

Petri Nevalainen

*Aktiivihillisuodattimella varustetun ilmanpuhdistimen toimintaperiaate ja suorituskyky*



Opinnäytetyö  
Rakennusterveysasiantuntija  
RTA 2018 – 2019  
Helsinki, 20.5.2019

Rakennusterveysasiantuntijan koulutusohjelma 45 op. 20.5.2019

<b>Tekijä</b> Petri Nevalainen	<b>Ryhmä</b> RTA 2018 - 2019
<b>Opinnäytetyön nimi</b> Aktiivihiihluodattimella varustetun ilmanpuhdistimen toimintaperiaate ja suorituskyky	<b>Sivu- ja liitesivumäärä</b> 37
<p>Tässä opinnäytetyössä tutkittiin aktiivihiihluodattimella varustetun ilmanpuhdistimen kykyä poistaa sisäilman kemiallisia epäpuhtauksia ja käydään läpi aktiivihiihlu toimintaperiaate. Lisäksi työssä esitellään kevyesti muut ilmanpuhdistimien yleisimmät puhdistustekniikat, käydään läpi sisäilmaan liittyvää lainsäädäntöä ja pohditaan ilmanpuhdistimen valintaan vaikuttavia seikkoja.</p> <p>Huono sisäilma vähentää sisätilojen viihtyisyyttä ja alentaa työtehoa ja lisäksi se voi aiheuttaa terveyshaittoja ja jopa sairastuttaa vakavasti. Kaasumaisia epäpuhtauksia emittoituu sisäilmaan mm. rakennusmateriaaleista, kalusteista ja kemikaaleista. Kaasumaiset päästöt lisääntyvät rakennusmateriaalien vaurioituessa ja hajotessa. Kun saadaan selville mitä käyttäjille haittaa aiheuttavia epäpuhtauksia sisäilmassa on, ei korjaavia toimia saada aina aloitettua heti tai väistötiloja ei saada heti käyttöön. Tällaisissa tapauksissa voidaan ilmanpuhdistimia käyttää yhtenä väliaikaisena käyttöä turvaavana toimenä ennen kuin rakenteet ja olosuhteet tiloissa saadaan kuntoon. Niitä voidaan käyttää apuna myös erityisen puhtaita tiloja tarvitseville teknisesti kunnossa olevissa tiloissa. Ilmanpuhdistimien käyttö on aina arvioitava tapauskohtaisesti ja on tiedettävä mitä epäpuhtauksia sisäilmasta halutaan poistaa. Ilmanpuhdistimia käytettäessä on tilojen olosuhteiden ja tilojen käyttäjien altistumisen muutoksia seurattava ja on oltava valmius reagoida muuttuviin tilanteisiin.</p> <p>Ilmanpuhdistimissa yleisimmin käytetyt suodatustekniikat voidaan jaotella mekaaniseen suodattukseen, kemialliseen suodattukseen, fotokatalyyttiseen hapetukseen, elektrostaattiseen suodattukseen, ultraviolettisäteilytykseen ja ionisointiin. Työssä keskityttiin kemialliseen suodattukseen. Ilmanpuhdistimissa yleisimmin käytetty kemiallinen suodatinmateriaali on aktiivihiihlu. Se on sekä rakenteensa että ominaisuuksiensa osalta ainutlaatuinen. Se kykenee suodattamaan sekä orgaanisia että epäorgaanisia aineita. Aktiivihiihlu toiminta perustuu adsorptioon, jossa adsorbenttina toimiva kiinteä aine sitoo pinnalleen tiettyjä molekyyliä joko kemisorption tai fysisorption avulla.</p> <p>Tämän opinnäytetyön yhtenä johtopäätöksenä voidaan todeta, että aktiivihiihlu tehoaa eri tavoin erilaisiin kemiallisiin yhdisteisiin. Tehokkuuteen vaikuttaa myös mm. aktiivihiihlu laatu ja määrä, impregnointiaineet, puhaltimen tehokkuus ja laitteen sijainti suhteessa päästölähteeseen.</p> <p>Ilmanpuhdistinta valittaessa on huomioitava, että mikään ilmanpuhdistin ei tehoa kaikkiin epäpuhtauksiin ja eri puhdistustekniikat tehoavat eri epäpuhtauksiin. Puhtaan ilman tuotto (CADR) on oltava riittävän suuri puhdistettavan tilan kokoon nähden. Osa tekniikoista tuottaa haitallisia sivutuotteita kuten otsonia ja osalla laitteista on suuret melupäästöt. Jos laite on testattu vain yhdellä yhdisteellä, kertoo tulos vain laitteen tehosta kyseisen yhdisteen poistamisessa. Ilmanpuhdistimet vaativat lisää tutkimuksia, jotta saisimme tietää tarkemmin niiden vaikutuksista sisäilman laatuun ja voisimme käyttää niitä sisäilman laadun parantamiseen turvallisemmin mielin.</p>	
<b>Avainsanat</b> Adsorptio, aktiivihiihlu, ilmaakierrättävä ilmanpuhdistin, VOC- yhdisteet	<b>Luottamuksellisuus</b> Julkinen

<b>Author</b> Petri Nevalainen	<b>Class</b> RTA 2018 - 2019
<b>Title</b> Operation principle and performance of air cleaners with active carbon filters	<b>Number of pages and annexes</b> <b>37</b>
<p>In this thesis, the ability of an air purifier equipped with an activated carbon filter to remove indoor air pollutants and to introduce the principle of activated carbon was studied. In addition to this, the most common cleaning techniques of air purifiers are presented in the work, the legislation related to indoor air is reviewed and the factors influencing the selection of the air cleaner are presented.</p> <p>Poor indoor air reduces the comfort of the interior and reduces work efficiency, and can also cause health problems and even become seriously ill. Gaseous impurities are emitted to indoor air, eg. building materials, furniture and chemicals. Gaseous emissions increase as building materials are damaged and decomposed. When it comes to finding out what pollutants are causing harm to indoor air, it is not always possible to take corrective action right away or the emergency modes are not immediately available. In such cases, air purifiers can be used as one temporary use as a protective action before the structures and conditions in the premises are restored. They can also be used in technically well-maintained areas that require particularly clean spaces. The use of air purifiers must always be assessed on a case-by-case basis and it is necessary to know what impurities are to be removed from the indoor air. When using air cleaners, changes in the conditions of the premises and the exposure of the users of the premises must be monitored and prepared to react to changing situations.</p> <p>The most commonly used filtering techniques in air purifiers can be divided into mechanical filtration, chemical filtration, photocatalytic oxidation, electrostatic precipitation, ultraviolet irradiation and ionization. The work focused on chemical filtration. In air purifiers, the most commonly used chemical filter material is activated carbon. It is unique in both its structure and properties. It is capable of filtering both organic and inorganic materials. The action of activated charcoal is based on adsorption, in which a solid acting as an adsorbent binds certain molecules to its surface by either chemisorption or physisorption.</p> <p>One conclusion of this thesis is that activated carbon works differently on different chemical compounds. Effectiveness is also affected by, for example, quality and quantity of activated carbon, impregnating agents, fan efficiency and location of the device relative to the emission source. When selecting an air cleaner, it should be noted that no air cleaner is effective for all pollutants and different cleaning techniques are effective for different pollutants. Some of the techniques produce harmful by-products such as ozone and some of the devices have high noise emissions. The clean air output (CADR) must be large enough for the space to be cleaned. If the device has only been tested with one compound, the result will only indicate the power of the device to remove that compound. Air purifiers require more research in order to know more about their impact on indoor air quality, and we could use them to improve indoor air quality with a safer, more comfortable way.</p>	
<b>Keywords</b> Activated carbon, adsorption, air cleaner, volatile organic compounds	<b>Confidentiality</b> Public

## **Esipuhe**

Työnantajani ehdotettua muutamia erilaisia opinnäytetyön aiheita minulle kiinnostuin ilmanpuhdistin-aiheesta kutakuinkin heti. Yhtenä syynä oli se, että mielestäni käyttöä turvaavia nopeita ratkaisuja kuten ilmanpuhdistimia on perusteltua käyttää tietyissä tilanteissa ja tietyin ehdoin nimenomaan väliaikaisena apuna. Ilmanpuhdistimien käytön kohdalla pitää kuitenkin tietää mitä yhdisteitä niillä halutaan poistaa ja pitää pystyä tapauskohtaisesti todentamaan, että pitoisuudet saadaan laskettua halutulle tasolle ja niistä saadaan toivottua apua heikosta sisäilmasta kärsiville tilojen käyttäjille. Ennen tämän opinnäytetyön aloittamista minulla ei ollut tietoa ilmanpuhdistimien toiminnasta tai niiden vaikuttavuudesta. Tiesin myös, että tämän työn tekemiseksi joutuisin tutustumaan tähän kiinnostavaan aihealueeseen, jota ei välttämättä käytäisi normaali RTA-opintojen puitteissa tässä laajuudessa läpi.

Kiitos Inspector Sec Oy:lle ja kaikille kollegoilleni saamastani tuesta opinnäytetyöni tekemiseen. Suurin kiitos kuuluu kollegalleni, lopputyöni pääohjaajalle dosentti, RTA Olavi Vaittiselle, joka on ollut isona tukena ja kannustajana sekä opinnäytetyön tekemisessä että yhteisissä työprojekteissamme. Kiitos myös toimitusjohtaja Risto Salinille, joka oli toisena lopputyön ohjaajana. Kiitos Helsingin yliopistolle ja dosentti Markus Metsälälle, jotka mahdollistivat ilmanpuhdistimen testaamisen antamalla tilat ja mittalaitteet käyttöömme ja olemalla mukana ilmanpuhdistimen testeissä. Markus toimi myös opinnäytetyön ohjaajana. Lopuksi vielä iso kiitos kotijoukoilleni, jotka ovat antaneet minulle tarvitsemani tuen ja ajan opintojeni läpiviemiseen.

## Sisällys

<b>1 JOHDANTO</b> .....	6
<b>2 SISÄILMASTOLLE ASETETUT VAATIMUKSET LAINSÄÄDÄNNÖSSÄ</b> .....	8
2.1 Asumisterveysasetus .....	8
2.2 Työterveyslaitoksen viitearvoja .....	11
2.3 Sisäilmastoluokitus 2018 .....	15
<b>3 ILMANPUHDISTIMIEN SUODATUSTEKNIIKAT</b> .....	16
3.1 Mekaaninen suodatus .....	16
3.2 Fotokatalyyttinen hapetus.....	17
3.3 Elektrostaattinen suodatus.....	17
3.4 Ultraviolettisäteilytys.....	18
3.5 Ionisointi .....	18
3.6 Kemiallinen suodatus aktiivihiilen avulla.....	18
3.6.1 Adsorptioprosessin tehokkuus.....	20
3.6.2 Aktiivihiilen valmistus .....	20
3.6.3 Aktiivihiilen uudelleenaktivointi .....	23
<b>4 ILMANPUHDISTIMEN VALINTA</b> .....	24
<b>5 TUTKIMUSMENETELMÄT JA -JÄRJESTELYT</b> .....	26
<b>6 TUTKIMUSTULOKSET</b> .....	31
<b>7 JOHTOPÄÄTÖKSET</b> .....	35
<b>Kirjallisuusluettelo</b> .....	36

**Käytetyt termit ja lyhenteet:**

**Adsorbaatti:** Adsorboituva aine eli aine, jonka adsorbentti sitoo pinnalleen.

**Adsorbentti:** Adsorboiva aine on kiinteä aine, joka adsorboi adsorbaatteja pinnalleen.

**Adsorptio:** Adsorptio on reaktio, jossa adsorboiva kiinteä aine sitoo kaasumaisia aineita tai nesteitä pinnalleen ohueksi kalvoksi.

**CADR:** Clean air delivery rate, puhtaan ilman tuotto.

**Fysisorptio:** Fysikaalinen adsorptio, jossa adsorbentti sitoo adsorbaatin pinnalleen fysikaalisten van der Waalsin voimien avulla.

**Huokoskoko:** Aktiivihiileen aktivoinnin aikana muodostuneet huokokset jaetaan huokosten koon mukaan kolmeen kokoluokkaan: mikro-, meso- ja makrohuokosiin.

**Impregnaatti:** Aine, jolla aktiivihiili käsitellään adsorptiokyvyn kasvattamiseksi. Yleisesti käytettyjä impregnaatteja (kemikaaleja) ovat mm. metallien suolat, hapot ja jalometallit.

**Impregnointi:** Impregnoinnilla tarkoitetaan aktiivihiilen käsittelyä kemikaaleilla siten, että aktiivihiilen adsorptiokyky tiettyjä aineita kohtaan kasvaa.

**Kemisorptio:** Kemiallinen adsorptio, jossa aktiivihiileen impregnoitu kemikaali sitoo adsorbaatin aktiivihiilen pinnalle muodostaen kemiallisen sidoksen impregnointikemikaalin ja adsorbaatin välille.

**Molekyyli massa:** Molekyyli massa kertoo molekyylin massan atomimassayksiköissä (u tai amu).

**PAH:** Polysykliset aromaattiset hiilivedyt.

**Persentiili:** Ilmoittaa muuttujan arvon, jonka alapuolelle jakaumassa jää tapauksista 1 % (1. persentiili), 2 % (2. persentiili), jne. Esimerkiksi (P90) tarkoittaa, että 90 % tapauksista jää alle ilmoitetun muuttujan arvon.

**Ppb:** parts per billion, miljardisosa.

**Ppm:** parts per million, miljoonasosa.

**PTR-TOF-MS:** Proton-Transfer-Reaction Time-Of-Flight Mass Spectrometer. Protoninsiirtoreaktiolentoaikamassaspektrometri.

**Tolueenivaste:** Esimerkiksi asumisterveysasetuksen kemiallisten yhdisteiden toimenpiderajat on ilmoitettu tolueenivasteena (mitattu FID-ilmaisimella). Jos yhdiste analysoidaan sen omalla vasteella, tulee laboratorion muuntaa saatu tulos tolueenivasteeksi. Tällöin näytteiden tuloksia voidaan verrata asetuksen toimenpiderajoihin.

**TVOC:** Total Volative Organic Compounds. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuus.

**Van der Waalsin voima:** Van der Waalsin voimalla tarkoitetaan molekyylien välille muodostuvaa heikkoa vetovoimaa, joka johtuu molekyylien polarisaatiosta dipoleiksi. Polarisoituminen aiheutuu pääasiassa dispersiovoimista, jotka aiheutuvat molekyylien elektronitiheyden satunnaisesta vaihtelusta.

**VOC:** Volative Organic Compounds. Haihtuvat orgaaniset yhdisteet.

## 1 JOHDANTO

Vietämme lähes 90% ajastamme sisätiloissa ja hengitämme noin 15 000 litraa ilmaa yhden vuorokauden aikana. Huono sisäilma vähentää sisätilojen viihtyisyyttä ja alentaa työtehoa. Tämän lisäksi huono sisäilma voi aiheuttaa terveyshaittoja ja jopa sairastuttaa vakavasti. Sisäilmassa terveyshaittoja voivat aiheuttaa monet asiat kuten esimerkiksi ilman kaasumaiset tai hiukkasmaiset epäpuhtaudet, jotka korostuvat, jos ilmanvaihdossa on puutteita. Kosteusvaurioihin liittyvien terveyshaittojen epäillään johtuvan mikrobeille ja niiden aineenvaihduntatuotteille ja myrkyille (toksiineille) altistumisesta. Sisäilmasta oireilu on hyvin yksilöllistä ja samoissa olosuhteissa yksi saa oireita jo lyhyelläkin altistumisajalla ja toinen ei oireile lainkaan pitkänkään altistuksen jälkeen. Huono sisäilma voi aiheuttaa esimerkiksi silmien ärsytysoireita ja kutinaa, päänsärkyä, pahoinvointia, kurkun karheutta, pitkittyneitä infektioita, astmaa ja astman ja allergian oireiden pahenemista. Vakavasti sairastuneet saattavat lisäksi herkistyä ha-juille ja kemikaaleille. (Hengityслиitto 2016)

Hyvä sisäilmasto on yksi rakentamisen tärkeimpiä tavoitteita. Rakennusmateriaalien emissioiden suhteen Suomessa on saatu aikaan merkittävää parannusta sisäilman laatuun mm. M1-luokituksen käyttöönoton ansiosta. Joulukuuhun 2017 mennessä oli Rakennustietosäätiö myöntänyt ilmanvaihtotuotteiden puhtausluokituksen ja rakennusmateriaalien päästöluokituksen mukaisen M1-merkin noin 4 300 rakennusmateriaalille, kalusteelle ja ilmanvaihtotuotteelle. (Sisäilmastoluokitus 2018, s.2) Tästä huolimatta Suomessa on paljon rakennettuun ympäristöön kohdistuvaa korjausvelkaa ja myös sisäilmaongelmaisia kohteita on tutkittavana ja korjattavana valitettavan paljon.

Sisäilmaongelman aiheuttajan löydyttyä ei mahdollisia jatkotutkimuksia ja sisäilmaongelman korjaavia toimenpiteitä aina saada riittävän nopeasti käyntiin ja tällöin olisi hyvä varmistaa tilojen turvallinen käyttö siihen saakka, kunnes korjaavat toimenpiteet on saatu toteutettua. Tässä työssä on tarkoitus tutkia, kuinka tehokkaasti aktiivihiihellä varustettu ilmanpuhdistin toimii sisäilman kemiallisiin yhdisteisiin. Tutkimuslaitteena käytettiin karkeasuodattimella, impregnoidulla aktiivihiiლისuodattimella ja H13-luokan HEPA-suodattimella varustettua ilmanpuhdistinta. Tarkoitus oli testata, miten hyvin ilmanpuhdistin pystyy poistamaan sisäilmasta kemiallisia yhdisteitä. Lisäksi testattiin miten kyseisen ilmanpuhdistimen puhallinmoottorin tehoasetus ja ilmanpuhdistimen ja päästölähteen sijainti toisiinsa nähden vaikuttaa kemiallisten yhdisteiden kiinnisaamiseen.

Jos tiedetään, mitkä yhdisteet aiheuttavat tilojen käyttäjille haittaa, ja kyseiset yhdisteet pystytään laskemaan tiloissa riittävän alhaiselle tasolle, voidaan tiloja käyttää ilmanpuhdistimien avulla, kunnes väistötilat on löydetty, ongelman aiheuttaja on poistettu ja rakenteet korjattu. Jos ilmanpuhdistimet pystyvät poistamaan haittaa aiheuttavat yhdisteet riittävän tehokkaasti, voidaan ilmanpuhdistimia käyttää tämän lisäksi myös esimerkiksi erityisen puhtaita tiloja tarvitsevien avuksi tai purku- ja kunnostustöiden ajaksi viereisiin tiloihin varmistamaan riittävän hyvä sisäilman laatu.

Lisäksi työssä käydään läpi ilmanpuhdistimien yleiset toimintaperiaatteet ja yleisimmät sisäilmaa kierrättävien ilmanpuhdistimien puhdistustekniikat. Tässä työssä keskityttiin

puhdistustekniikoista aktiivihiihliisuodattimiin ja niiden toimintaperiaatteisiin tarkemmin. Aktiivihiihliisuodattimilla varustetuilla ilmanpuhdistimilla sisäilmasta voidaan poistaa kemiallisia yhdisteitä.

Vaikka ilmanpuhdistimet kirjallisuuden perusteella todistetusti tehoavat joihinkin sisäilman epäpuhtauksiin, on tiedossa, että mikään puhdistustekniikka ei pysty tehokkaasti poistamaan kaikkia sisätilojen epäpuhtauksia ja osa niistä tuottaa haitallisia sivutuotteita. Tämä on todettu mm. laajassa kansainvälisessä kirjallisuustutkimuksessa, jossa laaja paneeli teki yhteenvedon tuulettimella varustettujen sisäilmaa kierrättävien ilmanpuhdistustekniikoiden vaikuttavuudesta (Zhang ym. 2011). Yhtenä tämän tieteellisen tutkimuksen johtopäätöksenä oli myös, että vaikka on näyttöä siitä, että jotkut ilmanpuhdistustekniikat todistetusti parantavat sisäilman laatua, lisätutkimuksia tarvitaan ennen kuin mitään niistä voi huoletta suositella käytettäväksi sisätiloissa (Zhang ym. 2011).

Ennen ilmanpuhdistimien käyttöönottoa on rakennus tutkittava tarkoin, jotta tiedetään mahdollisimman tarkkaan, mitä epäpuhtauksia sisäilmasta halutaan poistaa ja millä mahdollisesti muilla keinoilla kuin ilmanpuhdistimilla sisäilman laatua voitaisiin parantaa. Vasta tämän jälkeen voidaan tilaan valita ilmanpuhdistin, joka tehoaa kyseisiin epäpuhtauksiin. Puhdistustekniikan lisäksi ilmanpuhdistimen valintaan vaikuttaa laitteen riittävä kapasiteetti verrattuna tilan kokoon ja muotoon sekä laitteen huoltotarpeet ja käyttöikä. Puhtaan ilman tuotto (CADR) on oltava riittävän suuri tilan kokoon nähden eli laitteen läpi on kuljettava riittävä määrä puhdistettavaa ilmaa aikayksikköä kohden suhteessa tilan kokoon ja ilmanvaihdon tehokkuuteen. Ilmanpuhdistimien käytön aikana on puhdistettavan tilan olosuhteita, sisäilman laatua ja tilojen käyttäjien oireilua seurattava ja on oltava valmius tarvittaessa reagoida muuttuviin olosuhteisiin. Ilmanpuhdistinta ei saa koskaan käyttää siksi, että välttyttäisiin tilan kunnolliselta tutkimiselta, ilmanvaihdon huollolta tai siivoamiselta. Ilmanpuhdistimien käyttö on oltava pääsääntöisesti väliaikaista ja tilojen käyttöä turvaavaa toimintaa. Lähtökohtana on, että tilat korjataan siihen kuntoon, että ne ovat turvalliset ja terveelliset käyttää ilman ilmanpuhdistimia. Erityisen puhtaita tiloja tarvitseville herkistyneille henkilöille voidaan ilmanpuhdistimista saada kuitenkin parhaassa tapauksessa pitkäaikaistakin apua. Tutkimusta ilmanpuhdistimien vaikutuksesta hengitysterveyteen ja hengityssairaiden oireisiin ei ole tehty (Hengityслиitto 2019).

Tässä opinnäytetyössä käydään läpi sisäilmastolle asetettuja vaatimuksia lainsäädännön ja ohjeistusten näkökulmasta. Sen jälkeen esitellään sisäilmaa kierrättävissä ilmanpuhdistimissa yleisimmin käytetyt puhdistustekniikat pitäen pääpaino aktiivihiihliisuodattimen toiminnassa. Lisäksi käydään läpi yleisimpiä ilmanpuhdistimen valintaan vaikuttavia tekijöitä. Lopuksi arvioidaan impregnoidulla aktiivihiihliisuodattimella varustetun testilaitteen suorituskykyä sisäilman kaasumaisten epäpuhtauksien poistamiseen toimistomaisissa olosuhteissa.



## 2 SISÄILMASTOLLE ASETETUT VAATIMUKSET LAINSÄÄDÄNNÖSSÄ

Sisäilmastoon liittyen on annettu useita määräyksiä ja ohjeita muun muassa terveydensuojelulaissa (763/1994), työturvallisuuslaissa (738/2002), rakentamismääräyskokoelmassa, asumisterveysasetuksessa ja sen soveltamisohjeissa ja RT-kortissa Sisäilmastoluokitus 2018, Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Terveydensuojelulaki, työturvallisuuslaki, rakentamismääräyskokoelma ja asumisterveysasetus ovat velvoittavia.

Maankäyttö- ja rakennuslaissa (132/1999, MRL) määritellään rakentamista koskevat yleiset edellytykset, olennaiset tekniset vaatimukset sekä rakentamisen lupamenettely ja viranomaisvalvonta. Olennaiset tekniset vaatimukset koskevat myös mm. rakenteiden terveellisyyttä. Tarkemmat rakentamista koskevat säännökset ja ohjeet kootaan Suomen rakentamismääräyskokoelmaan. Rakentamista koskevat asetukset uudistettiin vuoteen 2018 mennessä vuonna 2013 voimaan tulleen maankäyttö- ja rakennuslain muutoksen (958/2012) mukaisesti. Rakentamismääräyskokoelman määräykset ovat perinteisesti koskeneet uuden rakennuksen rakentamista. Nyt uusittavassa rakentamismääräyskokoelmassa otetaan huomioon rakennuksen korjaus- ja muutostyöt entistä paremmin. Uudesta rakentamismääräyskokoelman korvaavasta asetuksesta käy ilmi koskeeko kulloinkin kyseessä oleva asetuksen osa pelkästään uudisrakentamista vai myös rakennuksen korjaus- ja muutostyötä. Uudistuksen keskeisenä tavoitteena on rakentamista koskevan sääntelyn selkeys sekä asetusten soveltamisen yhtenäisyys ja ennakoitavuus. (Ympäristöministeriö (1) 2016, päivitetty 2019)

Rakentamismääräyskokoelma edellyttää, että rakennushankkeeseen ryhtyvä huolehtii, että rakennus käyttötarkoituksensa ja ympäristöstä aiheutuvien olosuhteittensa edellyttämällä tavalla suunnitellaan ja rakennetaan siten, että se on terveellinen ja turvallinen rakennuksen sisäilma, kosteus-, lämpö- ja valaistusolosuhteet sekä vesihuolto huomioon ottaen. Kokoelmassa edellytetään myös, että rakennuksesta ei saa aiheutua terveyden vaarantumista mm. sisäilman epäpuhtauksien tai rakenteiden kosteuden vuoksi. Rakentamisessa on myös käytettävä tuotteita, joista ei niiden suunnitellun käyttöiän aikana aiheudu mm. sisäilmaan sellaisia päästöjä, joita ei voida pitää hyväksyttävänä. Rakennuksen järjestelmien ja laitteistojen on sovelluttava tarkoitukseensa ja ylläpidettävä terveellisiä olosuhteita. (Ympäristöministeriö (2) 2016, päivitetty 2019) Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta (1009/2017) säätelee myös rakentamista sisäilmavaikutukset huomioiden.

### 2.1 Asumisterveysasetus

Asumisterveysasetuksella on tarkoitus selkeyttää rakennusten terveydellisten olosuhteiden arviointia ja siinä säädetään myös ulkopuolisten asiantuntijoiden koulutuksesta ja pätevyysvaatimuksista. Asumisterveysasetuksen soveltamisohjeet on jaettu viiteen osaan. Osassa 1 käsitellään yleisiä säännöksiä ja tilojen fysikaalisia oloja kuten huoneilman kosteutta ja lämpötilaa. Osassa 2 käsitellään lähinnä melumittaukseen liittyviä toimenpiderajoja ja mittausmenetelmiä. Osassa 3 käsitellään kemiallisia epäpuhtauksia, hiukkasia ja kuituja. Tässä osassa esitellään myös mittausmenetelmät ja annetaan toimenpiderajat haihtuville orgaanisille yhdisteille eli VOC-yhdisteille. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden tolueenivasteella mitatun

kokonaispitoisuuden (TVOC) toimenpiderajaksi on asetettu huoneilmassa  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Tämän toimenpiderajan ylittyessä on terveyshaitan selvittämiseksi ja tarvittaessa poistamiseksi tai rajoittamiseksi ryhdyttävä toimenpiteisiin. Mikäli kokonaispitoisuuden toimenpideraja  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  alittuu, yksittäisistä yhdisteistä saattaa kuitenkin mitatussa pitoisuudessa aiheutua terveyshaittaa ja yksittäisten yhdisteiden vaikutus sisäilmaan on myös tutkittava. Mikäli kokonaispitoisuuden toimenpiderajan ylittymisen jälkeen todetaan, että ylittyminen johtui sellaisista yhdisteistä, joista ei ole terveydellistä haittaa, toimenpiderajan ylittyminen ei tällöin johda muihin toimenpiteisiin. Kokonaispitoisuuden toimenpiderajan ylittyminen edellyttää yksittäisten yhdisteiden selvittämistä. (Asumisterveysasetuksen soveltamisohje, osa 3, 2016)

Yksittäisten VOC-yhdisteiden toimenpiderajaksi tolueenivasteella laskettuna huoneilmassa on asetettu  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Tämä koskee kaikkia tunnettuja tai tuntemattomia orgaanisia sisäilman yhdisteitä. Poikkeuksena on neljä yhdistettä: 2,2,4-trimetyyli-1,3-pentaanidioli di-isobutyratti (TXIB), 2-etyyli-1-heksanoli (2-EH), naftaleeni ja styreeni, joille on asetettu taulukossa 1 esitetyt toimenpiderajat.

**Taulukko 1. Asumisterveysasetuksessa säädetyt poikkeavat toimenpiderajat.**

Yhdiste	Toimenpideraja
2,2,4-trimetyyli-1,3-pentaanidioli di-isobutyratti (TXIB)	$10 \mu\text{g}/\text{m}^3$
2-etyyli-1-heksanoli (2-EH)	$10 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Naftaleeni	$10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ei saa esiintyä hajua
Styreeni	$40 \mu\text{g}/\text{m}^3$

(Asumisterveysasetuksen soveltamisohje, osa 3, 2016)

Mikäli toimenpideraja ylittyy, kyseisen yhdisteen haitallisuus ja merkitys sisäilman laatuun on selvitettävä ja tarvittaessa on ryhdyttävä toimenpiteisiin haitan poistamiseksi tai haitan rajoittamiseksi. Mikäli todetaan, että  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ylittyminen johtui yhdisteestä, joka ei kyseisessä pitoisuudessa ole haitallista terveydelle, toimenpiderajan ylittyminen ei johda muihin toimenpiteisiin. Tällaisia yhdisteitä voivat olla esimerkiksi siloksaanit tai terpeenit. (Asumisterveysasetuksen soveltamisohje, osa 3, 2016)

Lähes kaikista rakennusmateriaaleista, myös täysin virheettömistä materiaaleista vapautuu sisäilmaan haihtuvia orgaanisia yhdisteitä. Uusien materiaalien emissioita kutsutaan primääriemissioiksi. Uusissa ja korjatuissa rakennuksissa ne ovat sisäilman laadun hallitseva tekijä. (Järnström, luentomateriaali RTA 16.1.2019). Päästöt virheettömissä materiaaleissa vähenevät ajan myötä. Kosteus- ja homevauriot puolestaan lisäävät vaurioituneen materiaalin VOC-päästöjä ja päästöjen koostumus saattaa muuttua kemiallisten reaktioiden ja mikrobiologisen aineenvaihdon seurauksena. Näitä materiaalien hapettumis- ja hajoamistuotteina syntyviä emissioita kutsutaan sekundäärisiksi emissioiksi ja ne ovat usein erityisen ärsyttäviä. (Järnström, luentomateriaali RTA 16.1.2019.) VOC-mittauksiin päädytään usein silloin kun, tiloissa havaitaan tavanomaisesta poikkeavaa hajua tai rakenteiden tai materiaalien epäillään sisältävän haitallisia yhdisteitä. (Asumisterveysasetuksen soveltamisohje, osa 3, 2016)

## **2,2,4-Trimetyyli-1,3-pentaanidioli di-isobutyraatti (TXIB)**

Aiemmin TXIB:tä on käytetty muovimattojen valmistuksessa viskositeetin alentajana ja nykyään sitä käytetään mm. maaleissa parantamaan maalausominaisuuksia. Suomalaisessa tutkimuksessa todettiin, että TXIB-pitoisuuden ollessa yli  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  toluleenivasteella laskettuna, uuden lääkärin toteaman astman riski on kolminkertainen. (Villberg ym, 2004, s. 90)

## **2-Etyyli-1-heksanoli (2-EH)**

2-Etyyli-1-heksanoli (2-EH) on kemiallinen yhdiste, jota käytetään liimojen, pinnoitteiden ja pehmittimien tuotannossa. Sisäilmaan sitä voi vapautua esimerkiksi kosteusongelmien yhteydessä PVC-muovimaton pehmittimen dietyyliheksaftalaatin (DEHP) ja liimojen akrylaattikopolymeerien hajoamisen seurauksena. Pieniä määriä 2-etyyli-1-heksanolia vapautuu sisäilmaan myös vaurioitumattomista PVC-tuotteista. DEHP-ftalaatti on korvattu uudemmissa PVC-muovimatoissa muilla pehmittimillä ja niiden hajoamistuotteina muodostuu erilaisia pitkäketjuisia C9-C10-alkoholeja. (Asumisterveysasetuksen soveltamisohje, osa 3, 2016)

Dietyyliheksaftyftalaatti (DEHP) on uusissa muovimatoissa korvattu mm. di-isononylyftalaatilla (DINP) tai muilla esteriyhdisteillä (DINCH). Näiden uusien pehmittimien hajoaminen näyttää alkavan jo alhaisemmissa kosteuspitoisuuksissa kuin DEHP:n hajoaminen. (Peter Backlund ym: Uusien lattiamuovipäällysteiden emissiot, Sisäilmastoseminaari 2014). Toisin sanoen C9-alkoholien esiintyminen ei *välttämättä* indikoi kosteusongelmaa. C9-alkoholien yhteydestä sisäilmaongelmiin ei ole kattavaa tietoa. (Järnström H, luentomateriaali, RTA, 2019)

## **Naftaleeni**

Naftaleeni on merkittävin kreosootista ilmaan haihtuva yhdiste ja sitä voidaan pitää kreosootin indikaattoriyhdisteenä. Sisäilmassa ei saa esiintyä naftaleenin hajua (kylästyneen ratapölkyn haju) ja toimenpiderajaksi on asetettu  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , joka vastaa WHO:n naftaleenin raja-arvoa vuosikeskiarvolle. (Asumisterveysasetuksen soveltamisohje, osa 3. 2016) PAH-yhdisteitä sisältäviä materiaaleja on pääsääntöisesti käytetty rakentamisessa kosteuden ja veden eristämiseen (Suominen J, 2012, s.20).

## **Styreeni**

Styreeniä saattaa esiintyä sisäilmassa esimerkiksi, jos rakennusmateriaalissa käytetyn polyestarihartsin komponentit eivät ole reagoineet täydellisesti keskenään. Styreenille on tyypillistä pistävä haju. Toimenpiderajaksi styreenille on asetettu  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . (Asumisterveysasetuksen soveltamisohje, osa 3. 2016)

## **Muita asumisterveysasetuksen toimenpiderajoja**

Lisäksi toimenpiderajat ja mittausmenetelmät annetaan formaldehydille, hiilimonoksidille, hiilidioksidille, tupakansavulle, hengitettävillä hiukkasilla ( $\text{PM}_{10}$ ), pienhiukkasilla ( $\text{PM}_{2,5}$ ), teollisille mineraalikuuduille sekä asbestikuuduille. Soveltamisohjeen neljännessä osassa annetaan ohjeistusta, miten ja millä välineillä ja menetelmillä rakennuksen kosteus- ja mikrobivaurio luotettavasti todetaan ja mitä pidetään mikrobivaurioiden osalta toimenpiderajan ylityksenä. Soveltamisohjeessa esitellään eri mikrobiologiset näytteenottomenetelmät, joita ovat materiaalinäyte, ilmanäyte ja pintasivelynäyte. Ohjeessa annetaan ohjeita myös eri menetelmillä

saatujen tulosten tulkintaan. Mikrobikasvu pyritään osoittamaan ensisijaisesti rakennusmateriaalista otettavalla näytteellä. Pelkkä ilmanäytteen mikrobiologinen tutkimus ei riitä näytöksi suuntaan eikä toiseen vaan sen lisäksi on oltava muuta näyttöä toimenpiderajan ylittymiseksi. Asumisterveysasetuksen viidennessä osassa käsitellään ulkopuolisten asiantuntijoiden koulutus- ja pätevyysvaatimuksia. (Asumisterveysasetuksen soveltamisohjeet, 2016)

## 2.2 Työterveyslaitoksen viitearvoja

Sisäympäristöongelmat ovat yleisiä toimistotyöpaikoilla. Suomen työvoimasta kaksi kolmasosaa työskentelee toimistoissa tai toimistoa vastaavissa tiloissa. Yleisimpiä sisäilmaongelmien aiheuttajia ovat ilmanvaihdon puutteet, liian korkea lämpötila tai ilman jakamiseen liittyvät ongelmat, kuten veto, kosteusvaurioiden aiheuttamat mikrobiperäiset epäpuhtaudet, rakennuksessa olevien materiaalien päästöt sekä teollisten mineraalikulujen aiheuttamat haitat. (Toimiston sisäilmaston tutkiminen, 2011, s.14)

Sisäilman laadun ja toimistotilojen työntekijöiden altistumisen arvioimisessa tarvitaan viitearvoja sisäympäristötekijöille ja sisäilmasto-olosuhteille. Viitearvot ovat yleensä suosituksia eikä niitä voida virallisesti valvoa, ellei suositusta ole lisätty lainsäädännölliseen asiakirjaan. Toimistoympäristöille voidaan antaa sisäilman tavanomaisia arvoja (esimerkiksi P50-arvot) tai kohonneiden pitoisuuksien viitearvoja (esimerkiksi P90-arvot eli 90 persentiili). Viitearvojen ylittyminen viittaa yleensä epätavanomaiseen sisäilmalähteeseen ja tämän lisäksi lisäselvitystarpeeseen. (Toimiston sisäilmaston tutkiminen, 2011, s.51) P90-arvot tarkoittavat sitä, että 90 % tutkitun aineiston tietyn yhdisteen pitoisuuksista on jäänyt alle P90-arvon. Työterveyslaitoksen Toimiston sisäilmaston tutkiminen -oppaasta löytyy näitä P90-arvoja. Työterveyslaitos on julkaissut päivityksiä oppaan arvoihin viimeksi 19.3.2019 (Kooste epäpuhtaustasoista, joiden ylittyminen voi viitata sisäilmasto-ongelmiin toimistotyypisillä työpaikoilla.) Tämän opinnäytetyön kirjoitushetken viimeisin päivitys löytyy osoitteesta <https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2016/09/sisaympariston-viitearvoja.pdf>.

Esimerkiksi formaldehydin P90-arvo on  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Tutkimusaineistona oli Työterveyslaitoksen mittauspalveluaineisto vuosilta 2001-2006, jossa formaldehydimittauksia tehtiin 23 toimistorakennuksessa. Keskimääräinen formaldehydipitoisuus oli pääkaupunkiseudun toimistoissa  $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Kuitenkin ainoastaan 10 % formaldehydipitoisuuksista ylitti  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . (Toimiston sisäilmaston tutkiminen, 2011, s.25)

P90-arvon ylittyminen viittaa yleensä epätavanomaiseen sisäilmalähteeseen. Näitä viitearvoja ei voi kuitenkaan käyttää suoraan terveysriskin arvioinnissa. Tämä johtuu mm. siitä, että useiden sisäilmassa alhaisella pitoisuustasolla esiintyvien yhdisteiden pitkäaikaisen altistuksen aiheuttamista terveyshaitoista ei toistaiseksi tiedetä riittävästi. (Toimiston sisäilmaston tutkiminen, 2011, s. 89)

Työterveyslaitoksen P90-viitearvoja on esitetty taulukossa 2. Kaikkien yksittäisten VOC-yhdisteiden pitoisuudet on määritetty käyttäen yhdisteen omaa vastetta. Viitearvot on annettu vain standardin ISO 16000-6 VOC määritelmään sisältyville yhdisteille eli yhdisteille, joiden haihtuvuus on välillä heksaani – heksadekaani ( $\text{C}_6 - \text{C}_{16}$ ) nämä yhdisteet mukaan lukien.

**Taulukko 2. Työterveyslaitoksen julkaisemia P90-viitearvoja.**

Mitattu altiste	Viitearvo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Ammoniakki	25
Formaldehydi	15
TVOC	100
<b>Alifaattiset hiilivedyt</b>	
Nonaani	2
Heptaani	3
2,2,4,6,6-Pentametyyliheptaani	4
Oktaani	1
Dekaani	3
Undekaani	3
<b>Aromaattiset hiilivedyt</b>	
Tolueeni	4
Bentseeni	1
Ksyleenit (m,o,p)	6
Etyylibentseeni	3
1,2,4-Trimetyylibentseeni	2
<b>Aldehydit ja Ketonit</b>	
Bentsaldehydi	2
Nonanaali	5
Dekanaali	3
Heksanaali	6
Oktanaali	2
Pentanaali	3
Asetofenoni	1
Heptanaali	2
<b>Alkoholit</b>	
Butanoli	4
2-Etyyli-1-heksanoli	4
Bentsyylialkoholi	6
2-Metyyli-1-propanoli	3
<b>Esterit</b>	
Texanol	6
TXIB	6
n-Butyyliasetaatti	4
2-(2-Butoksietoksi)-etyyliasetaatti	5
Etyyliasetaatti	7
<b>Fenolit</b>	
Fenoli	3
<b>Glykolit ja glykolieetterit</b>	
1,2-Propaanidioli	12
2-(Etoksietoksi)etanoli	15
2-Fenoksietanoli	3
2-(2-Butoksietoksi)etanoli	6
2-Butoksietanoli	7
1-Metoksi-2-propanoli	5
<b>Orgaaniset hapot</b>	
Heksaanihappo	11
Propaanihappo	8
<b>Pii-yhdisteet</b>	
Dekametyylisyklopentasiloksaani	10
<b>Terpeenit</b>	
a-Pineeni	8
Kareeni	6
Limoneeni	6

(Työterveyslaitos 2019)

TTL:n P90-viitearvot antavat tilastollisesti todistusvoimaisen tuloksen yhdisteiden esiintymiselle ja pitoisuuksille työpaikkojen sisäilmassa. Jos yhdisteelle on annettu viitearvo, voidaan yhdisteen esiintymistä sisäilmassa pitää normaalina. Jos viitearvoa ei ole annettu, se saattaa kertoa kohteessa olevasta epätyypillisestä päästölähteestä. Yhdisteen kvantitointitapa on aina huomioitava, koska tolueeniekvivalentin avulla lasketut pitoisuudet ovat aina puolikvantitatiivisia ja saattavat yli- tai aliarvioida pitoisuuden moninkertaisesti. (Valtanen 2016)

Esimerkiksi Valviran lausunnossa 30.8.2011 TXIB:lle ja 2-etyyliheksanolille annetut raja-arvot eroavat seuraavanlaisesti käytetystä kvantitointimenetelmästä riippuen: TXIB:n raja-arvo omalla vasteella laskettuna on  $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja vastaavasti tolueenivasteella laskettuna raja-arvo on  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . 2-etyyliheksanolin raja-arvo omalla vasteella laskettuna on  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja tolueenivasteella laskettuna  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . (Järnström, luentomateriaali, RTA4, 2019)

Työterveyslaitoksen oppaan päivitysliitteessä (19.3.2019) painotetaan sitä, että *sisäilma-asioita tulee aina tarkastella kokonaisuutena, johon kuuluvat: rakennus- ja talotekniikka, sisäilmasto-olosuhteet, käyttäjien kokemukset ja terveydentila sekä työpaikan toimintatavat rakennuksen ylläpidossa ja ongelmien ratkaisussa. Mittaustulokset ovat näin ollen vain yksi osa-alue ongelmien tunnistamisessa.* (Työterveyslaitos 2019)

Oppaassa on esitetty lisäksi tyypillisiä yleisimpien sisäilman haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästölähteitä. Päästölähteitä on esitetty taulukossa 3. Taulukkoon valittiin vain osa Työterveyslaitoksen taulukosta, mm. tämän työn kannalta oleellimmat yhdisteet.

**Taulukko 3.** Tyypillisiä yleisimpien sisäilman haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästölähteitä.\*

<b>YHDISTERYHMÄ</b>	<b>Esimerkkejä mahdollisista päästölähteistä</b>
<b>Yleisimmät yksittäiset yhdisteet</b>	
<b>Aromaattiset hiilivedyt</b>	
Tolueeni, ksyleenit, trimetyylibentseenit	Maalit, lakat, liimat, pakokaasut, bensiini, liuottimet, seinäpinnoitteet, polyuretaanit, puhdistusaineet, tietokoneet, tulostimet, kopiokoneet
Bentseeni	Maalit, lakat, liimat, pakokaasut, bensiini, liuottimet, seinäpinnoitteet, polyuretaanit, puhdistusaineet, tietokoneet, tulostimet, kopiokoneet, tupakointi, syntetiset kuidut
<b>Alkoholit</b>	
1-Butanoli	Liuottimet, puhdistusaineet, maalit, liimat, tasoitteet, laastit, kosmetiikkatuotteet, kuitulevyt
2-Etyyli-1-heksanoli	Muovimatot, liimat, tulostimet, kopiokoneet
<b>Alifaattiset hiilivedyt</b>	
Heksaani	Liimat, bensiini, pakokaasut, liuottimet, polyuretaani
<b>Aldehydit</b>	
Heksanaali	Puutuotteet, lastulevy, kuitulevy, tapetit, lattiavahat, hajusteet, linoleum, kostea mineraalivilla, kopiokoneet, hartsit, vesieristeet
Formaldehydi	Puutuotteet, eristemateriaalit, kulutustuotteet, pintakäsittelyaineet, kankaat, tupakointi, toimistolaitteet, otsonin ja terpeenien reaktiot
<b>Terpeenit eli isoprenoidit</b>	
3-Kareeni	Puu- ja puupohjaiset materiaalit, hajusteet, maalit, liuottimet, siivousaineet
Alfa-pineeni, limoneeni	Puu- ja puupohjaiset materiaalit, hajusteet, maalit, liuottimet, siivousaineet, kosmetiikkatuotteet, tietokoneet, ilmanraikastimet
<b>Piiyhdisteet</b>	
Orgaaniset piiyhdisteet	Rakennusmateriaalit, tiivistemassat, siivousaineet, pintojen käsittelyaineet, hiuslakat
<b>Orgaaniset hapot</b>	
Heksaanihappo	Linoleum, hartsit, liuotinhenteinen maali (alkydimaaali), mäntylauta (puun uuteaineet), lastulevy
Etikkahappo	Tiivistemassat, kittausaineet, linoleum, liimat
Propaanihappo	Linoleum
<b>Esterit</b>	
Etyyliasettaatti	Liimat, korjauskynät, siivousaineet, kosmetiikkatuotteet, homeet, tiivisteaineet, kittausaineet
2,2,4-Trimetyyli-1,3-pentanedioolidiisobutyraatti, TXIB	Muovimatot, lattialiimat, pehmitinaineet, apuaineet, tapetit, maalit, keinonahkatuotteet

\* (Toimiston sisäilmaston tutkiminen, 2011, liite 2 s. 106-108)

Taulukoita, joissa on lueteltu haihtuvien orgaanisten yhdisteiden yleisimpiä päästölähteitä, ovat julkaisseet muutkin tahot kuten esimerkiksi Suomen Työterveyslääkäriyhdistys ry artikkelissaan Sisäilman hajut ja orgaaniset epäpuhtaudet (Artikkelin tunnus: ttI00208 (000.208)).

### 2.3 Sisäilmastoluokitus 2018

Sisäilmastoluokitusta käytetään silloin, kun tavoitteena on rakentaa sisäympäristöltään terveellisiä, viihtyisiä ja turvallisia rakennuksia. Sisäilmastoluokituksen vaatimukset ja tavoitteet otetaan huomioon rakennushankkeen kaikissa vaiheissa. Rakennushankkeeseen ryhtyvä valitsee sisäympäristön tavoitearvot kuten rakennustöiden puhtausluokan, rakennusmateriaalien päästöluokat ja ilmanvaihtotuotteiden puhtausluokat yhteistyössä suunnittelijoiden kanssa. On kuitenkin huomioitavaa, että sisäilmastoluokitusta ei ole tarkoitettu käytettäväksi rakennuksen terveellisuuden arvioinnissa. Vaikka tavoitearvot alitettaisiin, saattavat herkät ihmiset oireilla ja toisaalta tavoitearvojen ylittäminen ei nykytietämyksen mukaan merkitse välitöntä terveysvaaraa. Sisäilmastoluokitus 2018 voidaan käyttää soveltuvien osien myös korjausrakentamisessa. (Sisäilmastoluokitus 2018)

Sisäilmaston terveyshaittojen arviointiin voidaan asuntojen ja muiden oleskelutilojen kuten esimerkiksi koulujen ja päiväkotien osalta käyttää em. sosiaali- ja terveysministeriön asetusta *asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista* (Asumisterveysasetus 545/2015) sekä sitä täydentävää Valviran laatimaa Asumisterveysasetuksen *soveltamisohjetta*. Ympäristöministeriön opasta *Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus (2016)* voidaan käyttää ohjeena rakennusten kuntotutkimukseen ja ilmanvaihdon kuntotutkimiseen voidaan käyttää Suomen LVI-liiton *Ilmanvaihto- ja ilmastointijärjestelmien ja laitteiden kuntotutkimusmenettelyä*. Työpaikkojen sisäilmaongelmien ratkaisemisesta on käsitelty mm. Työterveyslaitoksen julkaisemassa *Sisäilman hyväksi-* raportissa (Lahtinen ym 2008) sekä *Ohje työpaikkojen sisäilmasto-ongelmien selvittämiseen-* raportissa (Lappalainen ym 2017). (Sisäilmastoluokitus 2018)



### 3 ILMANPUHDISTIMIEN SUODATUSTEKNIIKAT

Ilmanpuhdistimissa yleisimmin nykyään käytetyt suodatustekniikat voidaan jaotella mekaaniseen suodatukseen, kemialliseen suodatukseen, fotokatalyyttiseen hapetukseen, elektrostaattiseen suodatukseen, ultraviolettisäteilytykseen ja ionisointiin (Luomalahti 2013, s. 19).

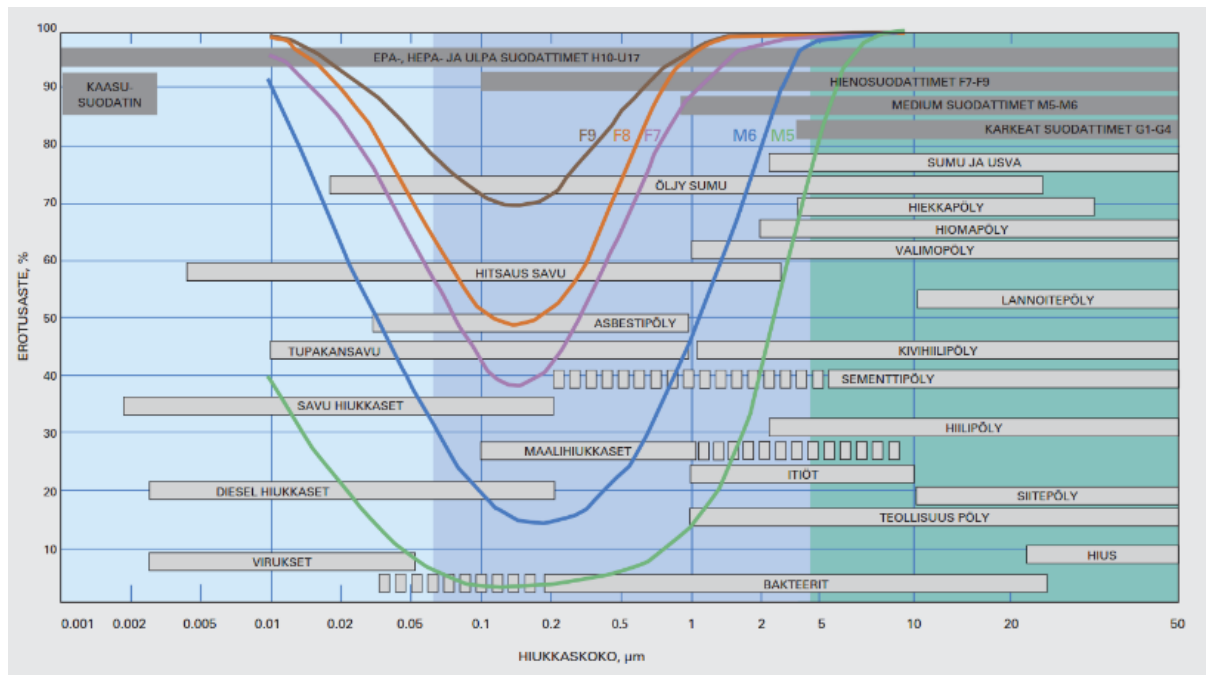
Tässä työssä keskitytään tarkemmin kemialliseen suodatukseen ja muut suodatustekniikat käsitellään vain lyhyesti. Kemiallisella suodatuksella tarkoitetaan kaasumaisten epäpuhtauksien suodattamista. Ilmanpuhdistimissa yleisimmin käytetty kemiallinen suodatinmateriaali on aktiivihiili. (Luomalahti 2013, s. 24) Tämän työn kokeellisessa osuudessa testattiin ilmanpuhdistinta, jossa pääsuodatinmateriaalina on aktiivihiili.

#### 3.1 Mekaaninen suodatus

Mekaanisella suodatuksella poistetaan sisäilman hiukkasia johtamalla sisäilma suodattimen läpi puhallinmoottorin avulla. Mekaanisissa suodattimissa hiukkasten kiinnittyminen suodattimeen voi tapahtua eri mekanismeilla kuten diffuusiolla tai törmäysvaikutuksen avulla. (Luomalahti 2013, s. 19-22)

Uusi maailmanlaajuinen standardi yleisilmanvaihdon suodattimille ISO16890 astui voimaan 1.7.2018 ja korvasi myös Suomessa käytössä olleen EN779:2012- standardin. Aiemmin erotusaste mitattiin vain yhdessä hiukkaskoossa, nyt se mitataan kolmessa kokoluokassa ePM<sub>1</sub>, ePM<sub>2,5</sub> ja ePM<sub>10</sub>. (Camfil 2018)

Hiukkaskoolla on ratkaiseva merkitys siihen, millä mekanismeilla hiukkaset tulevat keräytyä mekaaniseen suodattimeen. Kun diffuusiolla saadaan kerättyä vain pienimmät hiukkaset ja muut mekanismit toimivat tehokkaasti vain yli 0,5 µm hiukkasilla, on seurauksena se, että suodattimien suodatustehokkuus on heikoin näiden alueiden välissä hiukkaskoolla 0,1 – 0,4 µm. (Luomalahti 2013, s. 22) (Kuva 1)



Kuva 1. Ilman epäpuhtaudet, hiukkaskoot sekä suodatusluokat. (Hometalkoot)

### 3.2 Fotokatalyyttinen hapetus

Fotokatalyyttiseen hapetukseen perustuva ilmanpuhdistin hajottaa haihtuvia orgaanisia yhdisteitä huoneilmasta sekä tappaa homeitiöitä, viruksia ja bakteereja. Osa näistä laitteista toimii luonnonvalon ja osa UV-lampun avulla. (Hengitysliitto 2019)

Fotokatalyyysillä tarkoitetaan valon imeytyessä fotokatalyyttiin sen pinnalla tai pinnan läheisyydessä tapahtuvaa spontaania kemiallista reaktiota. Tunnetuin fotokatalyyttinen materiaali on titaanioksidi ( $\text{TiO}_2$ ). Katalyytillä tarkoitetaan ainetta, joka nopeuttaa ja edesauttaa kemiallisen reaktion tapahtumista. Fotokatalyyttisellä hapetuksella huoneilman epäpuhtauksia ei kerätä, vaan ne hajotetaan vaarattomiksi. Formaldehydiä ja otsonia on todettu muodostuvan väli- tai sivutuotteina. Menetelmää käyttävissä laitteissa fotokatalyyttinen hapetus -tekniikka esiintyy yleensä yhtenä osana suodatusjärjestelmää. (Luomalahti 2013, s. 27)

### 3.3 Elektrostaattinen suodatus

Elektrostaattisella menetelmällä toimivassa ilmanpuhdistimessa on yhdensuuntaisten levyjen väliin asetettu johtimia, jotka varaavat ilmavirtauksen mukana kulkevat hiukkaset. Suodattimessa on korkeajännitteinen keräilypinta, joka vetää hiukkasia puoleensa ja hiukkaset tarttuvat siihen kiinni. Elektrostaattiset laitteet tulee puhdistaa ja huoltaa säännöllisesti, jotta ilmanpuhdistimen suorituskyky säilyy. Sähkösuodattimet voivat tuottaa käytön aikana otsonia ja typen oksideja ja ne voivat siten osaltaan heikentää sisäilman laatua. Väärin toimiva huoltamaton laite voi aiheuttaa kasvaneen otsonin tuoton. (Luomalahti 2013, s. 23-24)

### 3.4 Ultraviolettisäteilytys

Ultraviolettisäteilyyn perustuva laite vaikuttaa mikrobien (esimerkiksi homeitiöiden) DNA:han estämällä niiden kasvun. UV-laitteen on oltava ilmankierrätysteholtaan riittävän suuri ja ilmanpuhdistimessa on oltava suodatin, joka poistaa kuolleet mikrobit huoneilmasta. UV-säteily on haitallista silmille ja iholle sekä vahingoittaa myös kasveja. Ultraviolettisäteilyyn perustuvaa ilmanpuhdistinta käytettäessä on varmistuttava, ettei säteilyä pääse laitteen ulkopuolelle. (Hengitysliitto 2019)

### 3.5 Ionisointi

Ionisointi esiintyy usein yhtenä osana eri suodatustekniikoita sisältävässä ilmanpuhdistimessa. (Hengitysliitto 2019). Laite kierrättää ilman lävitseen ja varaa ilmassa leijuvat epäpuhtaudet negatiivisesti, jolloin ne tarttuvat positiivisesti varattuihin tilan pintoihin. Epäpuhtaudet siivotaan pinnoilta pois. Ongelmana on, että esimerkiksi huoneiston pintojen sähkövaraus vaihtelee ja epäpuhtaudet tarttuvat vain positiivisesti varautuneille pinnoille. Sähkövaraus ei ole myöskään pysyvä ja pintojen siivous on tehtävä nopeasti. Vaihtoehtoisesti laitteessa voi olla positiivisesti varattu hiukkaskokooja, jolloin epäpuhtaudet eivät siirry puhdistettavan tilan pinnoille vaan ne kertyvät hiukkaskokoojaan. Ionisointi ei toimi kaasumaisten epäpuhtauksien, hajujen eikä ultrapienien hiukkasten poistoon. Ultrapienet hiukkaset eivät laskeudu ionisoinnin vaikutuksesta. (Luomalahti 2013, s.28)

### 3.6 Kemiallinen suodatus aktiivihiilen avulla

Kemiallisella suodatuksella tarkoitetaan kaasumaisten epäpuhtauksien suodattamista. Ilmanpuhdistimissa yleisimmin käytetty kemiallinen suodatinmateriaali on aktiivihiili (Luomalahti 2013, s. 24). Aktiivihiili on sekä rakenteensa että ominaisuuksiensa osalta ainutlaatuinen. Se kykenee suodattamaan sekä orgaanisia että epäorgaanisia aineita. (Hannola 2007, s. 63) Aktiivihiiltä käytetään lukuisissa siviili-, viranomais- sekä teollisuuden sovelluksissa. (Pulkinen 2010, s. 1,2)

Aktiivihiiltä on käytössä useita eri valmisteita. Yleisimpiä ovat jauhe, rakeet, monoliitti, nanoputket, kuidut sekä pelletit. Kaikista aktiivihiilivalmisteista yleisimmin käytetty on raemainen aktiivihiili. (Pulkinen 2010, s. 1,2)

Aktiivihiilisuodattimilla suodatetaan epäpuhtauksia ilmasta ja vedestä. Kaiken kaikkiaan suurin osa aktiivihiilen määrästä käytetään nestemäisten aineiden suodatukseen ja vain noin viidesosa kaasumaisten aineiden suodatukseen suunnatuissa sovelluksissa kuten huonekohtaisissa ilmanpuhdistimissa. (Hannola 2007, s. 11-16)

Aktiivihiilen toiminta perustuu adsorptioon, jossa adsorbenttina toimiva kiinteä aine sitoo pinnalleen tiettyjä molekyyliä joko kemisorption tai fysisorption avulla. Adsorptiolla tarkoitetaan kaasumolekyylin kiinnittymistä suodatinmateriaalin pintaan. Kemisorptiossa adsorbaatin ja adsorbentin pinnan välille syntyy vahva kemiallinen sidos ja fysisorptiossa adsorbentti sitoo adsorbaatin pinnalleen fyysisten, ns. van der Waalsin voimiin perustuvien vetovoimien avulla.

Fysisorptio on reversiibeli reaktio. Tämä tarkoittaa, että adsorboitunutta ainetta myös vapautuu aineen pinnalta esimerkiksi ulkoisen lämpöenergian vaikutuksesta. Tätä adsorption käänteisreaktiota kutsutaan desorptioksi. Kemisorptio ei ole fysisorption lailla reversiibeli reaktio, vaan vaatii korkean lämpötilan purkautuakseen. (Hannola 2007, s. 11-16)

Ennen kuin kaasumolekyylit voivat adsorboitua, täytyy niiden kulkeutua adsorbenttin huokosrakenteen sisäpinnalle. Ensin kaasumolekyylit diffundoituu pois ilmavirrasta kohti isompia huokosia (makrohuokoset), joiden suuaukot sijaitsevat adsorbenttin ulkopinnalla. Tämä diffuusioilmiö johtuu siitä, että ilmavirrassa olevien kaasumaisten epäpuhtausmolekyylien pitoisuus on suurempi kuin niiden pitoisuus adsorptioaineen sisäisessä huokosrakenteessa. (Sandberg (toim.) 2016, s. 223-224)

Adsorbaatit jaetaan kemiallisen koostumuksen perusteella orgaanisiin ja epäorgaanisiin kaasuihin. Koostumus vaikuttaa kaasujen adsorptioon. Useimpia epäorgaanisia kaasuja ei voida suodattaa fysikaalisella adsorptiolla ja parhaan ilmansuodatustuloksen saamiseksi tarvitaan myös kemiallista adsorptiota. (Mattila 2018, s. 15) Molekyylipainoltaan kevyet yhdisteet kuten ammoniakki, formaldehydi ja rikkivety adsorptioituvat heikosti tavalliseen käsittelemättömään aktiivihiileen. Mm. näiden epäpuhtauksien kiinnisaamiseen tarvitaan adsorptioaineen kyllästämistä kemikaaleilla eli impregnointia. (Luomalahti 2013, s. 24) Puhtaan impregnoimattoman aktiivihiilen epäpuhtauksia adsorboivat ominaisuudet perustuvat siis fysikaaliseen vuorovaikutukseen (fysisorptio) ja impregnoitun eli kemikaaleilla kyllästetyn aktiivihiilen epäpuhtauksia adsorboivat ominaisuudet perustuvat impregnointikemikaalin ja adsorbaatin välille syntyvään kemialliseen sidokseen (kemisorptio). Yleisesti käytettyjä impregnaatteja, joilla aktiivihiilen adsorptiokykyä parannetaan ovat mm. metallien suolat, hapot ja jalometallit. (Hannola 2007, s.15, 8) Lisäämällä esimerkiksi aktiivihiileen pieni määrä rikkiä voidaan parantaa hiilen elohopeansitomiskykyä. Rikkihappo ja fosforihappo vastaavasti tehostavat ammoniakkin ja amiinien adsorptiota. (Hannola 2007, s. 30)

Impregnointiaineet reagoivat ilmassa olevien kaasujen kanssa muodostaen kemiallisella sidoksella pysyviä yhdisteitä. Näin syntyneet yhdisteet joko jäävät adsorbenttin pintaan tai vapautuvat ilmaan. Nämä yhdisteet voivat olla joko haitattomia, kuten vesihöyryä ja hiilidioksidia, tai haitallisia. Impregnointiaineita käytettäessä tulee varmistaa, että syntyvät yhdisteet eivät aiheuta haittaa tai syntyvät yhdisteet poistetaan toisella adsorbentilla. (Mattila 2018, s. 15)

Aktiivihiili toimii myös sihdin tavoin niin, että suurikokoiset molekyylit jäävät fyysisesti kiinni pienikokoisiin huokosiin (Hannola 2007, s.15, 8). Aktiivihiilisuodattimessa suuremmat kuin 0,3 µm hiukkaset saattavat tukkia suodattimen huokoset niin, ettei se kykene enää sitomaan itseensä lainkaan pieniä hiukkasia ja molekyylejä. Aktiivihiilen käyttöään pidentämiseksi ja tukkiutumisen estämiseksi onkin hyvä, että ilmanpuhdistimessa on ennen aktiivihiilisuodatinta karkeampi esisuodatin, joka poistaa suuremmat hiukkaset. (Linna 2015, s. 23 - 24)

Aktiivihiili toimii kemisorptiossa kyllästyskemikaalien kantoaineena tarjoten suuren pinta-alan kemiallisen reaktion tapahtumiselle. Jotta kemiallinen reaktio varsinkin impregnoitulla suodattimella ehtii tapahtua, puhdistettavan ilmavirran viipymän tulee olla riittävän suuri.

Kemisorption vaatima aika voi olosuhteista riippuen vaihdella suuresti esimerkiksi välillä 0,01 – 0,4 s. (Luomalahti 2013, s. 25)

### 3.6.1 Adsorptioprosessin tehokkuus

Nopeus, jolla ilma tai neste virtaa aktiivihiilen läpi vaikuttaa voimakkaasti adsorptioprosessin tehokkuuteen. Nopeasti virtaava aine vaikuttaa lyhyemmän aikaa aktiivihiilen pinnalla kuin hitaammin virtaava aine, joten nopealla virtauksella aktiivihiilen pinnalla tapahtuva adsorptioprosessi ei ehdi tapahtua täydellisesti. Näin ollen aktiivihiilisuodattimen tehokkuutta voidaan parantaa alentamalla suodattimen läpi virtaavan kaasun virtausnopeutta. Toinen keino parantaa aktiivihiilisuodattimen tehokkuutta on lisätä suodatinkerroksen paksuutta ja poikkipinta-alaa. Suodatinkerroksen paksuutta kasvatettaessa ongelmaksi saattaa tulla merkittävä virtausvastuksen lisääntyminen. Poikkipinta-alan lisääminen puolestaan vähentää virtausvastusta ja on siten monessa sovelluksessa käyttökelpoisempi tapa kasvattaa adsorbentin määrää suodattimessa. (Hannola 2007, s.16)

Kulutuksen kestävyys ja kovuus ovat suotavia ominaisuuksia kaikille rakeisille aktiivihiilille. Oman painon ja virtaavan ilman tai nesteen lisäksi aktiivihiili voi joutua kestävämpään kovempaan rasitukseen esimerkiksi ollessaan puristuksissa suodattimen kuorien välissä tai altistuessaan kovalle tärinälle tai jatkuvalla lämmönvaihtelulle. Myös uudelleenaktivoinnissa ja materiaalin käsittelyssä aktiivihiilirakeen mekaaninen kestävyys on merkittävä tekijä. (Hannola 2007, s.30)

Kemisorptiolla voidaan poistaa ilmasta kaasumaisia epäpuhtauksia myös käyttämällä aktiivihiilen sijaan kaliumpermanganaatilla impregnoitua alumiinioksidia. Tämän käyttö on perusteltua kaikkein reaktiivisimpien yhdisteiden ilmasta poistamisessa. (Luomalahti 2013, s. 25)

Kosteus muuttaa adsorbentin ominaisuuksia merkittävästi. Osalla aineista adsorptioprosessi merkittävästi heikkenee, kun taas joillakin toisilla aineilla adsorptioprosessi tehostuu kosteuden vaikutuksesta. Tämän vuoksi suuret aktiivihiilisuodattimet varastoidaan yleensä hermeettisesti suljettuina ja näin pyritään välttämään hiilen kontaminoituminen ja aktiivihiilimateriaalin kostuminen varastoinnin aikana. Käyttösovelluksessa aktiivihiilisuodatin voidaan tarvittaessa suojata erillisellä kosteudenpoistoon tarkoitetulla silica-suodattimella. (Hannola 2007, s.31)

### 3.6.2 Aktiivihiilen valmistus

Aktiivihiilen valmistuksessa on kolme eri vaihetta. Nämä vaiheet ovat raaka-aineen valinta, hiillytys ja aktivointi. Tämän lisäksi tiettyjen aineiden adsorptiota aktiivihiileen voidaan parantaa lisäämällä aktiivihiileen lisäaineita. Tätä kutsutaan aktiivihiilen impregnoinniksi. Puu, sahanpuru, ruskohiili, turve, kookospähkinänkuori, kivihiili ja raakaöljyn jätteet ovat yleisimpiä aktiivihiilen raaka-aineita. Raaka-ainevalinta vaikuttaa merkittävästi aktiivihiilen ominaisuuksiin ja raaka-aineeksi pyritään valitsemaan materiaali, joka antaa aktiivihiilen tulevaan käyttö-tarkoitukseen parhaimmat ominaisuudet. (Pulkinen 2010, s.15-16)

Raaka-aineen valintaan vaikuttavia kriteerejä ovat lopputuotteelle haluttu huokosten rakenne, partikkelikoko, kokonaispinta-ala sekä tyhjä tila ainesosasten välillä. Kaasufaasissa olevien

aineiden puhdistamiseen käytetään rakeista aktiivihiiltä, joka on valmistettu korkeatiheyksistä raaka-aineista, kuten esimerkiksi kookospähkinän kuori, bambu, palmupuun siementen kuoret, koksi tai hiili. Huokoskoon toisistaan poikkeava jakauma tekee eri raaka-aineista valmistetuista aktiivihiilistä adsorptio-ominaisuuksiltaan erilaisia ja eri sovelluksiin sopivia. (Hannola 2007, s. 18, 19, 23)

Kivihiili on edullista ja siksi se on yleinen raaka-aine aktiivihiilen valmistuksessa. Kun raaka-aine on valittu, on vuorossa raaka-aineen kuivaus ja hiillytys. Hiillytyksessä raaka-aineelle suoritetaan pehmennys tietyssä pehmennyslämpötilassa. Tällä saadaan aikaan hiilen kutistuminen, jolla on suuri merkitys hiilen huokoiselle rakenteelle. Pehmennyslämpötila valitaan aktiivihiilelle haluttujen ominaisuuksien mukaan. Seuraava vaihe on varsinainen hiillytys noin 800-1000 asteisessa hapettomassa tilassa olevassa uunissa. Tässä vaiheessa käytetään kosteutta poistavia kemikaaleja. Oikeiden olosuhteiden valinnalla pyritään siihen, että osa hiilestä ja suurin osa hiilivedyistä poistuu ja tällä tavalla hiilen pinta-ala kasvaa. Viimeisenä vaiheena aktiivihiilen valmistuksessa on aktivointi. (Pulkkinen 2010, s. 15-16)

Hiilen orgaanisten aineiden adsorptiokykyä voidaan parantaa aktivointiprosessilla, jolloin syntyy aktiivihiiltä. Aktivoinnilla pyritään kasvattamaan hiilessä olevien huokosten kokoa ja kasvattamaan huokosten halkaisijaa. (Pulkkinen 2010, s.17)

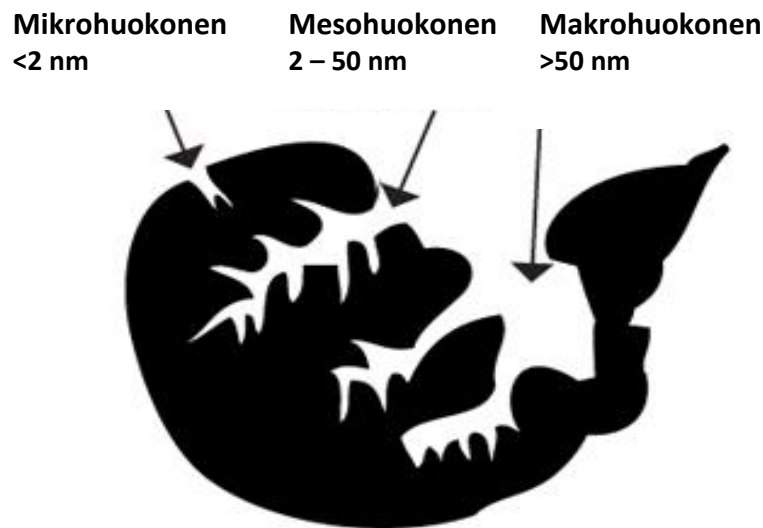
Hiilen aktivointiprosessiin on käytettävissä kaksi erilaista tapaa, kemiallinen aktivointi ja kuumen höyryn avulla tehtävä aktivointi. Aktivointitapa riippuu valitusta raaka-aineesta ja lopputuotteelle halutuista ominaisuuksista. Kemiallisella menetelmällä aktivoidut aktiivihiilet ovat huokosrakenteeltaan hyvin avoimia, jolloin aktiivihiilen ominaisuudet muodostuvat erinomaisesti adsorboimaan suuria molekyyliä. (Hannola 2007, s. 20)

Aktivointiprosessissa hiilen huokosista poistuu aineita kuten esimerkiksi hiiltä, rikkiä, tuhkaa, aromaattisia yhdisteitä tai kosteutta ja näin kyseisten huokosten koko kasvaa tai syntyy kokonaan uusia huokosia. Huokosia muodostuu hiileen myös hiilimonoksidikaasun vaikutuksesta ja sitä syntyy hiilen osittaisessa hapettumisessa. Aktivoidun hiilen adsorptiopinta-ala on normaalisti 500-1500 m<sup>2</sup>/g. (Pulkkinen 2010, s.17) Ominaispinta-alaa voi verrata esimerkiksi UEFA:n suositusten mukaisen jalkapallokentän kokoon, joka on 105 m x 68 m eli 7 140 m<sup>2</sup>. Viidessä grammassa aktiivihiiltä on siis parhaimmillaan saman verran ominaispinta-alaa kuin jalkapallokentässä.

Adsorptiopinta-alaa voidaan tutkia erilaisilla merkkiaineilla. Esimerkiksi metyleenisinisen avulla voidaan tutkia mesohuokosten adsorptiokapasiteettiä, jodin avulla voidaan tutkia meso- ja mikrohuokoisen alueen adsorptiokykyä ja hiilitetrakloridin adsorptio kertoo aktiivihiilen kyvystä suodattaa kaasufaasissa olevia aineita. Yleisimmin käytetty keino adsorptiopinta-alaa määrittäessä on mitata aktiivihiilelle jodiluku. Sen avulla arvioidaan aktiivihiilen mikrohuokoisen alueen (aktiivihiilen sisäisen pinta-alan) suuruutta käyttäen mitoitusta m<sup>2</sup>/1 g. Aktiivihiilen efektiivinen pinta-ala vaihtelee paljon riippuen aktivointiasteesta ja käytetystä raaka-aineesta. (Hannola 2007, s. 14,15,27)

Aktiivihiilen lopulliset käyttöominaisuudet riippuvat pitkälti valmistusvaiheessa valitusta raaka-aineesta. Raaka-aineen valinta vaikuttaa myös aktiivihiilen huokosrakenteeseen, joka muodostuu aktiivihiilen aktivointivaiheessa. (Linna 2015, s. 24) Aktiivihiileen aktivoinnin

aikana muodostuneet huokokset jaetaan huokosten koon mukaan kolmeen kokoluokkaan; mikro-, meso- ja makrohuokosiin. (Hannola 2007, s. 8) (kuva 2) Mikrohuokosten halkaisija on alle 2 nm, meso- ja makrohuokosten halkaisija on välillä 2 – 50 nm ja makrohuokosten halkaisija on yli 50 nm (Tikkanen ym. 2011, s. 28). Huokoskoko vaikuttaa suoraan siihen kuinka suuria partikkeleja tai molekyyliä on mahdollista adsorboida adsorbenttien pintaan. Huokosten pinta-ala aktiivihielessä taas vaikuttaa siihen, kuinka suuri määrä adsorbateja on mahdollista adsorboida. (Hannola 2007, s. 17)



Kuva 2. Hiilipartikkelin mikro-, meso- ja makrohuokokset. Pohjautuu kuvälähteeseen (Niskanen 2014).

Pienimmistä huokosista muodostuva mikrohuukoinen rakenne on adsorptiokapasiteetiltaan suurin alue aktiivihielessä. Mikrohuukoiset alueet ovat tehokkaimpia adsorboitaessa molekyyliä pienistä ja kiehumispisteeltään alhaisista orgaanisista höyryistä. Pienimmät adsorbaatit ovat yleensä voimakkaimmin kiinni aktiivihielessä. Tämä johtuu siitä, että ne mahtuvat aktiivihieksen pienimpiin onkaloihin. (Hannola 2007, s. 17)

Suuremmat huokokset muodostavat makrohuukoisen alueen, joka pystyy adsorboimaan suuria molekyyliä ja molekyylien ryvästymiä. Makrohuukokset ja mesohuukokset auttavat myös levittämään suodatettavan aineen hiilipartikkelin sisällä sijaitseville adsorptioalueille. Makrohuukoisen alueen tukkeutuessa adsorbaatit eivät pääse kulkeutumaan hiilipartikkelin sisälle ja edelleen aktiivihieksen meso- ja mikrohuukoille alueille. (Hannola 2007, s. 17)

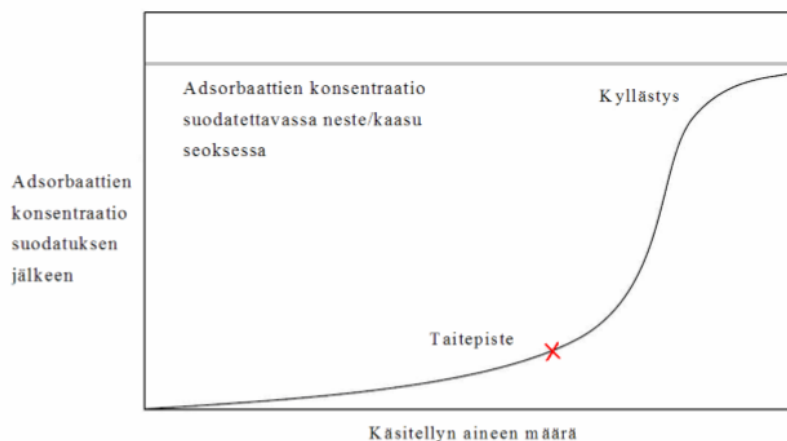
Aktiivihieksen raekoko vaikuttaa suodatimen tehokkuuteen niin, että pienikokoisten aktiivihiekerakeiden väliin jää vähemmän vapaata tilaa kuin suurempien rakeiden ja pienemmät raaket tehostavat suodatimen suorituskykyä adsorbattien poistossa, mutta samalla aiheuttavat merkittävän muutoksen suodatimen virtausvastukseen. (Hannola 2007, s. 29)

Puhdistettavan ilman kaasupitoisuus vaikuttaa aktiivihieksen adsorptiokapasiteettiin niin, että adsorptiokapasiteetti kasvaa, kun kaasupitoisuus kasvaa. Yhteen kiloon adsorptiomassaa, jonka adsorptiokyky on 40% voi imeytyä 40% kaasumaisia epäpuhtauksia sen painosta (0,4 kg

kaasumolekyylejä) hyvin korkeilla pitoisuuksilla, mutta vain muutamia prosentteja hyvin alhaisilla pitoisuuksilla samaa kaasua. (Sandberg (toim.) 2016, s. 224)

### 3.6.3 Aktiivihiilen uudelleenaktivointi

Käytön seurauksena adsorbointialueet aktiivihiilessä tukkeutuvat ja aktiivihiili on vaihdettava tai aktivoitava uudelleen. Kyllästyneen aktiivihiilen raja etenee aktiivihiilessä hyvin tasaisena adsorptiorintamana. Aktiivihiili kykenee tyypillisesti suodattamaan adsorbaatteja hyvin tehokkaasti aina aktiivihiilen suorituskyvyn taitepisteeseen asti. Tämän taitepisteen saavuttamisen jälkeen aktiivihiilen suodatuskyky romahtaa nopeasti (kuva 3). Yleensä käytetty aktiivihiili voidaan aktivoida uudelleen. Uudelleenaktivointi tapahtuu kuumentamalla aktiivihiiltä noin 820-950 °C lämpötilaan. Aktivointiprosessilla saadaan tyypillisesti alkuperäisen aineen adsorptio-ominaisuuksista käyttöön jopa 90-95 %. Osa aktiivihiilen massasta menetetään uudelleenaktivoinnin yhteydessä. (Hannola 2007, s.25-26)



Kuva 3. Periaatekuvaaja taitepisteen jälkeen tapahtuvasta nopeasta aktiivihiilen adsorptiokyvyn heikkenemisestä. Hiilipatjan läpäisevien adsorbaattien määrä ennen punaisella rastilla merkittyä taitepistettä on vähäistä. Taitepisteen jälkeen aktiivihiilen suorituskyky heikkenee romahdusmaisesti ja suurin osa adsorbaateista pääsee hiilipatjasta läpi. (Hannola 2007, s. 27)

Aktiivihiilisuodattimen käyttöikä voi vaikuttaa esimerkiksi se, otetaanko huonetilaan tuloilma katutasosta vai korkealta, koska tällä voi olla vaikutusta tuloilman sisältämien kaasumaisten epäpuhtauksien määrään. Normaaleissa olosuhteissa aktiivihiilisuodattimen suodatus-  
teho heikkenee merkittävästi vuodessa, mutta suodatin voidaan joutua vaihtamaan uuteen jopa kuukauden välein, jos ilmassa on runsaasti epäpuhtauksia. Kemiaaliset suodattimet tulee vaihtaa uusiin ilmanpuhdistimen valmistajan antamien ohjeiden mukaisesti. (Luomalahti 2013, s.25 - 26)



#### 4 ILMANPUHDISTIMEN VALINTA

Ilmanpuhdistimen tarve on aina selvitettävä kohde- ja tapauskohtaisesti. On selvitettävä, onko ilmanpuhdistimen käyttö perusteltua ja saadaanko sen käytöllä sisäilman laatua parannettua väliaikaisesti halutulle ja hyväksyttävälle tasolle. Ilmanpuhdistinta valittaessa on huomioitava, että eri puhdistustekniikoilla varustetut ilmanpuhdistimet tehoavat eri altisteisiin eli on tutkittava ja tiedettävä mitä altisteita sisäilmasta halutaan poistaa. Tämän lisäksi esimerkiksi aktiivivihiilen kemiallisten yhdisteiden sitomiskyky riippuu monesta tekijästä mm. aktiivivihiilessä käytetystä raaka-aineesta, aktiivivihiilessä käytetyistä kemikaaleista ja aktiivivihiilen määrästä. Aktiivivihiilestä irtoaa pienhiukkasia, joita voidaan ottaa talteen esimerkiksi samassa ilmanpuhdistimessa olevalla HEPA-suodattimella. Kemiallisten suodattimien toimivuudesta on varsin vähän tutkimustietoa (Hengityслиitto 2019).

Sisäilmaa kierrättävää konetta valittaessa on huomioitava puhdistettavan tilan koko suhteessa ilmanpuhdistimien tehoon ja määrään. Laitteen läpi kiertävän ilmavirran tulee olla riittävän suuri huoneen tilavuuteen verrattuna (Linna 2015, s. 32). Puhtaan ilman tuoton (CADR) pitää olla tilan kokoon nähden riittävä. Ilmanpuhdistimen tehoa olisi hyvä pystyä säätämään kulloisenkin tarpeen mukaiseksi. Ilmanpuhdistimissa on eroja myös siinä mihin suuntaan ja miltä korkeudelta niistä puhalletaan puhdasta ilmaa huonetilaan. Suoraan ylöspäin puhaltava laite tuottaa vähemmän vedon tunnetta koneen sivuille kuin versiot, jotka puhaltavat puhdistetun ilman oleskeluvyöhykkeelle lattian suuntaisesti. Myös puhtaan ilman heittopituus vaikuttaa vedon tunteeseen. Näillä ominaisuuksilla on myös vaikutusta siihen, kuinka puhdas ilma leviää huonetilaan. Ilmanpuhdistimen aiheuttamat ilmavirrat vaikuttavat myös epäpuhtauksien siirtymiseen tilan osasta toiseen.

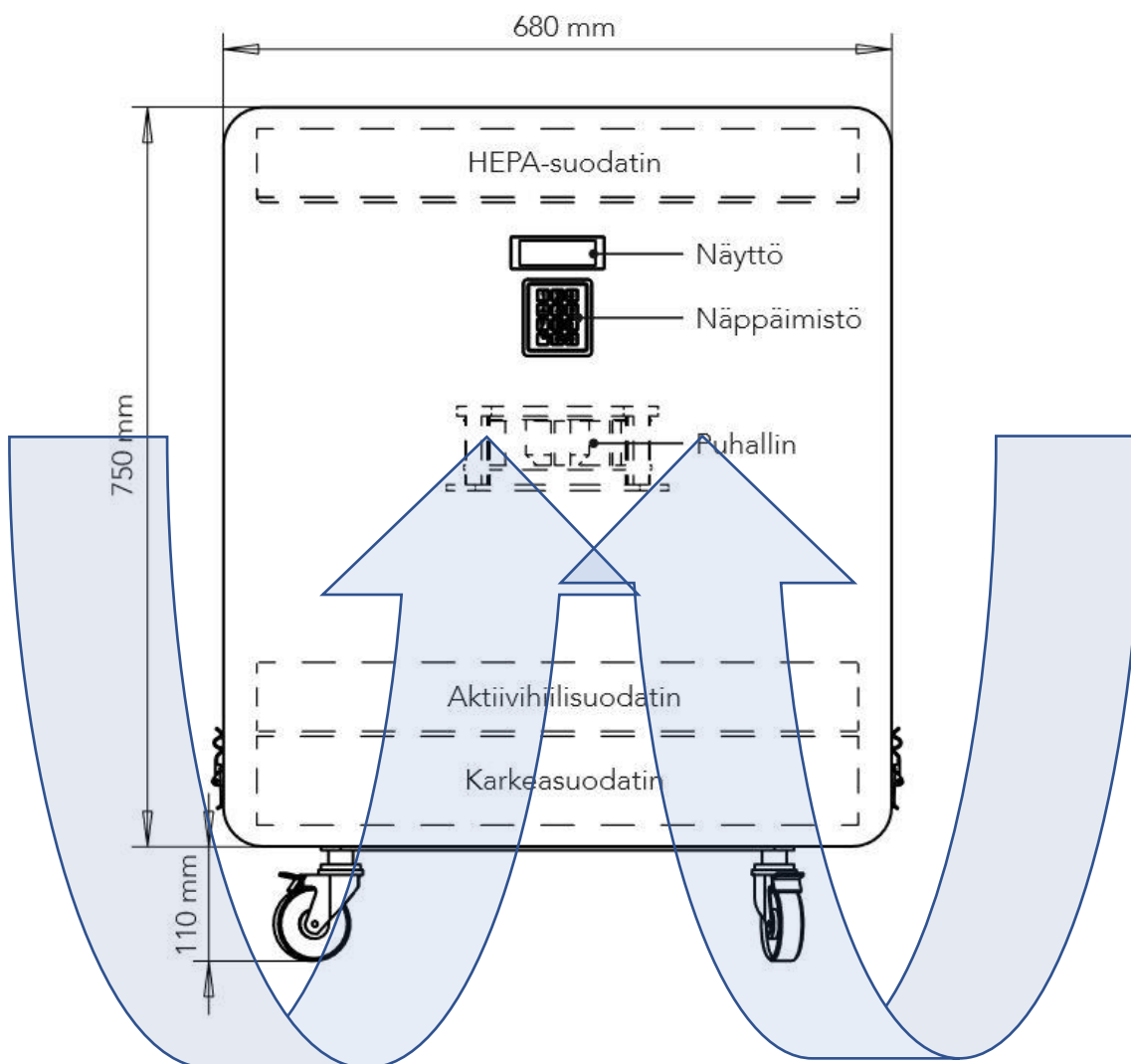
Itsenäisesti toimivat ja irralliset ilmanpuhdistimet sijoitetaan tilassa yleensä oleskeluvyöhykkeelle eli lähelle tilan käyttäjiä. Tällöin on tärkeää, ettei ilmanpuhdistimesta aiheudu ympäristöönsä liian suurta melupäästöä, jotta työskentely esimerkiksi toimistossa ei häiriintyisi. (Luomalahti 2013, s.40) Luomalahti tutki diplomityössään huonekohtaisia ilmanpuhdistimia ja tuli laboratoriotestien perusteella mm. siihen tulokseen, että nykyisenlaiset huonekohtaiset ilmanpuhdistimet soveltuvat yleisesti ottaen melko heikosti sisäilmaongelmien ratkaisemiseen. Tähän oli syynä pääosin laitteiden lähes poikkeuksetta synnyttämä suuri melupäästö. Lisäksi tutkimuksissa havaittiin, että monella ilmanpuhdistimella on taipumus synnyttää huonetilan oleskelualueelle vetoriskin mahdollisuus. (Luomalahti 2013, s. 76) Ilmanpuhdistinta valittaessa on hyvä selvittää, kuinka suurella teholla ilmanpuhdistinta tulee tilassa käyttää, jotta haluttu vaikutus saadaan aikaiseksi ja millaisen melutason ja vedon tunteen kyseinen tehoasetus tilaan tuottaa.

Osa ilmanpuhdistimista tuottaa haitallisia sivutuotteita kuten typen oksideja, formaldehydiä ja otsonia (Hengityслиitto 2019). Erityisen herkkiä otsonin ärsytysoireille ovat vanhukset, astmaatit sekä pikkulapset, joiden keuhkot ovat vasta kehitysvaiheessa (Sandberg (toim.) 2016, s. 231). Ilmanpuhdistimista valittaessa on huomioitava myös niiden erilaiset huoltotarpeet. Jotkut puhdistimet ovat lähes huoltovapaita, kun toiset saattavat vaatia huoltotoimenpiteitä tiheästi. Huoltovälien pituuteen vaikuttaa yleensä myös epäpuhtauksien määrä ja laatu

puhdistettavassa tilassa. Ilmanpuhdistinta valittaessa kannattaa selvittää myös huollon ja mm. vaihtosuodattimien saatavuus.

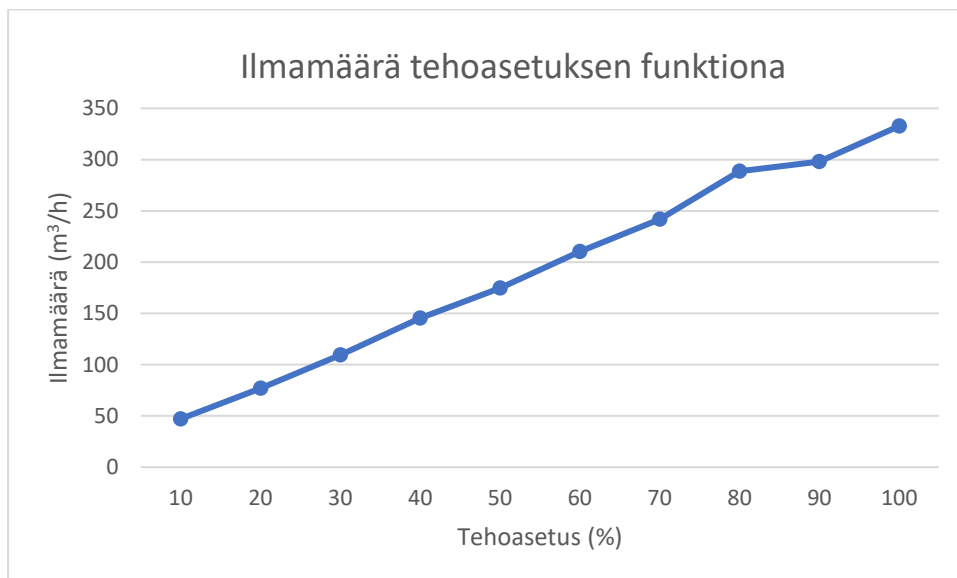
## 5 TUTKIMUSMENETELMÄT JA -JÄRJESTELYT

Tämän opinnäytetyön yhtenä tavoitteena oli tutkia käytännön kokein aktiivihiilellä varustetun ilmaa kierrättävän ilmanpuhdistimen kykyä poistaa sisäilmasta kemiallisia yhdisteitä. Tutkimuslaitteena käytettiin karkeasuodattimella, impregnoitulla aktiivihiilisuodattimella ja H13-luokan HEPA-suodattimella varustettua ilmanpuhdistinta. Ennen aktiivihiilisuodatinta puhdistettava ilma kulkee ilmanpuhdistimessa karkeasuodattimen läpi. Karkeasuodattimessa ilmasta poistetaan suurimmat epäpuhtaudet ja estetään isojen hiukkasten pääsy aktiivihiilisuodattimelle. Karkea suodatin pidentää aktiivihiilisuodattimen huolto- / vaihtoväliä, koska aktiivihiilisuodatin ei tukkeudu niin nopeasti. Aktiivihiilisuodattimen jälkeen ilmanpuhdistimessa on H13-luokan HEPA-suodatin, joka poistaa puhdistettavasta ilmasta pienimmät hiukaset. HEPA-suodatin poistaa yli 99,97% yli  $0,3 \mu\text{m}$  pöly-, eläin- ja siitepölyhiukkasista. HEPA-suodatin estää myös aktiivihiilestä irtoavien pienhiukkasten pääsyn sisäilmaan. (kuva 4)



Kuva 4. Leikkauskuvaa testatusta ilmanpuhdistimesta. Ilmavirta kulkee ilmanpuhdistimen läpi nuolten osoittamalla tavalla. Puhdistettava ilma otetaan koneeseen sen alapuolelta.

Ilmanpuhdistimessa on portaaton tehonsäätö. Laitetta testattiin viidellä eri asetuksella. Asetukset olivat 20 %, 40 %, 60 %, 80 % ja 100 % maksimitehosta. 20 % asetuksella koneen läpi kulkeva ilmamäärä on 77 m<sup>3</sup>/h ja asetuksella 100 % ilmamäärä on 333 m<sup>3</sup>/h. Kuvassa 5 ilmamäärät eri tehoasetuksilla kuvaajan muodossa.

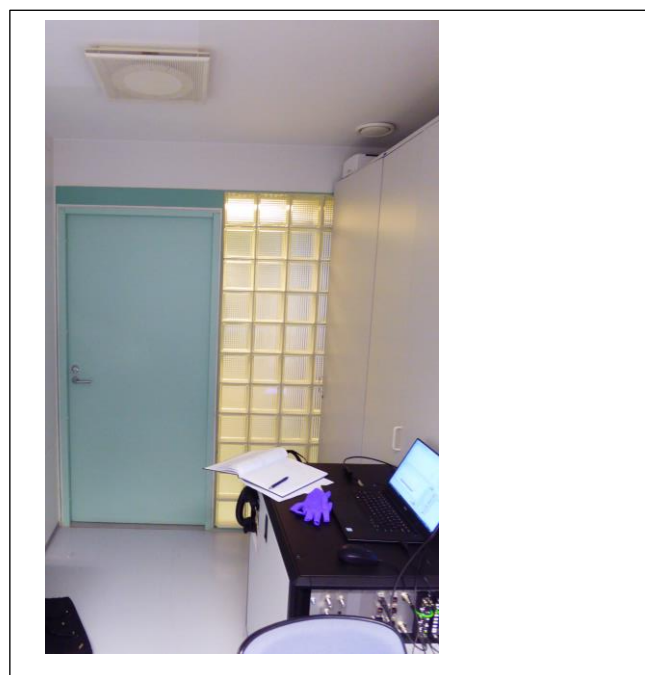


Kuva 5. Ilmanpuhdistimen ilmamäärät eri tehoasetuksilla. Ilmamäärä kasvaa lineaarisesti suhteessa tehoasetuksen nostoon lukuunottamatta aluetta 80 % yläpuolella.

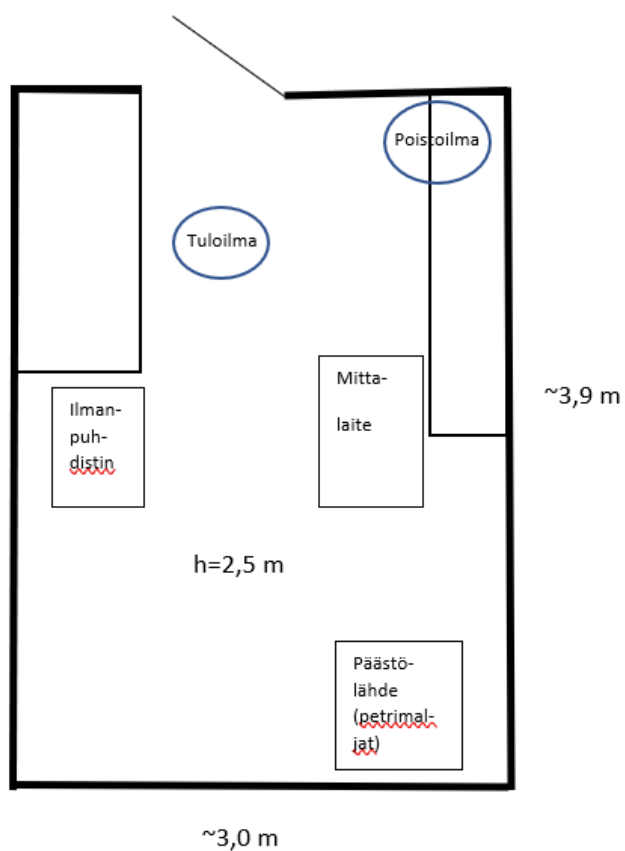
Ilmanpuhdistinta testattiin Helsingin yliopiston molekyyli­tieteen tiloissa tammikuussa 2019. Testihuoneena oli normaalissa toimistokäytössä oleva pienikokoinen toimistohuone, jossa oli koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto. (kuvat 6,7,8). Ilmanvaihtokerroin testien aikana oli 2,9 l/h. Ilmaa huonetilaan tuli teoreettisen laskun perusteella 19 l/s. Ilmanvaihtokerroin mitattiin hiilidioksidin vähenemisen perusteella ilmanvaihdon normaalikäytön aikana.



Kuva 6. Yleiskuva testihuoneesta.



Kuva 7. Yleiskuva testihuoneesta käytävän suuntaan. Keskellä kuvaa ylhäällä tuloilmalaite ja oikeassa reunassa ylhäällä poistoilmaventtiili.



Kuva 8. Viitteellinen kuva testihuoneesta. Huoneen pinta-ala (pois lukien kiintokaappi ja kotelointi) on noin  $9,6 \text{ m}^2$  ja tilavuus ilman kiintokaappia ja kotelointia on noin  $24 \text{ m}^3$ .

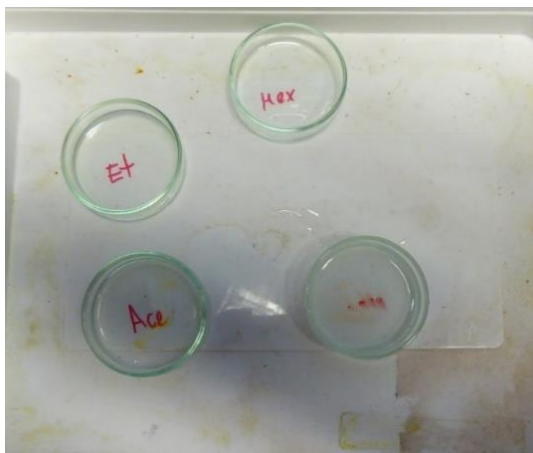
Helsingin yliopistolla on mittalaite (protoninsiirtoreaktiolentoaikamassaspektrometri), jolla pystytään mittaamaan sisäilman kemiallisia yhdisteitä reaaliajassa. (kuva 9) Laitteen herkkyys on noin 1 ppb.



Kuva 9. Mittalaitteena käytettiin reaaliajassa toimivaa massaspektrometriä PTR-TOF-MS: Proton-Transfer-Reaction Time-Of-Flight Mass Spectrometer (protoninsiirtoreaktiolentoaikamassaspektrometri).

Ilmanpuhdistinta testattiin neljän erilaisen kemiallisen yhdisteen, heksanaalin, asetonin, etanolin ja toluenin poistamiseen testihuoneen sisäilmasta. Testissä testihuoneeseen tuotettiin kemiallisia yhdisteitä kaatamalla yhdisteitä petrialjaan ja antamalla yhdisteiden haihtua sisäilmaan. (kuva 10.) Toluenia pidetään sopivana referenssikaasuna VOC-yhdisteille ja lisäksi se on hyvä referenssi mikrobeista vapautuville kaasumaisille yhdisteille (Mattila 2018, s. 47).

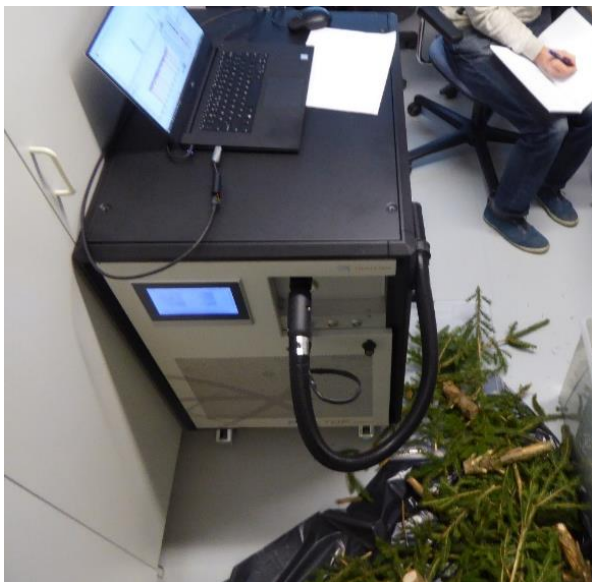
Ilmanpuhdistimen tehoa kemiallisten yhdisteiden poistamiseen testattiin ilmanpuhdistimen kuudella eri tehoasetuksella 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % ja 100 % maksimitehosta. Tutkimustulokset on esitetty kappaleessa 7.



Kuva 10. Testihuoneen päästölähteinä toimivat avoimet petrialjat, joissa oli heksanaalia, asetonia, etanolia ja toluenia.

Ilmanpuhdistimen tehoa testattiin karkeasti myös siirtämällä päästölähdettä eri paikkaan suhteessa ilmanpuhdistimeen ja käytettyyn mittalaitteeseen.

Pineenin poistumista testattiin tuottamalla terpeenejä testihuoneeseen kuusen avulla. Pineeni ei testien yhteydessä mitatuissa pitoisuuksissa ole terveydelle haitallista. Testihuoneessa mitattiin ensin pineenipitoisuudet normaalitilassa niin, että ilmanpuhdistin ei ollut vielä päällä ja tilaan ei oltu vielä tuotu kuusta. Tämän jälkeen testihuoneeseen tuotettiin pineeniä levittämällä kuusen oksat ja rungon palat huoneen lattialle. (kuva 11) Pineenipitoisuuden annettiin tasaantua, jonka jälkeen testihuoneen pineenipitoisuus mitattiin. Seuraavaksi testihuoneessa käynnistettiin ilmanpuhdistin. Ilmanpuhdistimen tehoa pineenin poistamiseen testattiin ilmanpuhdistimen tehokkaimmalla asetuksella (100 %). Lopuksi ilmanpuhdistin sammutettiin ja pineenin pitoisuuden annettiin tasaantua testihuoneeseen ja pineenin pitoisuus mitattiin. Käytännössä laite mittaa yhdessä kaikkia monoterpeenejä, eikä se erottele niitä. Valtaosa kuusen emittoimista monoterpeeneistä koostuu kuitenkin pineenistä (Vaittinen, 2019).

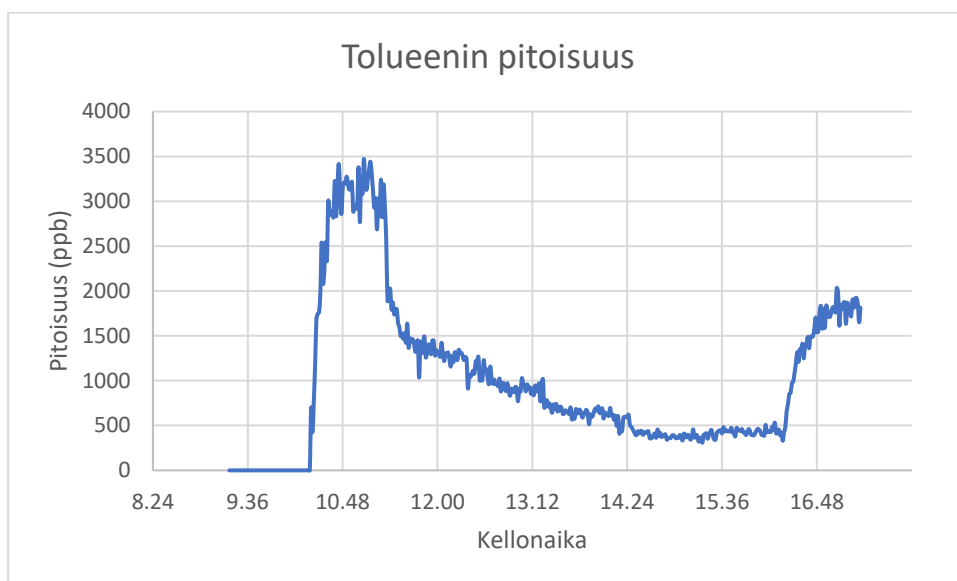


Kuva 11. Pineenipitoisuuden mittaamista.

## 6 TUTKIMUSTULOKSET

Ilmanpuhdistimen tehoasetusta vaihdettiin sarjassa 0-20-40-60-80-100-0 prosenttia. Havaittiin, että tolueenin pitoisuuteen tehoasetus vaikutti niin, että asetuksilla 20, 40, 60 ja 80 testi-huoneen tolueenipitoisuus laski aina kun ilmanpuhdistimen tehoa lisättiin. Tehoasetukselta 80 % täydelle teholle (100 %) siirryttäessä pitoisuus kuitenkin hieman kasvoi. (kuvat 12, 13) Tämä saattaa johtua esimerkiksi siitä, että aktiivihiilen läpi kulkevan puhdistettavan ilman viipymä aktiivihiilen pinnalla ei ole tarpeeksi pitkä, jotta adsorptio ehtisi toteutua täydellisesti. Vaikka ilmanpuhdistimen läpi virtaava ilmamäärä ei kasva yhtä paljon välillä 80-100% kuin väleillä 0-20 %, 20-40 % ja 60-80 %, kasvaa ilmamäärä silti aina tehoasetusta nostettaessa. (Kuva 5, kappale 5) Viipymääjan pituuteen vaikuttaa ilmanpuhdistimen tehon lisäksi aktiivihiilipatjan paksuus. Viipymääjan lisäksi vaikuttavana tekijänä saattavat olla muuttuvat ilmavirtaukset eri tehoasetuksilla. Ilmavirtaukset vaikuttavat siihen, kuinka hyvin epäpuhtaudet kulkeutuvat ilmanpuhdistimeen.

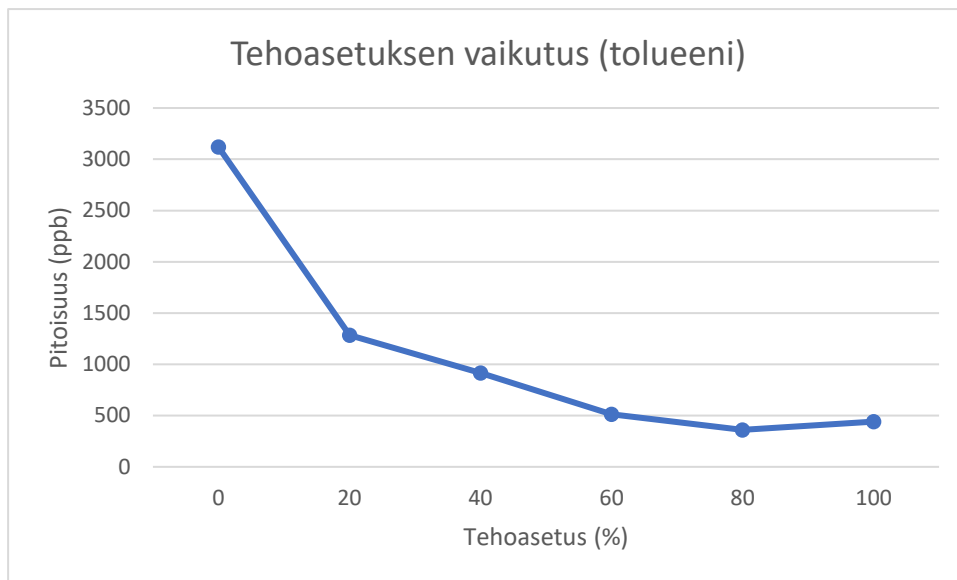
Tolueenin pitoisuus ei noussut ilmanpuhdistimen sammuttamisen jälkeen (klo 16.22 eteenpäin) yhtä suureksi kuin mitä se oli ennen ilmanpuhdistimen päälle laittamista (välillä klo 10.29-11.20). Syytä tähän ei osata sanoa.



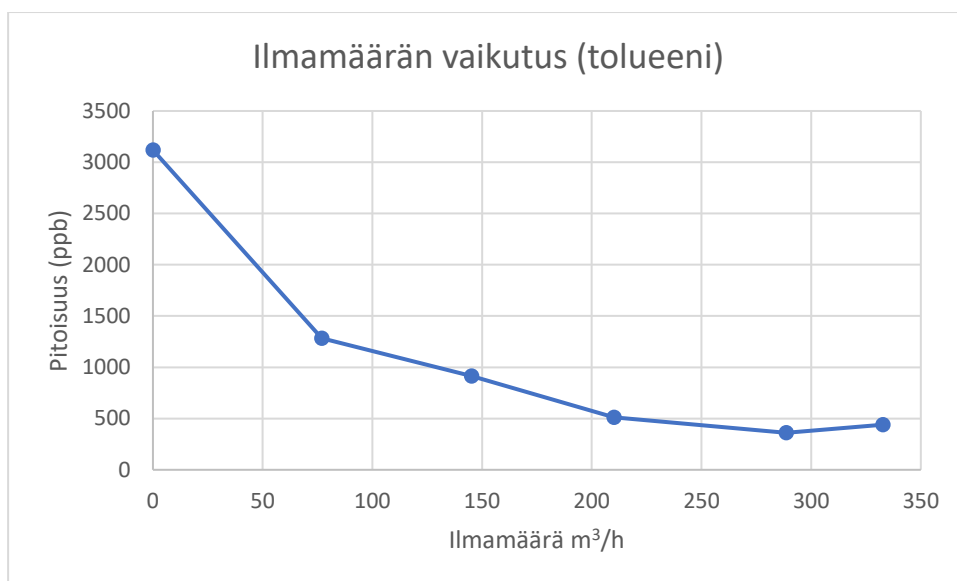
Kuva (12). Tolueenin pitoisuus reaaliajassa testien aikana.  $1000 \text{ ppb} = 3769 \mu\text{g}/\text{m}^3 = 3,769 \text{ mg}/\text{m}^3$ .



Kuvaajissa 13 ja 14 on esitetty tehoasetuksen ja ilmamäärän vaikutus toluenin pitoisuuteen. Koska ilmamäärä riippuu lähes lineaarisesti tehoasetuksesta, kuvaajat ovat lähes toistensa kaltaisia.

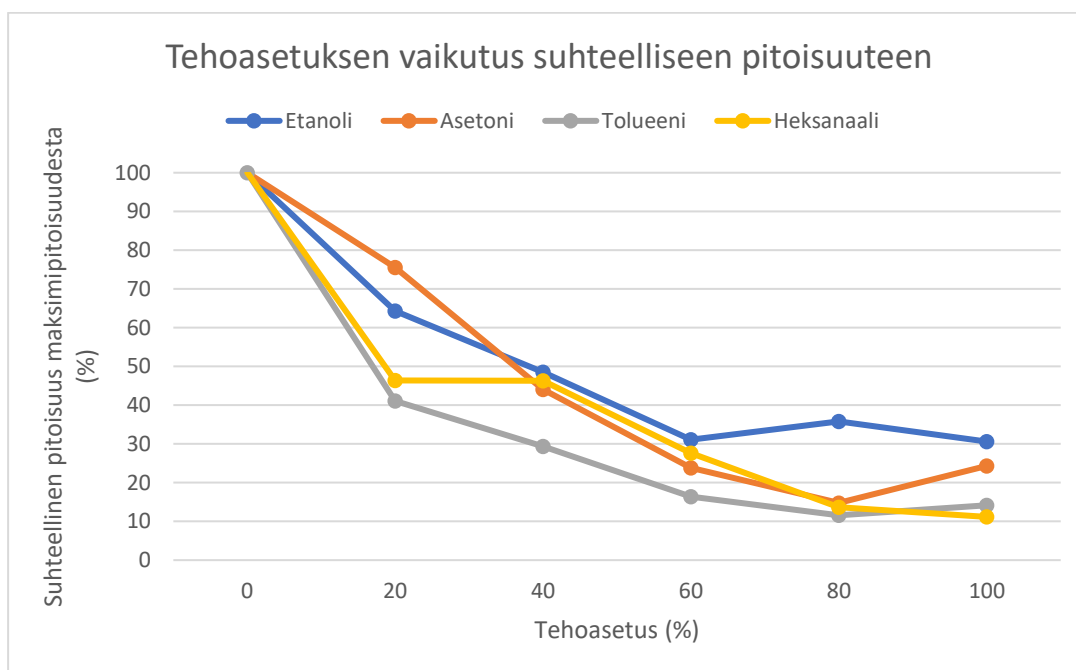


Kuva 13. Toluenin pitoisuus ilmanpuhdistimen eri tehoasetuksilla päästölähteen ollessa noin 2 metrin päässä ilmanpuhdistimesta.



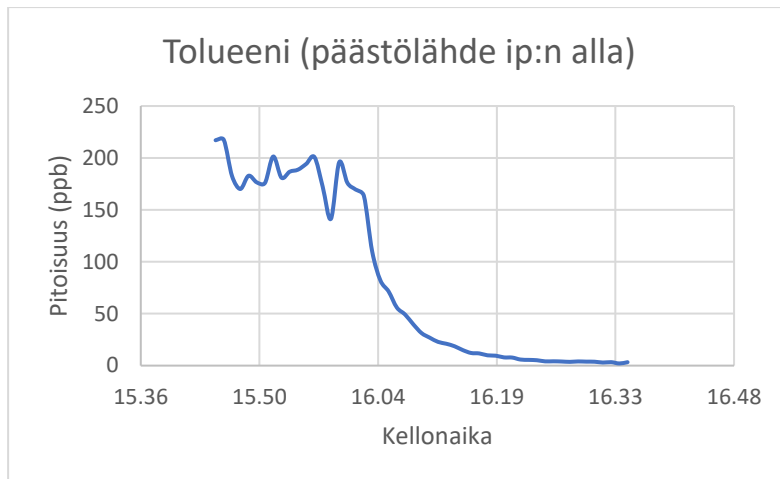
Kuva 14. Toluenin pitoisuus ilmanpuhdistimen ilmamäärän funktiona päästölähteen ollessa noin kahden metrin päässä ilmanpuhdistimesta.

Ilmanpuhdistimen tehoasetus vaikutti eri yhdisteisiin eri tavalla. Esimerkiksi ilmanpuhdistimen päälle kytkeminen 20 % teholla pudotti parhaimmillaan yksittäisen yhdisteen pitoisuutta (tolueeni) noin 40 %:iin maksimipitoisuudesta ja huonoimmillaan (asetoni) noin 75 %:iin. Kahden yhdisteen kohdalla pitoisuus saatiin testitilanteessa alimmalle tasolle tehoasetuksen oltua 80 % (asetoni ja tolueeni) ja kahden muun yhdisteen kohdalla pitoisuus putosi alimmalle tasolle ilmanpuhdistimen oltua täydellä (100 %) teholla (etanoli ja heksanaali). Ilmanpuhdistin vähensi testien aikana asetonin, tolueenin ja heksanaalin pitoisuudet parhaimmillaan 11-15 % pitoisuuteen maksimipitoisuudesta. Etanolin kohdalla pitoisuus väheni parhaimmillaan 31 % pitoisuuteen maksimipitoisuudesta. (kuva 15) Tutkimustulosten perusteella vaikuttaa siltä, että testattu ilmanpuhdistin poistaa tehokkaammin raskaampia VOC-yhdisteitä varsinkin pienemmillä tehoasetuksilla. Kaikki tässä työssä esitellyt tutkimustulokset ovat alustavia ja niihin liittyy huomattava mittausepävarmuus. Suurin epävarmuus liittyy heksanaalin ja tolueenin mittaustuloksiin.



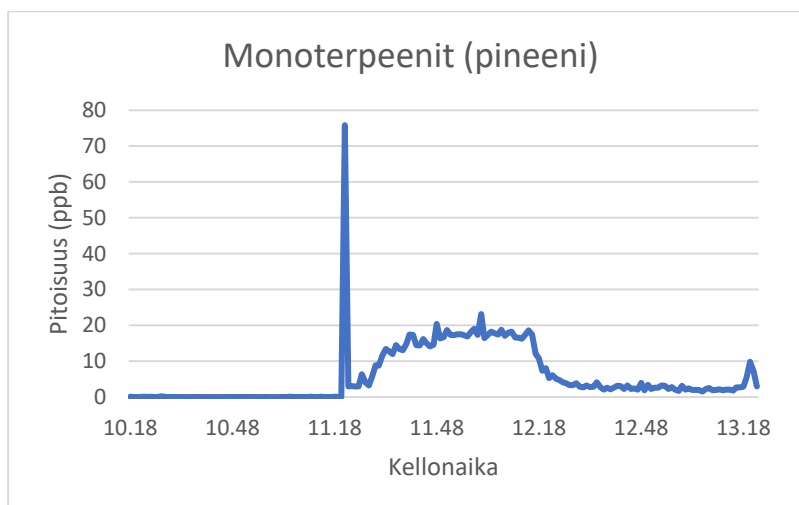
Kuva 15. Tehoasetuksen vaikutus tutkittujen yhdisteiden suhteelliseen pitoisuuteen.

Ilmanpuhdistinta haluttiin testata myös niin, että päästölähde on lähempänä ilmanpuhdistinta. Testilaitteena ollut ilmanpuhdistin ottaa puhdistettavan ilman sisään koneen alaosaan ja se puhaltaa puhdistetun ilman suoraan ylöspäin. Päästölähde laitettiin ilmanpuhdistimen alle (tolueenia petrimaljassa) ja ilmanpuhdistinta käytettiin tehoasetuksella 50 %. Kuvassa 16 näkyy testihuoneen tolueenipitoisuus tämän yhden karkean testin aikana. Tolueenin pitoisuus putosi tässä testissä noin 2 %:iin alkuperäisestä pitoisuudesta. Tutkimustuloksista selvisi, että päästölähteen ja ilmanpuhdistimen sijainti toisiinsa nähden vaikuttaa siihen, kuinka paljon sisäilman epäpuhtauksista ilmanpuhdistin pystyy poistamaan.



Kuva 16. Ilmanpuhdistimen vaikutus, kun päästölähde on ilmanpuhdistimen alla. Ilmanpuhdistin oli tehoasetuksella 50 %. Aluksi päästölähde oli huoneen toisessa päässä noin kahden metrin päässä ilmanpuhdistimesta. Kello 16.00 tolueenimalja asetettiin ilmanpuhdistimen alle. Tolueenin pitoisuus putosi noin 2 prosenttiin alkuperäisestä eli pitoisuuteen 3 ppb.

Kuvassa 17 näkyy pineenin pitoisuus testihuoneessa ajan funktiona. Kuvaajassa näkyy selkeä piikki kohdassa, jossa kuusi tuotiin testihuoneeseen ja levitettiin lattialle. Pineenin pitoisuus tasaantui noin 18 ppb:n pitoisuuteen. Kun ilmanpuhdistin käynnistettiin, laski pineenin pitoisuus noin 2 ppb:een.



Kuva 17. Joulukuusi tuotiin testihuoneeseen kello 11.20. Ilmanpuhdistin käynnistettiin täydellä teholla (100 %) kello 12.15. Ilmanpuhdistin sammutettiin kello 13.22.

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän tutkimuksen perusteella aktiivihiilisuodattimella varustettu ilmanpuhdistin poistaa sisäilman kemiallisia epäpuhtauksia. Aktiivihiili tehoaa eri tavoin erilaisiin kemiallisiin yhdisteisiin. Näin ollen testiaineella, jolla ilmanpuhdistimen suorituskykyä testataan, on suuri merkitys. Jos ilmanpuhdistimen puhtaan ilman tuotto testataan vain yhdellä testiaineella, saadaan selville ilmanpuhdistimen suorituskyky vain kyseisen testiaineen poistamiseen sisäilmasta.

Ilmanpuhdistimen puhaltimen käyttöteholla on merkitystä siihen, kuinka kauan epäpuhtaudet viipyvät aktiivihiilen pinnalla. Jos viipymäaika on liian pieni, adsorptio aktiivihiilen pinnalla ei ehdi tapahtua täydellisesti ja osa ilman epäpuhtauksista, jotka hitaammalla ilmavirralla olisivat adsorptoituneet aktiivihiileen, kulkeutuvat aktiivihiilisuodattimen läpi takaisin puhdistettavaan sisäilmaan. Toisaalta ilmanpuhdistimen läpi kulkevan ilmamäärän on oltava riittävän suuri suhteessa puhdistettavan tilan kokoon ja ilmanvaihtoon. Puhtaan ilman tuoton (CADR) on oltava tilan kokoon nähden riittävä.

Ilmanpuhdistimen sijainnilla suhteessa päästölähteeseen on suuri merkitys siihen, kuinka matalalle tasolle puhdistettavassa tilassa pitoisuudet alenevat ilmanpuhdistimen avulla.

Kirjallisuustutkimuksessa selvisi edellä esitettyjen asioiden lisäksi myös, se että ilmaakierrättävien ilmanpuhdistinten merkittävänä rajoittavana tekijänä on ilmanpuhdistimien aiheuttama melu. Jotta ilmanpuhdistimen läpi saataisiin kulkemaan riittävä määrä ilmaa aikayksikköä kohden tilan kokoon nähden, joudutaan ilmanpuhdistinta käyttämään suurella teholla. Tehon lisääminen tarkoittaa melun lisääntymistä. Tämä on ongelma kohteissa, joissa ilmanpuhdistimet joudutaan asentamaan oleskeluvyöhykkeelle lähelle tilojen käyttäjiä. Tämän opinnäytetyön yhteydessä testatun ilmanpuhdistimen äänitasoja eri tehoasetuksilla ei testattu aika- ja resurssipulan vuoksi. Tämän opinnäytetyön yhteydessä tehdyissä suuntaa antavissa testeissä havaittiin, että testeissä käytetty laite poistaa sisäilmasta tehokkaimmin testissä käytettyjä kemiallisia yhdisteitä (etanoli, asetoni, tolueeni ja heksanaali) silloin, kun ilmanpuhdistimen tehosta on käytössä 80-100%. Ilmanpuhdistinta on siis käytettävä täydellä tai lähes täydellä teholla parhaan sisäilmavaikutuksen saavuttamiseksi. Tehoasetuksen nostaminen tarkoittaa myös melutason nousua.

Ilmanpuhdistimen tarve on aina selvitettävä kohde- ja tapauskohtaisesti. On selvitettävä, onko ilmanpuhdistimen käyttö perusteltua ja saadaanko sen käytöllä sisäilman laatua parannettua väliaikaisesti halutulle ja hyväksyttävälle tasolle. Ilmanpuhdistinta valittaessa on huomioitava, että eri puhdistustekniikoilla varustetut ilmanpuhdistimet tehoavat eri altisteisiin eli on tutkittava ja tiedettävä mitä altisteita sisäilmasta halutaan poistaa. Sisäilmaa kierrättävää ilmanpuhdistinta valittaessa on huomioitava puhdistettavan tilan koko suhteessa ilmanpuhdistimien tehoon ja määrään. Puhtaan ilman tuoton pitää olla tilan kokoon nähden riittävä. Osa ilmanpuhdistimista tuottaa haitallisia sivutuotteita kuten typen oksideja, formaldehydiä ja otsonia. Ilmanpuhdistimet vaativat lisää tutkimuksia, jotta saisimme tietää tarkemmin niiden vaikutuksista sisäilman laatuun ja voisimme käyttää niitä sisäilman laadun parantamiseen turvallisemmin mielin.

## Kirjallisuusluettelo

Asumisterveysasetuksen soveltamisohjeet, osat I-V. Ohje 8/2016. Valvira, Sosiaali- ja terveysalan lupa- ja valvontavirasto. Saatavissa: <https://www.valvira.fi/ymparistoterveys/terveysalansuojelu/asumisterveys>

Camfil. 2018. Verkkajulkaisu. Viitattu 7.4.2019. Saatavissa: [https://www.camfil.com/-/media/files/qbank/documents/documents/brochures/standards\\_iso-16890\\_fin.pdf?la=fi-fi&rev=c3494e871bf44617867e3e53153407b2&hash=CF4609517EF56417A73E8793F964836B](https://www.camfil.com/-/media/files/qbank/documents/documents/brochures/standards_iso-16890_fin.pdf?la=fi-fi&rev=c3494e871bf44617867e3e53153407b2&hash=CF4609517EF56417A73E8793F964836B)

Hannola T. Diplomityö. Aktiivihielessä etenevän adsorptiorintaman mittaaminen puolijohdekaasuantureiden avulla. 2007.

Hengitysliitto. 2016. Opas sisäilmasta.. Verkkajulkaisu. Viitattu 7.10.2018. Saatavissa: [https://www.hengitysliitto.fi/sites/default/files/oppaat/sisailmaopas\\_kevyt.pdf](https://www.hengitysliitto.fi/sites/default/files/oppaat/sisailmaopas_kevyt.pdf)

Hengitysliitto. 2019. Verkkajulkaisu. Viitattu 9.3., 23.3. ja 7.4.2019. Saatavissa: <https://www.hengitysliitto.fi/fi/sisailma/ilmanpuhdistin>

Hometalkoot.fi- sivustolta opetusmateriaali sisäilma-asioita opiskelevien ammattilaisten käyttöön osa 6/9. Ilmanvaihto ja sisäilmasto. Luettu 23.2.2019.

Järnström H, luentomateriaali RTA4- kurssi. Sisäilmasto ja materiaalien emissiot – mittaus ja analyysimenetelmät, 8.1.2019.

Linna K. Opinnäytetyö RTA. Puhdistustekniikoiden vaikutus eri altisteperäisten oireiden vähenemiseen. 2015.

Luomalahti N. Diplomityö. Tekniset vaatimukset huonekohtaisen ilmanpuhdistimen valitsemiseksi sisäilmaongelmaisessa kohteessa. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2013.

Mattila I. Diplomityö. Huonekohtaisten ilmanpuhdistimien suorituskyvyn mittausmenetelmät. Tampereen teknillinen yliopisto. 2018.

Niskanen M, Fysikaalisen kemian Pro gradu- tutkielma. Hybridimenetelmän käyttö kaivosvesien sulfaatin poistossa. 2014.

Pulkinen M. Opinnäytetyö (AMK). Aktiivihielessä aktiivihielessä regenerointi ja käyttö. 2010.

Salonen H, Lappalainen S, Lahtinen M, Holopainen R, Palomäki E, Koskela H, Backlund P, Niemelä R, Pasanen A, Reijula K. Toimiston sisäilmaston tutkiminen. Työterveyslaitos, Tampere 2011

Sandberg E (toim.). Ilmastointilaitoksen mitoitus. Ilmastointitekniikka osa 2. Alkuteos 2014. Toinen painos 2016.

Sisäilmastoluokitus 2018, RT 07-11299, Sisäilmayhdistys ry. 2018.

Suominen J. Opinnäytetyö (AMK). Terveydelle haitalliset aineet korjausrakentamisessa. 2012.

Tikkanen T., Mero J. Lopputyö. Sterimat ilmanpuhdistimen UV-C säteilykammion vaikutus mikrobin tuhoamiseen huoneilmasta. 2011.

Työterveyslaitos. 2019. Verkkojulkaisu. Kooste epäpuhtaustasoista, joiden ylittyminen voi viitata sisäilmasto-ongelmiin toimistotyypisillä työpaikoilla. Viitattu 6.4.2019. Saatavilla: <https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2016/09/sisaympariston-viitearvoja.pdf>

Vaittinen O, Lapinlampi T. Uuden hirsirakennuksen sisäilman VOC-pitoisuudet – seuranta-tutkimus. Sisäilmastoseminaariesitys 2019.

Valtanan A, Hovi H, Tuomi T. Työpaikkojen sisäilman VOC- viitearvot. Työterveyslaitos, 2016.

Villberg K, Saarela K, Tirkkonen T, Pasanen A, Kasanen J, Pasanen P, Kalliokoski P, Mus-salo-Rauhamaa H, Malmberg M & Haahtela T, 2004. Sisäilman laadun hallinta. VTT publi-cations 540. <https://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2004/P540.pdf>, luettu helmi-maaliskuussa 2019.

Ympäristöministeriö (1). 2016, päivitetty 2019. Verkkojulkaisu. Viitattu syyskuussa 2018. Saatavissa: <http://www.ym.fi/rakentamismaaraykset>

Ympäristöministeriö (2). 2016, päivitetty 2019. Verkkojulkaisu. Viitattu 7.4.2019. Saata-vissa: [http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto\\_ja\\_rakentaminen/Lainsaadanto\\_ja\\_ohjeet/Rakenta-mismaarayskokoelma/Terveellisyys](http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakenta-mismaarayskokoelma/Terveellisyys)

Zhang Y, Mo J, Li Y, Sundell J, Wargocki P, Zhang J, Little J, Corsi R, Deng Q, Leung M, Fang L, Chen W, Li J, Sun Y. 2011. Referaatti review- artikkelista (Atmospheric Environ-ment 45 (2011) 4329-4343). Referaatin suomentanut Olavi Vaittinen.