



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

TILAKOHTAISET ILMANVAIHTO- JA ILMANPUHDISTUSMENETELMÄT

Miranda Hytönen

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIikka

Kandidaatintyö

Helmikuu 2023

TIIVISTELMÄ

Tilakohtaiset ilmanvaihto- ja ilmanpuhdistusmenetelmät

Miranda Hytönen

Oulun yliopisto, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2023, 31 s.

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Iris Pulkkinen

Ilmanvaihdon tehtävä on ylläpitää hyvää sisäilman laatua ja tuoda tilaan puhdasta ilmaa. Riittävä ilmanvaihto on edellytys hyvälle sisäilmalle, jolla puolestaan on suuri vaikutus rakennuksen käyttäjien terveyteen, viihtyvyyteen ja suorituskykyyn. Ilmanvaihdon merkitys korostuu erityisesti sellaisissa tiloissa, joissa on useita käyttäjiä päivittäin. Esimerkki tällaisesta tilasta on opetusrakennus. Tutkimukset osoittavat, että riittämätön ilmanvaihto on myös yhteydessä esimerkiksi väsymykseen ja oppimisvaikeuksiin, minkä vuoksi riittävän ilmanvaihdon takaaminen olisi tärkeää opetusrakennuksissa. Tavallisimmat ilmanvaihtomenetelmät ovat painovoimainen ilmanvaihto, koneellinen poisto- sekä koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto. Ilmanvaihtomenetelmät voidaan jakaa tilakohtaisiin ja keskitettyihin menetelmiin. Tilakohtainen ilmanvaihtomenetelmä on ratkaisu, jossa tilan ilmanvaihtokoneen vaikutusalue on juuri kyseinen tila, kun taas keskusilmanvaihdon vaikutusalue on koko rakennus. Ilmanvaihtomenetelmien lisäksi on olemassa ilman puhdistamiseen kehitettyjä menetelmiä. Tutkimuksen tarkoitus on selvittää, millaisia tilakohtaisia ilmanvaihto- ja ilmanpuhdistusmenetelmiä on olemassa, ja arvioida niiden soveltuvuutta opetusrakennuksiin. Tutkimus on toteutettu kirjallisuusselvityksenä, ja siinä on esitelty tavallisimpia ilmanvaihtomenetelmiä ja niiden tehostamistapoja, joitakin tilakohtaisia menetelmiä sekä ilmanpuhdistustekniikoita.

Asiasanat: ilmanvaihto, ilmanpuhdistus, tilakohtainen ilmanvaihto

ABSTRACT

Room-based ventilation and air purification techniques

Miranda Hytönen

University of Oulu, Degree Programme of Civil Engineering

Bachelor's thesis 2023, 31 pp.

Supervisor(s) at the university: Iiris Pulkkinen

The purpose of ventilation is to maintain good indoor air quality and supply fresh air to the indoor space. Adequate ventilation is the requirement for good indoor air which has a great effect on the health, comfort and efficiency of the occupants in the building. Ventilation is more important in buildings with many daily occupants. An example of this is an educational building. According to studies, insufficient ventilation is linked to tiredness and learning difficulties. On that basis, guaranteeing sufficient ventilation in educational buildings is important. The most conventional ventilation techniques are natural ventilation, mechanical exhaust and mechanical supply and exhaust ventilation. Ventilation techniques can be divided into decentralized and centralized methods. Decentralized ventilation system has a coverage area of only the exact room whereas centralized ventilation system affects around the whole building. In addition to ventilation techniques, there are methods developed for air purification. The aim of this thesis is to investigate decentralized ventilation and air purification techniques existing and assess their applicability in educational buildings. This thesis is carried out as a literature survey and it introduces the most conventional ventilation techniques and how to enhance them, some decentralized ventilation techniques, and air purification methods.

Keywords: ventilation, air purification, decentralized ventilation

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
SISÄLLYSLUETTELO.....	4
MERKINNÄT JA LYHENTEET	5
1 JOHDANTO	6
1.1 Tutkimuksen tausta	6
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja menetelmät	7
2 ILMANVAIHTOMENETELMÄT.....	8
2.1 Tavanomaiset ilmanvaihtomenetelmät.....	8
2.2 Ilmanvaihdon tehostaminen	10
2.3 Ilman laadun parantaminen ilmastoinnilla	12
3 ILMANPUHDISTUSMENETELMÄT	14
3.1 Suodatus ja adsorptio	15
3.2 Fotokatalyyttinen hapetus (PCO).....	17
3.3 Ei-terminen plasma (NTP)	18
4 TILAKOHTAINEN ILMANVAIHTO JA -PUHDISTUS.....	19
4.1 Ilmanvaihdon riittävyys	19
4.2 Ilmanjako.....	21
4.3 Ilmanpuhdistimet.....	24
5 POHDINTA	25
LÄHDELUETTELO.....	27

MERKINNÄT JA LYHENTEET

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Amerikkalainen lämmitys-, ilmanvaihto-, ilmastointi- ja jäähdytysjärjestelmien suunnittelua ja rakentamista edistävä ammattiliitto.
DOAS	Ilmastointijärjestelmä (eng. dedicated outdoor air system).
ePM _x	Vähimmäiserotusaste alle x mikrometrille (µm) pienhiukkasille, eli nykyisen ISO 16890 -standardin mukainen suodatinluokka.
ICTHS	Itsenäinen lämpötilan ja kosteuden säätöjärjestelmä
NTP	Ei-terminen plasma
ODA	Ulkoilmaluokka
PCO	Fotokatalyyttinen hapetus
PM _x	Pienhiukkaset (eng. particulate matter), jotka ovat läpimitaltaan alle x mikrometriä (µm).
ppm	Miljoonasosa. 10 000 ppm = 1 %.
RakMK	Suomen rakentamismääräyskokoelma
SHRTD	Vapaata lämpöä poistava päätelaite
SUP	Tuloilmaluokka
VOC	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (eng. volatile organic compounds).

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Ilmanvaihtojärjestelmien tarkoituksena on ylläpitää rakennuksen käyttäjille miellyttäviä olosuhteita sekä riittävän hyvää sisäilman laatua. Sisäilman laatuun vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa ilman vaihtuvuus, sisäilman epäpuhtaudet, ilmankosteus ja lämpötila. Ihmiset viettävät 80–90 % elämästään sisätiloissa, ja sisäilman laadulla on iso vaikutus rakennuksen käyttäjien terveyteen sekä työskentelytehokkuuteen. Vaikka asumisolaja ja rakentamista koskevat standardit ovat ajan saatossa parantuneet, ilmanvaihtoon ja sisäilman laatuun liittyvät ongelmat ovat lisääntyneet. (Yu et al. 2009)

Riittävän tehokkaan ilmanvaihdon merkitys korostuu erityisesti rakennuksissa, joissa on useita käyttäjiä, kuten esimerkiksi kouluissa ja päiväkodeissa. Opetusrakennusten huono sisäilman laatu on maailmanlaajuinen ongelma, joka aiheuttaa terveysriskejä rakennuksen käyttäjille (Uotila et al. 2022). Riittämätön ilmanvaihto yhdistettynä lukuisten synteettisten kemikaalien käyttöön rakennuksissa johtaa pienhiukkasten sekä VOC-yhdisteiden kohonneisiin pitoisuuksiin sisäilmassa (Yu et al. 2009). Näiden lisäksi riittämätön ilmanvaihto johtaa usein sisäilman hiilidioksidipitoisuuksien nousemiseen (Uotila et al. 2022).

Hyvällä ilmanvaihdolla on todettu olevan vaikutuksia terveyteen. Se on ensisijainen tekijä terveellisen sisäilman laadun ylläpidossa ja hillitsee ilmateitse tarttuvien infektioiden leviämistä (McNeill et al. 2022). Lasten altistuminen ilmansaasteille on ongelmallista sen vuoksi, että heidän keuhkonsa ja immuunijärjestelmänsä eivät ole vielä täysin kehittyneitä. Lasten keuhkojen pinta-ala suhteessa kehon massaan on myös suurempi kuin aikuisilla, ja lapset hengittävät tavanomaisesti 50 % enemmän ilmaa suhteessa kehon massaan. (Schwartz 2004) Sisäilman laadun on myös todettu vaikuttavan oppimiseen, minkä vuoksi hyvän sisäilman ylläpitäminen on erityisen tärkeää kouluissa ja päiväkodeissa (Lestinen et al. 2021). Usean ihmisen oleskellessa samassa tilassa sisäilman hiilidioksidipitoisuus kasvaa (Choe et al. 2022). Halgamugen (2009) tutkimuksen mukaan sisäilman korkea hiilidioksidipitoisuus voi aiheuttaa rakennuksen käyttäjille huimausta, pääkipua sekä toimintakyvyn alenemista. Sisäilman

pienhiukkasten, hiilidioksidin sekä VOC-yhdisteiden pitoisuuksiin sisäilmassa voidaan vaikuttaa hyvällä ilmanvaihdolla, mutta myös erilaisilla ilmanpuhdistusmenetelmillä.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja menetelmät

Tämän tutkimuksen päätavoitteena on selvittää, millaisia tilakohtaisia ilmanvaihto- ja ilmanpuhdistusmenetelmiä on olemassa, ja miten ne soveltuvat opetusrakennuksiin. Tutkimus keskittyy etsimään erityisesti opetusrakennuksiin soveltuvia tilakohtaisia ilmanvaihto- ja ilmanpuhdistusmenetelmiä, sillä opetusrakennuksissa riittävän ilmanvaihdon tärkeys korostuu. Lisäksi tutkimuksen tarkoituksena on perehtyä erilaisiin tapoihin tehostaa tavallisimpia ilmanvaihtoratkaisuja. Tutkimuksessa pyritään tarkastelemaan eri ratkaisuja rakennuksen käyttäjien, eli tässä tapauksessa oppilaiden ja henkilökunnan kannalta. Tavoitteena on löytää ilmanvaihto- ja ilmanpuhdistusmenetelmiin liittyvää tietoa, jonka avulla tutkimuksessa voidaan arvioida kunkin menetelmän soveltuvuutta opetusrakennuksiin. Tämän lisäksi keskeisenä tutkimuskysymyksenä on selvittää, miten määritellään riittävä ilmanvaihto. Tässä tutkimuksessa ei vertailla ilmanvaihtojärjestelmien energiatehokkuutta tai taloudellisuutta. Tutkimus toteutetaan kirjallisuusselvityksenä.

2 ILMANVAIHTOMENETELMÄT

Rakennuksen käyttötarkoituksella on merkitystä, kun valitaan sopivinta ilmanvaihtomenetelmää. Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D2 (2012) määrätään ilmanvaihtojärjestelmien suunnittelusta ja rakentamisesta seuraavaa: ilmanvaihtojärjestelmä tulee suunnitella ja rakentaa rakennuksen suunnitellun käyttötarkoituksen pohjalta niin, että se omalta osaltaan antaa edellytykset terveelliselle, turvalliselle ja viihtyisälle sisäilmastolle tavallisissa sääoloissa sekä käyttötilanteissa. Tavallisimpien ilmanvaihtomenetelmien lisäksi on olemassa harvinaisempia ilmanvaihtomenetelmiä, joista puhutaan tässä tutkimuksessa vaihtoehtoisina ilmanvaihtomenetelminä. Ilmanvaihdon toimivuutta voidaan myös parantaa erilaisilla tehostusmenetelmillä.

2.1 Tavanomaiset ilmanvaihtomenetelmät

Hengityслиitto esittelee tavanomaisiksi ilmanvaihtojärjestelmiksi painovoimaisen ja koneellisen ilmanvaihdon. Koneellinen ilmanvaihto voi tarkoittaa joko koneellista poistoilmanvaihtoa tai sekä koneellista tulo- että poistoilmanvaihtoa. Koneellinen poistoilmajärjestelmä tarkoittaa ilmanvaihtojärjestelmää, joka poistaa ilmaa rakennuksesta koneellisesti esimerkiksi huippuimurin tai poistoilmaventtiilin päälle asennetun puhaltimen avulla. Raitis ulkoilma virtaa asunnon oleskelutiloihin korvausilmaventtiilien kautta ja ilma poistetaan koneellisesti likaisten tilojen poistoilmaventtiileistä poistohormiin. Erityisesti koneellisessa poistoilmanvaihdossa korostuu korvausilman riittävyys, sillä mikäli korvausilmaventtiilejä ei ole riittävästi, korvausilma tulee tilaan rakenteiden ja niiden liitosten kautta ilmavuotoina. Tällöin korvausilma ei ole puhdasta. (Hengityслиitto 2022) Koneellinen tulo- ja poistoilmajärjestelmä puolestaan toimii kokonaisuudessaan koneellisesti. Koneellinen tulo- ja poistoilmajärjestelmä poistaa ilman rakennuksesta puhaltimen avulla koneellisesti ja tuo puhaltimen avulla tilalle ulkoilmaa suodatettuna sekä lämmitettynä tai jäähdytettynä (RakMK D2/2012).

Painovoimaisen ilmanvaihdon toimintaperiaatteena on korkeus- ja lämpötilaerot ulko- ja sisätilojen välillä sekä tuulen aikaansaamat paine-erot (RakMK D2/2012). Raitis ulkoilma kulkee asunnon oleskelutiloihin korvausilmaventtiilien kautta ja poistuu likaisten tilojen poistoilmaventtiileiden kautta poistohormeihin (Hengitysliitto 2022). Rakennuksessa ei saa yhdistää painovoimaista ja koneellista ilmanvaihtoa siten, että ilman virtaussuunnat huonetilojen välillä ja ilmanvaihtokanavissa voivat muuttua suunnitelluista (RakMK D2/2012).

Kuuluvaisen et al. (2018) mukaan painovoimaisen ilmanvaihdon erityispiirre on se, että ilmavirta vaihtelee sääolosuhteiden, vuorokauden ajan ja vuodenajan mukaan. Tämän takia järjestelmän laskennallisen vaatimuksenmukaisuuden osoittaminen ja käyttöönoton yhteydessä tapahtuva mittaaminen on haasteellisempaa verrattuna koneellisiin järjestelmiin (Kuuluvainen et al. 2018). Lämpimällä ja tuulettomalla säällä painovoimainen ilmanvaihto toimii heikoinen, ja ilmanvaihto voi tällöin olla olematonta (Hengitysliitto 2022).

Useissa maissa käytetään painovoimaista ilmanvaihtoa sekä ikkunoiden ja ovien kautta tapahtuvaa tuuletusta ainoana ilmanvaihtomenetelmänä opetusrakennuksissa. Esimerkiksi isossa osassa Yhdysvaltoja on tavallista, että kouluissa ja yliopistoissa ilmanvaihto perustuu ainoastaan painovoimaiseen ilmanvaihtoon yhdistettynä tuuletukseen. Moni opetusrakennus Yhdysvalloissa ei täytä ASHRAE:n mukaista ilmanvaihdon suunnittelun standardia. (ASHRAE 2019, McNeillin et al. 2022 mukaan) Myös Euroopan maissa painovoimainen ilmanvaihto on yleinen ilmanvaihtomenetelmä kouluissa. WHO:n vuonna 2015 julkaistun raportin mukaan 86 % kouluista toimi painovoimaisella ilmanvaihdolla. Cuce et al. (2019) on analysoinut painovoimaisen ilmanvaihdon variaatioita, toimintaperiaatteita ja rajoitteita opetusrakennuksissa. Koska painovoimaisen ilmanvaihdon toimivuus riippuu muun muassa sääolosuhteista, joudutaan menetelmää tarpeen mukaan tehostamaan, mikäli halutaan taata riittävä ilmanvaihto.

2.2 Ilmanvaihdon tehostaminen

Jos rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmä ei itsessään riitä takaamaan terveellistä, turvallista ja viihtyisää sisäilmastoa, voidaan ilmanvaihtoa tehostaa eri tavoin. Painovoimaisen ilmanvaihdon tapauksessa toimivan ilmanvaihdon edellyttämää paine-eroa ei synny silloin, kun sisä- ja ulkotilan välillä ei ole lämpötilaeroa ja sää on tuuleton. Tällöin painovoimaista ilmanvaihtojärjestelmää tulisi avustaa sopivalla menetelmällä. (Kuuluvainen et al. 2018).

Hengityслиiton (2022) mukaan painovoimaista ilmanvaihtoa voidaan tehostaa esimerkiksi asentamalla poistoilmahormin päähän vedonparantajia, jotka toimivat tuulen voimalla, tai tuulenojaimia. Tuulenojaimen asentaminen poistoilmahormin päähän rajoittaa ilman takaisinvirtausta (Kuuluvainen et al. 2018). Painovoimaista ilmanvaihtoa voidaan myös tehostaa puhalltimilla, jotka varmistavat riittävät ilmavirrat. Menetelmää kutsutaan puhallinavusteiseksi ilmanvaihdoksi. (Kuuluvainen et al. 2018; Hengityслиitto 2022) Toinen kesäajan paine-eron puuttumista kompensoiva ratkaisu on esimerkiksi aurinkoavusteinen painovoimainen ilmanvaihto (Kuuluvainen et al. 2018).

Puhallinavusteinen ilmanvaihto

Puhallinavusteinen painovoimainen ilmanvaihto tarkoittaa järjestelmää, jossa poistoilmahormit on varustettu poistoilmapuhalltimella, joka ei saa aikaan merkittävää painehäviötä ollessaan pysäytettynä. Tähän tarkoitukseen sopii esimerkiksi harvalapainen aksiaalipuhallin, jonka voi varustaa ohjausautomaatiolla. Ohjauksen perusteena voi olla muun muassa sisäilman hiilidioksidi- ja/tai kosteuspitoisuus. Suomessa puhallinavusteisten painovoimaisten ilmanvaihtojärjestelmien käytöstä on vain vähän kokemuksia suhteellisen lyhyeltä ajalta. (Kuuluvainen et al. 2018)

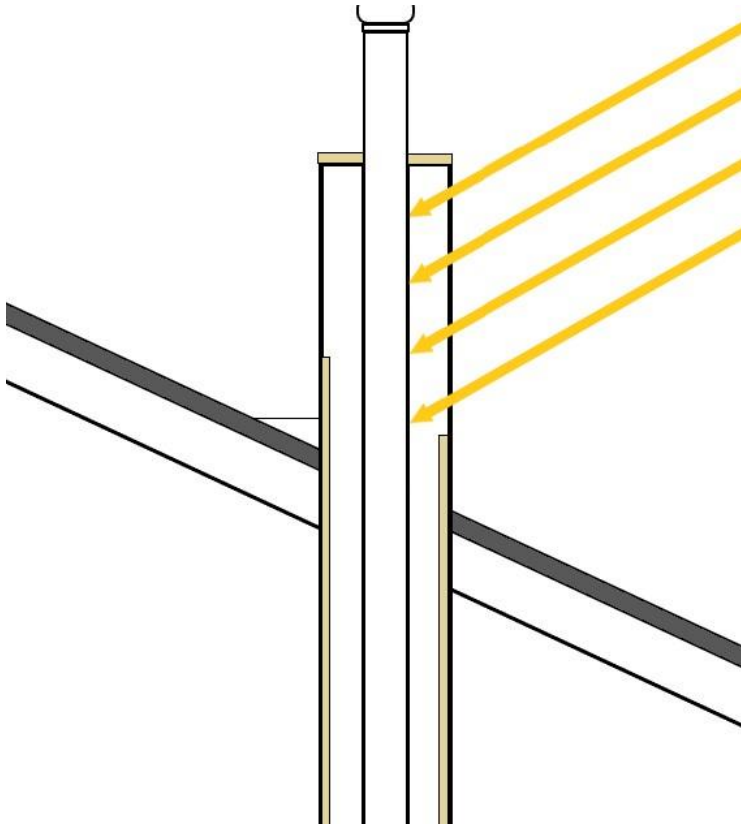
Vornanen-Windqvist et al. (2018) on tutkinut ilmanvaihdon parantamista koulurakennuksessa, jossa on sekä koneellisella ilmanvaihdolla että puhallinavusteisella painovoimaisella ilmanvaihdolla toimivia alueita. Mittaukset toteutettiin luokkahuoneissa, joissa oli puhallinavusteinen ilmanvaihtojärjestelmä. Tutkittu

ilmanvaihtojärjestelmä onnistui tuottamaan riittävän ilmanvaihdon, ja ilmanvaihdon parantamisen jälkeen VOC-pitoisuudet laskivat huomattavasti.

Aurinkoavusteinen ilmanvaihto

Aurinkoavusteisen painovoimaisen ilmanvaihdon toiminta perustuu paine-eron tehostamiseen poistoilmahormissa auringon lämmön avulla. Auringon lämpö tavoittaa poistoilmahormin yläosan, joka ulottuu vesikatolle. Aurinko lämmittää lasin läpi tummapintaisia poistoilmakanavia, jotka sijaitsevat lämpöeristetyissä koteloissa. Auringon lämmittämä ilma nousee poistoilmahormissa, sillä se on kylmää ilmaa harvempaa. Menetelmän tehokkuus vaihtelee säätilan mukaan, ja se toimii parhaiten aurinkoisella säällä. Aurinkoavusteista ilmanvaihtomenetelmää kutsutaan myös aurinkohormiksi. Aurinkohormia on kokeiltu Suomessa toistaiseksi vain yksittäisissä rakennuksissa. (Kuuluvainen et al. 2018) Kuvassa 1 esitetään aurinkoavusteisen ilmanvaihdon toimintaperiaate Kuuluvaisen et al. (2018, s. 4) kuvaa mukailten.

Suhendri et al. (2018) on tutkinut aurinkohormin käyttöä painovoimaisen ilmanvaihdon rinnalla alakoulun ilmanvaihtostrategiana. Strategian on oletettu toimivan tehokkaammin lämpimässä ilmastossa (Awbi 2010, Suhendrin et al. 2018 mukaan). Cucen et al. (2019) mukaan menetelmä ei sovellu opetusrakennuksiin erityisen kylmillä tai kuumilla ilmastovyöhykkeillä, tai alueille, joissa on vakavia ääni- tai ilmansaasteita. Ilmastotekijöiden lisäksi aurinkohormin korkeus on yksi merkittävimmistä muuttujista tutkittaessa aurinkohormin käyttöönoton vaikutuksia koulurakennuksessa (Suhendri et al. 2018).



Kuva 1. Aurinkohormin toimintaperiaate (mukaien Kuuluvainen et al. 2018).

2.3 Ilman laadun parantaminen ilmastoinnilla

Sisäilman laatuun ja lämpöviihtyvyyteen voidaan vaikuttaa hyvällä ilmastoinnilla. Ilmastoinnin ja ilmanvaihdon ero määritellään seuraavasti: ilmanvaihto vaihtaa ilmaa poistaen epäpuhtaan ilman ja tuoden tilalle raikasta ulkoilmaa, kun taas ilmastointi jäädyttää tai lämmittää ilmaa lisäten tilan viihtyisyyttä. Ilmastointilaitte imee huoneilmaa sisäänsä puhaltaen jäähtyneen ilman takaisin viilentämään huonetta. Lämmin ilma johdetaan ulos poistoputkella esimerkiksi tuuletusikkunan kautta. Tällöin osa laitteen läpi virtaavasta ilmasta poistuu sisätilasta, mutta tilalle ei tule uutta puhdasta ilmaa. (Rakentaja.fi 2022)

Sisäilman laatuun liittyy oleellisesti lämpöviihtyvyys, johon voidaan vaikuttaa esimerkiksi ilmalämpöpumpulla, johon kuuluu sisä- ja ulkoyksikkö sekä niiden välinen putkisto kylmäaineelle. Sisäyksikkö kierrättää tilan ilmaa samalla viilentäen tai lämmittäen sitä. Kylmäaineen virtaussuunta riippuu siitä, käytetäänkö laitetta

viilentämiseen vai lämmittämiseen. (Rakentaja.fi 2022) Kyseessä ei ole ilmastointilaitte, vaikka viilennettäessä ilmalämpöpumpun toiminta muistuttaa ilmastointilaitetta. Ilmastointi voidaan toteuttaa myös vaihtoehtoisilla menetelmillä. Yu et al. (2009) esittelee kolme vaihtoehtoista ilmastointimenetelmää, jotka ovat DOAS-järjestelmä (eng. dedicated outdoor air system), itsenäinen lämpötilan ja kosteuden säätöjärjestelmä (ICTHS) sekä jäähdytyskatto yhdistettynä syrjäytysilmanvaihtoon.

DOAS-järjestelmän tekniikoita on aiemmin hyödynnetty alalla laajalti, mutta järjestelmän potentiaali on ilmennyt vasta tekniikoiden yhdistyessä uudeksi, mullistavaksi konseptiksi (Yu et al. 2009). Järjestelmän vaikutusalue on koko rakennus, joten kyseessä ei ole tilakohtainen ratkaisu. Tyypilliseen DOAS-järjestelmään kuuluu tavallisesti kylmä lähde, ulkoilman prosessointiyksikkö, vapaata lämpöä poistava päätelaite (SHRTD), lämmönsiirrin sekä automatisoitu ohjausjärjestelmä, joka on systeemille välttämätön (Yin ja Mumma 2003, Yu et al. 2009, s. 6–7 mukaan). SHRTD voi tarkoittaa joko jäähdytyskattoa tai puhallinkonvektoria. SHRTD:n tuloventtiilin veden lämpötilaa säädellään sisätilan kastepistelämpötilan mukaan. Laite toimii täysin kuivissa oloissa, eikä kondenssiveden muodostumista tarvitse murehtia. (Yu et al. 2009)

ICTHS-järjestelmän toiminta perustuu kosteutta säätelevään kuivausainejärjestelmään ja lämpötilaa säätelevään lämmitys-/viilennysjärjestelmään. Kuivausainejärjestelmä poistaa ilmankosteutta kesällä ja lisää sitä talvella. Järjestelmällä on positiivisia vaikutuksia sisäilman laatuun, sillä sen lisäksi että ICTHS ei tuota kondenssivettä pinnoilleen, nestemäinen kuivausaine pystyy poistamaan useita epäpuhtauksia ilmavirrasta. ICTHS on tilakohtainen ilmastointijärjestelmä. (Yu et al. 2009)

Jäähdytyskatto ja syrjäytysilmanvaihto palvelevat eri tarkoituksia, ja tutkimuksessa esitetään, että niiden yhdistetyllä käytöllä on hyviä puolia. Syrjäytysilmanvaihto eliminoi hyvin sisäilman epäpuhtauksia ja parantaa ilmanlaatua, mutta saattaa huonontaa sisätilan lämpöviihtyvyyttä. Jäähdytyskatto puolestaan palvelee rakennuksen käyttäjiä hyvin lämpöviihtyvyyden kannalta, mutta ei pysty yksin parantamaan sisäilman laatua. Yhdessä käytettyinä jäähdytyskatto ja syrjäytysilmanvaihto kompensoivat toistensa haittapuolia ja siten sekä parantavat sisäilman laatua että lämpöviihtyvyyttä. (Yu et al. 2009)

3 ILMANPUHDISTUSMENETELMÄT

Sisäilman laadun hallinta on luokkahuoneissa välttämätöntä. Koska opetusrakennuksissa on tavallisesti suuri määrä ihmisiä suhteellisen pienessä tilassa, sisäilman laadulla on iso merkitys. Oppilaat viettävät suurimman osan ajasta luokkahuoneissa, ja altistuvat tällöin sisäilman epäpuhtauksille. (Choe et al. 2022) Sisäilman epäpuhtaudet voidaan jaotella kaasumaisiin sekä hiukkasmaisiin epäpuhtauksiin. Kaasumaisia sisäilman epäpuhtauksia ovat pääasiassa hiilimonoksidi, hiilidioksidi, rikkidioksidi, typen oksidit, otsoni, radon ja VOC-yhdisteet. Muun muassa VOC-yhdisteitä vapautuu sisäilmaan kemikaaleista, joita nykyään laajalti käytetään sisätiloissa sisustus- ja rakennusmateriaaleina. Hiukkasmaisia epäpuhtauksia voi sekä syntyä sisätiloissa että kulkeutua rakennuksen ulkopuolelta rakennuksen sisälle. Ulkoilman hiukkasmaisten epäpuhtauksien kulkeutuminen tapahtuu esimerkiksi ovien ja ikkunoiden rakojen kautta sekä ilmanvaihtojärjestelmän tuodessa raitista ilmaa sisätilaan. (Yu et al. 2009) Ulkoilman hiukkasmaiset epäpuhtaudet voivat kulkeutua sisätiloihin myös oppilaiden vaatteiden mukana. Opetusrakennuksissa sisäilman pienhiukkaspitoisuuksiin vaikuttaa muun muassa se, onko rakennuksessa kaappeja ulkovaatteille ja kengille. Esimerkiksi kenkäkaapin käyttö opetusrakennuksissa vähentää merkittävästi luokkahuoneiden pienhiukkaspitoisuuksia (Choe et al. 2022).

Riittävä ilmanvaihto ei aina yksinään takaa hyvää sisäilman laatua. Esimerkiksi ikkunan avaaminen voi tehostaa painovoimaista ilmanvaihtoa, mutta sillä voi olla myös negatiivisia vaikutuksia saastuneen ilman virratessa suodattamattomana sisätilaan (Choe et al. 2022). Riittävän ilmanvaihdon ohella sisäilman laatua voidaan parantaa erilaisilla ilmanpuhdistusmenetelmillä, joilla voidaan parhaimmillaan vähentää kaasumaisten ja hiukkasmaisten epäpuhtauksien määrää sisäilmassa olennaisesti. Choe et al. (2022) osoittaa tutkimuksessaan, että tarkastelluissa kouluissa ilmanpuhdistimilla pystyttiin vähentämään luokkahuoneiden pienhiukkaspitoisuuksia noin 30 %, mikä tässä tapauksessa laski pienhiukkaspitoisuudet sallittuihin rajoihin.

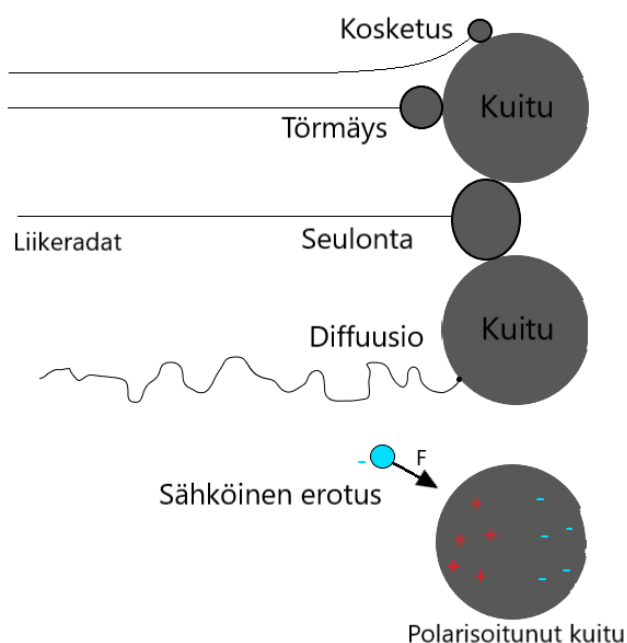
Nykyään on olemassa lukuisia ilmanpuhdistusmenetelmiä, jotka tähtäävät sisäilman epäpuhtauksien vähentämiseen. Pääasiallisiksi ilmanpuhdistusmenetelmiksi Yu et al. (2009) esittelee suodatuksen, adsorption, fotokatalyyttisen hapetuksen (PCO) sekä negatiivisten ilmaionien ja ei-termisen plasman (NTP) käytön. Tekniikoita hyödynnetään

tilakohtaisissa ilmanpuhdistimissa. Tilakohtaisia ilmanpuhdistimia on olemassa lukuisia erilaisia, ja erilaisia sisäilman epäpuhtauksia poistetaan eri puhdistusmenetelmillä (Merikari 2022).

3.1 Suodatus ja adsorptio

Suodatus on varsin tehokas menetelmä, kun halutaan parantaa sisäilman laatua, ja ilmansuodattimet ovat tärkeä osa kaikissa ilmanvaihtojärjestelmissä ja ilmanpuhdistimissa (Yu et al. 2009). Kuuluvaisen et al. (2018) mukaan ilmanvaihtojärjestelmä voidaan kuitenkin suunnitella myös ilman suodatusta ulkoilman laadun ollessa riittävän hyvä. Vastaavasti suodatus on välttämätön sellaisilla rakennuspaikoilla, joiden läheisyydessä sijaitsee useita vilkkaita liikenneväyliä (Kuuluvainen et al. 2018).

Vaikka kaikkien ilmansuodattimien tehtävä on jokseenkin sama, on niiden toimintaperiaatteissa ja sovelluskohteissa eroja. Kuitusuodattimet, kuten HEPA- ja ePM-suodattimet keräävät ilman pienhiukkasia eri mekanismeilla riippuen pienhiukkasen koosta. Hiukkasten tartuntatapoja ovat kosketus, törmäys, seulonta, diffuusio ja sähköinen erotus. (Air Cleaners 2018) Nämä mekanismit on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Pienhiukkasten tartuntatavat (Air Cleaners 2018).

Aktiivihiihliisuodattimet poistavat ilman haitallisia kaasuja, kuten aldehydejä, hiilivetyjä, orgaanisia happoja fyysisen adsorption ja otsonia kemiallisen adsorption vaikutuksesta. On myös olemassa sähkösuodattimia, jotka keräävät hiukkasia sähköstaattisen vetovoiman avulla. Hiukkaset varautuvat korkean jännityksen vaikutuksesta, jonka jälkeen vastakkain varautunut pinta kerää hiukkaset sähköstaattisen vetovoiman ansiosta. Negatiivisia ilmaioneja kerätään myös ionisaattoreilla, jotka pääpiirteittäin toimivat samalla tavalla kuin sähkösuodattimet. Ilman mikrobin tuhoamiseen käytetään UVC-valoa. UV-säteily tunkeutuu mikro-organismien, kuten bakteerien tai virusten soluihin, ja joko tappaa tai deaktivoi ne muuttamalla solujen DNA:ta. (EPA 2018)

Kuitusuodattimilla tuloilman vaadittu suodatustaso riippuu sisäilman laadulle asetetuista vaatimuksista sekä ulkoilman laadusta ja hiukkaspitoisuudesta. Suodatinluokan valinnassa hyödynnetään tuloilma- (SUP) ja ulkoilmaluokkia (ODA). Rakennusmääräyskokoelman D2/2012 mukaan tuloilman suodatuksessa ilmansuodattimien erotusaste suunnitellaan yleensä olemaan vähintään 80 % halkaisijaltaan 1,0 µm tai sitä pienemmille hiukkasille (PM₁). Uusi SFS-EN ISO 16890 pyrkii yhdistämään amerikkalaisen ja eurooppalaisen standardin, ja standardi korvasi RakMK:n D2-osan ohjeistuksen kokonaisuudessaan vuonna 2018 (Kukkonen 2017). Standardi määrittelee ilmansuodattimien PM₁-, PM_{2.5}- ja PM₁₀-hiukkasten suodatukseen liittyvän tehokkuusluokituksen (Eurovent 2018).

Esimerkiksi SUP2-luokkaa käytetään keskitason hygieniavaatimusten täyttämiseen, ja myös koulut ja päiväkodit kuuluvat tähän luokkaan. SUP2-luokalle tuloilman PM_{2.5}-pitoisuuden vuosikeskiarvo saa olla korkeintaan 5 µg/m³ ja PM₁₀-pitoisuus korkeintaan 10 µg/m³. Eurovent Association on valmistellut ohjeistuksen suodatinluokan valintaan ISO 16890 -standardin perusteella. Taulukossa 1 on esitetty suositellut vähimmäiserotusasteet eri SUP- ja ODA-luokkien yhdistelmille mukaillen Euroventin ohjeistusta. Taulukkoon on sisällytetty SUP-luokat 1–3. Merkinnällä ePM_x tarkoitetaan vähimmäiserotusastetta eli nykyisen ISO 16890 -standardin mukaista suodatinluokkaa. Ulkoilman hiukkaspitoisuusluokkien lisäksi on olemassa vastaavat luokat ulkoilman kaasumaisille pitoisuuksille. (Camfil 2022) On huomioitava, että hiukkassuodattimien ohella tulisi käyttää tapaukseen soveltuvaa kaasusuodatinta tilanteen niin vaatiessa (Camfil 2022; Kukkonen 2017).

Taulukko 1. Vähimmäiserotusasteet eri SUP- ja ODA-luokille (mukailten Camfil 2022).

ULKOILMA [µg/m ³]			TULOILMA		
			SUP 1 PM _{2,5} ≤ 2,5 PM ₁₀ ≤ 5	SUP 2 PM _{2,5} ≤ 5 PM ₁₀ ≤ 10	SUP 3 PM _{2,5} ≤ 7,5 PM ₁₀ ≤ 15
LUOKKA	PM _{2,5}	PM ₁₀	ePM ₁	ePM ₁	ePM _{2,5}
ODA 1	≤ 5	≤ 15	70 %	50 %	50 %
ODA 2	≤ 7,5	≤ 22,5	80 %	70 %	70 %
ODA 3	> 7,5	> 22,5	90 %	80 %	80 %

Adsorptio tarkoittaa fyysistä prosessia, joka tapahtuu aineen kiinnittyessä materiaalin, kuten tässä tapauksessa suodatinmateriaalin pinnalle tai huokosiin. Adsorptio tapahtuu helpommin matalammassa lämpötilassa ja kosteudessa. Aktiivihiihen lisäksi suodatinmateriaaliksi kelpaa esimerkiksi silikageeli, aktiivialumiini, zeoliitit, synteettiset polymeerit ja huokoiset savimineraalit. Kaasumaiset epäpuhtaudet adsorboituvat suodatinmateriaaliin joko fyysisen adsorption kautta tai reagoimalla kemiallisesti. (EPA 2018)

3.2 Fotokatalyyttinen hapetus (PCO)

Tilakohtaisissa ilmanpuhdistimissa voidaan hyödyntää myös PCO-tekniikkaa. PCO on innovatiivinen ja potentiaalinen ratkaisu sisäilman puhdistamiselle (Yu et al. 2009). Tekniikalla muunnetaan useita sisäilman epäpuhtauksia hiilidioksidiksi ja vedeksi hyödyntämällä UV-valoa (EPA 2018; Yu et al. 2009). PCO:n reaktionopeus riippuu kosteudesta, valonlähteestä, tuloilmakanavan epäpuhtauspitoisuudesta, fotokatalyytin ominaisuuksista ja reaktorin tyypistä (Yu et al. 2009). Jotkin PCO-tekniikkaa hyödyntävät puhdistimet vaativat lisäksi adsorboivan ilmansuodattimen, joka mahdollisesti suodattaa osan reaktiossa syntyneistä haitallisista sivutuotteista. PCO-tekniikalla toimivista puhdistimista on tehty joitakin tutkimuksia, jotka osoittavat suurta vaihtelua puhdistimien tehokkuudessa. (EPA 2018) Merkittävä löytö on muun muassa Chenin et al. (2005) tutkimus, joka vertaili VOC-yhdisteiden poistamistehokkuutta 15 erilaisella ilmanpuhdistimella. Tutkitut PCO-laitteet yhdistettyinä ilmanpuhdistimiin eivät poistaneet tehokkaasti mitään tilan VOC-yhdisteistä, joita normaalisti löytyy sisäilmasta (ks. EPA 2018 s. 30).

3.3 Ei-terminen plasma (NTP)

NTP-tekniikkaa hyödyntävät ilmanpuhdistimet ovat tilakohtaisia plasman käyttöön perustuvia ilmanpuhdistimia. NTP-tekniikalla tuotetaan atomaarista happea (O), radikaaleja sekä otsonia, jotka voivat poistaa useita sisäilman epäpuhtauksia, kuten VOC-yhdisteitä, aerosolihiukkasia ja mikrobeja. (Yu et al. 2009) Myös EPA:n (2018) mukaan laboratoriotestien tulokset osoittavat, että plasmapuhdistimet pystyvät poistamaan joitakin kaasuja ja hiukkasia sekä tappamaan tai deaktivoimaan sisäilman mikrobeja todella tehokkaasti. NTP-tekniikalla toimivien puhdistimien käytössä syntyy kuitenkin haitallisia sivutuotteita, kuten otsonia ja typen oksideja (Yu et al. 2009; EPA 2018). Typen oksidien ja otsonin määrä riippuu sisäilman kosteudesta (Yu et al. 2009). Van Durmen et al. (2007) mukaan otsonipitoisuus sekä typen oksidien pitoisuudet laskevat suhteellisen kosteuden ollessa korkeampi (ks. Yu et al. 2009, s. 15). NTP voidaan yhdistää johonkin toiseen ilmanpuhdistusmenetelmään, kuten PCO-tekniikkaan tai adsorptioon, mutta niiden toiminnasta käytännössä on olemassa hyvin vähän tutkimustietoa (EPA 2018).

4 TILAKOHTAINEN ILMANVAIHTO JA -PUHDISTUS

Tilakohtainen ilmanvaihto tarkoittaa ratkaisua, jossa tilan ilmanvaihtokoneen vaikutusalue on juuri kyseinen tila. Ulkoilma tuodaan ilmanvaihtokoneelle kanavien kautta, jonka jälkeen ilma lämmitetään lämmön talteenottojärjestelmän (LTO) ja jälkilämmityspatterin avulla haluttuun lämpötilaan. Lämmitetystä ulkoilmasta tulee tällöin sisätilan tuloilmaa. Tulo- ja poistoilmanjako toteutetaan tavallisesti RakMK D2-osan mukaisesti. Vastaavasti poistokanavat johdetaan ilmanvaihtokoneelle, jossa LTO-järjestelmä kerää poistoilmasta lämpöä tuloilman lämmittämistä varten. Tämän jälkeen poistoilma johdetaan ulos. Tilakohtainen ilmanvaihto poikkeaa keskitetystä siten, että keskitetyn ilmanvaihdon toiminta perustuu yhteen keskusilmanvaihtokoneeseen, jonka vaikutusalue kattaa kaikki rakennuksen tilat. (Ryyppö 2005, Osmanin 2014, s. 8 mukaan)

4.1 Ilmanvaihdon riittävyys

Jotta voitaisiin puhua hyvästä sisäilman laadusta, ilmanvaihdon tulisi olla riittävä. Ilmanvaihdon riittävyttä voidaan tutkia eri näkökulmista. Ilmanvaihdon riittävyys pohjautuu muun muassa annettuihin raja-arvoihin sekä ohjeisiin. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista määrittelee toimenpiderajat muun muassa VOC-yhdisteille, hiilidioksidille, hiukkasmaisille epäpuhtauksille ja mikrobeille. Riittäväällä ilmanvaihdolla voidaan pienentää sisäilman epäpuhtauspitoisuuksia, mutta ilmanvaihdon riittävyteen vaikuttaa myös moni muu tekijä. Rakennuksen käyttäjien kokemuksilla on myös merkitystä. Käyttäjien tyytyväisyyttä sisäilman laatuun arvioidaan koetun sisäilman laadun (PAQ) avulla (Choe et al. 2022). Ihmisten kokemukset sisäilman laadusta ovat yksilökohtaisia ja voivat poiketa toisistaan merkittävästi.

Vaikka ilmanlaatua saataisiin parannettua joltain osin esimerkiksi ilmanpuhdistimen avulla, muutos ei välttämättä ole riittävä toisesta näkökulmasta katsottuna. Choe et al. 2022 onnistui tutkimuksessaan alentamaan sisäilman pienhiukkaspitoisuuksia ilmanpuhdistimilla merkittävästi, mutta ilmanvaihto todettiin siitä huolimatta riittämättömäksi enemmistössä tutkituista kouluista sisäilman hiilidioksidipitoisuuden

ylittäessä School Health Actin asettaman standardiarvon (1000 ppm) (Choe et al. 2022). Ilmanpuhdistimet eivät tässä tapauksessa riitä takaamaan hyvää sisäilman laatua hiilidioksidipitoisuuden osalta, vaikka ne toimivatkin hyvinä ilmanvaihdon tehostajina laskemalla pienhiukkaspitoisuuksia.

Sisäilman hiilidioksidipitoisuus on yksi mittari ilmanvaihdon riittävyyden tarkastelussa, sillä uloshengityksessä syntyvää hiilidioksidia kertyy liikaa sisäilmaan ilmanvaihdon ollessa riittämätön. Hiilidioksidipitoisuuden ollessa 1000–2000 ppm oppilaat saattavat kokea epämiellyttäviä oireita. Hiilidioksidipitoisuuden ylittäessä 2000 ppm, oireet, kuten pahoinvointi ja väsymys yleistyvät enemmän, ja toimintakyky yleensä laskee. (Wagrocki et al. 2007, Choen et al. 2022, s. 7–8 mukaan)

Hiilidioksidipitoisuuksille on määritelty rajat sisäilmastoluokituksen mukaan. Sisäilmastoluokkia ovat S1, S2 ja S3, joista S1 vastaa parasta luokitusta. Ympäristöministeriön asetus 1009/2017 uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta määrittelee, että sisäilman hetkellisen hiilidioksidipitoisuuden suunnitteluarvo tilan suunniteltuna käyttöaikana saa olla enintään 1450 mg/m³ eli 800 ppm suurempi kuin ulkoilman vastaava pitoisuus. Arvo vastaa sisäilmastoluokkaa S3. Vastaavasti luokassa S2 rajana on 550 ppm ja luokassa S1 350 ppm ulkoilman pitoisuutta suurempi pitoisuus. Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus on tavallisesti noin 0,04 % eli 400 ppm. (Sisäilmayhdistys 2008)

Ilmanvaihdon toimivuuden tarkastelussa voidaan tutkia tilan ilmavirtoja. Ympäristöministeriön asetuksessa 1009/2017 määritetään vähimmäisilmavirraksi 6 dm³/s tai 0,35 (dm³/s)/m² lattian pinta-alaan nähden riippuen, kumpi mainituista on suurempi (Sisäilmayhdistys 2008). Epäpuhtauskuorman ollessa suurempi ilmanvaihdon tarve kasvaa. Ulkoilmavirta määräytyy pääasiassa henkilömäärän perusteella, ja opetusrakennuksissa käytetään yleisenä mitoitusperusteena 6 dm³/s henkilöä kohti. Lisäilmanvaihdolle on tarvetta liikuntatiloissa sekä taide- ja taitoaineiden tiloissa, joissa opetuksessa hyödynnettävien laitteiden ja aineiden käyttö voi lisätä ilmanvaihdon tarvetta. Huoneilman epäpuhtauksien minimoimiseksi voidaan tarvita moninkertaisia ilmavirtamääriä verrattuna perusilmanvaihtoon. Rakennuksen painesuhteet eivät kuitenkaan saisi muuttua pitkäaikaisesti, kun ilmanvaihtoa tehostetaan. Siirtoilmareittien

painohäviö ei saa kasvaa liian suureksi (yli 5 Pa). Hiilidioksidipitoisuuden pohjautuvaa laskentaa voidaan hyödyntää täydentämään ilmanvaihdon mitoitusta ja käytön suunnittelua. Laskennalla voidaan arvioida suunnitellun ilmanvaihdon riittävyttä. (Finvac 2019)

Ilmanvaihdon suunnittelu tulee tehdä aina tilojen ja niissä harjoitettavan toiminnan mukaan. Esimerkiksi korkeissa tiloissa asetuksen mukaiset henkilö- tai neliöperusteet eivät riitä hyvän sisäilman laadun takaamiseen ilman vaihtuvuuden jäädessä liian pieneksi. Sisäilman epäpuhtauksien lisäksi ilmanvaihdon riittävyttä voidaan arvioida myös esimerkiksi sisäilman kosteuden perusteella. Ilmanvaihdon ei tule aiheuttaa rakenteille kosteusriskejä, eli ilman kosteus ei saa nousta haitallisen korkeaksi. Tilat, joissa on huomattavia sisäisiä kosteuskuormia, kuten esimerkiksi kuivaushuoneet, suunnitellaan ulkoilmaan nähden lievästi alipaineisiksi (2–5 Pa), jotta kosteus ei pääse kertymään rakenteisiin. (Aavaharju et al. 2018)

4.2 Ilmanjako

Ilmanvaihtoon vaikuttaa merkittävästi ilmanjako. Ilmanjako suunnitellaan toimimaan mahdollisimman tehokkaasti. Periaatteena on, että tuloilma virtaa oleskelutiloihin ja epäpuhtaudet siirtyvät poistoilman päätelaitteita kohti. Rakennuksessa ilman tulee virrata sisäilmaltaan puhtaammista tiloista epäpuhtaampiin. Tuloilma ei saa virrata oleskeluvyöhykkeen läpi suoraan poistoilman päätelaitteisiin, vaan ilman tulisi virrata tehokkaasti koko oleskeluvyöhykkeelle. Kun tilassa on sisäilman laatua heikentäviä epäpuhtauskuormia, kuten pölyä, kaasuja tai höyryjä, on ne huomioitava kohdepoistolla. Tarvittavien kohdepoistojen suunnittelussa tulee ottaa huomioon tilan painesuhteiden ylläpitäminen eli tuloilman hallittu tuonti tilaan. WC-, pesu- ja siivoustilat, joihin kuljetaan työ-, oleskelu- tai käytävätiloista, varustetaan tavallisesti erillisellä poistoilmajärjestelmällä. Kuitenkin WC- ja vastaavien tilojen poistoilma voidaan siirtää kyseisten tilojen yläpuolisen kokoojakanavan kautta muiden tilojen poistoilmajärjestelmään. (Aavaharju et al. 2018)

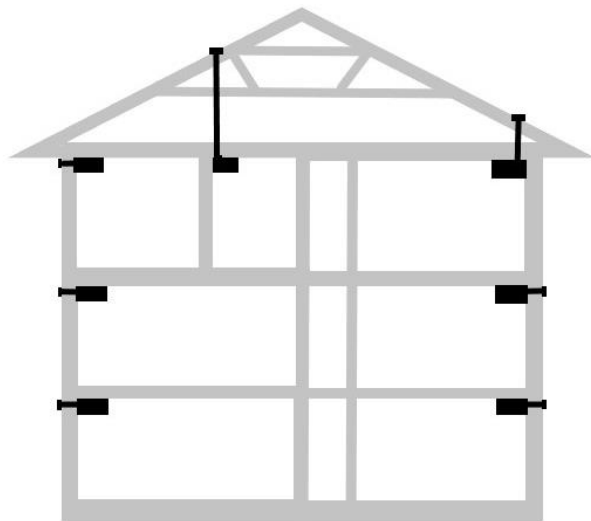
Poistoilmaa voidaan joissain tapauksissa hyödyntää palautus- ja siirtoilmana. Poistoilman käyttöön liittyy kuitenkin rajoituksia, jotka perustuvat poistoilmaluokitukseen.

Poistoilmaluokkia on yhteensä 4, joista luokan 1 ilma sisältää vähiten epäpuhtauksia. Luokan 1 poistoilma soveltuu palautus- ja siirtoilmaksi, ja poistoilman epäpuhtaudet ovat tässä luokassa pääsääntöisesti peräisin ihmisistä ja rakenteista. Esimerkiksi opetustiloista peräisin oleva ilma kuuluu tähän luokkaan. Luokan 2 ilma voidaan johtaa siirtoilmana esimerkiksi WC-tiloihin, mutta sitä ei käytetä tilojen palautusilmana. Koulun tai päiväkodin ruokailutilan poistoilmaa voidaan esimerkiksi hyödyntää WC-tilojen siirtoilmana. Ulkoiluvälinevarastot ja WC-tilat kuuluvat luokkaan 3, ja tällaisissa tiloissa esimerkiksi kosteus ja hajut huonontavat olennaisesti poistoilman laatua. Luokkaan 4 puolestaan kuuluu sellaisia tiloja, jotka ovat tekemisissä maalien, liuottimien tai muiden kemikaalien kanssa. Luokkien 3 ja 4 poistoilma ei sovellu palautus- tai siirtoilmaksi. Lisäksi tilan käyttötarkoitus rajoittaa poistoilman käyttöä. Sen lisäksi, että palautusilmana ei saa käyttää poistoilmaluokkien 2, 3 ja 4 ilmaa, palautusilmaa ei saa käyttää tuloilmana tietyissä tiloissa, kuten oppilaitosten opetustiloissa sekä päiväkotien lepo-, leikki- ja ryhmätiloissa. (Aavaharju et al. 2018)

Vaihtoehtoisia ilmanvaihtomenetelmiä

Henkilökohtainen ilmanvaihto eli PV on yksi potentiaalinen ilmanvaihtomenetelmä, jota on tutkittu keinona vähentää sisäilman epäpuhtauksia. Chunwen ja Li (2018) tutkivat henkilökohtaista ilmanvaihtoa mahdollisena ratkaisuna pisaratartuntojen torjuntaan tiloissa, joissa ihmisiä on tavallisesti tiheästi. PV on kehittynyt ilmanvaihtomenetelmä, joka tuottaa puhdasta ilmaa suoraan tilan käyttäjien hengitysvyöhykkeille (Chunwen & Li 2018). Ilma voidaan johtaa suoraan hengitysvyöhykkeelle asettamalla henkilökohtainen ilmanvaihtolaite esimerkiksi työpöydälle tai epäsuorasti tuolin selkänojan kautta. Ilman kulkiessa suoraan hengitysalueelle se ei pääse sekoittumaan huoneilmaan, mikä voi muun muassa ehkäistä infektioiden leviämistä ilmateitse. Menetelmää on tutkittu Suomessa Otaniemen LVI-tekniikan laitoksessa väitöskirjatutkimuksessa, mutta laite ei ole vielä saavuttanut suurta suosiota. (Mölsä 2020) Henkilökohtaisen ilmanvaihtomenetelmän nähdään soveltuvan hyvin luokahuoneisiin, sillä se on Chunwenin ja Lin (2018) mukaan oikein käytettynä hyvin tehokas ilmanvaihtomenetelmä. Tutkimukset osoittavat, että henkilökohtaisella ilmanvaihdolla voidaan hillitä aerosolihiukkasten leviämistä ja parantaa ilmanlaatua merkittävästi (Chunwen & Li 2018, s. 875).

Osman (2014) esittelee opinnäytetyössään tanskalaisen Airmaster-yhtiön tuottamia tilakohtaisia ilmanvaihtojärjestelmiä. Airmasterin ratkaisu on lähes kanavaton ilmanvaihtojärjestelmä, joka kulkee seinän läpi sisätilasta ulkotilaan. Järjestelmää on havainnollistettu kuvassa 3. Ratkaisu on Osmanin (2014) mukaan hiljainen ja energiankulutukseltaan pieni järjestelmä tehokkaalla lämmöntalteenotolla. Airmasterin laitteita ohjataan automaattisella valvontajärjestelmällä, joka säätelee sisäilman laatuun vaikuttavia tekijöitä, kuten lämmitystä, kosteutta ja hiilidioksidia. Ongelmana järjestelmässä on se, että sen käyttö ei ole Suomessa mahdollista, sillä asennustapa on RakMK:n D2-osan vastainen jäteilman kulkiessa seinästä ulos. D2:n mukaan jäteilma tulee johtaa kanavia pitkin ulos. Airmasterin järjestelmää on kuitenkin käytetty ympäri Eurooppaa esimerkiksi kouluissa ja sairaaloissa, missä sen on todettu toimivan hyvin. (Osman 2014) Airmaster-laitteen tapaisella ratkaisulla voisi Osmanin (2014) mukaan olla mahdollisuutensa Suomessa, mikäli seinästä ulos puhallettavan jäteilman jälkitoimenpiteitä ja kustannusarvioita tutkittaisiin. Järjestelmällä on siis selvästi potentiaalia, mutta sen käyttö Suomessa vaatisi lisää tutkimista.



Kuva 3. Airmasterin esimerkki kanavattomasta tilakohtaisesta ilmanvaihtojärjestelmästä (mukaillen Airmaster 2014, Osmanin 2014 mukaan).

Cao et al. (2014) on esittänyt tutkimuksessaan muita vaihtoehtoisia ilmanvaihtomenetelmiä sekä havainnollistanut erilaisia syrjäytysilmanvaihtoa käyttävien menetelmien toimintaperiaatteita. Erinäiset tutkimukset osoittavat, että tuloilma- ja poistoilmakanavien sijoittelulla ja määrällä on merkitystä syrjäytysilmanvaihdon vaikutuksiin (ks. Cao et al. 2014, s. 176).

4.3 Ilmanpuhdistimet

Ilmanpuhdistimissa voidaan hyödyntää erilaisia menetelmiä ja niiden yhdistelmiä. Erilaisia ilmanpuhdistusmenetelmiä on esitelty luvussa 3. Ilmanpuhdistimet ovat pääasiassa vapaasti siirrettäviä laitteita, joten ne ovat esimerkki tilakohtaisesta ilmanpuhdistusmenetelmästä. Cheek et al. (2021) on tutkinut ilmanpuhdistimien vaikutuksia sisäilman laatuun muutamassa käyttöympäristössä asuinrakennuksissa sekä kouluissa eri puolilla maailmaa. Tutkimuksessa arvioidaan ilmanpuhdistimien käytön vaikutuksia muun muassa lasten terveyteen sekä $PM_{2.5}$ -konsentraatioihin kouluympäristössä. Cheekin et al. (2021) mukaan sisäilmaston pienhiukkaspitoisuuksia voidaan alentaa ilmanpuhdistimilla ja parhaimmillaan $PM_{2.5}$ -konsentraatiot laskivat 49 % tutkimukseen osallistuneissa kouluissa. $PM_{2.5}$ -konsentraatioon lasketaan ne sisäilman pienhiukkaset, joiden halkaisija on korkeintaan 2,5 mikrometriä. (Cheek et al. 2021) Ilmanpuhdistimien käytössä on oletettavasti merkittävää se, miten puhdistimet sijoitellaan. Ilmanpuhdistimien sijoitteluun liittyvää tieteellistä tietoa ei kuitenkaan juuri löytynyt.

5 POHDINTA

Hyvä ilmanvaihto on edellytys hyvälle sisäilmalle, mutta ei automaattisesti takaa sitä. Ilmanvaihdon riittävyys määritellään monen tekijän pohjalta, ja esimerkiksi sisäilman pienhiukkas- ja hiilidioksidipitoisuuksille on omat suosituksensa. Yksi ilmanvaihto- tai ilmanpuhdistusmenetelmä ei luonnollisesti ratkaise kaikkia sisäilman laatuun liittyviä ongelmia, sillä sisäilman laatuun vaikuttaa niin pienhiukkasten, VOC-yhdisteiden ja mikrobien kuin hiilidioksidin ja muiden kaasumaisten epäpuhtauksien pitoisuudet sisäilmassa. Näiden tekijöiden lisäksi myös esimerkiksi lämpötila, kosteus ja ilman vaihtuvuus vaikuttavat sisäilman laatuun. Yhdistelemällä eri menetelmiä voidaan todennäköisemmin saavuttaa riittävä ilmanvaihto sekä hyvä sisäilman laatu.

Pohdittaessa kunkin menetelmän soveltuvuutta opetusrakennuksiin on huomioitava lasten erityinen herkkyys huonolle sisäilmalle sekä sisäilman laadun vaikutukset muun muassa suorituskykyyn ja oppimiseen. Vaikka ilmanpuhdistusmenetelmät tähtäävät puhtaampaan sisäilmaan, eivät niistä kaikki välttämättä sovellu opetusrakennuksiin. Tutkimuksessa ilmeni, että jotkin ilmanpuhdistusmenetelmät saattavat pahimmassa tapauksessa tuottaa itse sisäilman laatuun vaikuttavia haitallisia sivutuotteita. Tällaiset menetelmät eivät välttämättä sellaisinaan sovi päiväkoteihin tai kouluihin, mutta voivat toimia esimerkiksi koneellisen ilmanvaihdon tukena. Osa menetelmistä vaatisi kuitenkin lisää tutkimuksia siitä, onko niiden pitkäaikainen käyttö turvallista ja kannattavaa. Esimerkiksi NTP:n ja PCO:n käytöstä ilmanpuhdistimissa ei löytynyt riittävästi sellaista tietoa, joka tukisi menetelmien soveltuvuutta opetusrakennuksiin niiden tuottaessa haitallisia sivutuotteita. Yhdistelemällä NTP-, PCO- sekä muita tekniikoita keskenään voidaan mahdollisesti minimoida haitallisten sivutuotteiden syntyminen, mutta tutkimustietoa menetelmien yhteiskäytöstä tarvittaisiin lisää.

Vastaavasti kaikki ilmanvaihtomenetelmät eivät välttämättä sellaisinaan sovellu opetusrakennuksiin. Ongelmana voi olla esimerkiksi ilman huono vaihtuvuus tai riittämätön ilmansuodatustaso. Rakennuksissa, joissa on painovoimainen ilmanvaihto, ilma ei välttämättä vaihdu riittävän tehokkaasti lämpimällä ja tuulettomalla säällä. Tällöin ilmanvaihtoa voidaan tehostaa muun muassa aurinkohormilla tai puhaltimella. Aurinkohormin tai puhallinavusteisen ilmanvaihdon käytölle opetusrakennuksissa ei

ilmennyt tutkimuksessa esteitä. Rajoitteena aurinkohormin käytölle on erityisen kylmä tai kuuma ilmastovyöhyke sekä alueet, joissa on vakavia ääni- tai ilmansaasteita. Yleisesti voisi sanoa, että Suomessa sekä muualla Euroopassa aurinkohormi sekä puhallin soveltuvat tehostamaan opetusrakennuksen ilmanvaihtoa pois lukien nämä erityisolosuhteet. Kuitenkin tehostusmenetelmien käytöstä Suomessa on suhteellisen vähän tutkimustietoa.

Tilakohtaisten ilmanvaihto- ja ilmanpuhdistusmenetelmien käyttöön liittyy ilmiselviä etuja. Tilakohtainen ilmanvaihtojärjestelmä voi olla helpompi lisätä rakennukseen jälkeenpäin, mikäli ilmanvaihtojärjestelmä on tarpeen uusina. Samoin ilmanpuhdistimet, jotka tavallisesti ovat helposti siirrettävissä, ovat suhteellisen helppo ratkaisu rakennukseen, jossa sisäilman epäpuhtaudet ovat ongelmana. Sisäilman laatua voidaan tukea myös ilmastoinnilla, joka vaikuttaa sisäilman lämpöviihtyvyyteen ja suhteelliseen kosteuteen.

Henkilökohtainen ilmanvaihto eli PV sekä esimerkiksi Airmaster-yhtiön tuottama tilakohtainen ilmanvaihtojärjestelmä voisivat soveltua hyvin opetusrakennuksiin. Airmasterin kaltaista järjestelmää voidaan kuitenkin käyttää Suomessa vasta sitten, kun seinästä ulos puhallettavan jäteilman jälkitoimenpiteitä ja kustannusarvioita on tutkittu enemmän. Järjestelmän käytöllä on kuitenkin jo ollut positiivisia tuloksia Euroopan sairaaloissa ja kouluissa, mikä antaa viitteitä sen soveltuvuudesta Suomen opetusrakennuksiin. PV puolestaan on tutkimusten mukaan oikein käytettynä hyvin tehokas ilmanvaihtomenetelmä, jolla voidaan esimerkiksi vähentää pisaratartuntojen leviämistä. Esitetyn tutkimustiedon perusteella menetelmä voisi hyvinkin soveltua opetusrakennuksiin.

Parhaimmillaan eri menetelmiä yhdistelemällä voidaan saavuttaa riittävä ilman vaihtuvuus, hyvä sisäilman laatu ja näiden myötä oppilaiden riittävä suorituskyky sekä terveellinen ja turvallinen oppimisympäristö. Erilaisten ilmanvaihto- ja ilmanpuhdistusmenetelmien yhteiskäytöstä on mahdollisesti paljon hyötyä, mutta tutkimustietoa eri menetelmien käytöstä tarvittaisiin lisää.

LÄHDELUETTELO

Aavaharju, H., Hotokainen, J., Karkiainen, S., Koivula, U., Koskinen, E., Saari, M., Railio, J., Järvinen, J., Reinikainen, M., Hyvärinen, J., 2018. Sisäilmasto ja ilmanvaihto - opas [verkkodokumentti]. Talotekniikkainfo. Saatavissa: https://talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/talotekniikkainfo_sisisailmasto_ja_ilmanvaihto_-_opas_30.1.2018.pdf [viitattu 6.12.2022].

Airmaster, 2014. Decentralised ventilation [verkkodokumentti]. Aars: Airmaster. Saatavissa: <http://ipaper.ipapercms.dk/Airmaster/Decentralisedventilation/DecentralisedventilationUK/> [viitattu 21.12.2022].

Air Cleaners, 2018. Mechanisms Of Filtration [verkkodokumentti]. Brooklyn Park: Air Quality Engineering. Saatavissa: <https://www.air-quality-eng.com/air-cleaners/filtration-mechanisms/> [viitattu 29.1.2023].

ASHRAE, 2019. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Standing Standard Project Committee 62.1, ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019: 10 s.

Awbi, H., 2010. Basic concepts for natural ventilation of buildings [verkkodokumentti]. CIBSE BSG Seminar: Natural and Mixed Mode Ventilation Modelling. Saatavissa: <https://www.cibse.org/media/mtrlmv25/01-hazim-awbi-university-of-reading-basic-concepts-for-natural-ventilation-of-buildings-1.pdf> [viitattu 9.11.2022].

Camfil, 2022. Standardeja & Asetuksia, EN 16798-3 ja suodatinluokan valinta Eurovent 4/23-suosituksen mukaisesti [verkkodokumentti]. Espoo: Camfil. Saatavissa: <https://www.camfil.com/fi-fi/insights/standardeja-ja-asetuksia/ilmansuodattimen-valinta> [viitattu 15.11.2022].

Cao, G., Awbi, H., Yao, R., Fan, Y., Sirén, K., Kosonen, R., Zhang, J. 2014. A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings. *Building and Environment*, 73. S. 171-186.

Cheek, E., Guercio, V., Shrubsole, C., Dimitroulopoulou, S., 2021. Portable air purification: Review of impacts on indoor air quality and health. *Science of the Total Environment*, 766 (142585). S. 1-41.

Chen, R., Zhang, J., Zhang, Z., 2005. Performance of air cleaners for removing multiple volatile organic compounds in indoor air. *ASHRAE Transactions* 111:1101-1114.

Choe, Y., Shin, J., Park, J., Kim, E., Oh, N., Min, K., Kim, D., Sung, K., Cho, M., Yang, W., 2022. Inadequacy of air purifier for indoor air quality improvement in classrooms without external ventilation. *Building and Environment*, 207 A-osa. Artikkelin numero 108450.

Chunwen, X., Li, L., 2018. Personalized ventilation: One possible solution for airborne infection control in highly occupied space? *Indoor and Build Environment*, 27(7). S. 873-876.

Cuce, E., Sher, F., Sadiq, H., Cuce, P., Guclu, T., Besir, A., 2019. Sustainable ventilation strategies in buildings: CFD research. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 36 (100540). S. 1-10.

EPA (United States Environmental Protection Agency), 2018. Residential Air Cleaners – A Technical Summary [verkkodokumentti]. 3. Painos. Washington, D.C.: EPA. Saatavissa: https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-07/documents/residential_air_cleaners_-_a_technical_summary_3rd_edition.pdf [viitattu 19.12.2022].

Eurovent, 2018. Ilmansuodattimien EN ISO 16890 -luokituksen mukaisen suodatinluokan valinta yleisilmanvaihdon sovelluksiin [verkkodokumentti]. 2. painos. Bryssel: Eurovent. Saatavissa: https://talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/eurovent_rec_4-23_-_selection_of_en_iso_16890_rated_air_filter_classes_-_second_edition_-_2018_-_fi_-_web.pdf [viitattu 24.11.2022].

Finvac, 2019. Opas ilmanvaihdon mitoitukseen muissa kuin asuinrakennuksissa [verkkodokumentti]. Finvac. Saatavissa: https://finvac.org/wp-content/uploads/2020/06/Opas_ilmanvaihdon_mitoitukseen_muissa_kuin_asuinrakennuksissa_2019b.pdf [viitattu 6.12.2022].

Halgamuge, M., 2009. Ventilation efficiency and carbon dioxide (CO₂) concentration. PIER Online, 5 (7). S. 637–640.

Hengitysliitto, 2022. Ilmanvaihtojärjestelmät [verkkodokumentti]. Helsinki: Hengitysliitto. Saatavissa: <https://www.hengitysliitto.fi/kodin-sisailma-ja-kunnossapito/ilmanvaihto/ilmanvaihtojarjestelmat/> [viitattu 22.11.2022].

Kukkonen, E., 2017. Ilmanvaihtosuodatinten luokitus muuttuu [verkkodokumentti]. Espoo: Sisäilmayhdistys. Saatavissa: <https://www.sisailmautiset.fi/maaraykset/ilmanvaihtosuodatinten-luokitus-muuttuu/> [viitattu 30.11.2022].

Kuuluvainen, L., Lindberg, B., Lylykangas, K., Mikkola, J., Sainio, J., Vuolle, M., 2018. Painovoimainen ilmanvaihto opas [verkkodokumentti]. Ympäristöministeriö & Suomen Kulttuurirahasto. Saatavissa: <https://docplayer.fi/107596213-Painovoimainen-ilmanvaihto-opas.html> [viitattu 10.11.2022]. 12 s.

Lestinen, S., Kilpeläinen, S., Kosonen, R., Jokisalo, J., 2021. Impact of different mechanical ventilation strategies for night purging on indoor air quality in public buildings. E3S Web of Conferences, 246. Artikkelin numero 11003.

McNeill, V., Corsi, R., Huffman, J., King, C., Klein, R., Lamore, M., Maeng, D., Miller, S., Ng, N., Olsiewski, P., Pollitt, K., Segalman, R., Sessions, A., Squires, T., Westgate, S., 2022. Room-level ventilation in schools and universities. Atmospheric Environment: X, 13. Artikkelin numero 100152.

Merikari, A., 2022. Ilmanpuhdistimet poistavat epäpuhtauksia ja parantavat sisäilman laatua [verkkodokumentti]. Espoo: Sisäilmayhdistys. Saatavissa: <https://www.sisailmautiset.fi/uutiset/ilmanpuhdistimet-poistavat-epapuhtauksia-ja-parantavat-sisailman-laatua/> [viitattu 30.11.2022].

Mölsä, S., 2020. Ilmanvaihto voi ehkä levittää koronaa tai torjua sen leviämistä [verkkodokumentti]. Helsinki: Rakennuslehti. Saatavissa:

<https://www.rakennuslehti.fi/2020/03/ilmanvaihto-voi-levittaa-koronaa-tai-torjua-sen-leviamista/> [viitattu 22.1.2023].

Osman, M., 2014. Keskitetyn ja hajautetun ilmanvaihtojärjestelmän vertailu. Opinnäytetyö, Metropolia ammattikorkeakoulu.

Rakentaja.fi, 2022. Ilmanvaihtokone, ilmastointilaite vai ilmalämpöpumppu? [verkkodokumentti]. Helsinki: Rakentaja.fi. Saatavissa: https://www.rakentaja.fi/artikkelit/18356/ilmanvaihtokone_ilmastointilaite_vai_ilmalam-popumppu.htm [viitattu 22.11.2022].

RakMK D2, 2012. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto: 34 + 11 s.

Ryöppö, P., 2005. Keskitetyn ja asuntokohtaisen ilmanvaihtojärjestelmän vertailu asuinkerrostalossa. Opinnäytetyö, EVTEK-ammattikorkeakoulu.

Schwartz, J., 2004. Air pollution and children's health. *Pediatrics*, 113 (4). S. 1037–1043.

SFS-EN ISO 16890-1:2016. Yleisilmanvaihdon suodattimet. Osa 1: Tekniset määritelmät, vaatimukset ja hiukkasmaisen aineksen erotusasteeseen perustuva luokitusjärjestelmä (ePM). Suomen standardoimisliitto SFS: 65 + 44 s.

Sisäilmayhdistys, 2008. Ilmanvaihdon vaikutus [verkkodokumentti]. Espoo: Sisäilmayhdistys. Saatavissa: <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Sisailmasto/Ilmanvaihdon-vaikutus> [viitattu 2.12.2022]. Päivitetty 6.5.2020.

Sosiaali- ja terveysministeriö, 2015. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista. Helsinki: Sosiaali- ja terveysministeriö STM. 12 + 7 s.

Suhendri, Koerniawan, M., Alprianti, R., 2018. Solar chimney as a natural ventilation strategy for elementary school in urban area. *AIP Conference Proceedings*, 1984 (030007). S. 1-10.

Uotila, U., Saari, A., Junnonen, J., Eskola, L., 2022. Assessing ventilation strategies in a school with observed indoor air problems, 40 (15/16). Tampere: Tampereen yliopisto, TUNICRIS-julkaisut, 16 s.

Van Durme, J., Dewulf, J., Sysmans, W., Leys, C., Van Langenhove, H., 2007. Efficient toluene abatement in indoor air by a plasma catalytic hybrid system. *Applied Catalysis B: Environmental*, 74, S. 161–169.

Yin, P., Mumma, S.A., 2003. Study of the dedicated outdoor air system (1): a review. *HVAC*, 33 (6). S. 44–46.

Ympäristöministeriö, 2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta (1009/2017). Helsinki: Ympäristöministeriö. 16 + 6 s.

Yu, B., Hu, Z., Liu, M., Yang, H., Kong, Q., Liu, Y., 2009. Review of research on air-conditioning systems and indoor air quality control for human health. *International Journal of Refrigeration*, 32 (1). S. 3–20.

Vornanen-Windqvist, C., Salonen, H., Järvi, K., Andersson, M., Mikkola, R., Marik, T., Kredics, L., Kurnitski, J., 2018. Effects of ventilation improvement on measured and perceived indoor air quality in a school building with a hybrid ventilation system. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15 (1414). S. 1-18.

Wagrocki, P. & Wyon, D., 2007. The effects of outdoor air supply rate and supply air filter condition in classrooms on the performance of schoolwork by children. *HVAC&R Research*, 13 (2). S. 165-191.

World Health Organization, 2015. School Environment: Policies and Current Status [verkkodokumentti]. Kööpenhamina: World Health Organization. Saatavissa: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/276624/School-environment-Policies-current-status-en.pdf [viitattu 9.11.2022]. 82 s.