy/m³]
H112	Auditorio H112	M2, THG, DG18	-	-	-	21	-	21
KAIKKI LAJIKKEET YHTEENSÄ:				-	-	21	-	21