



Karelia-ammattikorkeakoulu  
Talotekniikan koulutusohjelma, insinööri (AMK)

# Laboratoriotilojen ilmanvaihdon suunnittelun kartoitusohje

Kimmo Luostarinen

Opinnäytetyö, Joulukuu 2022

[www.karelia.fi](http://www.karelia.fi)



**Karelia**  
AMMATTIKORKEAKOULU

**OPINNÄYTETYÖ**  
**Joulukuu 2022**  
**Talotekniikan koulutus**

Tikkarinne 9  
80200 JOENSUU  
+358 13 260 600

Tekijä(t)

Kimmo Luostarinen

Nimeke

Laboratoriotilojen ilmanvaihdon suunnittelun kartoitusohje

Tiivistelmä

Opinnäytetyön tavoitteena oli laatia yhtenäinen kokonaisuus, joka helpottaisi laboratoriotilojen ilmanvaihdon suunnitteluun tarvittavan kartoituksen tekemistä. Työn tarkoitus oli kohottaa omaa ammattitaitoa ja tuottaa tietämystä teollisuuden erikoiskohteiden kartoituksen suorittamisesta.

Opinnäytetyössä käsitellään ilmanvaihdon mitoitusta ja määrittelyä, laitteiston valintaa ja mitoitusta, ilmanlaadun tekijöitä ja hallintaa, teollisuuden erikoistiloja, ilmansuodatusta ja valintoihin vaadittavien tietojen hankintaa. Työhön on koottu standardien, lakien, kirjallisuuden ammattiteosten ja ammattiohjeistuksien sisältöä ilmanvaihtoon vaikuttavista tekijöistä.

Opinnäytetyön pohjalta luotiin tarkastuslista, johon koottiin keskeisiä huomioon otettavia mitoituksen ja määrittelyn kohteita. Tarkastuslistan tavoitteena on helpottaa ilmanvaihdon suunnittelun prosessissa tarvittavien asioiden hahmottamista ja niiden huomioimista.

Kieli  
suomi

Sivuja 82  
Liitteet 4  
Liitesivumäärä 6

Asiasanat

ilmanvaihto, laboratorio, kartoitusohje



**THESIS**  
**December 2022**  
**Degree Programme in Building Services Engineering**

Tikkarinne 9  
80200 JOENSUU  
FINLAND  
+ 358 13 260 600

Author (s)  
Kimmo Luostarinen

Title  
Charting Instructions for Designing the Ventilation for Laboratory Facilities

Abstract

The goal of the thesis was to compile necessary information for the charting into single package, which facilitates designing the ventilation to laboratory facilities. The purpose of the thesis was to increase expertise and to create knowledge of special applications of industry ventilation to manage charting of special applications.

The thesis covers sizing and specifying of air volume, ventilation devices, factors and control of air quality. The special facilities of industry, air filtering and gathering the necessary information to make choices of equipment and sizing are also covered in this thesis. The thesis includes ventilation contents from standards, laws, professional literature and professional guidelines.

Based on the thesis, a checklist was made, which places together essential information of sizing and specifying items and processes to be used in designing the ventilation to laboratory facilities. The purpose of the checklist was to ease perceiving the process and to take account necessary information in ventilation designing.

Language  
Finnish

Pages 82  
Appendices 4  
Pages of Appendices 6

Keywords  
ventilation, laboratory, charting instruction

## Sisältö

1	Johdanto .....	7
2	Ilmanvaihto .....	8
2.1	Yleisilmanvaihdon mitoituksen perusteet .....	8
2.1.1	Ilmamäärät laskennallisesti .....	9
2.1.2	Tasapainotus .....	13
2.1.3	Tuloilmaluokat .....	14
2.1.4	Poistoilmaluokat .....	17
2.2	Tilailmastoinnin luokitus- ja toimintaperiaatteet .....	21
2.3	Työterveys .....	25
3	Laitteisto .....	27
3.1	Kanaviston mitoitus .....	27
3.1.1	Kanaviston materiaalit .....	29
3.1.2	Kanaviston puhtaus .....	30
3.1.3	Kanaviston tiiveys .....	31
3.2	LTO-ratkaisut .....	33
3.3	Päätelaitteet .....	34
3.3.1	Kohdepoistot .....	37
3.3.2	Koteloinnit .....	40
4	Ilmanlaatu .....	42
4.1	Olosuhdehallinta .....	44
4.1.1	Ilman lämmitys .....	44
4.1.2	Jäähdytys .....	47
4.1.3	Kostutus .....	48
4.1.4	Kuivaus .....	49
4.2	Ilmanvaihto, vaaralliset kemikaalit .....	50
4.3	Haitalliseksi tunnetut pitoisuudet, HTP .....	52
5	Erikoistilat .....	54
5.1	Tiiveys .....	54
5.2	Puhdastilat .....	57
5.3	Puhdastilaluokitus .....	58
5.4	Räjähdysvaaralliset tilat .....	61
6	Ilmansuodatus .....	62
6.1	Pölynsuodatus .....	67
6.2	HEPA-suodattimet .....	70
6.3	Molekyylisuodattimet .....	72
7	Kartoitusta avustavat selvitystiedot .....	73
7.1	Ilmanvaihdon tarve .....	73
7.2	Kuormittavat laitteistot .....	73
7.3	Alue ja erityistarpeet .....	74
7.4	Käsiteltävät kemikaalit .....	74
7.5	Tilat, joissa noudatetaan erityisiä olosuhteita .....	75
7.6	Mittaukset ilmanlaadusta .....	75
7.7	Ilmanvaihdon hätätoiminto .....	75
7.8	Tiiveysmittaukset .....	76
7.9	Vuotoilma .....	76
7.10	Ilmanvaihtojärjestelmän puhdistettavuus ja huollettavuus .....	77
7.11	Ilman liikkeisiin vaikuttavat paineolosuhteet .....	77

8 Yhteenveto.....	78
9 Pohdinta.....	80
Lähteet.....	81

#### Liitteet

Liite 1	Eri pölynerotinmenetelmien vertailu
Liite 2	Kemikaalien yhteensopivuustaulukko
Liite 3	Suomen säävyöhykkeet ja mitoituslämpötilat säävyöhykkeille
Liite 4	Näytteenotto kohtien lukumäärä puhdastilassa suhteessa pinta- alaan

# 1 Johdanto

Laboratoriotiloja löytyy nykyään useista ympäristöistä ja niiden sovellutuksia löytyy monista eri teollisuuskohteista. Laboratoriotilat voivat poiketa toisistaan hyvinkin paljon. Opinnäytetyössä pyrittiin luomaan tiivistelmä siitä, millaisia yleisiä asioita laboratoriotilojen ilmanvaihdon toteutuksessa tulee ottaa huomioon.

Ilmanvaihdon toteutuksessa tarvitaan riittävän kattavat lähtötiedot kohteen yksityiskohdista ja erilaisista poikkeuksellisista toiminnoista tiloissa. Tilojen puhtaudella ja tiloissa käsiteltävillä aineilla ja kemikaaleilla on suuresti ilmanvaihdon toteutukseen vaikuttavia erityistarpeita. Ilmanvaihdon suunnittelussa nämä erinäiset normaalista poikkeavat olosuhteet luovat haasteita ilmanvaihdon tekniselle toteuttamiselle ja ilmanvaihdossa toteutettavien menetelmien valinnalle.

Opinnäytetyössä paneuduttiin erilaisiin ilmanvaihdossa eteen tuleviin mitoitus- ja menetelmätekniisiin tekijöihin, ja esiteltiin erilaisia toteutusmahdollisuuksia ja mitoitusmenetelmiä. Tavoitteena oli koota tietoa kartoituksille, jotka liittyvät ilmanvaihdon suunnitteluun. Teoria pitää sisällään huomioon otettavia määräyksiä mm. kemikaalien ja muiden haitallisten aineiden huomioinnista ilmanvaihtoympäristössä. Kohteiden kartoituksen haasteena voivat olla suuret eroavaisuudet kohteiden välillä ja kohteissa usein käytetyt räätälöidyt ratkaisut. Opinnäytetyössä pyritään esittelemään laajalti erilaisia tiloihin vaikuttavia tekijöitä, joiden avulla voidaan lähteä selvittämään ilmastointitekniikan haluttua toteutustapaa.

Ilmanvaihdon teknisen toteutuksen lisäksi on tärkeää konsultoida kaikkien osaluokkien asiantuntijoiden selvityksissä ilmenneitä tarpeita. Kokonaiskuvaa voidaan muodostaa helpommin yhteistyössä muiden toimialojen ammattilaisten kanssa. Esimerkiksi rakennusteknisen-, automaation- ja paloturvallisuuden erityisosaajilta voidaan saada paljon esiselvitykseen vaikuttavaa tietoa, joka muuttaa toteutusta ilmanvaihdon näkökulmasta. Teoksen sisällön rajaamisen vuoksi paloteknisiä sovellutuksia ei esitellä, mutta aihe on kuitenkin erityisen tärkeä erikoistiloissa.

## 2 Ilmanvaihto

### 2.1 Yleisilmanvaihdon mitoituksen perusteet

Yleisilmanvaihto on perustana ilmanvaihdolle ja määrittelee ilmanvaihdon pienimmän mahdollisen ilmamäärän. Taulukossa 1 on esitelty laboratoriotilojen ilmanvaihdon ohjearvoja, joista voidaan katsoa  $6 \text{ dm}^3/\text{hlö} + 2\text{dm}^3/\text{s, m}^2$  olevan perustana yleisilmanvaihdolle työtiloissa. Kohdepoistojen, vetokaappien ja epäpuhtauslähteissä olevien poistoilmalaitteiden ilmavirtaukselle tulee järjestää korvaava määrä korvausilmaa. Poistojen samanaikainen käyttö on huomioitava suunnittelussa siten, ettei useamman poiston ollessa päällä korvausilmaa puutu. (FINVAC 2019, 21.)

Taulukko 1. Työtilojen ilmanvaihdon neliö- ja henkilömitoitus (FINVAC 2019, 21).

Tila / käyttötarkoitus	Ulkoilma- virta $\text{dm}^3/\text{s}$ , hlö	Ulkoilma- virta $\text{dm}^3/\text{s}$ , $\text{m}^2$	Pois- toilma- virta $\text{dm}^3/\text{s}$ , $\text{m}^2$	Muita ohjeita
<b>Työtila, jossa on ihmisten ja rakennusmateriaalien lisäksi runsaasti muitakin epäpuhtauslähteitä</b>	6	2, kuitenkin vähintään yhtä suuri kuin kohdepoistojen yhteenlaskettu ilmavirta		Ilmanvaihto $6 \text{ dm}^3/\text{s}$ , hlö + $2\text{dm}^3/\text{s}$ , $\text{m}^2$ Kohdepoistot selvästi rajattuihin epäpuhtauslähteisiin. Ilmanvaihdon riittävyys tarkastettava myös http-arvojen osalta.
<b>Kiinteä työpiste tms.</b>	10			Ulkoilmavirta tuotava suuremmassa tilassa työpisteeseen vedottomasti
<b>Laboratoriot ja muut vastaavat tilat, joissa käsitellään terveydelle haitallisia aineita</b>	6	2		Ilmanvaihto $6 \text{ dm}^3/\text{s}$ , hlö + $2\text{dm}^3/\text{s}$ , $\text{m}^2$ Paikallispoistot ja vetokaapit selviin epäpuhtauspäästölähteisiin, korvausilma järjestettävä, suunnittelussa otettava huomioon laitteiden käytön samanaikaisuus
<b>Varastot</b>	6	0,35–1,0		Varastoitavan tavaran mukaan.

Ilman epäpuhtauksien tulee alittaa epäpuhtauksien haitallisiksi tunnetut pitoisuudet (HTP-arvot). Epäpuhtauslähteisiin ja työskentelyyn liittyvät ilmanvaihdon epävarmuustekijät, kuten työskentelypaikka ja -asento, on huomioitava ilmanvaihdon mitoituksessa. Selkeät epäpuhtauslähteet, joita voidaan rajata, tulisi varustaa kohdepoistoilla, tai koteloinnilla epäpuhtauksien poiston tehostamiseksi. Epäpuhtaudet eivät pääse silloin vapaasti leviämään tilassa. (FINVAC 2019, 21.) Keskitetysti syntyvien epäpuhtauksien poistoon käytetään aina kohdepoistoa (Talotekniikkainfo 2018, 11). Tuloilman määrä kohteessa on oltava riittävä myös kohdepoistojen ollessa toiminnassa. Mitoitusilmavirran tulee olla työskentelyvyöhykkeelle vähintään  $10 \text{ dm}^3/\text{s}$  työntekijää kohden muiden kuin ihmisperäisten epäpuhtauksien takia. (FINVAC 2019, 21.)

### **2.1.1 Ilmamäärät laskennallisesti**

Laboratoriotiloissa voidaan käyttää kemikaaleja, tai puhtausluokiteltuja tiloja, joiden ilmanvaihtoa ei toteuteta suoraan taulukosta tehtävällä laskennalla ja tarkastelulla. Ilmanvaihto arvioidaan tapauskohtaisesti laskennan, mittauksen ja suunnittelijan harkinnan perusteella. Räjähdyksivaarallisten tilojen osalta mittauksen, ohjeistuksen ja harkinnan osuus on huomioitava aina tapauskohtaisesti. Kohteissa kartoitetaan käytössä olevat puhtausvaatimukset, kemikaalit sekä yhdisteet ja niiden sisällöstä selvitetään, onko varastoinnissa ja käytössä mahdollisesti tarvetta huomioida ATEX -tilojen ohjeistusta tai puhdastilojen vaatimuksia. Tiloissa, joissa käsitellään ja varastoidaan räjähdysvaarallisia kemikaaleja, tarvitaan normaalia tehokkaampaa ilmanvaihtoa. ATEX- ja puhdastiloja käsitellään enemmän luvussa 5.

Tukesin (2021) ohjeistuksessa tilojen, joissa käsitellään palavia tai räjähdysvaarallisia höyryjä ja pölyjä, suositellaan lähtökohtana ilman vaihtumista kuusi kertaa tunnissa. ”Palavan nesteen, höyryn, tai räjähdysvaarallisen pölyn määrä ilmassa ei saa normaalitoiminnassa olla yli 25 % alemmasta syttymisrajasta.” Varastoissa, tai muutoin suljetuissa laitteistoissa ilman tulee vaihtua vähintään kerran tunnissa. (Tukes 2021, 9.) Ilman kemikaalipitoisuuksien noustessa yli alemman syttymisrajan, seos saattaa aiheuttaa tulipalon tai räjähdysvaaran. Syttymisrajoista kerrotaan työterveyslaitoksen (2022) julkaisussa seuraavasti:

Syttymisrajat ovat ainepitoisuuksia, joiden pitoisuuksien rajoissa kaasun, höyryn, ilman tai pölyn ja ilman seos voi syttyä. Alempi syttymisraja ilmaisee pienimmän pitoisuuden, jolla seos voi vielä syttyä. Ylempi syttymisraja on vastaavasti suurin pitoisuus, jolla seos voi syttyä. Ylemmän ja alemman syttymisrajan pitoisuusväli on aineen syttymisalue. Rajat ilmoitetaan palavan aineen määränä ilmassa tilavuusprosentteina normaalipaineen alaisena ja 20 °C lämpötilassa. Pölyävien kiinteiden aineiden syttymisrajat ilmoitetaan painoyksikköinä tilavuusyksikköä kohti (mg/m<sup>3</sup>, g/m<sup>3</sup>). (Työterveyslaitos 2022b.)

20 °C lämpötilassa ilmasta saatua höyryn pitoisuuden arvoa verrataan aineen alempaan syttymisrajaa, josta voidaan selvittää, muodostuuko höyrystä syttyvä seos. Paineolosuhteiden ja lämpötilan eroavaisuudet taulukkoihin ilmoitetuista arvoista voivat muuttaa syttymisrajoja huomattavasti. (Työterveyslaitos 2022b.) Eri olosuhteiden vaikutuksista aineisiin tulee konsultoida alaan erikoistunutta ammattilaista, jonka ohjeistuksen mukaisesti olosuhteet huomioidaan ilmanvaihdon tarpeisiin.

Puhdastiloissa ilman vaihtuminen voidaan laskea esimerkiksi päästölähteiden mukaan. Päästölähteinä olevien prosessien ja ihmisten määrän perusteella saadaan selville ilmamäärä lämpökuorman, kosteuden poiston, tai epäpuhtauksien määrän perusteella. Ilmanvaihto mitoitetaan suurinta tarvetta vastaavien olosuhteiden mukaan, mutta ilmanvaihtoa käytetään vain todellista tarvetta vastaavasti. (Sandberg ym. 2014b, 543, 579.) Ilmamääriä voidaan laskea tiloista, joissa ei ole kohdepoistoja alla mainittujen kaavojen avulla. Kaavalla 1 lasketulla ilmamäärällä poistetaan tiloissa syntyvä haitallinen lämpökuorma. Jos tilojen vaipan yli tulevan lämpökuorman uskotaan olevan merkittävä, se voidaan lisätä laskentaan luvussa 5.1 mainitun laskennan avulla. Kaavalla 2 lasketulla ilmamäärällä poistetaan tilassa syntyvät epäpuhtaudet ja kaavalla 3 saadulla ilmamäärällä poistetaan muodostuva kosteus. Epäpuhtauksien määrän ja muiden tarvittavien suureitten sijoittamisella kaavaan saadaan tilaan tarvittava ilmamäärä laskettua. Ilmanvaihdon laskennallisen mitoituksen perustana kohteesta tulee tietää epäpuhtauskuormat, jotta laskentaa voidaan hyödyntää.

$$q_s = \frac{\dot{Q}}{\rho c_p (T_{ex} - T_s)} = \frac{\dot{Q}}{\rho c_p \varepsilon_T (T_{lz} - T_s)} \quad (1)$$

$$q_s = \frac{G}{C_{ex} - C_s} = \frac{G}{\varepsilon_{lz}(C_{lz} - C_s)} \quad (2)$$

$$q_s = \frac{q_h}{\rho(x_{es} - x_s)} = \frac{q_h}{\varepsilon_x \rho(x_{lz} - x_s)} \quad (3)$$

missä	$q_s$	tarvittava tuloilmavirta m <sup>3</sup> /s
	$q_h$	huonetilaan tuleva kosteuskuorma g/s
	$T_{ex}$	poistoilman lämpötila °C
	$T_s$	tuloilman lämpötila °C
	$T_{lz}$	alavyöhykkeen lämpötila °C
	$\emptyset$	huonetilaan tuleva lämpökuorma kW
	$G$	huonetilaan tuleva epäpuhtauskuorma g/s, cm <sup>3</sup> /s
	$\rho$	ilman tiheys 1,2 kg/m <sup>3</sup>
	$c_p$	ominaislämpökapasiteetti vakipaineessa J/kg*K
	$C_{ex}$	poistoilman pitoisuus g/m <sup>3</sup> , cm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
	$C_s$	tuloilman pitoisuus g/m <sup>3</sup> , cm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
	$C_{lz}$	alavyöhykkeen pitoisuus g/m <sup>3</sup> , cm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
	$x_{ex}$	poistoilman absoluuttinen kosteus g/kg
	$x_s$	tuloilman absoluuttinen kosteus g/kg
	$x_{lz}$	alavyöhykkeen absoluuttinen kosteus g/kg
	$\varepsilon_C$	epäpuhtauksien poistotehokkuus
	$\varepsilon_x$	kosteuden poistotehokkuus
	$\varepsilon_T$	lämmön poistotehokkuus
	$q_{lex}$	kohdepoiston ilmavirta m <sup>3</sup> /s

Kaavoilla 4–6 voidaan laskea tuloilmamäärien tarve kohdepoistoja sisältävissä järjestelmissä. Kaavalla 4 haitallisen lämpökuorman kautta, kaavalla 5 epäpuhtauskuorman kautta ja kaavalla 6 kosteuskuorman kautta. Kohdepoistot voivat tehostaa epäpuhtauksien poistoa, jolloin ilmamäärät voivat poiketa huomattavasti siihen, jos niitä ei ole erikseen huomioitu. Tuloilman laskennan jälkeen, kaavoista 1–6 saadusta ilmamäärästä voidaan laskea ilmanvaihtokerroin kaavan 7 avulla.

$$q_s = \frac{\dot{Q}}{\rho c_p (T_{ex} - T_s)} + \frac{T_{ex} - T_{lz}}{(T_{ex} - T_s)} q_{lex} \quad (4)$$

$$q_s = \frac{G}{c_{ex} - c_s} + \frac{c_{ex} - c_{lz}}{(c_{ex} - c_s)} q_{lex} \quad (5)$$

$$q_s = \frac{q_h}{\rho(x_{es} - x_s)} + \frac{x_{es} - x_{lz}}{(x_{es} - x_s)} q_{lex} \quad (6)$$

$$1/h = \frac{V}{q_s} \quad (7)$$

missä	1/h	ilmanvaihtokerroin 1/h
	V	ilmanvaihtoalueen tilavuus m <sup>3</sup>
	q <sub>s</sub>	tarvittava tuloilmavirta m <sup>3</sup> /s

Prosesseista poistettua ylimääräistä lämpöä voidaan hyödyntää lämmöntalteenoton kautta tuloilman lämmitykseen, tai esimerkiksi muiden tilojen lämmitykseen. Myös käsitellyn kierrätysilman käyttö, voi pienentää tuloilman lämmitystarvetta soveltuvissa kohteissa. Kierrätysilman soveltuvuutta on kuitenkin harkittava tapauskohtaisesti.

Puhdastilojen ilmanvaihdon epäpuhtauksien poistotehokkuus riippuu käytetystä ilmanvaihdon toimintaperiaatteesta. Riippuen toimintaperiaatteesta epäpuhtaudet voivat poistua heikommin tai tehokkaammin. Puhdastilojen ilmanvaihdon tavoitteiden täytyminen tulee tarkastaa tilan valmistuttua.

Puhdastiloissa korkeimpien luokkien ilmanvaihto joudutaan aina selvittämään tapauskohtaisesti, mutta Suomen standardointiliiton julkaisussa 2001 on annettu joitain suuntavia antavia ilmanvaihdon määriä puhdastiloista, joissa käsitellään mikroelektroniikkaa. Pyörteisen ja sekoitetun ilmanvaihdon ilmavirran tehot laskettuna huoneelle, joka on kolme metriä korkea, määritellään luokan ISO 8 - luokan ilmanvaihtoa 10–20 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, ISO 7 -luokalle 30–70 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> ja ISO 6-luokalle 70–160 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> kertaa tunnissa. (Suomen standardisoimisliitto 2001, 40).

Luokasta ISO 5 kohti puhtaampia luokkia ilmanvaihtoa esitetään ilmavirran keskimääräisenä nopeutena, jota käytetään määriteltessä yksisuuntaista ilmavirtaa tilassa. Ilmavirta ei ole välttämättä suodattimen otsapintanopeus, vaan tilassa

keskimäärin hallitseva ilmavirran nopeus. Luokassa ISO 5 keskimääräiseksi ilmavirran nopeudeksi on määritetty 0,2–0,5 m/s ja luokissa ISO 2-4 ilmavirran keskimääräiseksi nopeudeksi on määritetty 0,3–0,5 m/s (Suomen standardisoimisliitto 2001, 40).

GMP menettelyn mukaisissa lääketeollisuuden puhdastiloissa tilan ilmanvaihtuvuutta on myös arvioitu suureksi. Ilmanvaihdon käytännön toteutuksissa tilan ilma vaihtuu usein 5–20 kertaa tunnissa. Haastavammissa kohteissa tilan ilma voi vaihtua jopa 500 kertaa tunnissa. Tuloilmassa käytetään usein käsiteltyä kierrätysilmaa ja ulkoilmaa käytetään yleensä 10–20 %. Ulko- ja palautusilman määrä riippuu useimmiten epäpuhtauslähteistä ja kohdepoistojen määrästä. (Sandberg ym. 2014, 579.)

### 2.1.2 Tasapainotus

Tiloissa tarvittavan ilmanvaihdon kanssa on määriteltävä, onko tila alipaineinen, tasapaineinen, vai ylipaineinen, riippuen käyttökohteesta. Yleisimmin laboratoriossa käsiteltäviä epäpuhtauksia yritetään hallita poistamalla ne kohdepoistoin ilmasta, jolloin tilat suunnitellaan alipaineisiksi. Ylipaineisia tiloja käytetään useammin, jos tilat vaativat erityistä puhtautta ja epäpuhdasta ilmaa ei haluta tiloihin vuotovirtana. Kohdepoistot eivät saa epäpuhtauksien poistojen yhteydessä muuttaa tilan painesuhteita, vaan kohdepoistolle on hallitusti tuotava riittävä määrä tuloilmaa (Talotekniikkainfo 2021, 9).

Ilmavirran tasapainotuksesta löytyy suuntaa antavia ilmavirran tasapaino-olosuhteita listattuna taulukkoon 2. Ilmanvaihdon tasapainotilan tason valinta riippuu tiloissa käytetyistä sovelluksista. Joissain tapauksissa voidaan hyödyntää useampaa paineolosuhdetta eri tilojen vaatimuksia mukailleen. Ilman liikesuunnan lisäksi kannattaa huomioida myös muita näkökulmia. (Suomen standardisoimisliitto 2017, 29.)

Taulukko 2. Alueen suunnitellun ilman virtaustasapainon luokitus (Suomen standardisoimisliitto 2017, 29).

Luokka	Kuvaus (tilanne, jossa ei ole tuulen eikä korkeuseron vaikutusta)
--------	---

<b>AB 1</b>	$Q_{\text{exhaust}} > 1,15 q_{\text{supply}}$
<b>AB 2</b>	$1,05 q_{\text{supply}} < Q_{\text{exhaust}} < 1,15 q_{\text{supply}}$
<b>AB 3</b>	$0,95 q_{\text{supply}} < Q_{\text{exhaust}} < 1,05 q_{\text{supply}}$
<b>AB 4</b>	$0,85 q_{\text{supply}} < Q_{\text{exhaust}} < 0,95 q_{\text{supply}}$
<b>AB 5</b>	$Q_{\text{exhaust}} > 0,85 q_{\text{supply}}$

Puhdastiloissa voidaan hyödyntää paineistettua ilmanvaihtojärjestelmää, jossa eri puhtausluokkien tilojen välille synnytetään paine-ero. Tilojen välillä olevaa suurta paine-eroa voidaan valvoa helposti. Paineistettu ilmanvaihtojärjestelmä voi mahdollistaa pienempien ilmamäärien käytön, paine-eron avustaessa epäpuhtauksien hallinnassa.

Paine-eron tulisi kuitenkin olla riittävän suuri ja vakaa, jotta tiloista ei voi tulla vahingossa vuotovirtauksia väärään suuntaan. Viereisten tilojen tai vyöhykkeiden paine-eron tulisi olla 5–20 Pa, ovien toiminnan varmistamiseksi. Paine-ero ehkäisee vuotovirtaukset puhtaampiin tiloihin likaisista tiloista ilman pyrkiessä kohti matalapaineista tilaa. (Suomen standardisoimisliitto 2001, 34.) GMP menettelyn mukaan tilojen paine-eron tulisi taas olla 10–15 Pa. Ilman tulee molemmissa tapauksissa virrata puhtaammasta tilasta likaisempaan päin paine-eron seurauksena. (Sandberg ym. 2014, 580.)

### 2.1.3 Tuloilmaluokat

Tuloilmaluokat määrittelevät kuinka puhdasta tiloihin saapuva ilma on ja käyttökohteitten mukaan ilman puhtauden vaatimukset poikkeavat. Talotekniikkainfon (2021, 12.3) ilmoittamat yleisilmanvaihdon tuloilmaluokitukset ovat SUP 1-5. Tuloilmaluokituksista 1 on puhtain ja 5 likaisin. Suodatinluokitukset vaihtuvat tarkemmin suodatettuun ilmaan luvun siirtyessä lähemmäs yhtä. Taulukossa 3 on selitetty suuntaa antavia esimerkkejä tuloilmaluokkien käyttökohteista. Tuloilmaluokkien suodatuksesta on kerrottu lisää luvussa 6. Taulukossa 4 esitellään tuloilmaluokkien raja-arvot epäpuhtauksien määrien perusteella.

Taulukko 3. Tuloilmaluokkien tyypilliset käyttökohteet (Talotekniikkainfo 2021, 12.3).

Tuloilma-luokka	Tyypilliset käyttökohteet
<b>SUP 1</b>	herkimmät kohteet kuten sairaalat ja muut puhtaita tiloja tarvitsevat kohteet.
<b>SUP 2</b>	normaaliin jatkuvaan oleskeluun tarkoitettut huonetilat, kuten toimistot ja kokoushuoneet.
<b>SUP 3</b>	Tilapäiseen oleskeluun tarkoitettut huonetilat, kuten varastorakennukset, palvelinhuoneet ja pesusalit.
<b>SUP 4</b>	Lyhytaikaiseen oleskeluun tarkoitettut tilat, kuten WC:t varastohuoneet ja porrashuoneet.
<b>SUP 5</b>	Huonetilat, joissa ei oleskella, kuten jätehuoneet, datahuoneet ja maanalaiset pysäköintitilat.

Taulukko 4. Tuloilman SUP luokitus (Talotekniikkainfo 2018, 12.2).

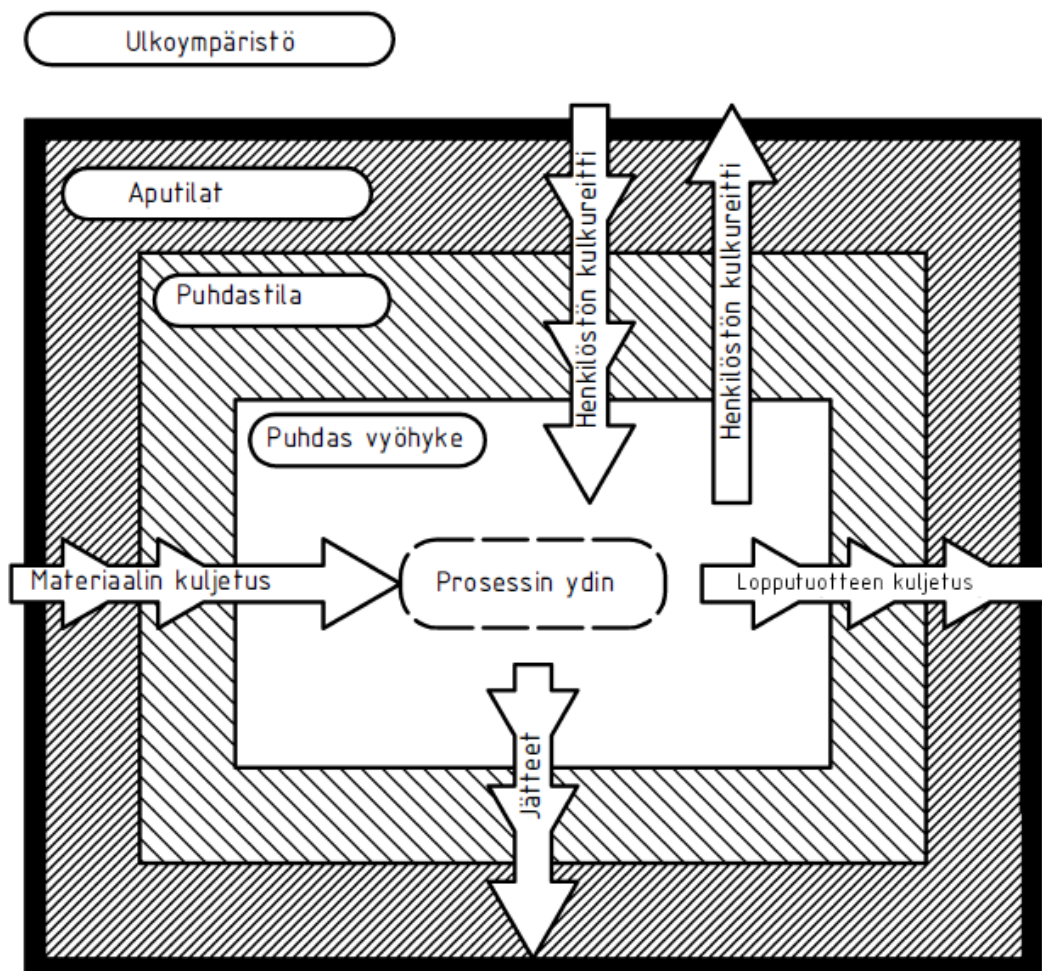
Luokka	Kuvaus	Hiukkasmaisten epäpuhtauksien raja-arvot	
		PM2,5	PM10
<b>SUP 1</b>	Erittäin pienet hiukkasmaiset (ja/tai kaasumaiset) epäpuhtauspitoisuudet	6 µg/m <sup>3</sup>	12,5 µg/m <sup>3</sup>
<b>SUP 2</b>	Pienet hiukkasmaiset (ja/tai kaasumaiset) epäpuhtauspitoisuudet	12,5 µg/m <sup>3</sup>	25 µg/m <sup>3</sup>
<b>SUP 3</b>	Keskimääräiset hiukkasmaiset (ja/tai kaasumaiset) epäpuhtauspitoisuudet	18 µg/m <sup>3</sup>	37,5 µg/m <sup>3</sup>
<b>SUP 4</b>	Suuret hiukkasmaiset (ja/tai kaasumaiset) epäpuhtauspitoisuudet	25 µg/m <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>
<b>SUP 5</b>	Erittäin suuret hiukkasmaiset (ja/tai kaasumaiset) epäpuhtauspitoisuudet	32,5 µg/m <sup>3</sup>	75 µg/m <sup>3</sup>

Tuloilmaluokkien määrittelyssä on huomioitava ulkoilman laatu. Ulkoilman laatu vaihtelee paikoittain ja paikalliset reaaliaikaiset, sekä tunti-, vuorokausi- ja vuosikeskiarvona ulkoilman epäpuhtauksien määrät voi selvittää ilmatieteenlaitoksen ilmanlaatuportaalista (Talotekniikkainfo 2021, 12.2). Taulukossa 5 esitellään ODA-luokitus ilmanlaadusta ja esimerkkejä missä vastaavia hiukkaspitoisuuksia voidaan mitata.

Taulukko 5. Ulkoilman ODA luokitus (Talotekniikkainfo 2021, 12.2).

Luokka	Kuvaus ja esimerkki	Hiukkasmaisten epäpuhtauksien raja-arvot (24 tunnin keskiarvo ja vuosikeskiarvo)	
		PM <sub>2,5</sub>	PM <sub>10</sub>
<b>ODA 1</b>	<b>Tilapäisesti pölyinen</b> Ulkoilma, jossa on pölyä ainoastaan tilapäisesti (esim. siitepölyä kesäisin.) Maaseutu	25 µg/ m <sup>3</sup> (vuorokausi) 10 µg/ m <sup>3</sup> (vuosi)	50 µg/ m <sup>3</sup> (vuorokausi) 20 µg/ m <sup>3</sup> (vuosi)
<b>ODA 2</b>	<b>Korkea pienhiukkaspitoisuus</b> Ulkoilma, jossa on suuria hiukkasmaisia ja/tai kaasumaisia epäpuhtauspitoisuuksia.	37,5 µg/ m <sup>3</sup> (vuorokausi) 15 µg/ m <sup>3</sup> (vuosi) tai vähemmän	75 µg/ m <sup>3</sup> (vuorokausi) 30 µg/ m <sup>3</sup> (vuosi) tai vähemmän
<b>ODA 3</b>	<b>Hyvin korkea pienhiukkaspitoisuus</b> Ulkoilma, jossa on erittäin suuria hiukkasmaisia ja/tai kaasumaisia epäpuhtauspitoisuuksia. Isommat kaupungit ja teollisuusalueiden ympäristöt	Yli 37,5 µg/ m <sup>3</sup> (vuorokausi) 15 µg/ m <sup>3</sup> (vuosi)	Yli 75 µg/ m <sup>3</sup> (vuorokausi) 30 µg/ m <sup>3</sup> (vuosi)

Tuloilmaluokkia määriteltessä tulee kiinnittää huomiota vaativatko useat tilat samaa tuloilmaluokkaa, vai onko järkevämpää järjestää ilmanvaihtoa useilla ilmanvaihtokoneilla, jolloin puhtainta ilmaa ei tarvitse luoda yhtä paljoa. Ilman suodattaminen korkeimpiin ilmanpuhtausluokkiin luo ylimääräisiä kustannuksia ja tilojen sijoittelussa olisi hyvä huomioida tilojen vaatimukset. Esimerkiksi puhdistiloissa on usein eritasoisia puhdistilavyöhykkeitä vierekkäin. Näin voidaan pitää puhtaimpaan luokkaan kuuluvat haasteellisemmat ylläpidettävät vyöhykkeet mahdollisimman pieninä. Kuviossa 1 esitellään vyöhykeperiaatetta ja vyöhykkeiden yleistä jakaumaa. Aputilat ja toissijaiset puhdistilat ovat puhtaampia kuin ulkoympäristö ja vähentävät kuormaa ympäristöstä puhtaimpaan tilaan vuotovirtausten ja häiriövirtausten yhteydessä. (Suomen standardisoimisliitto 2001, 24.)



Kuvio 1. Puhdastilojen vyöhykemalli (Suomen standardisoimisliitto 2001, 24).

Samaa periaatetta voidaan hyödyntää muuallakin kuin puhdastiloissa. Kohteenä voi olla likaisia tiloja, jolloin kaikkein likaisimmasta tilasta siirrytään seuraavaksi likaisempaan. Puhtaimpien ja likaisimpien tilojen sijoittamista vierekkäin tulisi välttää, jos se on mahdollista. Kulku suoraan puhtaasta likaisimpaan tilaan voi heikentää puhtaan tilan olosuhteita huomattavasti.

#### 2.1.4 Poistoilmaluokat

Poistoilmaluokat määräytyvät poistettavan ilman laadun perusteella ja niitä on eritelty likaisuusasteen perusteella. Poistoilmaluokat on määritelty luokkiin 1–4, jotka esitellään taulukossa 6. Poistoilmaluokka 1 on puhtain ja luokka 4 likaisin poistoilmaluokka. Ympäristöministeriön 2017 asetuksessa on ilmaistu poistoilmaluokkien määritteet seuraavasti.

Luokka 1: poistoilma sisältää vain vähän epäpuhtauksia ja epäpuhtaudet ovat pääasiallisesti lähtöisin ihmisistä ja rakenteista.  
 Luokka 2: poistoilma sisältää jonkin verran epäpuhtauksia.  
 Luokka 3: poistoilma sisältää epäpuhtauksia, kosteutta, kemikaaleja tai hajuja, jotka oleellisesti huonontavat poistoilman laatua.  
 Luokka 4: poistoilma sisältää huomattavasti pahanhajuisia tai epäterveellisiä epäpuhtauksia tai kemikaaleja. (Ympäristöministeriö 1009/2017, 13§.)

Taulukko 6. Poistoilman puhtausluokat (Suomen standardisoimisliitto 2017, 24).

Luokka	Kuvaus
<b>ETA 1, SET 1, EHA 1, SEH 1</b>	Matalan epäpuhtaustason ilma Ilma huoneista, joissa pääasiallinen epäpuhtauslähde ovat rakennusmateriaalit ja rakenteet. Ilma huoneistoista, joissa pääasiallinen epäpuhtauslähde on ihmisen aineenvaihdunta sekä rakennusmateriaalit ja rakenteet. Huoneet, joissa tupakointi on sallittu eivät sisälly tähän luokkaan.
<b>ETA 2, SET 2, EHA 2, SEH 2</b>	Kohtalaisen epäpuhtaustason ilma Ilma käytössä olevista huoneista, joissa on enemmän epäpuhtauksia kuin luokassa 1 samoista lähteistä, tai ihmisten aktiviteeteistä.
<b>ETA 3, SET 3, EHA 3, SEH 3</b>	Korkean epäpuhtaustason ilma Ilma huoneista, joissa erittyvä kosteus, prosessit, kemikaalit, tupakansavu jne. merkittävästi heikentävät ilmanlaatua.
<b>ETA 4, SET 4, EHA 4, SEH 4</b>	Erittäin korkea epäpuhtaustason ilma Ilma, joka sisältää hajuja ja epäpuhtauksia huomattavasti suuremmissa pitoisuuksissa kuin on sallittu oleskeluvyöhykkeiden sisäilmassa.

Tiloissa, joissa poistetaan useamman puhtausluokan ilmaa, ilman luokka määräytyy likaisimman puhtausluokan mukaan (Metalliteollisuuden standardisointiyhdistys 2017, 24). Erillispoistoja, joita käytetään jonkin työvaiheen yhteydessä syntyviin epäpuhtauksien poistoon, käsitellään suoraan poistettavana ilmana ja niitä ei tavallisesti yhdistetä muiden tilojen poistoon, mahdollisen teollisen poistoilman tulipalo- ja reaktoriskin vuoksi. (Talotekniikkainfo 2021, 13.)

Taulukossa 7 esitellään poistoilmaluokkien yleisimmät käytön rajoitukset ja tilaesimerkit. Ilmanvaihdon yhdistämisestä on määrätty ympäristöministeriön 2017 asetuksessa seuraavasti.

Luokkien 1 ja 2 poistoilma voidaan johtaa yhteiseen kanavistoon. Jos luokan 2 ilmavirran osuus on yli 10 prosenttia yhdistetystä ilmavirrasta, yhdistetty ilmavirta katsotaan kuuluvaksi luokkaan 2. Luokan 3 poistoilma on johdettava erilliskanavilla tai ilmanpuhtaudeltaan saman tyyppisiä tiloja palvelevilla yhteiskanavilla ulos,

palvelemissa tilojen yläpuolella olevaan kokoojakanavaan tai poistoilmakammioon. WC-, pesu- ja siivoustilan poistoilma voidaan johdattaa luokkien 1 ja 2 poistoilman pystykanaviin, jos näiden tilojen poistoilmavirta on yhteensä korkeintaan 10 prosenttia pystykanavan kokonaisilmavirrasta. Tällöin yhdistettyä ilmavirtaa ei saa käyttää palautusilmana. (Ympäristöministeriö 2017, 18§.)

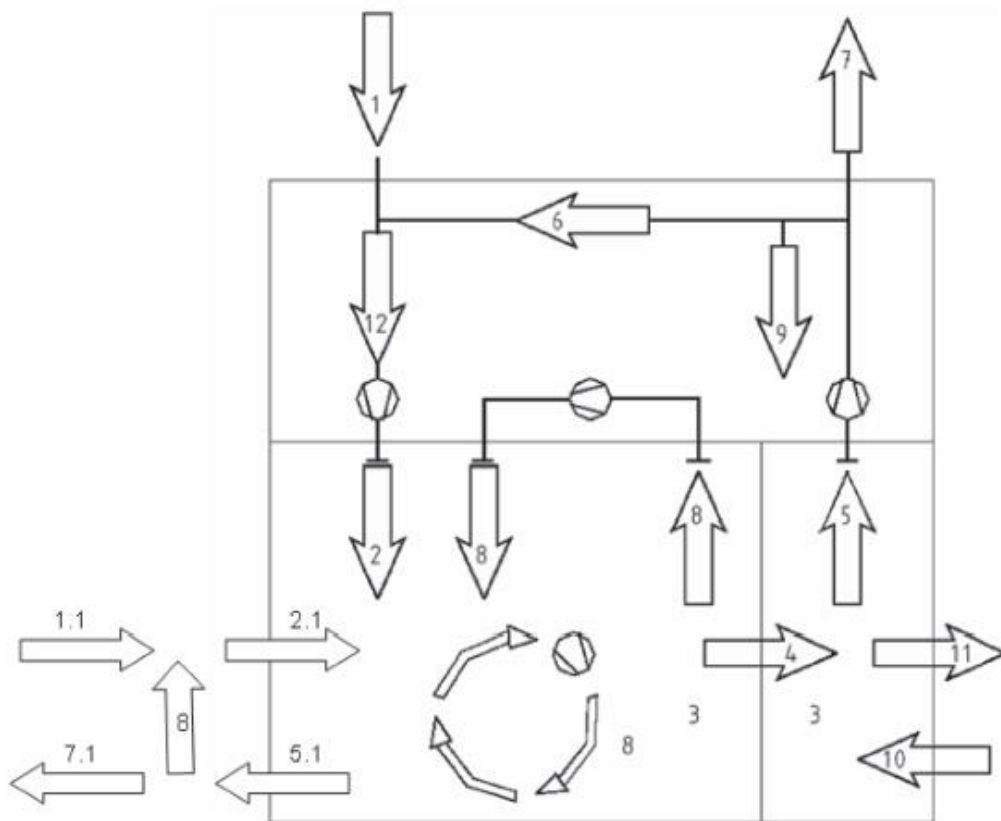
Luokan 4 poistoilma on johdettava ulos erillisillä poistoilmakanavilla. Jos tilassa käsitellään tai säilytetään merkittäviä määriä terveydelle vaarallisia tai voimakasta hajua aiheuttavia aineita, huone-tilaan on tehtävä muusta ilmanvaihtojärjestelmästä erilliset ulko- ja poistoilmakanavat ja tila on suunniteltava alipaineiseksi viereisiin tiloihin nähden. (Ympäristöministeriö 2017, 18§.)

Taulukko 7. Poistoilmaluokkien käyttökohteet ja tilaesimerkit (Talotekniikkainfo 2021, 13).

Poistoilmaluokka	Käytön rajoitus	Tilaesimerkkejä
<b>Luokka 1</b>	Ilma soveltuu palautus- ja siirtoilmaksi.	Toimistotilat ja niiden yhteydessä olevat pienet varastotilat, yleisöpalvelutilat sekä eräät kokoontumistilat, joissa ei ole hajukuormitusta.
<b>Luokka 2</b>	Ilmaa ei käytetä muiden tilojen palautusilmana, mutta se voidaan johtaa siirtoilmana esimerkiksi WC- ja pesutiloihin.	Toimistorakennusten varastot ja sosiaalitilat.
<b>Luokka 3</b>	Poistoilmaa tiloista, joissa kosteus, prosessit, kemikaalit ja hajut oleellisesti huonontavat poistoilman laatua. Ilmaa ei käytetä palautus- tai siirtoilmana.	WC- ja pesutilat, sekä kopiolaitokset.
<b>Luokka 4</b>	Ilmaa ei käytetä palautus- tai siirtoilmana.	Ammattimaisessa käytössä olevat vetokaapit, maalaamot, maalien ja liottimien käsittelyhuoneet, kemialliset laboratoriot ja tupakointitilat.

”Palautus-, siirto-, tai kierrätysilman käyttö ei saa aiheuttaa epäpuhtauksien, hajujen tai muiden haitallisten yhdisteiden leviämistä, eikä se saa heikentää tilan ilmanlaatua” (Ympäristöministeriö 2017, 15§). Ympäristöministeriön asetuksessa (2017) pykälässä 15§ mainitaan ”palautusilmana ei saa käyttää poistoilmaluokkien 2, 3 ja 4 ilmaa”, mutta pykälässä on myös maininta ”Palautusilmaa ei saa käyttää tuloilmana seuraavissa tiloissa: 7) muut erityisen puhtaana pidettävät tilat, jollei palautusilmaa puhdisteta tilan käyttötarkoituksen edellyttämälle tasolle.” Palautusilmaa voidaan hyödyntää esimerkiksi puhdastiloissa, mutta se

vaatii käsittelyn asianmukaiselle tasolle. Kierrätys- tai siirtoilmaa voidaan käyttää rajoitetuissa määrin. Puhtaammasta tilasta voidaan siirtoilmaa hyödyntää likaisempaan tilaan. Kierrätysilmaa voidaan hyödyntää asianmukaisesti käsiteltynä soveltuvissa tiloissa, kuten puhdastiloissa. Kuviossa 2 esitellään ilmanvaihdon eri ilmavirtojen siirtymäreitit, jonka nimitykset löytyvät taulukoista 8. Kuvion 2 avulla voidaan havainnollistaa mitä taulukon 8 termit tarkoittavat. Nuolella osoitetaan ilman liikesuunta ja suorakulmiot esittävät tiloja.



Kuvio 2. Havainnekuva ilmavirroista tilassa (Suomen standardisoimisliitto 2017, 23)

Taulukko 8. Ilmavirtojen määrittely (Suomen standardisoimisliitto 2017, 22–23).

Nu- mero	Ilmavirtaustyyppi	Ly- henne	Kuvaus
1	Ulkoilma	ODA	Ilma, joka tulee järjestelmään, tai aukkoon ulkoa ennen ilmapöytä
2	Tuloilma	SUP	Huoneeseen tuleva ilmavirta, tai järjestelmään tuleva ilmavirta, jonkin käsittelyn jälkeen
3	Sisäilma	IDA	Ilma sisätilassa, tai sisätilan vyöhykkeellä
4	Siirtoilma	TRA	Sisäilma, joka siirtyy sisätilasta toiseen

5	Poistoilma	ETA	Ilmavirta, joka poistuu huoneesta ilmankäsittelyjärjestelmään.
6	Palautusilma	RCA	Ilmavirta, joka palautuu ilmankäsittelyjärjestelmään ja jota käytetään uudelleen tuloilmana
7	Ulospuhallusilma	EHA	Ilmavirtaus, joka poistuu järjestelmästä ulkoilmaan
8	Kierrätysilma	SEC	Ilmavirtaus, joka on otettu huoneesta ja palautettu samaan huoneeseen käsittelyn jälkeen. HUOM. Induktiolaitteessa oleva sekundaari-ilma katsotaan kierrätysilmaksi
9	Vuoto	LEA	Tahaton ilmavirtaus vuotoreittejä pitkin
10	Sisäänvuoto	INF	Tahaton ulkoilman vuoto rakennukseen ulkovai-passa olevia vuotoreittejä pitkin
11	Ulosvuoto	EXF	Sisäilman tahaton vuoto rakennuksesta ulkovai-passa olevia vuotoreittejä pitkin.
12	Sekoittunut ilma	MIA	Ilma, joka sisältää useamman kuin yhden ilmavirran
1.1	Yksittäisen huoneen ulkoilma	SRO	Ilma, joka tulee ulkoa yksittäisen huoneen ilmankäsittelykoneeseen, tai aukkoon ennen ilmankäsittelyä
2.1	Yksittäisen huoneen tuloilma	SRS	Yksittäiseen huoneeseen tuleva ilmavirta
5.1	Yksittäisen huoneen poistoilma	SET	Ilmavirta, joka poistuu yksittäisestä huoneesta sitä palvelemaan ilmankäsittelykoneeseen
7.1	Yksittäisen huoneen ulospuhallusilma	SEH	Ilmavirtaus poistuu rakennuksesta yksittäisen huoneen ilmankäsittelykoneesta

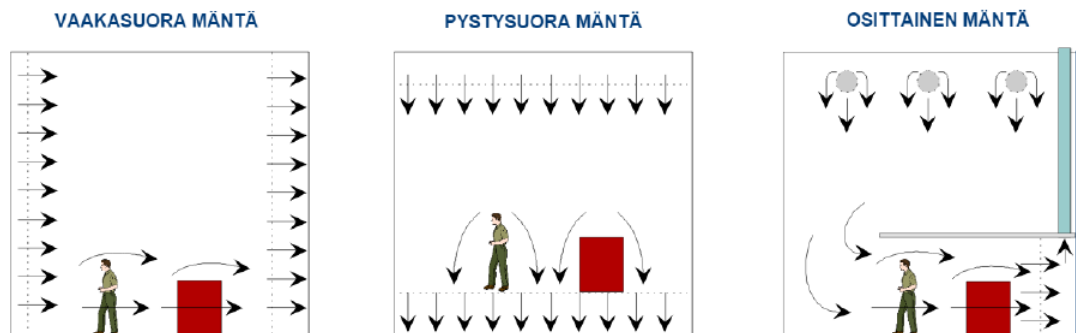
Ilmavirtojen liikkeellä ja liikkeiden ymmärtämisellä voidaan luoda ilmanvaihtojärjestelmiä tehokkaammin ja ottaa huomioon erinäisten ilman liikkeiden mahdollisuudet. Myös lyhenteitä käytetään usein ilmanvaihtotekniikan kirjallisuudessa ja suunnittelussa. Esimerkiksi ODA ja SUP nimikkeitä on käytetty luvussa 2.1.3.

## 2.2 Tilailmastoinnin luokitus- ja toimintaperiaatteet

Tilailmastoinnissa neljä yleisintä periaatetta mäntä-, kerrostuma-, vyöhyke- ja sekoitusilmanvaihto. Neljä tilailmastoinnin luokkaa on lueteltu teoreettisen epäpuhtauksien- ja lämmönpoistotehokkuuden mukaan, ensimmäisen ollessa tehokkain ja viimeisen ollessa tehottomin. (Hautalampi 2008, 42, 44.) Tilailmanvaihdossa voidaan myös hyödyntää kohdepoistoja erinäisien tilailmastoinnin periaatteiden lisäksi ja niiden vaikutukset ilmanvaihtoon on aina huomioitava ta-pauskohtaisesti.

Mäntäperiaatteinen ilmanvaihto luo tilaan yksisuuntaisen ilmavirtauksen, jossa tuloilma tuodaan tilaan yhdestä suunnasta ja ilma poistetaan vastakkaisesta suunnasta. Tuloilma ohjataan tilaan riittävällä nopeudella syrjäyttääkseen häiriövirtaukset. Häiriövirtauksia aiheuttavat tiloissa olevat henkilöt ja esineet. Sisätilojen suunnittelussa on otettava huomioon ympäristön esteet ja esineet, jotta häiriövirtauksia ei luotaisi niiden sijoittelulla. Mäntäperiaatteinen ilmanliike on tehokkain epäpuhtaus-, kosteus- ja lämpökuormien poistossa. Ilmanliike kattaa koko tilan, jolloin puhtauden ylläpito helpottuu. Tekniikka on kaikkein suurin tilantarpeeltaan ja ilmaa joudutaan johtamaan tiloihin paljon, koko tilan tasaisen ilmanliikkeen takaamiseksi. (Hautalampi 2008, 42, 44.)

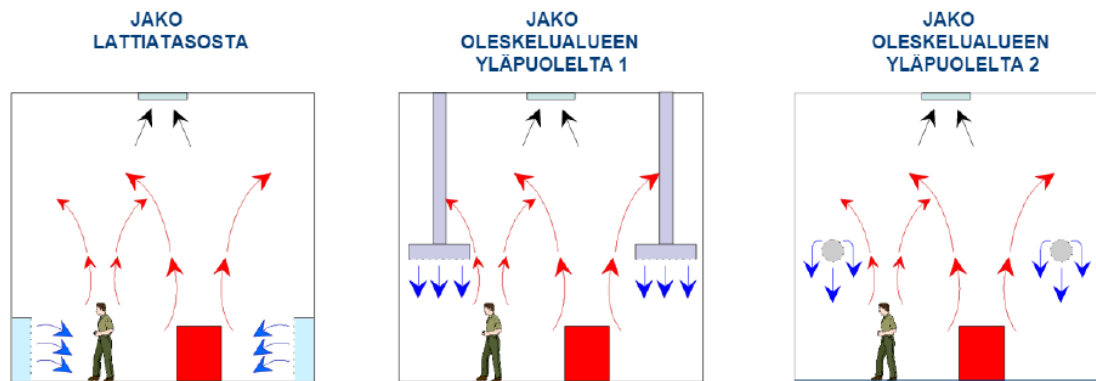
Esimerkiksi kemikaalien varastoinnissa voidaan hyödyntää mäntäperiaatteella toimivaa ilmanvaihtoa läpivirtauksena tilassa. Menetelmää voidaan toteuttaa vastakkaisille seinustoille sijoitetuilla riittävän suurilla tulo- ja poistoaukoilla. (Tu-kes 2021, 29–30.) Mäntäperiaatetta hyödynnetään korkeiden luokitusten puhdistiloissa, joiden luokitukset ovat ISO 1-5, joiden ilman tulisi olla mahdollisimman puhdasta (Suomen standardisoimisliitto 2001, 24). Mäntäperiaatteiden ilmanvaihdon esimerkkejä löytyy kuvasta 1.



Kuva 1. Mäntäperiaatteisen ilmanvaihdon toteutus- ja havainnekuvia. (Hautalampi 2008, 43)

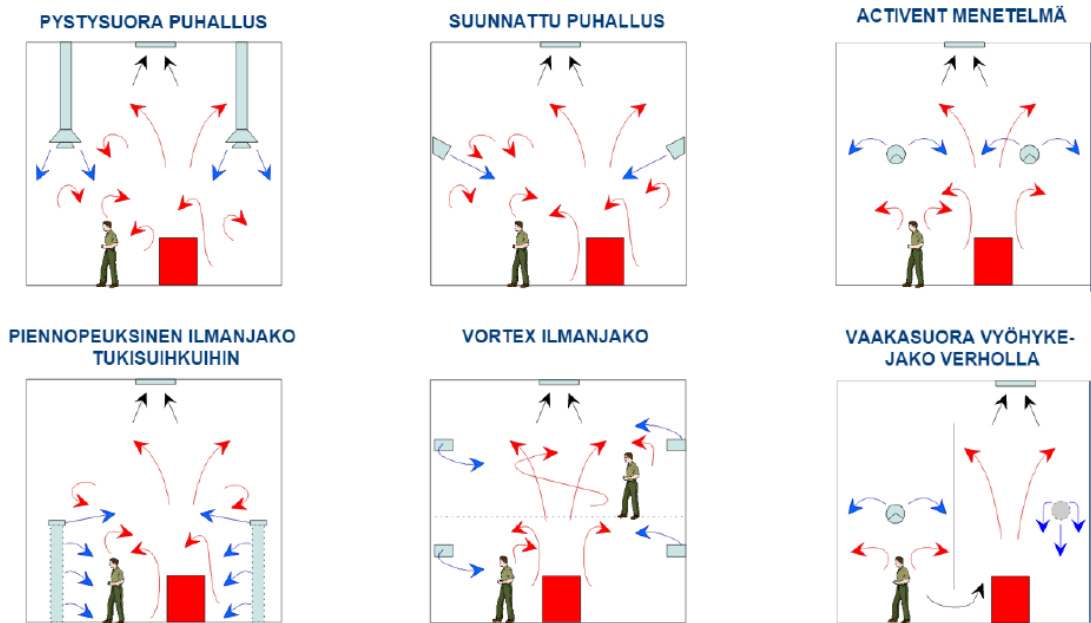
Kerrostumaperiaatteessa likainen ja lämpimämpi ilma kohoaa ylöspäin ja tuloilmaa johdetaan tilojen alaosiin. Matalanopeuksisella tuloilmalla pyritään syrjäyttämään likainen ilma ylöspäin, kohti tilojen yläosissa olevia poistolaitteita. Alemmillä vyöhykkeillä voidaan saavuttaa alhaisia pitoisuustasoja, hyvä lämpötilatehokkuus ja epäpuhtauksien poistotehokkuus. Ilmanvaihdossa on mahdollista

syntyä katvealueita riippuen ilman liikkeen hallinnasta, joissa voi esiintyä enemmän epäpuhtauksia. Järjestelmä toimii optimaalisesti vain sopivissa olosuhteissa. (Hautalampi 2008 42, 48.) Kerrostumaperiaatetta voidaan hyödyntää tehokkaasti päästölähteiden luodessa lämpöä ja lämpimän epäpuhtaan ilman noustessa ylöspäin lämmön nostevoiman vaikutuksesta. Kerrostumaperiaatetta voi olla vaikea hallita suurissa tiloissa, joissa tuloilmaa ei saada tuotua tasaisesti ympäristöön. Kerrostumaperiaatetta esitellään kuvassa 2.



Kuva 2. Kerrostumaperiaatteisen ilmanvaihdon toteutus-esimerkkejä havainnekuvina. (Hautalampi 2008, 45)

Vyöhykeilmanvaihdossa tuloilmaa tuodaan työpisteille ja muihin määritettyihin kohteisiin. Tuloilmalla syrjäytetään likaista ja lämpimämpää ilmaa halutuilta vyöhykkeiltä. Nostevoiman avulla lämmön ja epäpuhtauksien kerrostuminen sallitaan muualla huonetiloissa. Kerrostumisen avulla epäpuhtaudet nousevat ylöspäin, josta likainen ilma poistetaan. Vyöhykeilmanvaihto on sekoitusilmanvaihtoa tehokkaampi lämpötilojen ja epäpuhtauksien hallinnassa. Kohdistetulla tuloilmalla saavutetaan parempi ilmanlaadun hallinta työskentelypisteisiin ja pienemmät katvealueet sekoitusperiaatteeseen verrattuna tuloilman ohjauksen ansiosta. Epäpuhtaudet voivat sekoittua työskentelyvyöhykkeen ilmaan ja olosuhteiden hallinta ei ole yhtä tehokasta, kuin aikaisemmin mainituin menetelmin. (Hautalampi 2008, 42, 50.) Vyöhykeperiaatteen toteutus-esimerkkejä esitellään kuvassa 3.



Kuva 3. Vyöhykeperiaatteisen ilmanvaihdon toteutusmerkkejä havainnekuvina. (Hautalampi 2008, 49)

Sekoitusperiaatteella tuloilma tuodaan suurnopeusilmanjaon avulla, luoden tilaan tasaiset olosuhteet. Ilmastoidulle vyöhykkeelle ei synny suuria katvealueita ja lämpöoloja voidaan pitää suhteellisen tasaisina. Tilojen ilman sekoittuessa ongelmaksi syntyy epäpuhtauksien ja lämmön poiston tehokkuus. Tuloilman sekoittuessa likaiseen ilmaan, epäpuhtaudet eivät ohjautu yhtä tehokkaasti poistoilmalaitteisiin. Myös tuloilman suuremmat nopeudet voivat aiheuttaa vedon tunnetta oleskeluvyöhykkeelle. (Hautalampi 2008, 42,52.)

Sekoitusperiaatteisen ilmanvaihdon epäpuhtauksien hallintaa voidaan tehostaa epäpuhtauslähteiden kohdepoistoin ja koteloinnin avulla. Tiloissa ihmisistä peräisin olevat epäpuhtauslähteet kuitenkin jäävät ilmaan helpommin. Epäpuhtaudet napataan ilmasta ennen kuin ne voivat sekoittua oleskeluvyöhykkeen ilmaan. Sekoitusperiaatetta voidaan hyödyntää joissain puhdastiloissa, joiden puhtausolosuhteet ovat vähäisempiä ISO 6-9 (Suomen standardisoimisliitto 2001, 24). Sekoitusperiaatetta esitellään havainnekuvassa 4.



Kuva 4. Tyypilliset sekoitusperiaatteisen ilmanvaihdon havainnekuvat. (Hautalampi 2008, 51)

Laboratorioympäristössä tehokas epäpuhtauksien ja olosuhteiden hallinta on tärkeää ja kohdepoistoilla voidaan tehostetusti poistaa pistemäisiä epäpuhtauslähteitä. Ilman sekoittumista likaisissa tiloissa on kuitenkin syytä välttää. Terveydelle vaarallisten ja suurien epäpuhtauslähteiden kohdalle on aina syytä sijoittaa kohdepoisto tai kotelointi.

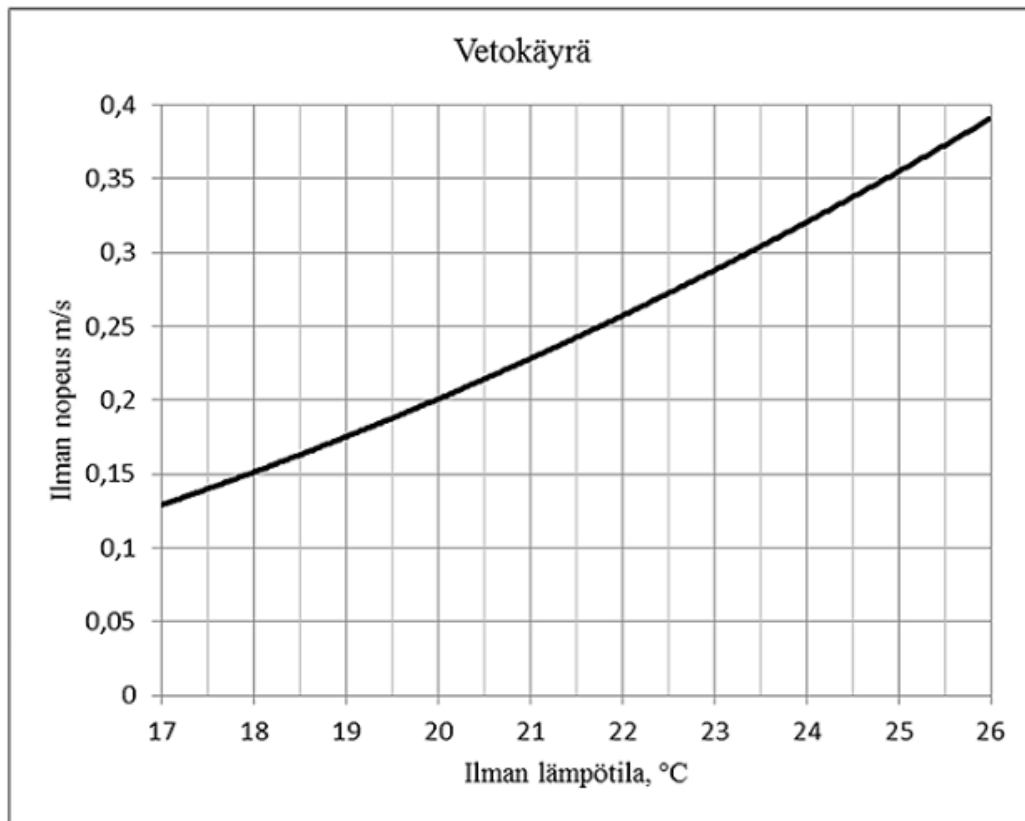
### 2.3 Työterveys

Työterveys on huomioitava työpaikoilla ja teollisuudessa työolosuhteet voivat olla usein haastavat. Ilmanvaihdon vaikutus tiloissa, joissa esiintyy runsaasti epäpuhtauksia, on oleellinen. Ilmanvaihdon lisäksi saatetaan joutua käyttämään erityisiä suojauskeinoja, kuten suojaruusteita. Ilmanvaihdosta on työterveyslaissa määrätty seuraavasti.

Työpaikalla tulee olla riittävästi kelpollista hengitysilmaa. Työpaikan ilmanvaihdon tulee olla riittävän tehokas ja tarkoituksenmukainen. (Työterveyslaki 2002, §33.) Työpaikalla, jossa esiintyy ilman epäpuhtauksia, kuten pölyä, savua, kaasua, tai höyryä työntekijää vaingoittavassa tai häiritsevässä määrin, on niiden leviäminen mahdollisuuksien mukaan estettävä eristämällä epäpuhtauksien lähde, tai sijoittamalla se suljettuun tilaan, tai laitteeseen. Ilman epäpuhtaudet on riittävässä määrin koottava ja poistettava tarkoituksenmukaisen ilmanvaihdon avulla. (Työterveyslaki 2002, §37.)

Ilman liikenopeuksista on rakennustietosäätiön (2018) julkaisussa mainittu tavoitearvoja, joiden perusteella yritetään saada ilman liikenopeuksia hallittua viihtyvyyden vuoksi. Teollisuusympäristössä voidaan katsoa ilmannopeuden

oleskeluvyöhykkeelle suunniteltuja (S3) tavoitearvoja, jotka ovat alle 0,2 m/s talviaikaan, tai lämpötilojen ollessa 21°C ja kesäaikaan 0,3 m/s, tai lämpötilojen ollessa 25°C. (Rakennustietosäätiö 2018, 7.) Sosiaali- ja terveysministeriön asetus 2015 antaa ilman virtausnopeudesta arvion vetokäyrän avulla, josta saadaan samansuuntaisia arvoja suunnitteluun. Vetokäyrä on esiteltyä kuviossa 3, jossa nähdään ilman lämpötilan vaikutus vedon tunteen aistimisessa. Hietaamman ilman virtausnopeuden etuna ovat mukavammat työskentelyolosuhteet ja vähäisempi vedon tunne ilmavirran nopeuden seurauksena.



Kuvio 3. Ilmavirran nopeuden vetokäyrä (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015, liite 1).

Vetoa ei voida täysin välttää teollisuuden ilmanvaihdon epäpuhtauksien hallinnan tarpeitten takia, mutta tuloilmaa pyritään ohjaamaan työskentelyvyöhykkeelle pienemmillä nopeuksilla. Tarvittaessa vedon ja ilmanvaihdon vaikutuksista tehdään erillinen arvio. Prosessien ja terveyden kannalta joissain prosesseissa joudutaan käyttämään suurempia virtausnopeuksia turvallisen lopputuloksen mahdollistamiseksi. Esimerkiksi epäpuhtauksien ohjausta pystytään

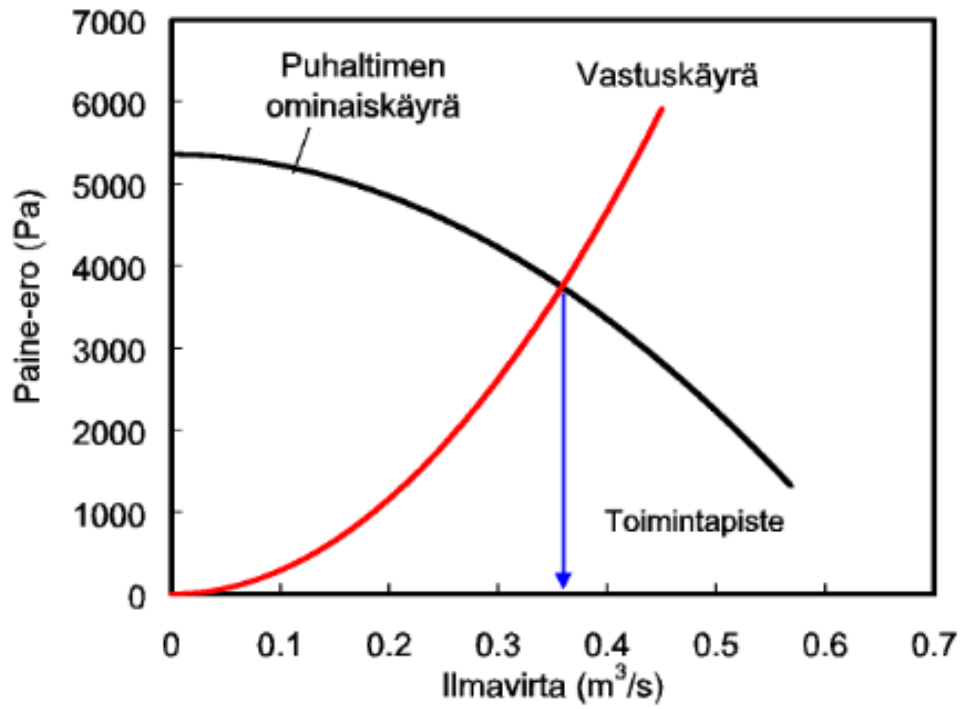
tekemään nopeammalla ilman liikkeellä. Näin pystytään pitämään joissain sovellutuksissa työolot turvallisena ja työskentelijälle ei aiheutu terveyshaittaa.

### 3 Laitteisto

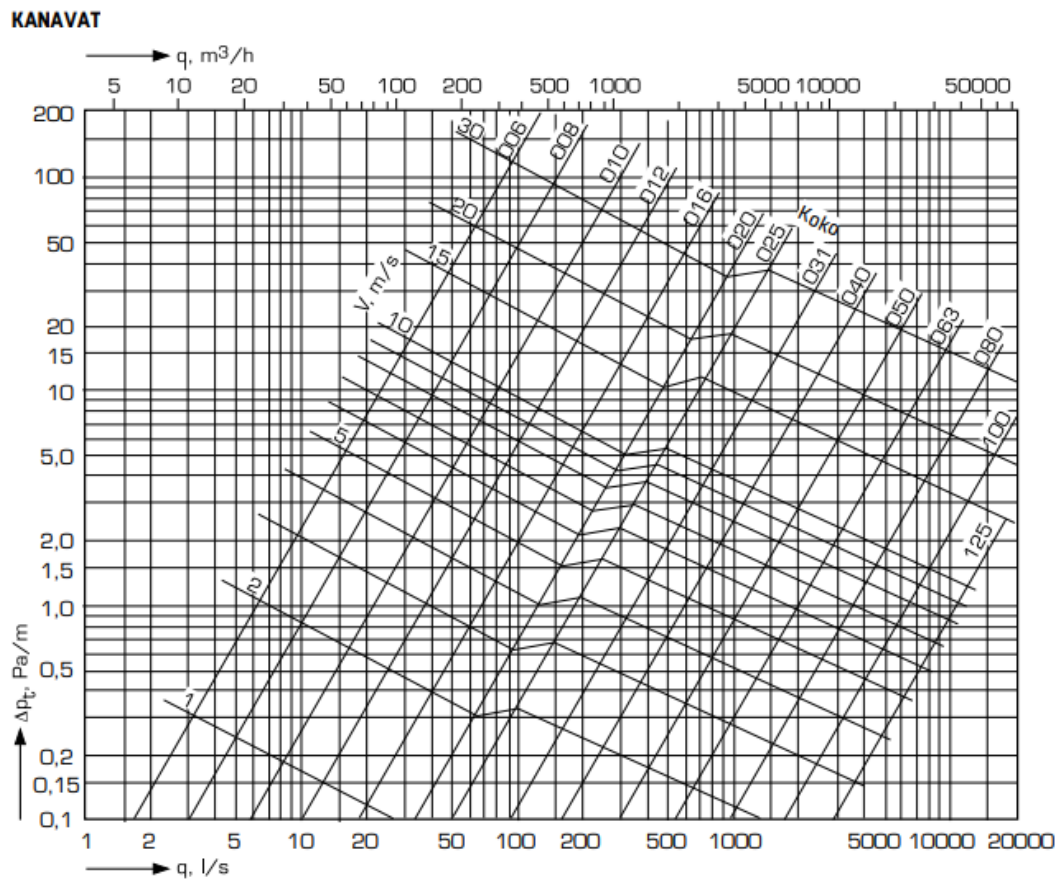
#### 3.1 Kanaviston mitoitus

Kanaviston mitoitus määrittää kuljetusnopeuden kanaviston eri osuuksilla ja kanaviston mitoituksessa hyödynnetään usein valmistajilta saatuja tuotekohtaisia kitkapainehäviötaulukoita. Kitkapainehäviötaulukoista selviää tuotteiden painehäviöt ilmamäärään, tai kanavanopeuteen verrannollisesti. Kanaviston mitoituksessa tarvitaan tietää tilassa käsiteltävien epäpuhtauksien laatu, jotteivat epäpuhtaudet jää kanavistoon. Tilassa syntyvän pölyn laadun mukaan kanaviston kuljetinnopeutta joudutaan arvioimaan tapauskohtaisesti. Teollisen ilmanvaihdon virtausnopeuden tulisi olla yli 10 m/s, teollisuuden eri sovellutusten luodessa usein suurempia määriä epäpuhtauksia. (Sandberg ym. 2014b, 548.)

Kevyehkölle pölylle (esim. muovipöly) kuljetusnopeutena olisi 15 m/s, tavalliselle teollisuuspölylle (hiontapöly, karkea kumipöly) 20 m/s ja raskaalle pölylle (lyijypöly, kostea pöly) suositellaan 25 m/s kuljetusnopeuksia. (Tähti ym. 2002; Sandberg ym. 2014b, 548.) Kuvioista 5 voidaan päätellä täten, jos tilassa vaadittaisiin 15 m/s kuljetusnopeus 200 l/s, kanavakoko voi olla Ø125, jolloin painehäviö metrille olisi noin 19 Pa/m. Puhaltimen tuottama ilmavirta on riippuvainen paine-erosta ja siinä on huomioitava kuvion 4 tavalla tehon riittävyys painehäviön ja puhaltimen tehokkuuden vertailulla (Kulmala ym. 2004).



Kuvio 4. Puhaltimen suhde kanaviston painehäviöön (Kulmala ym. 2004).



Kuvio 5. Kanaviston painehäviökäyrät FläktGroup ekoduct. (FläktGroup 2022a)

Puhaltimen on kyettävä painehäviöstä huolimatta saamaan ilma liikkumaan kanavistossa halutulla nopeudella. Puhaltimen valinta tarvittaviin käyttökohteisiin on syytä tehdä asiantuntijan kanssa. Kanaviston mitoituksessa teollisuudessa suositellaan pyöreitä kanavia paineen keston ja tasaisemman nopeusjakauman vuoksi (Sandberg ym. 2014, 548). Kanaviston suunnittelussa on vältettävä ylimääräisiä käyriä ja olemassa olevien käyrien olisi hyvä olla loivia, jotta epäpuhtaudet eivät kerääny niiden päälle (Sandberg ym. 2014, 548).

### 3.1.1 Kanaviston materiaalit

Kanaviston materiaalien käyttö riippuu tiloissa olevista päästölähteistä ja sen valinnalla on vaikutuksia kanaviston kestävyyskannalta. Kanavien ja laitteiden materiaalina käytetään usein galvanoitua terästä. Lääketeollisuudessa ja tiettyjen kemikaalien käsittelyä sisältävissä tiloissa ruostumattoman teräksen käyttö kanavistossa on suositeltavaa kemikaalien ja kulutuksen kestävyyskannalta. Syövyttäviä epäpuhtauksia sisältävissä tiloissa voidaan käyttää PVC- ja lasikuitukanavaa, joka ei reagoi yhtä paljon epäpuhtauksien kanssa. Joissain kohteissa kanaviston liitoksia joudutaan tekemään työntöliitoksista poiketen laipoilla ja hitsaamalla. Kanavistoja voidaan myös pinnoittaa erillisillä pinnoitteilla korrosiokestävyyskannan parantamiseksi haasteellisissa tiloissa. (Sandberg ym. 2014b, 550; Kulmala ym. 2004.)

Materiaalina yleisesti käytetyn teräksestä valmistetun kanavan ja kanavaosien seinämäpaksuus paloturvallisuuden ja puhdistettavuuden kannalta (rasvakanaavat, palo- ja räjähdysvaarallisissa tiloissa käytetyt kanavat) seinämävahvuus tulisi olla vähintään 1,25 mm (Talotekniikkainfo 2022, 6.3). Normaalissa käytössä oleville pyöreille kanaville on ilmoitettu taulukossa 9 pyöreän kanavan materiaalin paksuuden minimiarvot vertailuarvoiksi.

Taulukko 9. Pyöreän kanavan materiaalin paksuudet (Talotekniikkainfo 2022, 6.3).

Pyöreä kanava	Materiaalin paksuus
63–315 mm	Minimi 0,5 mm
400–800 mm	Minimi 0,7 mm

1000–1250 mm	Minimi 0,9 mm
--------------	---------------

Muista materiaaleista valmistettujen kanavistojen rakennevahvuudet tulee selvittää materiaalivalmistajan ilmoittamista tiedoista tai suoraan valmistajalta, jotta käytettyjä tuotteita voidaan hyödyntää kohteissa turvallisesti (Talotekniikkainfo 2018). Puhdastiloissa kanaviston materiaaleista tulisi varmistaa, ettei niistä irtoa sisäilmaan hiukkasia ja materiaalit ovat korroosionkestävät, tai niille tulee tehdä asianmukainen pinnoitus (Suomen standardisoimisliitto 2001, 60).

### 3.1.2 Kanaviston puhtaus

Ilmanvaihtotuotteiden puhtauteen on aihetta kiinnittää huomiota laboratoriokohteissa, likaisten kanavien luodessa riskiä epäpuhtauksien johtumiseen tiloihin. Rakennustietosäätiön (2018) mukaan ilmanvaihtotuotteille on vain yksi puhtausluokitus: M1. Sisäilmastoluokitus ilmoittaa sen vaatimukset seuraavasti:

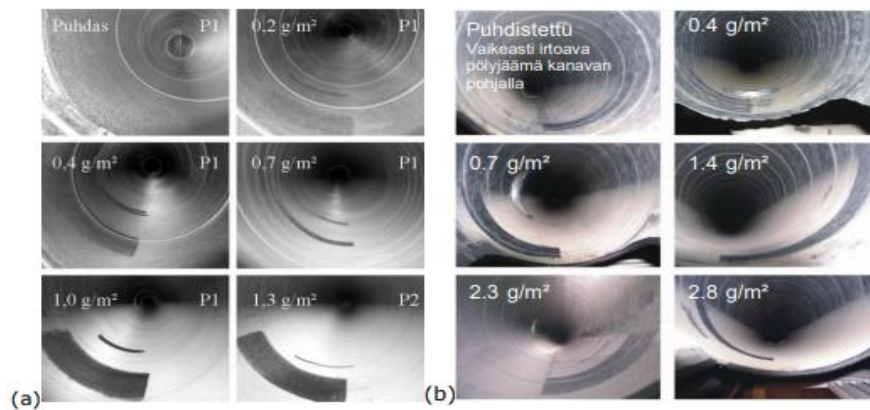
Puhtausluokiteltu tuote ei saa lisätä terveyden tai viihtyvyyden kannalta haitallisia epäpuhtauksia ilmanvaihtojärjestelmässä eikä tuloilmassa. Puhtausluokiteltu tuote ei saa tuottaa tuloilman laatua huonontavaa hajua tai hiukkasmaisia epäpuhtauksia. Puhtausluokittelun tuotteen tulee olla helposti puhdistettavissa. (Rakennustietosäätiö 2018, 21.)

Ilmanvaihtotuotteista todetaan hyväksymismerkinnät ja täten selvitetään ovatko ne kunnossa. Tuotteen on täytynyt täyttää vaatimukset valmistuksen jälkeen. (Rakennustietosäätiö 2018, 21.) Ilmanvaihdon järjestelmän puhtaudesta voidaan materiaalien lisäksi antaa erillinen puhtausluokitus, joka puhtaammissa kohteissa on P1. Rakennustietosäätiö (2018) listaa P1 luokan ilmanvaihtojärjestelmän vaatimuksia seuraavasti:

Tuloilmakanavat ja kanavaosat on tehty puhtausluokitelluista ilmanvaihtotuotteista tai työmaalla vastaavaan tasoon puhdistetuista muista tuotteista. Tiivistemateriaaleina käytetään rakennusmateriaalien päästöluokkaan M1 luokiteltuja tai muuten emissioiltaan alhaiseksi tunnettuja materiaaleja. Luovutusvalmiin ilmanvaihtojärjestelmän sisäpinnan pölykertymän keskiarvo saa olla enintään 0,7 g/m<sup>2</sup> suodatinmenetelmällä (Pasanen ym. 1999) mitattuna tai visuaalisesti arvioituna (Narvanne 2001). BM-Dustdetector -

mittalaitteella mitattuna puhtausvaatimus  $\leq 5\%$ . Laitoksessa ei käytetä palautusilmaa lukuun ottamatta vain yhtä tilaa tai asuntoa palvelevia ilmanvaihtokoneita. Tuloilmassa ei saa käyttää hajusteita (Rakennustietosäätiö 2018, 17.)

Kuvassa 5 esitellään visuaalisen arvioinnin pölykertymän esimerkkejä.



Kuva 5. Puhtauden arviointi visuaalisesti a) uusille kanaville b) käytössä oleville tuloilmakanaville (Suomen LVI-liitto, 2016, 4).

Tuloilman puhtausluokkiin SUP 1 ja SUP 2 vaaditaan puhtausluokituksen P1 ilmanvaihtojärjestelmän puhtaus. Sisäilmaluokituksen määrittelemät sisäilmaluokat S1 ja S2 vaativat myös P1 puhtausluokituksen kanavistoa. ”Tuloilmassa ei saa olla ilmanvaihtojärjestelmästä peräisin olevia terveydelle tai viihtyvyydelle haitallisia aineita (esim. mikrobit, kuidut ja hiukkaset) tai hajuja.” (Rakennustietosäätiö 2018, 17.)

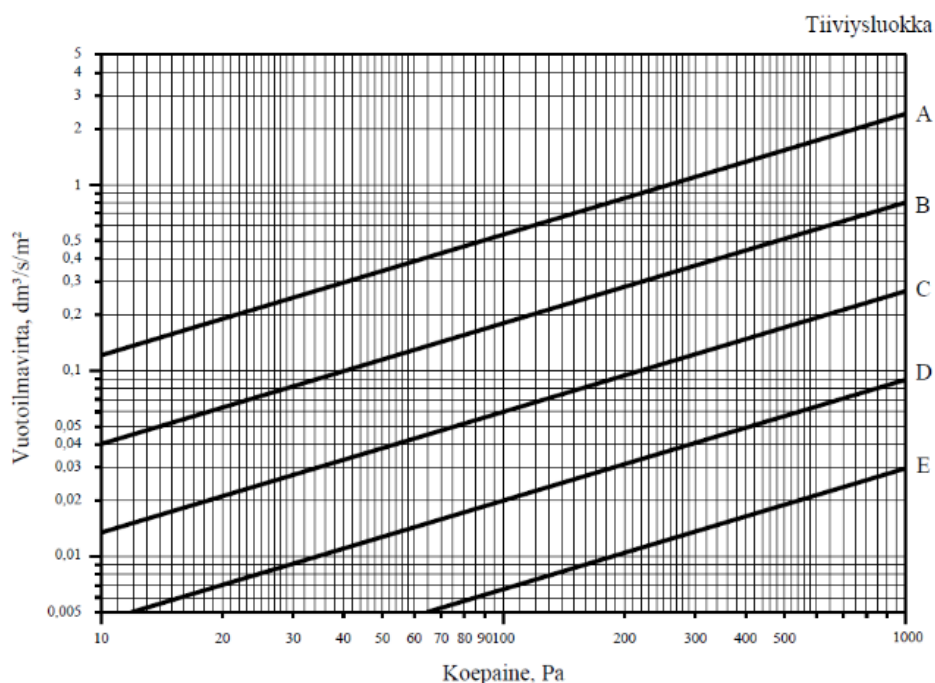
### 3.1.3 Kanaviston tiiveys

Kanaviston tiiveys vaikuttaa kuljetettavan ilmavirran ja epäpuhtauksien pysymiseen kanaviston sisäpuolella. Kanaviston tiiveydestä on säädetty ympäristöministeriön (2017) asetuksessa seuraavasti: ”Rakennuksen painovoimaisen tai koneellisen ilmanvaihtojärjestelmän on oltava luja ja tiiviydeltään vähintään tiiviysluokkaa B. Jos poistoilmassa on runsaasti muita kuin ihmisperäisiä epäpuhtauksia, on tiiviysluokan oltava vähintään C.” (Ympäristöministeriö 2017, 20§). Ilmanvaihdon on täytettävä asetuksen mukaisesti minimissään luokka B ja

useimmissa teollisuuskohteissa epäpuhtauksien määrän takia tiiviysluokka C on vähimmäisvaatimuksena.

Koneellisessa ilmanvaihtojärjestelmässä rakennuksen sisällä konehuoneen ulkopuolella sijaitsevat poistoilmakanavat on suunniteltava alipaineisiksi. Poistoilmaluokkien 1 ja 2 poistoilmakanavat voivat kuitenkin olla ylipaineisia rakennuksen sisällä edellyttäen, että kanavisto on vähintään tiiviysluokkaa C. Poistoilmaluokan 3 poistoilmakanavat ja asuntokohtaiset ulospuhalluskanavat voivat olla ylipaineisia rakennuksen sisällä edellyttäen, että kanavisto on vähintään tiiviysluokkaa D. Poistoilmaluokan 4 poistoilmakanavat voivat olla ylipaineisia rakennuksen sisällä, jos kanavisto ei vuoda. (Ympäristöministeriö 2017, 20§.)

Ilmanvaihtokanaviston tiiveyttä voidaan tarkastella kuvion 6 avulla. Taulukossa verrataan koepainetta (Pa), vuotoilman määrään litroissa sekunnissa neliötä kohden. Tiiveysluokista A on heikoin ja E on vuotoluokista kaikkein tiivein.



Kuvio 6. Tiiveysluokkien määrittely ja vuotoilmavirta (Talotekniikkainfo 2021, 19).

Ilmanvaihtojärjestelmän, ilmanvaihtokanavan ja kanavan osien tiiveysluokat voidaan myös määrittää laskennallisesti vuotoilmavirran määrällä koepaineeseen verrattuna, johon ympäristöministeriön (2017) asetus esittää luokittelun 19§. Laskennan periaatetta ja luokkia esitellään taulukossa 10. Laskennalla saaduista tuloksista pystytään selvittämään kohteen ilmanvaihtojärjestelmien tiiveys

ja vertaamaan sitä kohteelle esitettyihin vaatimuksiin. Ilmanvaihtojärjestelmän tiiveyden selvittäminen tällä tavoin vaatii aina vuotoilmatestausta, eikä sitä voida suorittaa ilman sitä.

Taulukko 10. Ilmanvaihtojärjestelmien tiiveysluokkien laskuohje (Talotekniikkainfo 2021, 19).

Tiiveysluokka	Sallittu vuotoilma enintään $q_{VIA}$ $dm^3/s/m^2$
<b>A</b>	$0,027 * p_s^{0,65}$
<b>B</b>	$0,009 * p_s^{0,65}$
<b>C</b>	$0,003 * p_s^{0,65}$
<b>D</b>	$0,001 * p_s^{0,65}$
<b>E</b>	$0,0003 * p_s^{0,65}$

$Q_{VIA}$  ( $dm^3/s/m^2$ ) Litraa sekunnissa neliötä kohden.  
 $p_s$  ( $Pa$ ) Pascalia koepainetta.

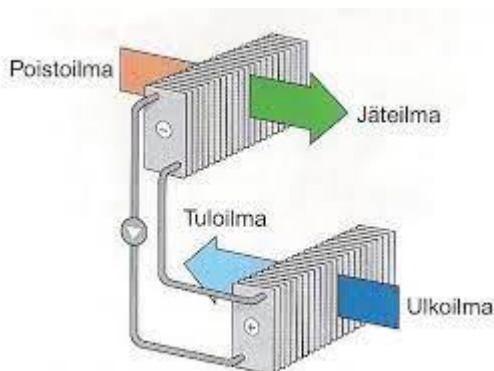
Kanaviston ja kannatuksen on pysyttävä tukevasti paikallaan ja ilmanvaihtojärjestelmän kanaviston pitää kestää ilmanvaihtojärjestelmän yli-, tai alipaineistus 1000 Pa asti, puhdistus, korrosio, yhden henkilön paino ja muut rasitukset. (Sandberg 2014a, 214, 218.) Kanaviston tiiveyteen voi aiheutua vahinkoa, jos puhdistuksen rasitteita ei huomioida ja kanavisto vaurioituu sen seurauksena. Kanaviston vaatimuksien lisäksi ilmanvaihtokoneista ja kammioista on annettu lisää ohjeistusta ympäristöministeriön (2017) asetuksessa:

Koneellisessa ilmanvaihtojärjestelmässä ilmanvaihtokoneiden ja -kammioiden tulee kestää puhaltimen paineen aiheuttama kuormitus sulkupeltien ollessa suljettuina. Jos koneellisen ilmanvaihtojärjestelmän ilmakehän poikkipinta-ala suunnitellaan suuremmaksi kuin 0,06 neliometriä, on ulko- ja ulospuhallusilmakanavat varustettava sulkupelleillä, jotka sulkeutuvat automaattisesti järjestelmän pysähtyessä. (Ympäristöministeriö 2017, 20§.)

### 3.2 LTO-ratkaisut

Yleisesti likaisissa tiloissa käsiteltävien epäpuhtauksien takia ainoa mahdollinen LTO-muoto on nestekiertoinen lämmöntalteenotto eli epäsuora rekuperatiivinen lämmöntalteenotto, jota esitellään kuvassa 6. Puhtaammassa tiloissa, jossa pienestä vuotoilmasta ei ole haittaa voidaan hyödyntää muita rekuperatiivisia

(vastavirtakenno ja ristivirtakenno) ja regeneratiivisia (pyörivä lämmönsiirrin) lämmöntalteenottomuotoja, joiden lämmöntalteenottotehokkuus on parempi. Eri lämmöntalteenottomuotojen hyötysuhteita esitellään tarkemmin luvussa 4.1.1, jossa esitetään tuloilman lämmityksen teoriaa. Esimerkiksi regeneratiivista lämmöntalteenottoa voidaan hyödyntää tiloissa, joissa käsitellään luokkien 1 ja 2 poistoilmaa, jossa on maksimissaan 5 % luokan 3 poistoilmaa (Sandberg ym. 2014a, 179). Rekuperatiiviset lämmöntalteenottolaitteet voidaan rakentaa hyvin tiiviiksi, mutta silti niistä voi ilmetä vuotovirtoja  $\leq 0,5$  % (Sandberg 2014a 181). Riskin minimointi rekuperatiivisella lämmöntalteenotolla kannattaa, jos tiloissa käsitellään ihmiselle haitallisia aineita. Tilojen käyttötarkoitus ja olosuhteet on selvitettävä ennen laitteiston valintaa. Valinta on hyvä suorittaa asiantuntijan kanssa yhteistyössä.



Kuva 6. nestekiertoinen lämmöntalteenotto (Sandberg ym. 2014a, 184).

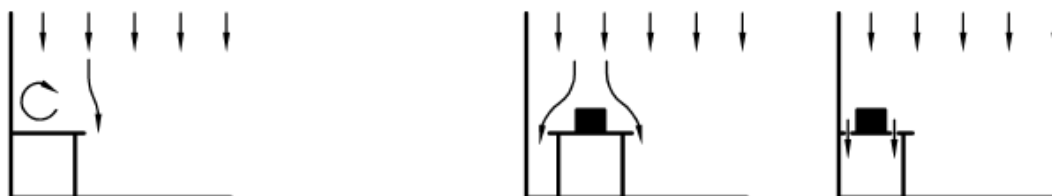
Esimerkiksi rakennustietosäätöön (2018, 18) mukaan regeneratiivista lämmöntalteenottoa saa käyttää vain, jos poistoilmassa ei ole terveydelle vaarallisia aineita. Likaisemmissa tiloissa joudutaan vielä ennen lämmöntalteenottoa suodattamaan likaista ilmaa, jotta kenno ei tukkeudu niin nopeasti, tai hapettuisi käytettävien kemikaalien takia. Kennon likaantuminen voi aiheuttaa hyötysuhteen pienenemistä huomattavasti, lämmönjohtokyvyn heikentyessä. Kaikkiin tiloihin lämmöntalteenotto ei sovellu ollenkaan, jolloin erinäisien kohdepoistojen ilmaa saatetaan johtaa suoraan ulos ilman lämmöntalteenottoa, esimerkiksi vahvasti korroosioisien olosuhteiden takia, tai muista teknisesti haastavista syistä.

### 3.3 Päätelaitteet

Ilmanvaihdon päätelaitteet ovat ilmavirtaa ohjaavia ja ilmavirtaa nappaavia laitteita ilmanvaihtokanavan päässä. Päätelaitteina voidaan käyttää normaalista valikoimasta löytyviä tulo- ja päätelaitteita, ellei olosuhteet määritä niille esteitä. Joissain tiloissa voidaan joutua venttiileitä ja muita päätelaitteita käsittelemään kestävästi tilojen olosuhteita. Joskus päätelaitteina käytetään suodattimet sisältäviä ratkaisuita, kuten puhdastiloissa. Useimmiten tiloissa yleisilmanvaihtoa ohjataan useista venttiileistä laajoille alueille, tai kohdistettuna työpisteisiin ja poistoveniilejä voi olla harvemmassa, jos kohdepoistot ottavat isomman osan poistoilmasta.

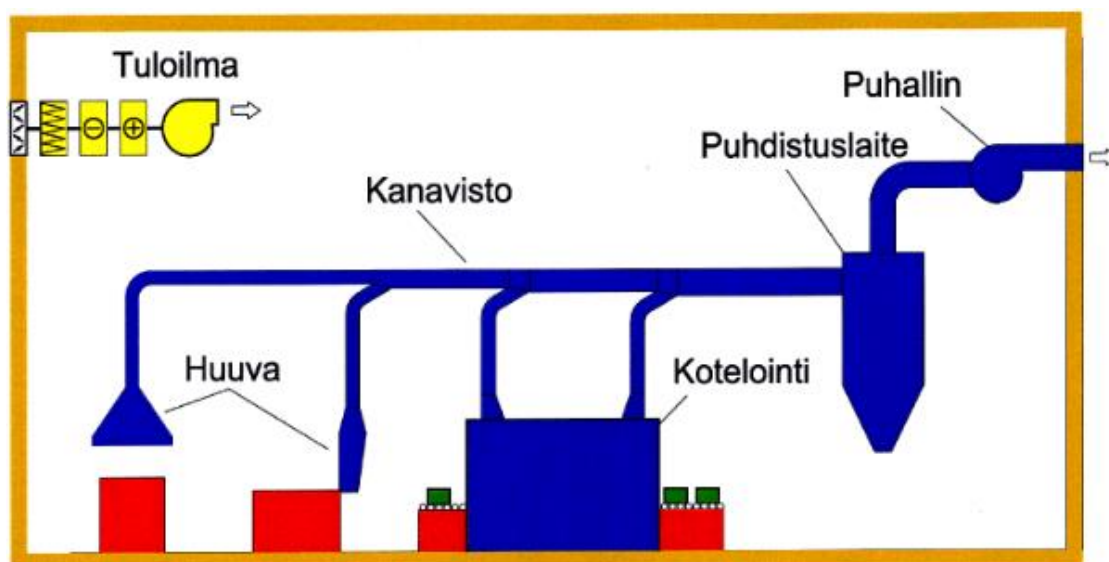
Tuloilma tuodaan useimmiten matalanopeuksisena tiloihin, johon voidaan käyttää esimerkiksi puhdastiloissa kattopaneeleita. Tuloilmaa voidaan sekoittavan ilmanvaihdon kohteisiin tuoda myös korkeanopeuksisena, jolloin ratkaisuna voivat olla esimerkiksi puhallussuuttimet. Ilmanvaihdon poistoilmalaitteina voi toimia ritilät, tai venttiilit, jotka sijoittuvat usein tilojen yläosiin. Mäntäilmanvaihdossa ne ovat vastakkaisella seinustalla tuloilmalaitteiden kanssa. Monesti poistoina toimivat myös vetokaapit ja huuvat, sekä erinäiset työpisteen läheisyydessä ja lattiatasossa olevat kohdistetut poistoilmaratkaisut.

Sisäisten rakennelmien ja kiinteiden asennusten sijoitteluun on kiinnitettävä erityistä huomiota kohteissa, joissa olosuhteiden halutaan pysyvän erityisen puhtaana, jottei sisäilmavirta häiriintyisi. Koteloinnit, huuvat ja kanavisto voivat olla työpisteiden lisäksi esimerkkejä kyseisistä huomioista (Suomen standardisointiliitto 2001, 60). Häiriövirtausta voi aiheuttaa esimerkiksi työpisteen pöytä, jonka sijoittelulla tai siihen asentamalla kohdepoiston työtason alle saadaan tilannetta hallittua. Kuvassa 7 on vasemmalla työpiste, joka aiheuttaa häiriövirtausta ja oikealla on kaksi esimerkkiä tilanteen parantamisesta.



Kuva 7. Häiriövirtaus ja ratkaisuesimerkit (Suomen standardisoimisliitto 2001, 30).

Työpisteillä tai päästölähteillä voidaan käyttää kohdepoistoja, huuvia, tai laboratorikaappeja ja niiden yhdistelmiä poistamaan epäpuhtauksia kohteesta. Kuvassa 8 esitellään kanavistoa teollisuusympäristössä ja sen osia esimerkkinä huuvista ja koteloinnista. Järjestelmissä käytetään usein monia erityyppisiä laitteita monimutkaisemmissa kohteissa.

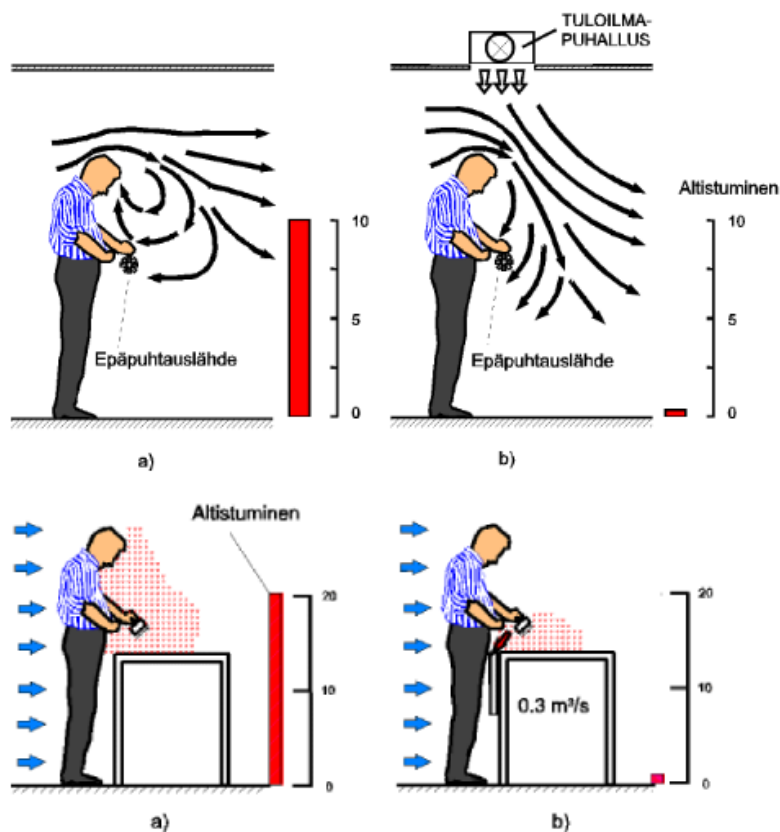


Kuva 8. Kohdepoistojärjestelmän periaate (Kulmala ym. 2004, 6.2).

Ilmanvaihtojärjestelmässä tiloihin tulevat elementit vaativat puhdastiloissa erityistä huomiota eritoten puhtauden ylläpitämiseen. Komponenteissa ja pinnoissa muodostuneet epäpuhtaudet on minimoitava ja laitteita on pystyttävä puhdistamaan tehokkaasti. Laitteiden materiaalien pitäisi olla korroosionkestäviä ja niistä ei saa irrota hiukkasia, tai laitteet on pintakäsiteltävä asianmukaisesti. (Suomen standardisoimisliitto 2001, 60.)

### 3.3.1 Kohdepoistot

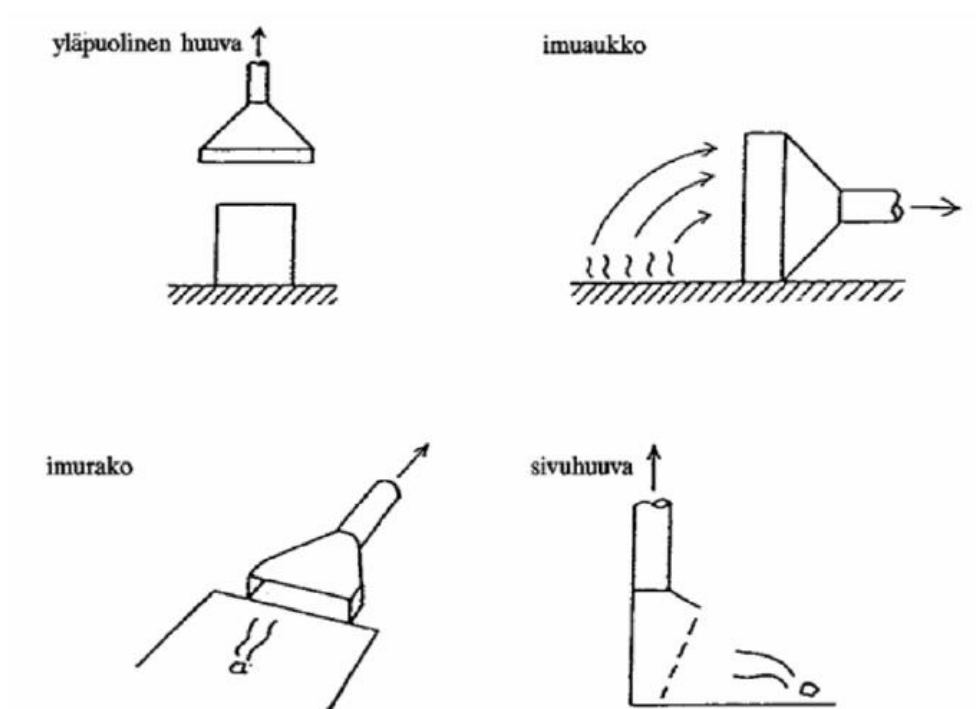
Kohdepoistot ovat epäpuhtauslähteiden läheisyyteen sijoitettuja ilmaa imeviä päätelaitteita. Epäpuhtauksien leviämistä muodostumispaikalta estetään sijoittamalla kohdepoisto epäpuhtauslähteen läheisyyteen, jotta epäpuhtaudet eivät päädy työpaikan ilmaan. Esimerkiksi päästölähteen ja työntekijän väliin sijoitettu kohdepoistolla kuten kuvan 9 oikeassa alakulmassa esitellään. (Työterveyslaitos 2022a.)



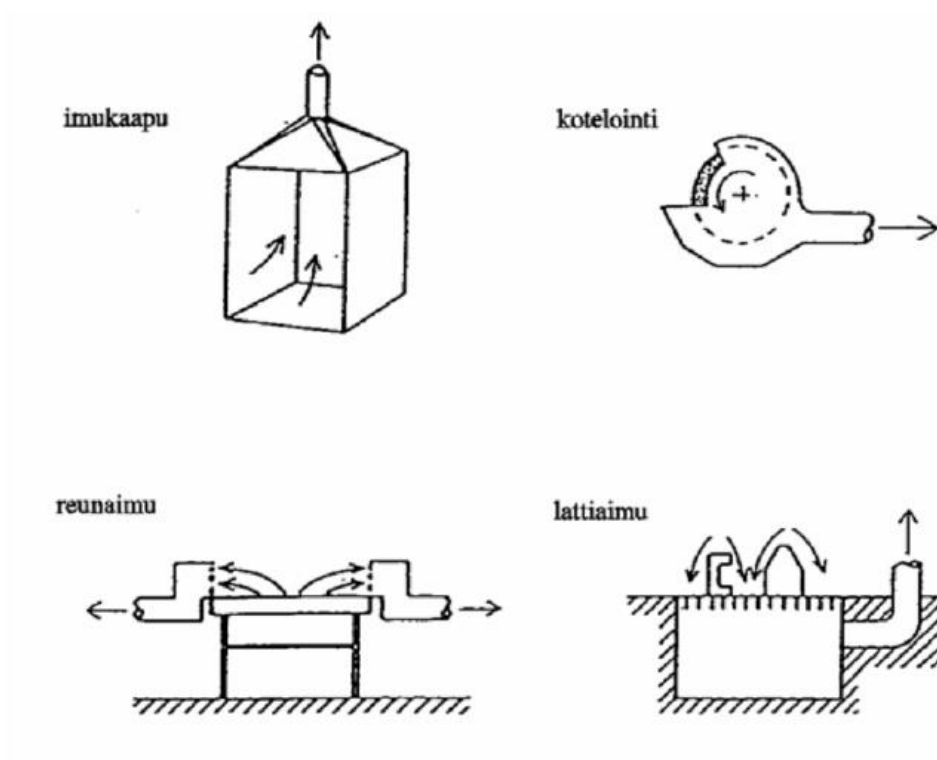
Kuva 9. Epäpuhtauslähteille altistuminen ilmanvaihdon seurauksena (Kulmala ym. 2004, 6.2).

Kohdepoistojen mitoituksessa sieppausasteella on suuri merkitys epäpuhtauksien poistossa ja suunnittelussa pyritään mahdollisimman suureen sieppausasteeseen, mieluiten yli 90 %:iin. (Kulmala ym. 2004, 6.3.) Kohdepuhalluksella voidaan vielä tehostaa vaikutusta, suunnatun tuloilmanjaon avulla. Kohdepuhallus toimii parhaiten työntekijän ollessa sivuttain ilman päävirtaussuuntaan nähden. Aina sivuttaispuhallusta ei voida hyödyntää, jolloin seuraavana vaihtoehtona on puhallus työntekijän päältä alaspäin. (Työterveyslaitos 2022a.)

Kohdepoiston sijoituksessa on huomioitava, ettei työntekijä jää epäpuhtauslähteen ja huuven väliin (Kulmala ym. 2004, 6.3). Esimerkkejä kohdepoistoratkaisuista löytyy kuvista 14 ja 15.



Kuva 10. Esimerkkejä kohdepoistoratkaisuista 1 (Hautalampi 2008, 61).



Kuva 11. Esimerkkejä kohdepoistoratkaisuista 2 (Hautalampi 2008, 62).

Kartiohuuvan mitoitus aloitetaan poistettavan epäpuhtauden laadun tarkastelulla ja soveltuvan huuvan valinnalla. Sieppausnopeuden tarve riippuu poistettavan epäpuhtauden päästövirran määrästä. Virtausnopeuden laskennan jälkeen poistoilmavirta mitoitetaan ja ilmavirran avulla kanavisto mitoitetaan sopivaksi luvussa 3.1 esitetyn menetelmän avulla. Kanaviston painehäviö kartoitetaan ja poistoilman puhdistimen painehäviö lisätään tuloksiin. Puhallin määritetään luvussa 3.1 määritetyllä tavalla. Taulukon 11 arvojen perusteella voidaan ottaa suuntaa antavia arvoja eri päästölähteisiin. Monimutkaisemmissa ympäristöissä mitoitus perustuu usein käytännössä toimivaksi koettuun järjestelmään. (Sandberg ym. 2014b, 547–548)

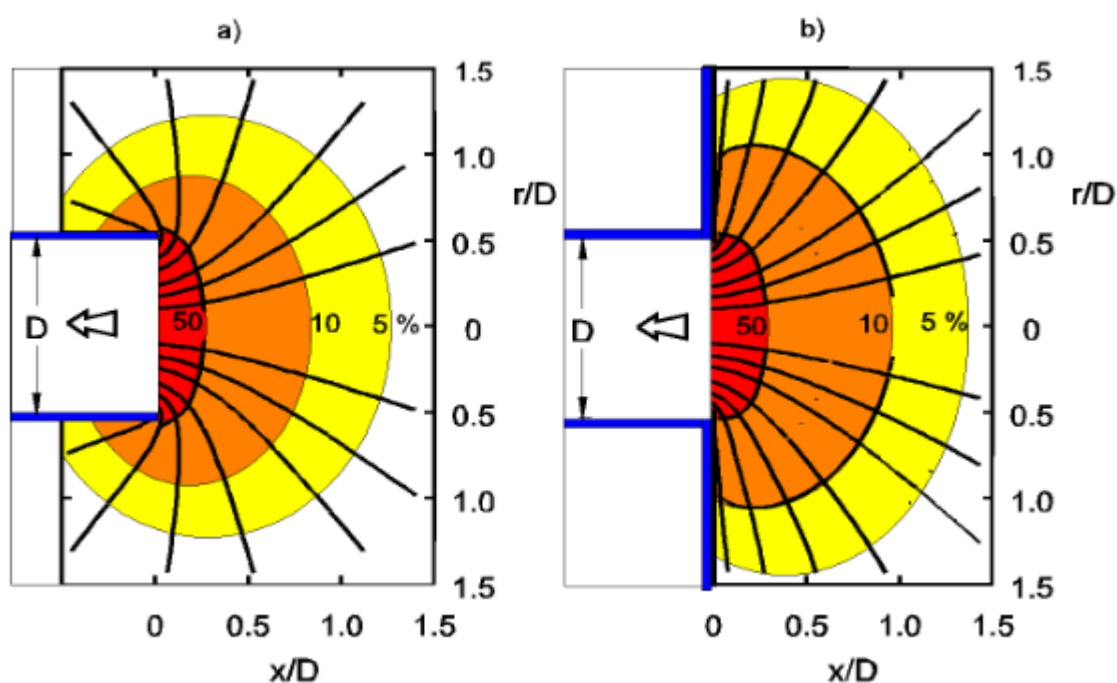
Taulukko 11. Sieppausnopeuksien suuntaa antavia arvoja. (Sandberg ym. 2014b, 548)

Epäpuhtauden päästövirran määrä	Sieppausnopeus m/s	Esimerkki
<b>Alhainen</b>	0,3–0,5	Jauhemaisten aineiden annostelu, haihtuminen altaista
<b>Melko alhainen</b>	0,5–1	Hitsaus; pinnoitus; liikkuvat kuljettimet (nopeus alle 1 m/s)
<b>Melko suuri</b>	1–2,5	Ruiskumaalaaminen kopissa; avokuljettimen täyttö ja purkaminen
<b>Suuri</b>	2,5–10	Hionta; raepuhallus; rumpukiillotus

Lisäksi tarvitaan päästölähteen ja huuvan välinen etäisyys, imuaukon otsapinta-ala  $m^2$ , lisäksi tieto onko huuvassa laippaa. Laipallisen huuvan laskukaavaan lisätään kerroin 0,75. (Sandberg ym. 2014b, 550.) Huuvan rakenne vaikuttaa suuresti sieppausasteeseen ja laipallisena se poistaa tehokkaammin epäpuhtauslähteitä etualalta. Mitoituksessa etäisyys epäpuhtauslähteeseen on kriittinen tekijä. Matkan kaksinkertaistuessa poistoilman tarve nelinkertaistuu. Myös sieppausnopeutta täytyy kasvattaa, jos epäpuhtauksia halutaan saada kiinni hyvällä menestyksellä. Hyvänä pidetty imuetäisyys olisikin noin 0,5 m luokkaa, ja pitemmät matkat asettavat haasteita kohdepoiston toteuttamiseen. (Kulmala ym. 2004, 6.3.2.) Laipallisen ja laipattoman kohdepoiston eroja esitellään kuvassa 12. Kaavan 8 avulla voidaan laskea tarvittava poistoilmavirta huuvalle.

$$q = kv_x(10x^2 + A) \quad (8)$$

missä	$x$	päästölähteen ja huuvan välinen etäisyys m
	$A$	Imuaukon otsapinta-ala m <sup>2</sup>
	$v_x$	tarvittava sieppausnopeus m/s
	$k$	Kerroin, joka laipattomalla huuvalla on 1.0 ja laipallisella 0,75
	$q$	Poistoilmavirta m <sup>3</sup> /s



Kuva 12. Pyöreän a) laipattoman ja b) laipallisen imuaukon virtausnopeudet ja virtaviivat. (Kulmala ym. 2004, 6.3.2.)

Erillispoistot tulee varustaa sulkupellein, hallitsemattomien ilmavirtausten ehkäisemiseksi puhaltimen pysähtyessä. Räjähdyksivaarallisten tilojen, kemikaalikaappien ja muiden erityistilojen ilmanvaihtoa ei saa pysäyttää. Erityisesti poistoluokan 4 kohdepoistoissa sulkupelleillä estetään takaisinvirtaus esimerkiksi veto-kaapista yleisiin tiloihin. (Talotekniikkainfo 2021, 13.)

### 3.3.2 Koteloinnit

Koteloinnit ovat epäpuhtauslähteen ympärille rakennettuja kiinteitä elementtejä, joiden tarkoitus on estää epäpuhtauksien pääsy ympäröivään ilmaan.

Koteloinnilla voidaan erottaa prosessi tai laite muusta työtilasta osittain, tai kokonaan. Koteloinnin sisäpuolelle järjestetään jatkuva imu, joka ehkäisee epäpuhtauksien pääsyä koteloinnin sisältä ympäristöön. Koteloinnilla voidaan tehokkaasti poistaa epäpuhtauksia ja järjestelmä ei ole yhtä altis häiriövirtauksille. (Työterveyslaitos 2022a.) Koteloinnin otsapintanopeuden on oltava kyllin suuri, jottei häiriövirtauksista, kappaleiden siirtelystä, työskentelystä, yleisilmanvaihdosta ja muista häiriövirtauksista kuten ovien aukomisesta aiheutu haittaa. (Kulmala ym. 2004, 6.3.1). Kotelointi voi haitata työskentelyä ja laitteiston huoltoa, jonka takia se on suunniteltava siten, ettei työskentely, huolto, tai puhdistus aiheuta suurta altistumista epäpuhtauksille (Työterveyslaitos 2022a). Koteloinnin poistoilmavirran määrä voidaan laskea kaavalla 9. Otsapintanopeus on tyypillisesti 0,5–1 m/s (Sandberg 2014b, 547; Kulmala ym. 2004, 6.3.1).

$$Q = A * V \quad (9)$$

missä	Q	Poistoilmavirta m <sup>3</sup> /s
	A	Kotelon avoin otsapinta-ala m <sup>2</sup>
	V	Otsapintanopeus m/s

Sisään ja uloskäyntien ilman liikettä voidaan rajoittaa ilmalukolla tai sulkuhuoneella. Myös oviverholla voidaan rajoittaa ilman liikettä tilaan, tai pois tilasta. Sulkuhuone on erillinen rakenne, jonka tavoitteena pysäyttää tiloista tuleva ilmavirtaus, esimerkiksi erillinen eteinen laboratorion ja yleistilojen välissä. Tilan tarkoitus on estää siirtoilman pääseminen vapaasti tilasta toiseen. Jos ilman vaihtuminen yritetään ehkäistä tehokkaasti, tilan molemmat ovet eivät saa aueta samanaikaisesti. Kuvassa 13 on esitelty suluksi tehty erillinen pieni tila, jonka läpi kävellään tilaan, jonka olosuhteita halutaan hallita. Tiloihin voidaan tehdä erilliset reitit henkilöstölle ja materiaaleille ja tarvittaessa erilliset pukeutumis- ja puhtausjärjestelyt (Suomen standardisoimisliitto 2001, 52).



Kuva 13. Puhdastilan ilmasulku (Clean air technology inc. 2022).

Oviverhoilla voidaan rajoittaa ilman liikettä tilasta toiseen. Oviverhoista käytetyistä tyypeistä, alhaalta puhallus ja ylhäältä puhallus ovat parhaiten käyttökelpoisia. Horisontaaliset oviverhot sekoittavat eniten ilmaa tilojen kesken (Sandberg ym. 2014b, 562). Oviverhot kuitenkin ovat huonotehoisia itsessään estämään tilojen ilmaa sekoittumasta keskenään, jonka seurauksena niitä harvoin käytetään ainoana menetelmänä tiloissa, joissa ei haluta ilman vaihtuvan tilasta toiseen.

## 4 Ilmanlaatu

Ilmanlaadusta on määräyksiä useassa eri laissa ja asetuksessa, joissa esitellään erinäisiä toimenpiderajoja ilmanlaadun valvontaan. Ympäristöministeriö määrittelee ilmanlaadulle vaatimuksia asetuksessaan seuraavasti:

Sisäilmassa ei saa esiintyä terveydelle haitallisessa määrin hiukkasmaisia epäpuhtauksia, fysikaalisia, kemiallisia tai mikrobiologisia tekijöitä eikä viihtyisyyttä jatkuvasti heikentäviä hajuja. Sisäilman hiilidioksidin hetkellisen pitoisuuden suunnittelu-arvo huonetilan

suunniteltuna käyttöaikana voi olla enintään 1 450 mg/m<sup>3</sup> (800 ppm) suurempi kuin ulkoilman pitoisuus. (Ympäristöministeriö 2017, 5§.)

Ympäristöministeriön ohjeistuksien lisäksi sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa esitetään huoneilman kosteudesta: ”Huoneilman kosteus ei saa olla pitkäkestoisesti niin suuri, että siitä aiheutuu rakenteissa, laiteissa taikka niiden pinnoilla mikrobikasvuston riskiä.” (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015, §5) Vastaavasti hiilidioksidin toimenpideraja on korkeampi kuin ympäristöministeriön uudemmassa asetuksessa. ”Toimenpideraja ylittyy, jos pitoisuus on 2100 mg/m<sup>3</sup> (1150 ppm) suurempi kuin ulkoilman hiilidioksidipitoisuus” (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015, §8).

Sosiaali- ja terveysministeriö esittää myös useampien muiden aineiden toimenpiderajoja, kuten: ”Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden tolueenivasteella lasketun kokonaispitoisuuden toimenpideraja huoneilmassa on 400 µg/m<sup>3</sup>. Yksittäisen orgaanisen yhdisteen tolueenivasteella lasketun pitoisuuden toimenpideraja huoneilmassa on 50 µg/m<sup>3</sup>.” (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015, 15§.) Lisäksi sosiaali- ja terveysministeriö (2015) on asettanut asetuksessaan toimenpiderajat neljälle eri haihtuvalle yhdisteelle, jotka esitellään taulukossa 12.

Taulukko 12. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden toimenpiderajoja (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015, 15§).

Yhdiste	Toimenpideraja
<b>2,2,4-trimetyyli-1,3-pentaalidioli di-isobutyraatti (TXIB)</b>	10 µg/m <sup>3</sup>
<b>2-etyyli-1-heksanoli (2EH)</b>	10 µg/m <sup>3</sup>
<b>Naftaleeni</b>	Ei saa esiintyä hajua, 10 µg/m <sup>3</sup>
<b>Styreeni</b>	40 µg/m <sup>3</sup>

Sisäilmassa mahdollisesti havaittavista formaldehydille ja hiilimonoksidille on samassa asetuksessa annettu rajat esiintymiselle. ”Sisäilman formaldehydipitoisuuden vuosikeskiarvo ei saa ylittää 50 µg/m<sup>3</sup> ja lyhyen ajan keskiarvopitoisuus 30 minuutin mittauksen aikana ei saa ylittää 100 µg/m<sup>3</sup>” (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015, 16§). ”Hiilimonoksidipitoisuus ei saa ylittää 7 µg/m<sup>3</sup>.” (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015, 17§.) Ja pienhiukkasten, mineraali- ja asbestikuitujen hallinasta sisäilmassa sosiaali- ja terveysministeriö sanoo seuraavasti:

Hengitettävien hiukkasten ( $PM_{10}$ ) pitoisuus sisäilmassa 24 tunnin mittauksen aikana saa olla enintään  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Pienhiukkasten ( $PM_{2,5}$ ) pitoisuus sisäilmassa 24 tunnin mittauksen aikana saa olla enintään  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Teollisten mineraalikulujen toimenpideraja kahden viikon aikana pinnoille laskeutuneessa pölyssä on  $0,2 \text{ kuitua}/\text{cm}^2$ . Asbestikulujen esiintymistä pinnoille laskeutuneessa pölyssä pidetään toimenpiderajan ylittämisenä. Sisäilman asbestikulujen pitoisuus ei saa ylittää  $0,01 \text{ kuitua}/\text{cm}^3$ . (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015, 19§.)

Mikrobit ovat eliöitä, jotka aiheuttavat vaaraa terveydelle ja rakenteille. Rakenteille suurimpana haittana on homeen kasvu ja vahvuuden heikkeneminen. Ihmiselle haittaa ilmenee myös homeen ja muiden mikrobien kasvusta, niiden aiheuttaessa haittaa terveydelle, esimerkiksi allergian ja limakalvojen ärtymyksen vuoksi. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus kattaa mikrobien haittojen toimenpiderajoja seuraavasti:

Mikrobien toimenpiderajan ylittämisenä pidetään korjaamatonta kosteustai lahovauriota, aistinvaraisesti todettua ja tarvittaessa analyysillä varmistettua mikrobikasvua rakennuksen sisäpinnalla, sisäpuolisessa rakenteessa tai lämmöneristeessä silloin, kun lämmöneriste ei ole kosketuksissa ulkoilman tai maaperän kanssa, taikka mikrobikasvua muussa rakenteessa tai tilassa, jos sisätiloissa oleva voi sille altistua. (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015, 20§.)

## **4.1 Olosuhdehallinta**

### **4.1.1 Ilman lämmitys**

Ilman lämmitystä tiloissa voidaan hahmottaa laskennalla, mutta tiloissa usein käytettyjen jäähdytyksen, kostutuksen, kuivauksen, ilmanvaihtojärjestelmän vaikutusta lämmitystarpeeseen joudutaan arvioimaan laitevalmistajien tai erikoissuunnittelijan kanssa. Ilmanvaihdon lämmitysenergian nettotarvetta ilman edellä mainittuja järjestelmiä voidaan kuitenkin laskea kaavalla 10. Ilmanvaihdon nettoenergian tarve lasketaan IV-kone kohtaisesti, koska ilmanvaihtokoneessa tuuloilman lämmittämiseen voidaan käyttää eri lämmitysmuotoa kuin tilojen lämmitykseen. (Ympäristöministeriö 2012, 20.)

Lämmöntalteenoton jälkeinen kuukauden keskimääräinen tuloilmalämpötila lasketaan kaavalla 11. Kaavan 10 laskennassa tilanteissa jossa tulos on negatiivinen, käytetään  $Q_{iv}$  arvona nollaa. Lämmöntalteenoton teho lasketaan kaavalla 12, jota hyödynnetään lämmitystehon määrittämisessä. (Ympäristöministeriö 2012, 21.) Ulkoilman suunnittelulämpötiloja ja lämpövyöhykkeitä on esitelty liitteessä 3. Säävyöhykkeiden perusteella voidaan katsoa alueen ulkolämpötilan mitoituslämpötila laskentaa varten.

$$Q_{iv} = t_d t_v \rho_i c_{pi} q_{v,tulo} \left( (T_{sp} - \Delta t_{puhallin}) - T_{lto} \right) \Delta t / 1000 \quad (10)$$

$$T_{lto} = T_u + \frac{\Phi_{lto}}{t_d t_v \rho_i c_{pi} q_{v,tulo}} \quad (11)$$

$$\Phi_{lto} = \eta_{a,ivkone} t_d t_v \rho_i c_{pi} q_{v,poisto} (T_s - T_u) \quad (12)$$

missä	$Q_{iv}$	ilmanvaihdon lämmitysenergian nettotarve, kWh
	$t_d$	ilmanvaihtolaitoksen keskimääräinen vuorokautinen käyntiaikasuhte, h/ 24 h
	$t_v$	ilmanvaihtolaitoksen viikoittainen käyntiaikasuhte, vrk/7 vrk
	$\rho_i$	ilman tiheys, 1,2 kg/m <sup>3</sup>
	$c_{pi}$	ilman ominaislämpökapasiteetti, 1000 J/ (kg K)
	$q_{v,tulo}$	tuloilmavirta, m <sup>3</sup> /s
	$T_{sp}$	sisään puhallus lämpötila, °C
	$\Delta T_{puhallin}$	lämpötilan nousu puhaltimessa, °C
	$T_{lto}$	lämmöntalteenottolaitteen jälkeinen lämpötila, °C
	$T_u$	ulkoilman lämpötila, °C
	$T_s$	sisälämpötila, °C
	$T_u$	ulkolämpötila, °C
	$\Delta t$	ajanjakson pituus, h
	1000	kerroin, jolla suoritetaan laatumuunnos kilowattitunneiksi.
	$\Phi_{lto}$	lämmöntalteenotolla talteen otettu kuukauden keskimääräinen teho, W
	$\eta_{a,ivkone}$	ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton poistoilman vuosihyötysuhde, -

Jos ilmanvaihdon lämmöntalteenotto ei siirrä poistoilmasta talteen otettua lämpöä tuloilmaan, tai lämmöntalteenottoa ei ole, niin kaavassa 10 käytetään lämmöntalteenottolaitteen jälkeisenä ( $T_{to}$ ) ulkoilmanlämpötilaa ( $T_u$ ). Yleensä kesäkuusta elokuuhun lämmöntalteenottoa ei hyödynnetä, ellei rakennuksen toiminta siitä hyödy. Näinä kuukausina tuloilman lämpötila voi poiketa asetusarvoista. Kanavistossa tapahtuvaa ilman lämpenemistä ei laskennassa oteta huomioon. (Ympäristöministeriö 2012, 22.)

Lämmöntalteenoton siirtäessä lämpöä tuloilmavirtaan puhalluslämpötila on usein säädetty siten, ettei lämpötila ylitä haluttua asetusarvoa. Lämmöntalteenottolaitteen vuosihyötysuhteen määrittämisessä on huomioitava sen ilmavirtausuhde ja lämmöntalteenottolaitteen jäätyksen esto on otettava huomioon. Taulukossa 13 on esitelty lämmöntalteenoton suuntaa antavia arvoja, jos lämmöntalteenottolaitteiston valmistajalta ei ole saatavilla tietoja vuosihyötysuhteesta. (Ympäristöministeriö 2012, 22.) Lämmöntalteenotto laitteisto kannattaa aina mahdollisuuksien mukaan tyypittää, koska valmistajien arvot ovat yleensä parempia kuin asetuksissa annetut suuntaa antavat arvot. Esimerkiksi FläcktGroup (2022b) tarjoaa lämmöntalteenottoratkaisuista omat lämmöntalteenoton energiatehokkuuden arvionsa optimaalisissa olosuhteissa. Tarkat lämmöntalteenoton hyötysuhteet saadaan ilmanvaihtokoneen kaikkien ominaisuuksien ollessa tiedossa.

Taulukko 13. Ilmanvaihdon lämmöntalteenoton lämmönsiirtimen lämpötilasuhteen arvoja (Ympäristöministeriö 2012, 22; Fläcktgroup 2022b).

Lämmönsiirintyyppi	Lämpötilasuhte $\eta_t$	Fläcktgrup lämpötilasuhte $\eta_t$
Nestekiertoinen lämmönsiirrin	0,40	0,8
Ristivirtalevyllämmönsiirrin	0,50	0,73
Vastavirtalevyllämmönsiirrin	0,60	0,85
Regeneratiivinen lämmönsiirrin (pyörivä)	0,65	0,9

Laboratoriotilat ovat monesti rakennusten keskellä sijaitsevia eristettyjä tiloja. Tästä syystä emme käsittele rakennusvaipan johtumislämpöhäviöitä, tai vuotoilman lämpenemisen lämpöenergian tarvetta. Tiiveyttä käsitelty enemmän luvuissa 3.1.3 ja 5.1.

### 4.1.2 Jäähdytys

Jäähdytyksen tarvetta voidaan mallintaa ulkoilman, henkilöstön ja laitteiden lämmöntuoton kautta lämpökuorman hahmottamisella. Esimerkiksi toimistotyö aiheuttaa aineenvaihdunnan kautta 135W lämpötehoa tunnissa, laboratorio-työssä 165W ja normaalissa seisomatyössä 210W lämpötehoa tunnissa. (Sandberg ym. 2014a, 43) Henkilöstöstä tapahtuvan tunnin pituisen tarkastelujakson aikana tulevaa huippulämpökuormaa voidaan laskea kaavalla 13 (Ympäristöministeriö 2012, 29). Kaava on muokattu tarkastelemaan pelkästään lämpökuormahuippua.

$$Q_{henk} = n\phi_{henk}/1000 \quad (13)$$

missä	$Q_{henk}$	henkilöiden luovuttama lämpöenergia, kWh
	$n$	henkilöiden suurin yhtäaikainen lukumäärä tiloissa, -
	$\phi_{henk}$	Yhden henkilön keskimääräinen lämpöteho, W/henkilö
	1000	kerroin, jolla suoritetaan laatumuutos kilowattitunneiksi

Lämpökuorma valaistuksesta ja sähkölaitteista voidaan huomioida kaavalla 14 (Ympäristöministeriö 2012, 30). Lämpökuormat laitteisiin valaistukseen ja prosessilaitteisiin tarvitaan selvittää ennen laskennan aloittamista. Lämpökuorman laskennassa ei huomioida auringon ja ikkunoiden vaikutusta lämpökuormaan, olettaen että laboratoriotilat ovat rakennuksen sisällä olevia erillistiloja, ilman ikkunoita ulkoilmaan.

$$Q_{säh} = W_{valaistus} + W_{kuluttajalaitteet} + W_{prosessilaitteet} \quad (14)$$

Missä	$Q_{säh}$	valaistuksesta ja sähkölaitteista rakennuksen sisälle tuleva lämpökuorma, kWh
	$W_{valaistus}$	valaistusjärjestelmän sähköenergian kulutus, kWh
	$W_{kuluttajalaitteet}$	kuluttajalaitteiden sähköenergian kulutus, kWh

$W_{\text{prosessilaitteet}}$ 

 prosessilaitteiden sähköenergian kulutus,  
 kWh

Lämpimän käyttöveden putkistoa voidaan ottaa laskentaan mukaan kiertojohdon lämpöhäviön ominaistehon määrittämisen kautta. Kiertojohdon tilassa olevan pituuden perusteella voidaan käyttää kertoimia kiertojohdon lämpöhäviöille. Putkista, joista ei ole tietoa voidaan käyttää yleisesti 40 W/m lämpöhäviön ominaistehoa, 0,5 putken paksuisella eristeellä kerroin on 10 W/m ja 1,5 kertaa putken paksuisella eristeellä 6 W/m. (Ympäristöministeriö 2012, 43) Kaavalla 15 voidaan laskea suuntaa antava lämpökuorma tiloihin, jolla saadaan suuntaa jäähdytys tarpeesta. Prosessista tulevaa lämpökuormaa pitää arvioida aina tapauskohtaisesti ja sen aiheuttama lämpökuorma lisätään laskentaan.

$$Q_{\text{lämpökuorma}} = Q_{\text{henk}} + Q_{\text{säh}} + Q_{\text{kierto}} \quad (15)$$

Missä	$Q_{\text{lämpökuorma}}$	kokonaislämpökuorma tilassa kWh
	$Q_{\text{henk}}$	henkilöiden luovuttama lämpöenergia, kWh
	$Q_{\text{säh}}$	valaistuksesta ja sähkölaitteista rakennuksen sisälle tuleva lämpökuorma, kWh
	$Q_{\text{kierto}}$	lämpimän veden kierron lämpökuorma kWh

#### 4.1.3 Kostutus

Kostutuksella tarkoitetaan ilman kosteuden lisäämistä erinäisillä prosesseilla, tavoitellen tiettyä ilman kosteutta. Ilman kosteutta ilmaistaan pääsääntöisesti kahdella eri menetelmällä, suhteellisena kosteutena ja absoluuttisena kosteutena. Suhteellisella kosteudella tarkoitetaan prosentuaalista arvoa siitä, kuinka paljon vesihöyryä mahtuu ilmaan kyseisessä lämpötilassa. Absoluuttinen kosteus ilmoittaa vesihöyryn määrän kuivaa ilmakiloa kohden. Sisäilman matala suhteellinen kosteus vaikuttaa ihmisten limakalvoihin, materiaalien staattiseen sähkөөn ja pölyn irtoavuuteen. Vastaavasti liian korkea ilman suhteellinen kosteus vaikuttaa sienien, pölypunkkien ja materiaalien emissioiden lisääntymiseen. Kosteus voi myös tiivistyä rakenteisiin ja pinnoille, jolloin kosteus aiheuttaa mikrobikasvuston kasvun riskiä. Sisäilma kostutus on tehtävä tarkan

harkinnan jälkeen liiallisen kosteuden aiheuttamien riskien takia, tai kostutuksen määrä on tarkoin hallinnoitava. Vaativista kohteista esimerkkinä voidaan pitää elektroniikkaa sisältävät puhdistilat, joissa lämpötilan ja kosteuden tarkkuusvaatimus voi olla esimerkiksi  $22\text{ °C} \pm 0,3\text{ °C}$  ja  $45\% \text{ RH} \pm 3\% \text{ RH}$ . RH kuvastaa suhteellista kosteutta ilmassa. (Sandberg ym. 2014a, 81–82.)

Ilmankostutuslaitteen hankinnassa on huomioitava, ettei kanaviston ilmanvirtaan saa päätyä vesipisaroita. Ilman kastelämpötilan tulee olla vähintään  $2\text{ °C}$  matalampi kostutusosan jälkeen kanavien sisälämpötilaan nähden kondensoitumisvaaran vuoksi. Laitteiston tulee myös olla vesitiivis kostutinlaitteiston kohdalta, joka on varustettava automaattisella tyhjennysjärjestelmällä. Yli vuorokauden mittaisten käyttökatkojen aikana järjestelmä tyhjentyy laitteiston avulla. (Rakennustietosäätiö 2018, 19.)

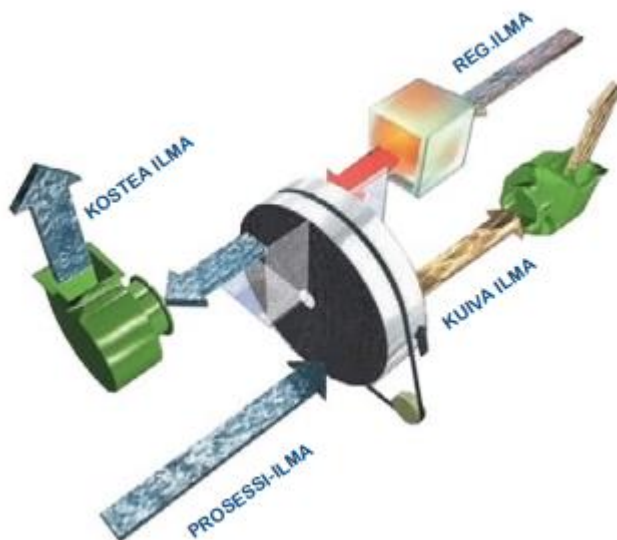
Ilman kostuttamiseen on olemassa monia erilaisia ratkaisuita ja niistä kannattaa keskustella erikoissuunnittelijan kanssa kohteeseen oikean ratkaisun löytämiseksi. Esimerkkejä ilmankostuttimista on höyrykostuttimet, haihdutuskostuttimet, sumutuskostuttimet ja ultraäänikostuttimet (Projektia engineering Oy, 2022).

#### 4.1.4 Kuivaus

Ilman kuivauksella tarkoitetaan ilmasta kosteuden poistamista tavoiteltua ilman kosteutta vastaavaksi. Ilman kuivaus perustuu usein järjestelmiin, joissa ilman kosteus tiivistyy kylmään pintaa mm. jäähdytys-elementeissä, jolloin ilmassa oleva kosteus vähenee sen tiivistyessä kylmälle pinnalle. On olemassa myös erinäisiä muita ratkaisuja kuten absorptiokennoilla varustettuja järjestelmiä, joista esitellään esimerkkinä fisair-RFRA sarjan kuivaimen toiminta.

DFRA-sarjan ilmankuivaimien toiminta perustuu siihen, että ilmavirrat ohjataan samanaikaisesti kulkemaan vastakkaisiin suuntiin läpi pyörivän silicagel-kennoston: kuivattava prosessi-ilma sekä absorptiomenetelmällä kosteaksi muunnettava reg.ilma. Suodatettu prosessi-ilma läpäisee aluksi kennon, joka imee itseensä suurimman osan ilmavirrassa olevasta vesihöyrystä. Kuivattu ilmavirta

puhalletaan sen jälkeen joko huonetilaan tai prosessivalmistuslaitteiston ilmanvaihtojärjestelmään. Absorptiokennon toimimaan paneva vastakkainen reg.ilma imetään kuivaimen tilan ulkopuolelta. Ilma suodatetaan ja lämmitetään joko sähkö-, höyry- tai öljylämmittimellä tai suoratoimisella maakaasupolttimolla. Lämmitessään reg.ilma muuttuu kykeneväksi sieppaamaan kennoon imeytyneitä vesihöyrymolekyylejä mukaansa. Kosteaksi muuttunut ilmavirta puhalletaan laitteesta kuivattavan tilan ulkopuolelle. (Projektia engineering oy 2022.)



Kuva 14. DRFA-ilmankuivaimen toiminnan periaatekuva (Projektia engineering oy 2022).

Ilman kuivausta tarvitaan tiloissa, joissa ilmankosteus on liian suuri prosessin toteuttamiselle ja tilassa voi olla suuria kosteuskuormia, jotka vaikuttavat ympäristöön. Joissain teollisissa prosesseissa joudutaan ilmaa kuivaamaan, jotta lopputuote saataisiin kyllin kuivaksi. Kosteaan ilmaan sitoutuu huomattava määrä lämpöenergiaa, jota voidaan hyödyntää lämmöntalteenoton laitteistolla. (Sandberg ym. 2014a, 82.) Prosessiteollisuudessa joudutaan joskus kuivamaan tuotteita valmistusprosessin jälkeen, jolloin tuotteen laatua voidaan parantaa huomattavasti. Myös elintarviketeollisuudessa voidaan vaatia kosteuden poistamista ilmasta esimerkiksi vihannesten säilönnässä ja kuivien tuotteiden käsittelyssä. (Sandberg ym. 2014a, 83.) Kuivat tuotteet voivat paakkuuntua ja juurekset voivat homehtua kosteissa olosuhteissa.

#### 4.2 Ilmanvaihto, vaaralliset kemikaalit

Vaaralliset kemikaalit vaativat tehostettua ilmanvaihtoa tiloissa.

Rakennuksen sisällä oleviin kemikaalien käsittely- ja varastointitiloihin pitää järjestää ilmanvaihto siten, ettei vaarallisia kemikaalipitoisuuksia ilmaannu. Yleisilmanvaihto voidaan toteuttaa painovoimaisena kohteissa, joissa ei ole vaarallisia hönkiä, muutoin tulee järjestää koneellinen ilmanvaihto. Kohdepoistojen avulla pyritään minimoimaan kemikaalien leviäminen tiloissa. Ilmanvaihdon suunnittelussa on tärkeä huomioida ovatko vaarallisten kemikaalien höyryt ilmaa raskaampia, vai ilmaa kevyempiä. Haitalliseksi tunnettujen pitoisuuksien listaus antaa terveysvaaraa aiheuttavista kemikaaleista toimenpidearvoja, joiden avulla voidaan selvittää ilmanvaihdon tarpeita. Lisää HTP:stä seuraavassa luvussa. Kemikaalien höyryn ja muiden räjähdysvaarallisten aineiden pitoisuus ilmassa ei saa ylittää 25 % alemmasta syttymisrajasta normaalitoiminnan aikana. (Tukes 2021, 8–9.)

Tiloihin, joissa varastoidaan tai käsitellään kemikaaleja, tulee järjestää erillinen ilmanvaihto, joilla pitoisuuksia hallitaan. Ilmanvaihtojärjestelmällä estetään kaasu- ja höyryjen ja pölyjen kulkeutuminen pois tarkoitetusta tilasta. Tilojen tulee olla siten alipaineisia, jotta tämä kyetään varmistamaan. Tuloilma tulee johtaa turvallisesta tilasta käsittely- ja varastotiloihin ja palo-osastojen rajat on huomioitava esimerkiksi palopellein. Poistoilma tulee johtaa suoraan ulos, ilman kulkua muiden tilojen kautta, jottei poistoilmakanava aiheuta vaaraa myös muihin tiloihin. Ilman poiston sijoittelussa huomioidaan vaarallisten aineiden paino ilmaan verrattuna. Kevyitä höyryjä sisältävissä tiloissa poistot sijoitetaan tilojen yläosiin ja painavia höyryjä (hapot, syttyvät nesteet) sisältävissä tiloissa alaosiin. Koneellista ilmanvaihtoa voidaan valvoa esimerkiksi virtausvahdeilla. (Tukes 2021, 8–9.)

Kemikaalien varastoinnista ja käytöstä tehdään erillinen riskiarvio ja voimakkaasti keskenään reagoivia kemikaaleja ei varastoida samoissa tiloissa ja käyttöä harkitaan, jos mahdollista. Syövyttävät ja hapettavat kemikaalit varastoidaan erillään syttyvistä aineista ja välittömästi myrkyllisille kemikaaleille tehdään oma lukittu varasto tai tila. Syttymis- ja räjähdysvaaraa aiheuttavien aineiden varastoinnissa huomioidaan ATEX-vaatimukset ilmanvaihdon suunnittelussa.

Kemikaalien säilytystilat ja -kaapit tulee olla liitettynä ilmanvaihtoon vaarallisten pitoisuuksien syntymisen ehkäisemiseksi. (Tukes 2021, 29–30.) Liite 1 on kemikaalien yhteensopivuustaulukko Tukesin oppaasta 2021, joissa kemikaalien reagointia toisiinsa käydään läpi.

Esimerkkinä vaarallisista kemikaaleista esitellään suolahappoa. Kloorivety reagoi voimakkaasti vahvojen hapettimien kanssa, jolloin vapautuu kloorikaasua. Reagointi metallien ja pelkistävien aineiden kanssa vapauttaa syttyvää vetykaasua. Kloorivety voi reagoida alkoholien, glykolin, amiinien, ketonien ja tyydyttymättömien alifaattisten hiilivetyjen kanssa vapauttaen lämpöä. Reaktiossa aldehydien ja epoksidien kanssa tapahtuu voimakasta polymeroitumista. Kloorivety voi reagoida formaldehydin kanssa muodostaen myrkyllistä bis(kloorimetyyli)etteriä. Suolahappo on vahva happo, joka syövyttää metalleja. Suolahappo reagoi räjähdyksenomaisesti kaliumpermanganaatin ja natriumin kanssa. Sekoittuminen rikkihapon kanssa vapauttaa kloorivetykaasua. (Tukes 2021, 40.)

### 4.3 Haitalliseksi tunnetut pitoisuudet, HTP

HTP eli haitallisiksi tunnetut pitoisuudet ovat epäpuhtauksille tunnettuja pitoisuuksia, jotka aiheuttavat terveyshaittaa, tai muuta vaaraa työntekijöille. Työnantajan pitää huomioida HTP työolosuhteita tutkiessa, vaaroja hallitessaan ja kartoittaessaan. Mittaustuloksista nähdään, jos joidenkin aineiden käsittely, tai tilan ilmanvaihto tarvitsee toimenpiteitä. Aineet ovat useimmiten hengityksen mukana imeytyviä ja HTP arvot on annettu tätä altistumistapaa ajatellen. (Sosiaali- ja terveysministeriö 2020, 10.)

Altistumisen terveydelle haittaa aiheuttavien kemiallisten tekijöiden ehkäisemiseen on olemassa monia keinoja. Ensisijaisesti kemikaalien parissa tulee työkennellä turvallisia työmenetelmiä hyödyntäen, mutta kemikaalien hallintaan tulee käyttää myös rakenteellisia ja teknisiä menetelmiä, joista ilmanvaihto ja kohdepoistot ovat suuressa osassa. Jos altistumista ei voida estää edellä mainituin keinoin, tulee tiloissa käyttää henkilösuojaimia ja muita henkilökohtaisia suojelutoimenpiteitä. (Sosiaali- ja terveysministeriö 2020, 11.)

Haitallisten aineiden raja-arvoja esitetään useimmiten kahdelle eri mittaiselle tarkastelujaksolle. Pitoisuuksien keskiarvoja tarkastellaan 15 minuutin ja 8 tunnin aikajaksoissa. 8 tunnin keskiarvossa pitoisuudet voivat ylittyä hetkellisesti toimenpiderajasta, mutta ei saa ylittyä koko mittauksen keskiarvossa. Sama periaate, mutta tarkastelujakson HTP 15 min-arvon pitoisuuksia ei kohteessa saa esiintyä kuin kerran tunnissa enintään 4 kertaa 8 tunnin työvuoron aikana. Lyhyemmän tarkastelujakson pitoisuuksilla voi olla jo lyhytaikaisen altistumisen seurauksena vaikutuksia terveydelle. (Sosiaali- ja terveysministeriö 2020, 11.)

Mittauksissa otetaan tuloksia keskipitoisuuksista lyhyellä aikavälillä ja lyhyen aikavälin tulokset kerrotaan mittauspituudella ja summataan yhteen, jonka jälkeen summa jaetaan kahdeksan tunnin tarkastelujaksolla. Käytännössä mittaukset suoritetaan useilla lyhytkestoisilla mittauksilla 8 tunnin aikana, joista saatua mittauskeskiarvoa verrataan kahdeksan tunnin tarkastelujakson sallittuihin pitoisuuksiin. Kaava 16 esittelee 8 tunnin keskiarvon laskennan periaatteen. Samaa periaatetta hyödynnetään myös 15 minuutin pitoisuuksien mittauksessa, jolloin tarkastellaan vain 15 minuutin aikana tehtyjä mittauksia. (Sosiaali- ja terveysministeriö 2020, liite 6)

$$C_{8h} = (C_1T_1 + C_2T_2 + \dots + C_nT_n)/8h \quad (16)$$

missä	$C_{8h}$	8 tunnin hiukkaskeskiarvo ppm
	$C_n$	Mittauksen hiukkaskeskiarvo ppm
	$T_n$	Mittauksen ajanjakso h

Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisussa (2020) listataan haitallisiksi tunnetut pitoisuudet kemikaaleista asetuksen liitteessä. Taulukossa 14 on ote julkaisun liitteestä, jossa ilmoitetaan haitallisiksi tunnettuja raja-arvoja. Taulukosta voidaan tarkastella eroavaisuuksia, joista voidaan huomata, ettei kaikilla aineilla ole esimerkiksi 15 minuutin tarkastelujakson toimenpiderajoja.

Taulukko 14. Haitalliseksi tunnetut pitoisuudet Etaani ym. (Sosiaali- ja terveysministeriö 2020, 7)

Aine tai aineryhmä	CAS-numero	HTP-arvot				H-lausekkeet	Huomautus
		8 h		15 min			
		ppm	mg/m <sup>3</sup>	ppm	mg/m <sup>3</sup>		
Etaani	74-84-0	1000				H220	
1,2-Etaanidioli	107-21-1	20	50	40	100	H302	iho
Etaanitioli	75-08-1			0,5	1,3	H225; H332; H400; H410	
Etanoli	64-17-5	1000	1900	1300	2500	H225	
Etikkahappo	64-19-7	5	13	10	25	H226; H314	
Etikkahappoanhydridi	108-24-7			5	21	H226; H302; H314; H332	
2-Etoksietanoli	110-80-5	2	7,5			H226; H302; H331; H360FD	iho
2-Etoksietyyliasetatti	111-15-9	2	11			H226; H302; H312; H332; H360FD	iho
Etyeeni	74-85-1	200				H220; H336	

Sosiaali- ja terveysministeriön 2020 listauksessa on ilmoitettu ohjearvot 156 aineelle ja aineryhmälle. Haitallisten pitoisuuksien luettelo päivitetään jatkuvasti ja on tärkeää tehdä vertailu aina uusimpaan versioon mahdollisten muutosten vuoksi. Sosiaali- ja terveysministeriö on julkaisemassa 2022 lopussa uuden HTP listauksen, ja viimeisimmät uudistukset ovat olleet 2 vuoden sykleissä.

## 5 Erikoistilat

Laboratoriossa on erityisiä tiloja, joille on eriteltyjä tarpeita normaaleihin tiloihin verrattuna. Tiiveyden merkitys kasvaa vaarallisten aineiden ja kemikaalien käsittelyn seurauksena ja tiloissa voidaan vaatia myös puhtaampia olosuhteita. Laboratoriotiloissa käytettävien vaarallisten ja räjähdysvaarallisten kemikaalien käsittelyn vuoksi myös ATEX-tilat voivat aiheuttaa suunnittelulle omia rajoitteitaan ilmanvaihdon eriytyksen ja tiiveyden vuoksi.

Tilojen jako tulee huomioida suunnittelussa aina tapauskohtaisesti ja kohteissa voidaan joutua huomioimaan useita erilaisia poikkeavia tiloja. Tiloissa, joissa käsitellään usean tyyppisiä erikoistiloja, voidaan joutua konsultoimaan useita eri erikoissuunnittelijoita, jotta tiloista saadaan toimivat. Ilmanvaihdon ilmavirtojen laskennassa ei voida myöskään edetä välttämättä yhden kuormituslähteen ilmanvaihdon määrittelyllä.

### 5.1 Tiiveys

Tiiveydellä tarkoitetaan rakennuksen kykyä pitää ilma sisä- tai ulkopuolella. Tiiveys ilmanvaihtovuotolukuna ilmoitetaan rakennusvaipan ilmanvuotolukuna ( $q_{50}$ ). Tyypillisiä toimistorakennusten ilmanvaihdon vuotoilmalukuja on listattu taulukossa 15. Rakennusten rakentamistavan ja toteutustavan perusteella voidaan päätellä vuotoilmalukua. Rakennuksen kuoren ilmanpitävyys, korkeus, sijainti, ilmanvaihtojärjestelmä ja sen käyttötapa vaikuttavat siihen. Rakennuksen keskellä ja maan alla olevia tiloja huomioida, jos niitä ympäröivien tilojen olosuhteet eivät ole huomattavasti erilaiset. (Ympäristöministeriö 2012, 20.) Huolellisesti rakennetut uudemmat rakennukset voivat esimerkiksi olla tiiviimpiä, kuin vanhat rakennukset.

Taulukko 15. Toimistorakennusten tyypillisiä ilmanvuotolukuja ilmanvaihdossa, sekä rakennusvaipassa (Ympäristöministeriö 2012, 20).

Tavoiteilmanpitävyys	Yksityiskohdat	Tyypilliset $q_{50}$ -luvut, $m^3/(h\ m^2)$
<b>Hyvä ilmanpitävyys</b>	Saumojen ja liitosten ilmanpitävyyteen on kiinnitetty erityistä huomiota, sekä suunnittelussa että rakennustyön toteutuksessa ja valvonnassa (erillistarkastus)	1,0–4,0
<b>Keskimääräinen ilmanpitävyys</b>	Ilmanpitävyys on huomioitu tavanomaisesti, sekä suunnittelussa että rakennustyön toteutuksessa ja valvonnassa	4,0–8,0
<b>Heikko ilmanpitävyys</b>	Ilmanpitävyyteen ei ole juurikaan kiinnitetty huomiota suunnittelussa, eikä rakennustyön toteutuksessa ja valvonnassa	8,0–20,0

Vuotoilman määrää voi laskea kaavalla 17. Vuotoilman laskentaa varten tulisi tietää tai arvioida rakennuksen ilmanvuotoluku ja perustiedot. Rakennusvaipan pinta-alan voi määrittää rakennuksen mitoista.

$$q_{v,vuotoilma} = \frac{q_{50}}{3600 \cdot x} A_{vaippa} \quad (17)$$

missä  $q_{v,vuotoilma}$  vuotoilmavirta,  $m^3/s$ .  
 $q_{50}$  rakennusvaipan ilmanvuotoluku,  $m^3/(h\ m^2)$ .  
 $A_{vaippa}$  rakennusvaipan pinta-ala (alapohja mukaan luettuna),  $m^2$ .  
 $x$  kerroin, joka on yksikerroksisille rakennuksille 35, kaksikerroksisille 24, kolmi- ja nelikerroksisille 20 ja

viisikerroksisille ja sitä korkeammille rakennuksille 15 kerroskorkeuden ollessa noin 3 m, -. Vain maanpinnan yläpuoliset kerrokset otetaan huomioon.

3600 kerroin, joka muuttaa ilmavirran m<sup>3</sup>/s yksiköstä m<sup>3</sup>/s yksikköön.

Vuotoilman määrityksen jälkeen voidaan harkinnan mukaan kartoittaa tarvetta vuotoilman lämmittämisen lämpöenergian tarpeelle. Ulkoa tuleva ilma on talvella kylmää, jolloin tilojen lämpöolosuhteissa voi ilmetä pieniä poikkeamia. Vuotoilman lämpöenergian tarpeen voi laskea kaavalla 18. Rakennusten keskellä olevissa tiloissa ja kellaritiloissa vuotoilman lämmitysenergian laskentaa ei välttämättä tarvitse suorittaa. Lämmitysenergian tarpeella voidaan myös laskea jäähdytystarvetta, jos sisään tuleva vuotoilma on lämpimämpää, jolloin tulos on negatiivinen. Negatiivinen tulos vastaa jäähdytystarpeen määrää. Sovellutusta voitaisiin hyödyntää kuuman teollisuushallin keskellä olevaan jäähdytettyyn tilaan.

$$Q_{vuotoilma} = \rho_i * c_{pi} * q_{v,vuotoilma} * (T_s - T_u) * \Delta t / 1000 \quad (18)$$

missä	$Q_{vuotoilma}$	vuotoilman lämpenemisen lämpöenergian tarve, kWh
	$\rho_i$	ilman tiheys, 1,2 kg/m <sup>3</sup>
	$c_{pi}$	ilman ominaislämpökapasiteetti, 1000 J/ (kg K)
	$q_{v, vuotoilma}$	vuotoilmavirta, m <sup>3</sup> /s
	$T_s$	sisäilman lämpötila, °C
	$T_u$	ulkoilman lämpötila, °C
	$\Delta t$	ajanjakson pituus, h
	1000	kerroin, jolla suoritetaan laatumuutos kilowattitunneiksi

Teollisuusympäristössä tiiveyttä ei voida verrata suoraan toimistorakennusten tiiveyteen, vaan työtä joudutaan tekemään materiaali- ja rakennevalmistajien kanssa, jolloin suoraan taulukosta saatavia tuloksia voidaan käyttää vain referenssinä. Ilmanvaihdon tasapainotus voi myös mahdollistaa eri tiiveysluokkia riippuen painesuhteista. Mm. puhdastilojen pehmytseinäisiä modulaarisia tiloja ei voi käsitellä tiiveydeltään kunnolla erillisinä tiloina, kun vastaavasti kiinteät huoneet ovat usein tiiviitä rakenteita.

Puhdastilat ovat yksiä tiiveimmistä tiloista ja tiiveyttä huomioidaan tehostetusti tilan toteutuksessa. Sisäkattoja tiivistetään ja siihen tulevat aukot ja saumat tiivistetään huolellisesti epäpuhtauksien leviämisen ehkäisemiseksi. Lämpö- ja viivien määrää pidetään mahdollisimman pienenä riskikohtien minimoimiseksi. Seinä voidaan tiivistää vielä erikseen. Ikkunoiden asennus tulisi olla kiinteä ja käytettäväksi suositellaan ilmatiiviitä kaksoislajeja. Oven avautumissuuntaa tulisi harkita, sekä puskulevyjen ja automaattisesti avautuvien ovien käyttöä. Ovien aukeaminen perinteisesti ulos tai sisäänpäin, voi olla esimerkiksi huonompi vaihtoehto kuin automaattiset seinän sisään liukuvat ovet. (Suomen standardisoimisliitto 2001, 60)

## 5.2 Puhdastilat

”Puhdastila on huone, jonka ilman hiukkaspitoisuus on luokiteltu, jonka hiukkaspitoisuutta valvotaan ja joka on suunniteltu ja rakennettu siten ja jota käytetään sellaisella tavalla, että hiukkasten pääsy, kerääntyminen ja säilyminen huoneen sisällä on valvottua” (Suomen standardisoimisliitto 2015, 7).

Puhdastilat ovat erityisiä tiloja, joiden ilmanlaatua ja olosuhteita valvotaan ja toteutetaan tehostetusti. Puhdastilat voidaan karkeasti jakaa kahteen pääryhmään. Alipaineiset puhdastilat ja ylipaineiset puhdastilat. Alipaineiset puhdastilat ovat käytössä, jos halutaan pitää puhdastilassa olevat epäpuhtaudet puhdastilan sisällä. Tästä esimerkkinä lääketiede, jonka laboratorioista ei haluta taudinaiheuttajien karkaavan. Alipaineisissa puhdastiloissa voi olla tilan yhteydessä sterilisaatioasema tai ilmasulku, jolla viimeistään yritetään ehkäistä, ettei tiloista karkaa mitään hallitsemattomasti ulkopuolelle. Ylipaineiset puhdastilat ovat käytössä esimerkiksi elektroniikka-, optiikka- ja sotilasteollisuuden kohteissa, joissa ei haluta epäpuhtauksia vuotovirtausten mukana. Ylipaineisen tilan tarkoitus on ohjata puhdasta ilmaa tilaan ja ehkäistä täten epäpuhtauksien pääsy tilaan. Puhdas ilma työntyy tilan mahdollisista aukoista ja raoista ulospäin estäen ilman pääsyn tilaan päin.

Puhdastiloja hyödynnetään myös prosesseissa, joissa tarvitaan tarkkoja parametreja lämpötilan, kosteuden, ilmanpaineen ja muun ilmastollisen

kontrollonin suhteen. Puhdastila voidaan myös helposti sekoittaa tiloihin, joissa vaaditaan normaaliin verrattuna lisähuomiota hygieniaan, jolloin on syytä tarkastella, onko tila luokiteltu puhdastila vai jokin muu tila. (Sandberg ym. 2014b, 576–577.) Puhdastilojen suunnittelussa on syytä huomioida, ettei tarpeella tarkoiteta yleistä tilannetta, vaan puhtausluokiteltua tilaa voidaan vaatia tietyllä hetkellä tehtävään prosessiin tai tapahtumaan, jolloin olosuhteita voidaan joutua jatkuvasti pitämään tietyllä tasolla prosessin mahdollistamiseksi (Sandberg ym. 2014b, 579).

### 5.3 Puhdastilaluokitus

Puhdastilojen luokitukset määrittävät puhdastilassa tarvittavien olosuhteiden puhtauden hiukkaspitoisuuksien määrittelemänä. Puhdastilojen luokitusta voidaan kuvata ja valvoa myös ilmassa olevien kemiallisten, elävien, tai nanohiukkasten pitoisuuksien avulla. Pintojen puhtautta voidaan myös valvoa ja kuvata samojen perusteiden avulla. Tilasta voidaan myös valvoa lämpötilaa, kosteutta, painetta, värinä ja sähköstaattisuutta. (Suomen standardisoimisliitto 2015, 7.)

Puhdastilojen hiukkaspuhtausluokkien määrittäminen voidaan suorittaa yksittäisiä hiukkasia laskevaa laitetta hyödyntäen nimetyissä näytteenotokohdissa. Laskurin on kyettävä laskemaan yksittäisten ilmassa olevien hiukkasten koko ja lukumäärä, erotellen niiden koot laskeakseen kokonaishiukkaspitoisuuden tarkasteltavan luokan hiukkaskokoalueelta. Hiukkaslaskuri tarvitsee kalibrointitodistuksen, jotta sen käyttö voidaan hyväksyä, mittauksista ilman kalibrointitodistusta pitää tehdä merkintä mittausraporttiin. Näytteenotossa on seurattava suomen standardisoimisliiton 2015 antaman ohjeistuksen mukaista käytäntöä. Liitteessä 4 on esitelty mittauskohtien määrä tilan kokoon suhteutettuna. (Suomen standardisoimisliitto 2015, 13.)

Puhdastilaluokitukset ovat numeroitu 1–9. Luokitus 1 asettaa puhtaimmat vaatimukset ja 9 likaisimmat vaatimukset. Puhdastilat voivat olla modulaarisia huoneista ja rakennuksista aina erinäisiin huputettuihin rakenteisiin teollisuushalissa. Taulukossa 16 esitellään suurimmat hiukkaspitoisuudet ISO luokitukselle.

Taulukko 16. Puhdastilojen luokituksen hiukkaspitoisuuksien taulukko. (Suomen standardisoimisliitto 2015, 11)

ISO- luokka	Suurimmat hiukkaspitoisuudet (hiukkasia/m <sup>3</sup> ) hiukkasille, jotka ovat yhtä suuria tai suurempia kuin alla esitetyt koot <sup>a</sup>					
	0,1 µm	0,2 µm	0,3 µm	0,5 µm	1 µm	5 µm
1	10 <sup>b</sup>	d	d	d	d	e
2	100	24 <sup>b</sup>	10 <sup>b</sup>	d	d	e
3	1 000	237	102	35 <sup>b</sup>	d	e
4	10 000	2 370	1 020	352	83 <sup>b</sup>	e
5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	d, e, f
6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
7	c	c	c	352 000	83 200	2 930
8	c	c	c	3 520 000	832 000	29 300
9 <sup>g</sup>	c	c	c	35 200 000	8 320 000	293 000

<sup>a</sup> Kaikki taulukossa mainitut pitoisuudet ovat kumulatiivisia, esimerkiksi ISO-5 luokan sisältämät kaikki kokonaisluokassa 0,3 µm ilmoitetut 10 200 hiukkasta ovat yhtä suuria tai suurempia kuin tämä 0,3 µm.

<sup>b</sup> Nämä pitoisuudet tarkoittavat suurien ilmamäärien ottamista näytteeksi luokitusta varten.

<sup>c</sup> Pitoisuuden raja-arvoja ei sovelleta taulukon tähän osuuteen hyvin suuren hiukkaspitoisuuden vuoksi.

<sup>d</sup> Ilmanpuhtauden luokitus tilassa, jossa hiukkasia on erittäin vähän, ei ole tarkoituksenmukaista näytteenoton ja tilastointiin liittyvien rajoitusten vuoksi.

<sup>e</sup> Tämän hiukkaskoon luokitus ei ole tarkoituksenmukaista hiukkasten vähyyden ja suuren koon vuoksi (yli 1 µm), sillä näytteenotto voi olla epätarkkaa.

<sup>f</sup> Jotta tämä hiukkaskoko voidaan luokitella ISO-luokkaan 5, voidaan käyttää makrohiukkasia koskevaa M-termiä vähintään yhden muun hiukkaskoon yhteydessä.

<sup>g</sup> Tätä luokkaa sovelletaan ainoastaan "toiminnassa"-olotilassa.

Lääketieteessä käytetty GMP (good manufacturing practice) listaa myös omat puhtausluokituksensa, jotka on jaettu A, B, C ja D puhtausluokkiin. A luokka vastaa puhtaampia normaalisti tarvittuja tiloja terveydenhuollossa. Tiloja käytetään herkimpien prosessien suorittamiseen ja steriilien tuotteiden käsittelyyn. A-luokan tilat vastaavat osittain ISO 4 -luokan tiloja, mutta osa hiukkasmääristä nousee vastaamaan lopulta 5 -luokan tiloja. B -luokiteltu sijaitsevat usein A -luokan tilan kanssa vierekkäin. B-luokan tila on aseptinen, eli steriilin työskentelyn tila, jonka prosesseilla tuetaan A -luokan tiloja. B -luokan tilat vastaavat ISO 5 -luokan tiloja, kun ne eivät ole käytössä, mutta käytön aikana tilat vastaavat ISO 7 -luokan tiloja. C -luokka vastaa ISO 7 -luokitusta käytön ulkopuolella ja kyseisissä tiloissa tehdään esimerkiksi puhtaiden tuotteiden valmistelua tarkempaa puhdistusta, josta tuotteet ohjataan steriileihin tiloihin. Käytön aikana tilat vastaavat ISO 8 -luokan tiloja. D -luokka vastaa käytön ulkopuolella ISO 8 -luokitusta, joka on myös vähemmän kriittisille lääketieteellisuudentyövaiheille. Käytön aikana tila ei vastaa puhdastilojen määräyksiä, tai niille ei ole annettu hiukkasrajaa. (Mecart inc. 2022.)

Kuvassa 15 puhdastila pystyy täyttämään 3–8 luokan puhdastilan vaatimukset pehmytseinäisenä ylipaineisena puhdastilana. Pehmytseinäisessä puhdastilassa on katossa HEPA-suodatus kattopaneeleissa, jonka avulla ilmaa suodatetaan puhdastilan vaatimalle tasolle. (Clean air technology inc. 2022)



Kuva 15. pehmytseinämäinen modulaarinen puhdastila. (Clean air technology inc. 2022)

Kuvassa 16 esitellään modulaarista kovaseinäistä puhdastilaa, joilla pystytään tekemään ylipaineisia tai alipaineisia tiloja aina lääketeollisuuden tarpeista kemian teollisuuteen. Kuvassa 16 esitellyssä tilassa ilmanjako poistetaan seinissä olevista ritilöistä ja ilmaa tuodaan tilan yläosissa olevista paneeleissa olevista tuloilmalaitteista. Jos tiloissa ei vaarallisia aineita ja mikrobeita, puhdasta ilmaa voidaan suodattaa takaisin tilaan, jolloin kerran puhdistettu, ulkoilmaa puhtaampi ilma suodatetaan uudelleen takaisin tilojen käyttöön.



Kuva 16. Puhdastila kiinteänä huoneena. (Clean air technology inc. 2022)

Puhdastilat ovat tiloja, joissa pyritään varmistamaan puhtaus, vakaat olosuhteet, tai muut erityisolot. Puhdastilat eivät vaadi aina kiinteitä suuria rakenteita, jos olosuhteet eivät vaadi esimerkiksi alipaineista tilaa. Prosesseja ja päästölähteitä voidaan eristää pienemmilläkin rakennelmilla ja ilmanvaihdon ja olosuhteiden hallinnalla voidaan niistä luoda puhdastiloja.

#### 5.4 Räjähdyksivaaralliset tilat

Räjähdyksivaaralliset tilat ovat tiloja, joiden sisältämät aineet tai käsiteltävät yhdisteet voivat aiheuttaa räjähdysvaaraa. Räjähdyksivaarallisia tiloja voi esiintyä laboratorioympäristössä ja niiden ilmanvaihto on määriteltävä erikseen tilassa riippuvien aineiden ja luokituksen perusteella. Taulukossa 17 on esitelty ATEX -tilojen tilaluokitukset, joiden perusteella voidaan arvioida tilan vaatimuksia. Kemikaalien säilönnässä on huomioitava eri kemikaalien varastoinnissa ja käytössä kemikaalien reagointi toisiinsa asiantuntijan kanssa.

Taulukko 17. ATEX -tilojen tilaluokitukset (Tukes 2022).

Tilaluokka	Määritelmä
0	Tila, jossa ilman ja kaasus, höyryn tai sumun muodossa olevan palavan aineen muodostamaa räjähdyskelpoista ilmaseosta esiintyy jatkuvasti, pitkäaikaisesti, tai usein.

<b>1</b>	Tila, johon normaalitoiminnassa voi satunnaisesti muodostua ilman ja palavien kaasujen, höyryjen tai sumujen sekoituksesta koostuvaa räjähdyskelpoista ilmaseosta.
<b>2</b>	Tila, jossa ilman ja palavien kaasujen, höyryjen tai sumujen sekoituksesta muodostuvan räjähdyskelpoisen ilmaseoksen esiintyminen on normaalitoiminnassa epätodennäköistä ja sitä esiintyy joka tapauksessa vain lyhytaikaisesti.
<b>20</b>	Tila, jossa ilman ja palavan pölyn muodostama räjähdyskelpoinen ilmaseos esiintyy jatkuvasti, pitkäaikaisesti tai usein.
<b>21</b>	Tila, jossa ilman ja palavan pölyn muodostama räjähdyskelpoinen ilmaseos todennäköisesti esiintyy normaalitoiminnassa satunnaisesti.
<b>22</b>	Tila, jossa ilman ja palavan pölyn muodostaman räjähdyskelpoisen ilmaseoksen normaalitoiminnassa on epätodennäköistä ja se kestää esiintyessään vain lyhyen ajan.

Räjähdysvaaralliset tilat on varustettava riittävällä ilmanvaiholla, jottei kemikaaleista voi aiheutua vaaraa terveydelle, eikä palavan kaasun, nesteen, tai sumun, eikä räjähdysvaarallisen pölyn syttymisen vaaraa. Ilmanvaihto suunnitellaan erilliseksi muista tiloista, jotta paloriskiä voitaisiin rajata pienempään tilaan. Ilmanvaihdon toimivuutta ja virtausta pitää valvoa ja se voidaan toteuttaa pitoisuusmittauksin ja virtausvahdeilla. (Valtioneuvoston asetus 2012, §40.)

Kemikaalien höyryjen ja päästöjen painon perusteella voidaan määrittää, poistaanko ilmaa tilan ylä- vai alaosista. Kevyempien päästöjen poistaminen onnistuu tilojen yläosista ja puolestaan painavampien päästöjen poisto tilojen alaosista. Väärin sijoitetulla poistoilmalaitteella voidaan aiheuttaa vaaratilanteita kaasuuntuneiden kemikaalien kerääntyessä tiloihin. Räjähdysvaarallisen höyryn, kaasun tai pölyn pitoisuus ei saa ylittää 25 % alemmasta syttymisrajasta. Ilmanvaihdon tulee olla alipainen kemikaalein käsittely- tai varastotiloja kohtaan, jotta tiloista ei pääse vuotamaan kemikaaleja. Tuloilma johdetaan tiloihin turvalisesta paikasta ja poistoilma puhalletaan suoraan ulos tarvittavan suodatuksen jälkeen. Poistoilmakana ei saa kulkea muiden tilojen läpi tulipalon leviämiskäytävänä. (Valtioneuvoston asetus 2012, §40.)

## 6 Ilmansuodatus

Ilman suodatuksella pyritään nappaamaan ilmasta epäpuhtauksia, jotta haluttuihin tiloihin saataisiin puhtaampaa ilmaa. Yleisesti käytössä on kuitusuodattimia,

joita löytää tyypillisesti jokaisesta ilmanvaihtokoneesta. Vanhan luokituksen EN 779:2012 nimikkeillä puhutuilla kuitusuodattimilla on useita eri toimintaperiaatteita, joista karkeasuodattimet(G) ja keskitason suodattimet(M) hyödyntävät törmäysvaikutukseen perustuvaa suodatusta. Karkea ja keskitason suodattimia käytetään useimmin esisuodattimina, joilla napataan ilmasta suurimmat pienhiukkaset. Hienosuodattimet(F) hyödyntävät kosketusvaikutukseen ja diffuusiovaikutukseen, tai sähköiseen suodatusvaikutukseen perustuvaa suodatusta. Kuitujen koon pienentyessä suodattimessa, saadaan yhä pienemmät hiukkaset kiinni ilmasta. Myös ilmavirran nopeudella on merkitystä suodattimen tehokkuuteen ja pienempi ilmavirran nopeus mahdollistaa pienempien hiukkasten suodattamisen tehokkaasti. (Rakennustietosäätiö 2012, 5.)

Uuden luokituksen ISO 16890-1:2016 myötä nimitykset ja testausmenettely muuttuivat entisestä G1-F9 lajittelusta, vaikka luokituksia tavataan vieläkin valmistajien ilmoittamana suodattimista. Suodattimien luokitus muuttui ePM erotusasteiden määrittelemäksi, jonka kautta ilmaistaan tietyn partikkelikoon suodatustehokkuus. Luokittelun perustana on neljä ryhmää, joiden vähimmäiserotteluasteikot on esitelty taulukossa 18. Suodattimien luokitukset esitetään yksittäisenä hiukkaskoon erotusasteena. Esimerkiksi ISO ePM10 70 % tarkoittaa 70 % erotusastetta hiukkasille, joiden aerodynaaminen halkaisija on 10 µm. Muita suodatustehokkuuksia ei ilmaista suodattimen nimikkeessä. Luokituksen mukaisten suodatusarvojen ilmoittaminen suoritetaan aina pyöristämällä alaspäin lähimpään 5 % ja yli 95 % suodattimet ilmoitetaan > 95 % suodatustehokkuutena. Täydellisessä yhteenvetoselostuksessa on kuitenkin 5 luokitusta, erotusasteet ePM<sub>1</sub>, ePM<sub>2,5</sub>, ePM<sub>10</sub>, sekä vähimmäiserotusaste ePM<sub>1, min</sub>, ePM<sub>2,5, min</sub>. Punnituseron alkuarvon ilmoittaminen karkeasuodattimia pois lukien on vapaaehtoista. (Suomen standardisoimisliitto 2016.)

Taulukko 18. ISO 16890 suodatinryhmien luokittelun vähimmäiserotteluasteikot (Suomen standardisoimisliitto 2016).

Ryhmätunnus	Vaatimus			Luokan ilmoitettava arvo
	ePM <sub>1, min</sub>	ePM <sub>1, min</sub>	ePM <sub>1, min</sub>	
<b>ISO Karkea</b>	-	-	< 50 %	Punnituseroasteen alkuarvo
<b>ISO ePM10</b>	-	-	≥ 50 %	ePM10
<b>ISO ePM2,5</b>	-	≥ 50 %	-	ePM2,5

ISO ePM1	≥ 50 %	-	-	ePM1
----------	--------	---	---	------

Suodatinten valinnasta erikoiskohteisiin ja puhdastiloihin tulee erikoissuunnittelijan kanssa valita oikeat vaihtoehdot suodattimien tarpeen ja mahdollisen porastuksen kanssa. Taulukossa 19 esitellään kuitusuodattimien tyypilliset suodatusmekanismit ja taulukossa 20 esitellään erotusmekanismien suoriutumista eri suureiden muuttuessa.

Taulukko 19. Kuitusuodattimien toimintaperiaatteet (Rakennustietosäätiö 2012, 4).

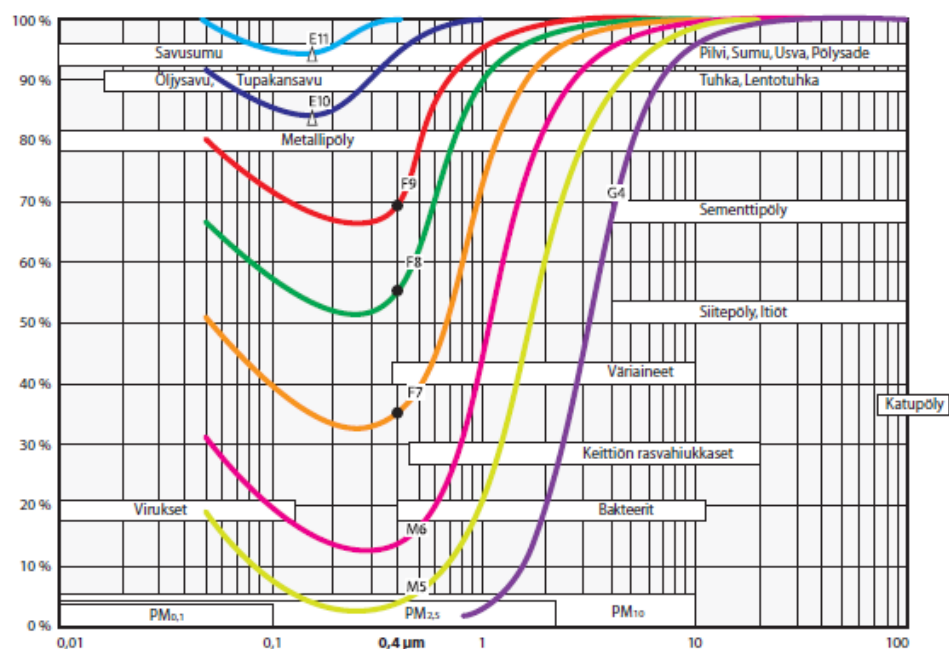
Suodatusmekanismi	Selite
<b>Seulavaikutus</b>	erottelee yli kuitujen välin kokoluokan hiukkasia, kuitujen tarttuessa suodattimeen, koska epäpuhtaudet eivät mahdu kulkeutumaan kuitujen välistä. Suodattaa suurempia hiukkasia ja epäpuhtauksia.
<b>Törmäysvaikutus</b>	erottelee hiukkaset, joilla on suuri massa ja hitausvoimat, jotka eivät seuraa virtaviivoja kuidun ympäri. Hiukkaset jatkavat omaa reittiään törmästen kuituun ja kiinnittyen siihen. Törmäysvaikutus on suurempi, kun virtausnopeus ja hiukkaskoko kasvavat ja kuidun läpimitta pienenee
<b>Kosketusvaikutus</b>	Pienien ja kevyiden hiukkasten suodatukseen, jotka kulkevat ilmavirran mukana kuidun ympäri. Hiukkasen keskipiste seuraa virtaviivaa ja osuu reunastaan kuituun ja kiinnittyy siihen. Kosketusvaikutus on riippumaton virtausnopeudesta, ellei virtausnopeus ole niin suuri, että virtauskuva muuttuu, tai hiukkasia irti repivä voima on suurempi kuin sitä kiinni pitävä voima. Kosketusvaikutus kasvaa hiukkaskoon kasvaessa ja kuidun läpimitan pienentyessä ja pakkaustiheyden kasvaessa.
<b>Diffuusiovaikutus</b>	Pienet alle 1 µm hiukkasiin vaikuttaa myös brownin liike, jonka seurauksena hiukkaset eivät seuraa suoraan ilmavirran reittiä, vaan kulkevat väreilevää reittiä. Epäpuhtaudet tarttuvat todennäköisemmin ilmavirran nopeuden pienentyessä ja hiukkaskoon kasvaessa, myös kuitujen läpimitan pienentyessä ja pakkaustiheyden kasvaessa.
<b>Sähköiset erotusmekanismit</b>	Mekaanisen vaikutusmekanismin lisäksi hiukkasten erottumiseen voivat vaikuttaa sähköiset voimat. Sähköinen vuorovaikutus on merkittävä, kun hiukkaset ja kuidut ovat varaukseltaan vastakkaiset. Sähköinen vetovoima auttaa hiukkasia kiinnittymään kuituihin, mutta neutraalisti varautuneisiin hiukkasiin sillä ei ole merkittävää vaikutusta. Kuidut ovat usein polarisoituneita ja esiintyvät vyöhykkeittäin, joka tehostaa normaalia suodatustulosta.

Taulukko 20. Erotusmekanismien sekä virtausnopeuden, hiukkaskoon, kuidun läpimitan ja pakkaustiheyden välinen vaikutus (Rakennustietosäätiö 2012, 4).

<b>Erotusmekanismi</b>	<b>Perussuure</b>
------------------------	-------------------

	Virtausnopeus	Hiukkaskoko	Kuidun läpimitta	Pakkaustiheys
<b>Törmäys</b>	+	+	-	+
<b>Kosketus</b>	0	+	-	+
<b>Diffuusio</b>	-	-	-	+
<b>+ Erotusvaikutus kasvaa, kun perussuure kasvaa.</b> <b>- Erotusvaikutus kasvaa, kun perussuure pienenee.</b> <b>0 Erotusvaikutus on riippumaton perussuureesta.</b>				

Kuviossa 7 esitellään vanhan standardin suodattimien vähimmäiserotusasteita, joista voidaan nähdä vähimmäiserotteluasteita. Vanhan standardin luokituksia voi vielä löytää valmistajan sivuilta suodattimien tiedoista. Kuvassa esitellään myös E10 ja E11 suodatusluokkia, jotka ovat EPA, HEPA, tai ULPA suodattimia, joita käsitellään myöhemmin luvussa 6.2. Kuviossa 7 voi myös nähdä erinäisten pienhiukkasten tyypillisiä hiukkaskokoja.



Kuvio 7. Ilman epäpuhtauksien ja ilmansuodatintyyppien vähimmäiserotusasteet eri suodatusluokissa. Pisteet ja kolmiot esittävät standardien EN 779:2012 ja EN 1822:2009 määrittelemiä vähimmäistasoja (Rakennustietosäätiö 2012, 5).

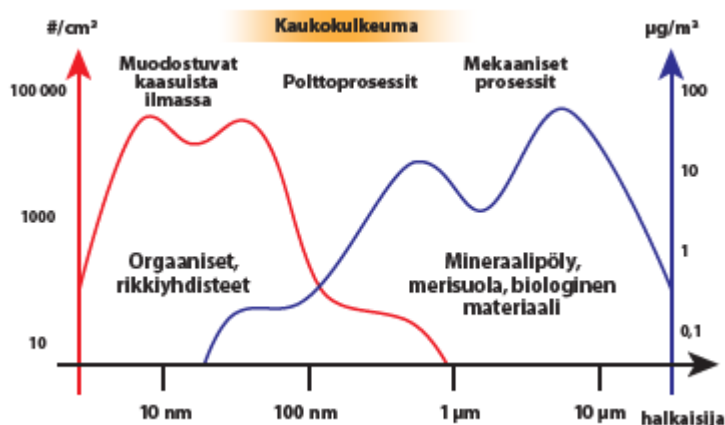
Suodattimien luokituksissa on määritelty keskimääräiset erotteluasteet ja taulukossa 21 esitellään kuitusuodattimien luokituksia. Kuitusuodattimia käytetään useimmiten esisuodattimina ja niillä voidaan napata ilmasta suurimmat hiukkaset. Suodattimia käytetään usein myös kerroksittain, jolloin esimerkiksi G4 karkeasuodatin tulisi ennen F7 hienosuodatinta, jolloin ilmasta saadaan

suodatettua ensin isommat hiukkaset, jolloin hienosuodatin ei tukkeutuisi niin nopeasti isompien hiukkasten aiheuttamien epäpuhtauksien takia.

Taulukko 21. Karkea-, keskitason- ja hienosuodattimien luokitus EN 779:2012 (vanha standardi) (Rakennustietosäätiö 2012, 6).

Suodatinryhmä	Suodatinluokka	Testin loppupainehäviö Pa	Keskimääräinen punnituserotusaste $A_m$ testipölylle %	Keskimääräinen erotusaste $E_m$ 0,4 $\mu\text{m}$ hiukkasille %	Vähimmäiserotusaste 0,4 $\mu\text{m}$ hiukkasille %
Karkea	G1	250	$50 \leq A_m < 65$	-	-
	G2	250	$65 \leq A_m < 80$	-	-
	G3	250	$80 \leq A_m < 90$	-	-
	G4	250	$90 \leq A_m$	-	-
Keskitaso	M5	450	-	$40 \leq E_m < 60$	-
	M6	450	-	$60 \leq E_m < 80$	-
Hieno	F7	450	-	$80 \leq E_m < 90$	35
	F8	450	-	$90 \leq E_m < 95$	55
	F9	450	-	$95 \leq E_m$	70

Ulkoilmasta saadaan useimmat epäpuhtaudet suodatettua karkean ja hienon suodattimen yhdistelmällä. Kuviossa 8 on esitelty ulkoilmassa löytyviä hiukkasia ja niiden esiintyvyys ja kokojakauma mittauksena pääkaupunkiseudulla. Useimmat pölyt ja biologiset materiaalit saadaan suodatinyhdistelmällä poistettua, mutta kaasujen poistoon tarvittaisiin jo erillistä suodatusta.



Kuvio 8. Ulkoilmassa olevien hiukkasten lukumäärä ja kokojakauma (Rakennustietosäätiö 2012, 3).

Erilliset hienommat suodattimet sijoitetaan usein karkeiden-, keskitason-, ja hienojen suodattimien jälkeen. Esimerkiksi puhdastiloissa HEPA-suodattimet sijoitetaan normaalin suodatuksen jälkeen, jolloin hienommat suodattimet eivät tukkeudu heti isommista hiukkasista. Pakkauskoon tiivistyessä myös ilmavirran on vaikeampi mennä suodatinmateriaalin läpi ja epäpuhtaudet hidastavat ilmavirtaa entisestään aiheuttaen suurta painetta suodattimen likaiselle puolelle.

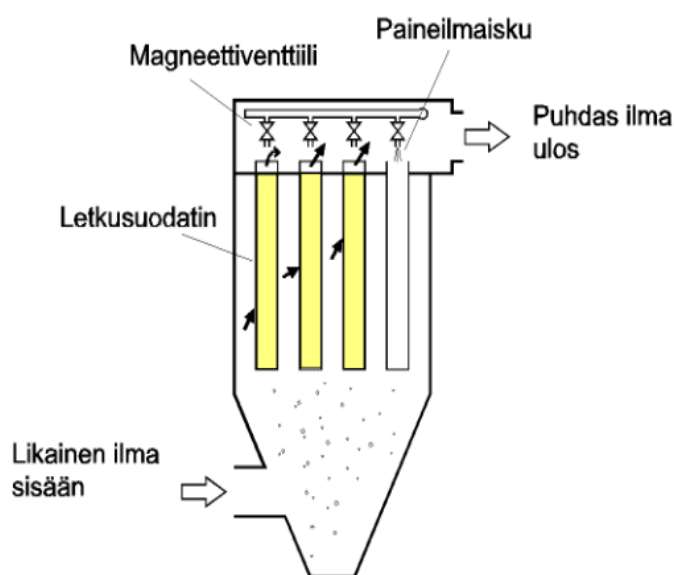
## 6.1 Pölynsuodatus

Pölynsuodatuksella pyritään ehkäisemään epäpuhtauksien ja erityisesti pölyn kulkeutumista ympäristöön sen voidessa aiheuttaa siellä haittaa. Kohdepoistojen poistoilmaa ei voi yleensä levittää ympäristöön suodattamatta. Epäpuhtauksien erottamiseen poistoilmasta voidaan käyttää esimerkiksi kohdepoistoilla pölynerotusjärjestelmiä poistamaan ilmasta epäpuhtauksia. Esimerkiksi mekaanisia erottimia kuten laskeutumiskammioita ja sykloneja, pintasuodattimia, sähkösuodattimia ja märkäpesureita voi käyttää epäpuhtauksien poistoon poistoilmasta. ”Sopivan suodatusmenetelmän valinta vaatii tietoa suodatettavasta pölystä (hiukkaskoko, olomuoto, pitoisuus) sekä pölyisen ilman ominaisuuksista (lämpötila, kosteus, koostumus).” (Kulmala ym. 2004, 6.)

Pölynerottimista yleisimpiä ovat syklonit yksinkertaisen toimintansa ja kustannustehokkuutensa ansiosta. Pölyinen ilmavirta ajetaan pyörivään liikkeeseen syklonin sisällä ja raskaammat hiukkaset painuvat seinämiä vasten, josta ne valuvat alas syklonin pohjalle. Käsitelty ilma imetään syklonin keskeltä pois, jolloin saadaan ilmasta suurimpia epäpuhtauksia poistettua. Niitä käytetään yleensä esierottimena kohteissa, joissa hiukkaskoko on suurta 1–10 mm. Sykloneita voidaan asentaa myös rinnakkain, jolloin suurempia ilmamääriä voidaan käsitellä samanaikaisesti. (Kulmala ym. 2004, 6.6.1.)

Kuitusuodattimia voidaan käyttää myös pölynerotuksessa, mutta usein niiden rakenne on erilainen. Ilma ajetaan kuitusuodattimen läpi, mutta usein pölymäärien ollessa suuria tarvitaan järjestelmään puhdistusominaisuuksia käytön jatkuvuuden kannalta. Vanhin käytetyistä menetelmistä on ravistuspuhdistus, jolloin käytetään suodatinletkuja, jotka ovat ylhäältä umpinaisia ja alhaalta avoimia.

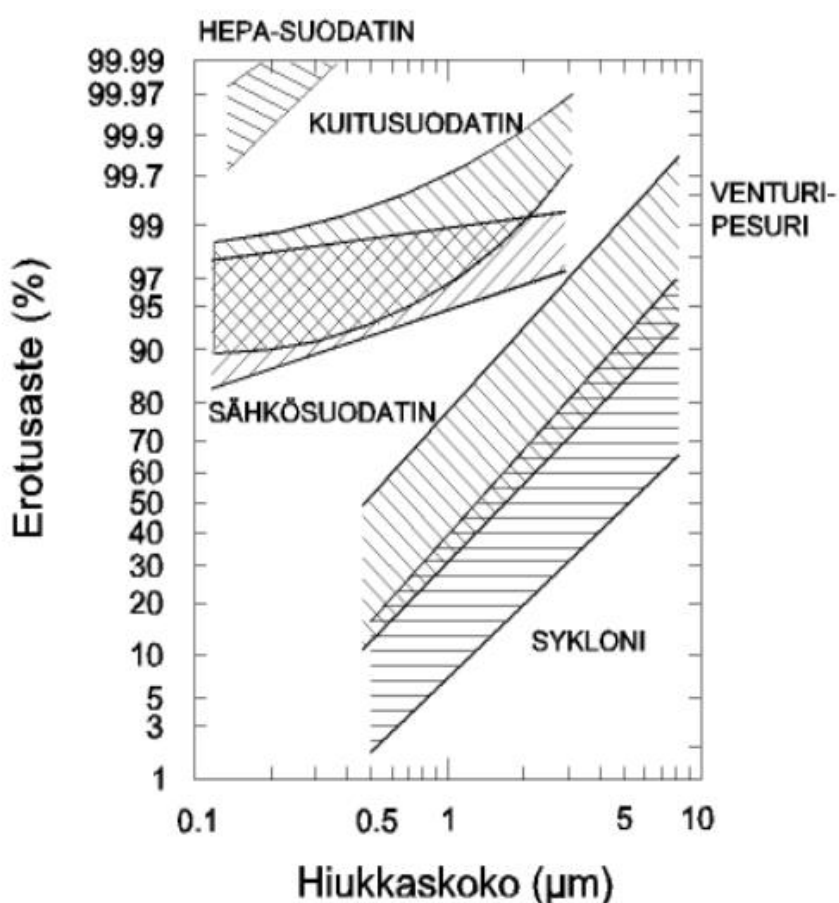
Pölyinen ilma johdetaan sisälle putken alapäästä ja suodatus tapahtuu ilman liikkuaessa ylöspäin, läpi suodatinelementistä. Isommissa yksiköissä ravistaminen tapahtuu koneellisesti, pienemmissä ravistus voidaan suorittaa käsin. Puhdistukseen voidaan käyttää myös paineilmaa, jolloin paineilmaisku kartion yläpäästä työntää hiukkaset astian alaosaan, puhdistuen kuitusuodattimen, kuten havainnoidaan kuvassa 17. Samalla kuvassa 17 nähdään kuitusuodattimien tyypillinen putkimainen rakenne pölynpoistosovellutuksessa. (Kulmala ym. 2004, 6.6.2.)



Kuva 17 Paineilmalla puhdistuvan suodatinyksikön toimintaperiaate (Kulmala ym. 2004, 6.6.2).

Sähkösuodattimilla kerätään sähköisesti varautuneita epäpuhtauksia sähkökentän avulla ja sähkösuodattimella voidaan soveltuvan epäpuhtauden kanssa saavuttaa hyviä suodatustuloksia (jopa 99 %). Hiukkaset varataan koronapurkauksella, joka synnytetään korkeajännitteisen elektrodilangan ja maadoitetun levyn, tai putken välille. Väliin jäänyt ilmassa ionisoituu ja sen kuljettamat hiukkaset varautuvat kaasuionien törmätessä niiden pintaan. Varautuneet hiukkaset kerätään joko koronapurkauksessa (1-vaiheinen sähkösuodatin), tai erillisessä sähkösuodattimessa (2-vaiheinen sähkösuodatin). Koronapurkaus voidaan järjestää positiivisella tai negatiivisella varauksella, josta negatiivinen purkaus mahdollistaa korkeammat jännitteet ja virrat, sen ollen yleisempi teollisuussovelluksissa. Pölyt pitäisivät olla ominaisvastukseltaan  $10^8$ – $10^{10}$  W\*cm optimaaliseen tuloksen saavuttamiseksi. (Kulmala ym. 2004, 6.6.3.)

Venturipesurien toiminta perustuu nesteen, tyypillisesti veden, avulla hiukkasten erottamiseen ilmvirrasta. Erotin ajaa ilmvirran kosketuksiin nesteen kanssa, sen napatessa epäpuhtauksia. Puhdistusteho riippuu nestepisaroiden ja hiukkasten välisestä nopeuserosta. Venturipesurissa matalapaineinen vesi johdetaan venturin kurkkuun, jolla ilman nopeus on jopa 50–150 m/s. Nopea virtaus saa nesteen pisaroitumaan, jolloin saadaan tehokas törmäysvaikutus nesteen ja ilman välillä. Venturipesurissa käytetään usein sykklonia pisaranerottimeksi, jossa tapahtuu nesteen erotus ilmvirrasta. Laitteella voidaan myös neutralisoida korrosioivia kaasuja ja sumuja, ja venturipesurilla voidaan käsitellä syttyviä ja räjähdysherkkiä pölyjä. Kuumien kaasujen käsittelyä voidaan helpottaa venturipesurilla, sen jäähdyttäessä läpivirtausta. Ongelmana voi esiintyä jäteveden käsittely, koska kerättyjä hiukkasia voi olla vaikeaa kierrättää kontaminaation vuoksi. (Kulmala ym. 2004, 6.6.4.) Kuviossa 9 on esitelty tyypillisiä erotustehokkuuksia pölynerottimille.



Kuvio 9. pölynerottimien tyypillisiä erotustehokkuuksia (Kulmala ym. 2004, 6.6.3).

Liitteessä 1 esitelty erilaisia pölynhallinnan suodatinmenetelmien hyötyjä ja haittoja. Pölynhallinnan eri menetelmillä on kustannuksien ja käyttötarkoitusten lisäksi suuria eroja paine-eroissa, joita järjestelmät aiheuttavat. Paine-ero on huomioitava suunnittelussa järjestelmän toimintaan saattamiseksi. Väärän tehoisen puhaltimen kanssa suodatus ei toimi halutulla tavalla.

## 6.2 HEPA-suodattimet

HEPA-suodattimen esisijainen tehtävä on siepata ilmavirrassa olevat hiukkaset ja varmistaa että ympäristöön tuleva ilma on optimaalinen. HEPA suodattimia käytetään usein tuloilman toisessa suodatusportaassa, joko loppusuodattimena yleisilmanvaihdossa tai toisena suodattimena puhdastiloissa. (Camfil 2022b.) Ennen HEPA-suodattimia on useimmiten karkeita, keskitasoisia ja hienoja kuitusuodattimia, joissain kohteissa myös pölynhallinnan luvussa esiteltyjä suodattimia, niitä kuitenkin esiintyy useammin poistoilman hallinnassa. HEPA, ULPA ja EPA suodattimet ovat usein kuitusuodattimia ja suodatus perustuu yleensä kosketus- ja diffuusiovaikutukseen (Rakennustietosäätiö 2012, 5).

Taulukossa 22 Esitellään EPA-, HEPA- ja ULPA-suodattimien suodatustehokkuuden luokituksia, joista E10 tasoiset suodattimet ovat heikkotehoisimpia ja U17 luokan suodattimet tekevät tarkimman suodatuksen. E10-U17 luokkien suodattimia käytetään yhtä useasti teollisuusympäristön ulkopuolella, käytön keskittyessä puhdastiloihin ja tärkeiden prosessien tuloilmaan. Taulukossa 23 esitellään uudempaa, vuonna 2017 esiteltyä ISO 29463 suodattimien luokitusta. Luokitusta voidaan verrata erotusasteen puolesta uudempiin suodatinluokituksen suodattimiin. Kokonaisarvo erotusaste vastaa tuoreempaa globaalia erotusastetta. Uudemmassa luokituksessa puhuttu MPPS tarkoittaa (most penetrating particle size) hiukkasia, joiden koko on tyypillisesti 0,1–0,2 µm. Vanhemman EN 1822:2009 luokituksen H13-U17 suodattimet on myös testattu MPPS avulla. (Camfil 2022.) Suodattimista ilmoitetaan vielä pääasiassa vanhan standardin mukaisesti valmistajien sivustoilla.

Taulukko 22. EPA-, HEPA- ja ULPA suodattimien luokitus, EN 1822:2009. Erotusasteella tarkoitetaan läpäisevimmän hiukkaskoon suodatustehokkuutta. (Rakennustieto 2012, 6). Vanhan ryhmituksen mukaisesti.

Suodatinryhmä suodatinluokka	Kokonaisarvo erotusaste %	Läpäisyaste %	Paikallinen arvo erotusaste %	Läpäisyaste %
E10	≥ 85	≤ 15	-	-
E11	≥ 95	≤ 5	-	-
E12	≥ 99,5	≤ 0,5	-	-
H13	≥ 99,95	≤ 0,05	≥ 99,75	≤ 0,25
H14	≥ 99,995	≤ 0,005	≥ 99,975	≤ 0,025
U15	≥ 99,999 5	≤ 0,000 5	≥ 99,997 5	≤ 0,002 5
U16	≥ 99,999 95	≤ 0,000 05	≥ 99,999 75	≤ 0,000 25
U17	≥ 99,999 995	≤ 0,000 005	≥ 99,999 9	≤ 0,000 1

1 Vuototestillä selvitetään H- ja U-suodatinluokkien suodattimien paikalliset läpäisyasteet sekä vuotojen puuttuminen.  
2 Taulukkoarvoja pienemmistä paikallisista läpäisyasteista voidaan sopia toimittajan ja ostajan kesken.  
3 Ryhmän E suodattimia (luokat E10, E11, E12) ei voi, eikä tule vuoto testata luokitusta varten.

Taulukko 23. HEPA suodattimien ISO 29463 -luokitus (Camfil 2022b).

ISO 29463 -luokitus		Globaali arvo	Paikallinen
Suodatinluokka (ryhmä)	Hiukkaskoko testauksessa	Erotusaste %	Jaollinen globaalista erotusaste %:sta
ISO 15 E		≥ 95	-
ISO 20 E		≥ 99	-
ISO 25 E		≥ 99,5	-
ISO 30 E		≥ 99,9	-
ISO 35 H	MPPS	≥ 99,95	5
ISO 40 H	MPPS	≥ 99,99	5
ISO 45 H	MPPS	≥ 99,995	5
ISO 50 U	MPPS	≥ 99,999	5
ISO 55 U	MPPS	≥ 99,999 5	5
ISO 60 U	MPPS	≥ 99,999 9	5
ISO 65 U	MPPS	≥ 99,999 95	5
ISO 70 U	MPPS	≥ 99,999 99	10
ISO 75 U	MPPS	≥ 99,999 995	20

HEPA-suodattimia käytetään esimerkiksi laminaarikaapeissa ja kattopaneelissa puhdistiloissa, joissa virtausnopeuksien tulee olla pieniä ja tuloilman syöttöalueet ovat suuria. HEPA-suodattimia on kuitenkin olemassa myös suurempia, jotka soveltuvat suurempiin ilmanvaihtokoneisiin niiden suodattaessa tuloilmaa, tai poistaen haitallisia hiukkasia poistoilmasta. Useimmiten suuremmat ilmanvaihtokoneisiin asennettavat HEPA-suodattimet eivät ole suodatusteoltaan yhtä tehokkaita hitaampien virtausnopeuksien pieniin usein tilan seiniin tai kattoon asennettaviin suodattimiin nähden.

### 6.3 Molekyylisuodattimet

Molekyylisuodattimet ovat kemialliseen toimintaan perustuvia suodattimia, joiden tarkoitus on poistaa ja neutralisoida epäpuhtauksia ilmasta. Usein molekyylisuodattimista puhutaan myös kemiallisina- tai kaasusuodattimina. ”Molekyylit ovat tyypillisesti 1000–10000 kertaa pienempiä kuin pienhiukkaset, joita suodattetaan HEPA ja ULPA suodattimilla” (Camfil 2022a). Molekyylisuodattimien toiminta alla näkyvien rakeiden tapauksessa on absorptio. Absorptiossa molekyylit tarttuvat suodatinmateriaalin pintaan. Molekyylisuodattimissa voi olla mm. aktiivihiihtä tai impregnoitua alumiinioksidia. Esimerkiksi sairaaloiden laboratorioympäristössä voidaan HEPA- ja molekyylisuodattimien yhdistelmällä poistaa formaldehydin ja voc yhdisteiden haittoja. (Camfil 2022a.) Kuvassa 18 näytetään esimerkkinä millaisia molekyylisuodattimien käyttämät suodatinmassat voivat olla.



Kuva 18 Molekyylisuodattimien rakeisia massoja. Vasemmalla aktivoitu alumiinioksidia, keskellä hybridi- ja sekamassa, oikealla aktiivihiihtä. (Camfil 2022a.)

Kemiallisessa suodatuksessa voidaan hyödyntää suodattimen kuitusuodattimeen lisättyä aktiivihiiltä tai rakeina kaasumaisten molekyylien epäpuhtauksien suodattamiseen. Erillinen rakeinen massa voidaan asentaa kehykseen ja ilma ohjataan kehyksen läpi, massan napatessa kemiallisia epäpuhtauksia ilmasta. Näin voidaan neutralisoida erinäisiä vaarallisia aineita ja poistaa niitä poistoilmasta.

## **7 Kartoitusta avustavat selvitystiedot**

### **7.1 Ilmanvaihdon tarve**

Ilmanvaihdon tarpeeseen vaikuttavia tekijöitä ovat alueen tilavuus, henkilöstömäärä, käyttöajat, kosteuskuorma, käytettävät kemikaalit, erikoistilat ja kuormittavat laitteet/prosessit. Yleistilanteen arvioinnin jälkeen päätellään millä tapaa ilmamääriä lähdetään arviomaan, koska riippuen käytetystä laskennasta ilmamäärät voivat vaihdella suuresti.

Kohteesta voi olla tarpeellista tehdä mitoitus useammalla tavalla oikean ilmamäärän löytämiseksi. Useimmiten kuormituksen ja kohdepoistojen laskennalla voidaan lähteä aloittamaan mitoitusta. Puhdastiloissa ja haastavissa kohteissa on aihetta tarkastella ilmamääriä erikoissuunnittelijan kanssa.

### **7.2 Kuormittavat laitteistot**

Lähtökartoituksessa selvitetään yhdessä kohteen edustajan ja tarvittavien laitevalmistajien kanssa kuormittavat laitteistot ja niiden aiheuttamat lämpö-, kosteus- ja epäpuhtauskuormat tiloihin tarvittavalta laajuudelta. Kohteesta on tiedettävä olosuhteet, joihin halutaan päästä ja arvioidaan mitkä kuormat ovat hallittavissa ilmanvaihdolla.

Ilmanvaihdon kuormien perusteella voidaan arvioida menetelmää, jonka avulla mitoitusta lähdetään tekemään. Epäpuhtauslähteiden hallintaa voidaan aloittaa kohdepoistojen määrittämisellä ja niiden mitoituksella, mikäli lähteet ovat pisteittäisiä. Ilmanlaatua saadaan tällöin jo parannettua huomattavasti.

### 7.3 Alue ja erityistarpeet

Tiloista kartoitetaan epäpuhtauslähteet ja mahdolliset kohdepoistot, olosuhdekaapit, vetokaapit ja muut erillistä poistoa hyödyntävät kohteet. Kohteisiin on määritettävä tarpeen mukaiset ilmamäärät ja epäpuhtauksien käsittelyyn hyödynnetään ilmanvaihtoa, jottei haitallisia epäpuhtauksia mahdollisuuksien mukaan kantaudu kohteessa työskentelevien henkilöiden oleskeluvyöhykkeelle. Päästölähteet rajataan pääsääntöisesti vetokaapein ja kohdepoistoin.

Alueen poistumisreiteillä huomioitava tuulikaappien tarve, jottei alueelta poistu epäpuhdasta ilmaa muihin tiloihin. Kartoitettava tarve suodatukselle, tarvitaanko kaikki kohteesta poistuva ilma suodattaa, vai suodatetaanko epäpuhtauksien kohdepoistoista tullut likainen ilma, vai onko ilmaa tarvetta suodattaa. Onko tiloissa tarvetta erityisesti kosteudeneristykselle, aurinkosuojaukselle, tiiveydelle. Onko tarvetta eristää laboratorio muusta sisäympäristöstä, vai riittävätkö kohdepoistot.

### 7.4 Käsiteltävät kemikaalit

Tarkastellaan kohteessa käytettäviä kemikaaleja ja selvitetään, onko niistä mainintaa haitallisten aineiden listauksessa ja voivatko kemikaalit olla räjähtäviä. Kartoitetaan, kuinka tehokasta ilmanvaihtoa tarvitaan ko. kemikaaleille. Räjähdyksenvaaralliset kemikaalit eivät saa ylittää 25 % räjähtävänä pidettyä pitoisuutta ja HTP:ssä ilmoitetaan pitoisuudet, joita saa ilmentyä 15 min ja 8 h tarkastelujatkoilla. (Sosiaali- ja terveysministeriö 2020, 11; Valtioneuvoston asetus 2012, §40.)

Haitallisia aineita sisältävistä tiloista tulee tehdä mittauksia ilmanlaadun varmistamiseksi. Ilmamääriä voidaan joutua määrittämään uudelleen myöhemmin mitausten varmistuttua tiloista. (Sosiaali- ja terveysministeriö 2020, 11; Valtioneuvoston asetus 2012, §40.) Ilmanlaatuun voidaan järjestää pysyviä mittauksia, mikäli kuormitukset vaihtelevat suuresti tiloissa.

## 7.5 Tilat, joissa noudatetaan erityisiä olosuhteita

Erikoistilojen vaatimukset määritellään kohteen edustajan kanssa. Olosuhdehallinnan seuranta järjestetään yhdessä erikoissuunnittelijan kanssa. Erikoistiloja voivat olla lääketieteen, teollisuuden ja kemianteollisuuden tilat. Erikoistilojen vaatimusten ja laitteiston määrittämisen kanssa on aihetta konsultoida erikoissuunnittelijaa, jonka kanssa yhteistyössä voidaan rakentaa toimivaa järjestelmää.

Olosuhteiden hallintaa ja erilaisia käyttömahdollisuuksia on lukuisia, ja monet vaativat suunnittelijalta huomattavaa kokemusta järjestelmän toteutuksen mahdollistamisessa. Räjähdyksenvaaralliset kemikaalit ja muuten vaaralliset kemikaalit voivat yhteisreaktiona aiheuttaa suurempia ongelmia reagoinnin seurauksena. Tiloissa, joissa käytetään useita haitallisia, tai vaarallisia kemikaaleja, tulee selvittää reagoinnin mahdollisuudet ja niiden seuraukset.

## 7.6 Mittaukset ilmanlaadusta

HTP listauksen mukaisista aineista määritetään tiloihin tarvittava mittauslaitteisto, joilla voidaan valvoa tilojen ilmanlaatua. Raaja-arvojen lähestyessä ilmanvaihtoa voi tehostaa, jotta vaarallisia pitoisuuksia ei esiinny ja vaaratilanteissa korkeista pitoisuuksista saadaan hälytys. Lisäksi kohteessa voidaan valvoa CO<sup>2</sup>-tasoa, kosteutta ja lämpötiloja prosessin ja sisäilmaston vaatimalla tasolla.

Kohteeseen voidaan tehdä suoraan erikoissuunnittelijan kanssa yhteistyössä mittauslaitteisto, joka valvoo automaattisesti pitoisuuksia tiloissa. Useissa kohteissa vaaditaan olosuhteiden valvontaa ja niiden tarve ja laajuus tulee aina selvittää.

## 7.7 Ilmanvaihdon hätätoiminto

Tiloissa voi olla aiheellista varautua ilmanvaihdon tehostamiseen. Tilanteissa, joissa kuormitus kasvaa nopeasti ja mahdollisten vahinkojen ja

onnettomuuksien varalle tulee selvittää tarve tehostukselle, tai erilliselle ilman poistolle tiloista vaaran ehkäisemiseksi. Tehostus tilojen ilmanvaihtoon tulee katsoa tapauskohtaisesti.

Palovaarallisissa tiloissa tehostuksessa on huomioitava, ettei ilmanvaihdon tehostuksella aiheuteta tulipalotilanteessa tulipalon leviämistä tiloista. Ilmanvaihdon tehostus tulisi määrittää siten mittauksilla, ettei vaaraa aiheudu. Pitoisuuksien mittausten perusteella tehostava ilmanvaihto toimii, mikäli sen toiminta tulipalon sattuessa estetään.

## **7.8 Tiiveysmittaukset**

Tiiveysmittauksia tehdään erillisesti tiloista ja ilmanvaihdosta. Ilmanvaihdon tiiveysmittauksissa osa kanavistoa koeponnistetaan ja selvitetään paljonko koepaine muuttuu mittauksen aikana. Koepaineen muutoksen avulla luvun 3.1.3 laskennan avulla määritetään, onko tiiveys tarvittavalla tasolla.

Tiloissa voidaan tehdä painetestauksia, joiden apuna käytetään merkkisavuja, joiden kulkeutuminen tiloissa pystytään toteamaan ja testauksen tuloksia hyväksi käyttäen tiiveydessä olevia puutteita voidaan tarkemmin havainnoida. Rakennusvaipan mittauksen suorittaa asiaan perehtynyt ammattilainen, joka tarkastaa menetelmineen tarvittavan tiiveyden kohteesta esimerkiksi merkkisavujen ja painekokeiden avulla.

## **7.9 Vuotoilma**

Vuotoilman ehkäisyssä tiloihin, joihin niitä ei haluta, on huomioitava rakenteiden tiiveys ja etenkin erityisen tiiviissä tiloissa konsultoitava erikoistuneita valmistajia ja suunnittelijoita. Vuotoilman hallinnassa ilmanvaihdossa on käytettävä materiaaleja ja osia, jotka takaavat mahdollisimman tiiviin lopputuloksen. Vuotoilman määrään vaikuttaa suurimmilta osin rakenteelliset seikat.

Ilmanvaihdon paineolosuhteilla voidaan saada alustavaa tietoa vuotoilman suunnasta ja siihen varautumisesta. Ilmanvaihtojärjestelmän ja muun tekniikan tilaan tuovat läpiviennit on huomioitava tarkoin, saumojen luodessa mahdollisia

ongelmia. Myöhemmin tehtävien läpivientien varalle olisi aiheellista tehdä ohjeistus tiloihin tehtävien muutoksien varalle.

### **7.10 Ilmanvaihtojärjestelmän puhdistettavuus ja huollettavuus**

Ilmanvaihtojärjestelmien puhtauden suunnittelu on suuressa osassa ilmanvaihdon ja rakennuksen olosuhteiden haluttuna pitämisessä. Likaiset kanavat voivat aiheuttaa terveyshaittaa, paloturvallisuusriskin ja mahdollisia tukkeutumisongelmia, jos puhdistusta laiminlyödään riittävän pitkään. Ympäristöministeriö on asetuksessaan kertonut ilmanvaihdon puhdistettavuudesta seuraavasti:

Erikoissuunnittelijan on suunniteltava ilmanvaihtojärjestelmä ja sen huoltoväylät siten, että ilmanvaihtojärjestelmän osat voidaan helposti ja turvallisesti puhdistaa, huoltaa, korjata ja vaihtaa. Ilmanvaihtokoneiden huoltoa ja korjausta varten on varattava vähintään huollettavien laitteiden mittainen tila huoltosuunnassa. (Ympäristöministeriö 2017, 24§.)

Useissa kohteissa ilmanvaihdon puhdistus tulisi järjestää vuosittain, jopa tiheämminkin, jolloin kanaviston rakenteellinen lujuus ja puhdistettavuus on tärkeässä osassa. Kanaviston pinnoitteet ja käytetyt materiaalit eivät saa vaurioitua puhdistuksen seurauksena. Puhdistukselle tulisi järjestää edellytykset kanaviston suunnittelussa, jotta vältetään myöhemmiltä muutoksilta ja epäpuhtauksien joutumiselta kanavaan muutostöiden takia.

### **7.11 Ilman liikkeisiin vaikuttavat paineolosuhteet**

Rakennuksen käyttö ja sääolosuhteet voivat vaikuttaa tilojen paineolosuhteisiin, jos niitä ei oteta huomioon. Paineolosuhteiden vaikutusten ehkäisemiseksi tulee ottaa huomioon rakennetekniset ratkaisut kuten riittävän pitkät tuulikaapit ja pyöröovet, jotka ehkäisevät tiloissa tapahtuvia paine-erojen muutoksia tehokkaasti. Normaalit aukeavat ovet ilman erillistä ilmasulkua aiheuttavat paine-erojen kautta ilman liikettä tiloista toiseen. (Talotekniikkainfo 2021, 21.)

Sääolojen ja rakennuksen korkeuden kautta ilmeneviin paine-eroihin voidaan varautua järjestelmän varustamisella ilmanpaine- ja ilmamäärämittauksilla, joiden mittausten perusteella järjestelmä säätää tulo- ja poistoilman ilmamääriä.

Huomioitavana on, ettei samassa kohteessa pystytä hyödyntämään sekä koneellista, että painovoimaista ilmanvaihtoa koneellisen ilmanvaihdon sotkiessa painovoimaisen ilmanvaihdon. (Talotekniikkainfo 2021, 21.)

## **8 Yhteenveto**

Kartoituksen ohjeistuksen tavoite on keskittää tietoa laboratorioympäristön ilmanvaihtoon liittyvien huomioitavien asioiden osalta. Kaikkea laboratorion ilmanvaihtoon liittyviä elementtejä ei pystytty tässä teoksessa käsittelemään, paloturvallisuuden sovellutuksien puuttuessa esikartoituksesta. Kartoituksen teoriassa käsitellään ilmanvaihtoon liittyviä seikkoja, joiden perustalla suunnittelua ja mitoitusta voidaan lähteä työstämään eteenpäin.

Kartoituksen teoriaa koostaessa on havaittu aihepiirin olevan laaja ja tarvitsevan useissa käyttökohteissa useamman alan erikoissuunnittelua. Toteutuksessa yksinkertaisimmissa sovellutuksissa pystytään etenemään pienen verkoston turvin, mutta haastavammissa kohteissa erityishuomiota vaativat melkein kaikki osa-alueet. Kartoituksen pohjalta on koostettu huomioon otettavista asioista ja määritettävistä asioista tarkastuslista kuvio 10, joka löytyy kokonaisuudessaan seuraavalta sivulta.

<b>Ilmanvaihdon kartoituksen tarkastuslista laboratorioympäristöön</b>	
<b>Ilmanvaihdon mitoituksen määrittely</b>	<b>Ilmanlaadun tekijöiden määrittely</b>
Yleisilmanvaihdon määrittely ja mitoitus	Ilmanlaadun seurantamittaukset ja niiden järjestäminen tarpeenmukaisiin tiloihin
Kohteen epäpuhtaus-, kosteus- ja lämpökuormien määrittäminen kohteen laitteiston ja henkilöstön perusteella	Ilmanlaadun tavoitteiden määrittäminen ja mahdolliset ilmanlaadun takaamiseksi tehtävät haitallisten aineiden ja pitoisuuksien mittaukset ja laskennat
Kohteen ilmanvaihdon mitoitus soveltuvan menetelmän avulla	Ilman lämmityksen tarpeen määrittäminen ja mitoitus
Paineolosuhteiden määrittäminen ja mitoitus	Ilman jäähdytyksen tarpeen määrittely ja mitoitus
<b>Ilmanvaihdon laadun ja menetelmän määrittely</b>	Kostutuksen ja kuivauksen tarpeen kartoitus ja huomioitavat seikat
Tuloilmaluokkien määrittäminen	Ilmanvaihdon huomiointi vaarallisten kemikaalien ja aineiden käsittelyn yhteydessä, mittauksen tekeminen ja seurannan järjestäminen
Poistoilmaluokkien määrittäminen	Haitalliseksi tunnettujen pitoisuuksien tunnistaminen ja niiden olemassaoloon varautuminen ilmanvaihdon määrittämisellä kohteeseen
Tilailmastoinnin menetelmän suunnittelu soveltuvaksi kohteeseen	<b>Tilojen eritysohjelmien määrittely</b>
Työterveyden huomiointi kohteen mitoituksessa virtausteknillisesti ja käsiteltävien aineiden mukaisesti	Tilojen tiiveyden tarpeen kartoittaminen ja tiiveyden testaaminen
<b>Kanaviston ja lämmöntalteenoton määrittely</b>	Puhdastilojen tarpeen kartoittaminen ja mahdollinen vyöhykkeiden järjestäminen puhdastilan yhteyteen
Kanaviston mitoitus, tiiveys ja materiaalien valinta kohteeseen soveltuvaksi	Puhdastilaluokituksen kartoittaminen ja vaatimusten selvittäminen kohteen tarpeisiin soveltuen
Kanaviston huollon huomiointi materiaaleissa ja kanaviston suunnittelussa	Räjähdyksenvaarallisten tilojen huomiointi, ilmanvaihdon mitoitus ja eriyttäminen muusta ilmanvaihdosta
LTO-koneiden valinnan suorittaminen kohteeseen soveltuvaksi	Kemikaalivaarallisten työpisteiden ja erityiskohdeiden huomiointi ilmanvaihdon suunnittelussa
<b>Päätelaitteiden ja kohdepoistojen määrittely</b>	<b>Soveltuvan suodatustekniikan määrittely</b>
Päätelaitteiden materiaalien ja tyyppien valinta kohteeseen soveltuvaksi	Suodatustekniikan harkinta kohteen tarpeita vastaavaksi yleisilmanvaihdossa
Kohdepoistojen, huuvien ja muiden kiinteiden ilmanvaihtoteknisten rakenteiden tarkastelu ilmavirtojen kulkuun nähden kohteen tarpeiden mukaisesti	Pölynpoiston ja muiden erikoissuodattimien tarpeen kartoitus kohteen poistoilmaan kohteen tarpeita vastaavalla laajuudella, jottei poistoilmaan päästetä vaarallisia aineita ja epäpuhtauksia
Kohdepoistojen tarpeen kartoitus ja mitoitus kohteeseen soveltuvaksi	HEPA-suodatuksen tarpeen määrittäminen kohteen tarpeita vastaavaksi
Kotelointien tarpeen määrittely ja niiden suunnittelu kohteeseen soveltuvaksi	Molekyylisuodattimien tarpeen määrittäminen ja kemikaalituloihin soveltuvuuden selvittäminen

Kuvio 10 Ilmanvaihdon kartoituksen tarkastuslista laboratorioympäristöön.

## 9 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda tietämystä ja parantaa ilmanvaihdon osaamista erikoisemmissa teollisuuden kohteissa erikoistuen laboratorioden ilmanvaihtoon. Erikoiskohteissa vaaditaan usein eri alojen erikoisosaamista ja tarvittavien menetelmien tietämystä. Tarkoituksena oli tehdä ilmanvaihdon tietopaketti, jonka avulla kohteen lähtötietojen kartoitusta voidaan lähteä edistämään. Kartoituksen avulla osataan lähteä hankkimaan tietoa kohteesta ja havainnoimaan mahdollisia kohteen vaatimia tarpeita. Useimmat erikoiskohteet eivät synny suoraan yhden henkilön työn tuloksena, vaan vaativat verkoston asiantuntijoita. Työssä haluan avata mitä kaikkea tämän verkoston jäseniltä tarvitaan ja lyhyesti kertoa mahdollisista toteutusvaihtoehdoista ja menetelmistä erinäisiin kohteisiin. Aihepiirin laajuudelta voitaisiin tehdä huomattavasti enemmän tutkimusta, mutta yksityiskohtiin menevää tutkimusta kaikkien aihepiirien parissa on mahdotonta lähteä yhden opinnäytetyön puitteissa.

Erityisen haastavan kohteen suunnittelussa ja sen kartoituksessa on sen laajuus ja mahdolliset erityisolosuhteet. Yksinkertaisimmillaan kohteessa voi olla muutama kohdepoisto, suodatus ja yleisilmanvaihto, mutta ympäristö voi olla myös erityisen haastava. Kohteessa voi olla puhdastiloja, kemikaalien varastointia ja mahdollisia hiukkaspäästöjä, jotka aiheuttavat haittaa työskentelijöille ja ympäristölle. Myös lääketieteen kohteet aiheuttavat omia haasteitaan, jos biolaboratorioihin aihetta lähdetäisiin tarkemmin syventämään. Rakenteellinen suunnittelu, palosuunnittelu, automaatio suunnittelu ja muut erityissuunnittelijat ovat todella tärkeä osa pelkästään sitä, mitä ilmanvaihdossa joudutaan miettimään. Näitä ei sisällytetty opinnäytetyöhön, mutta yhteistyön vaikutus on suuri lopputuleman kannalta.

Mielestäni ilmanvaihdon tarpeiden selvittäminen laboratoriotiloihin helpottui opinnäytetyön antaman tiedon ja kokemuksen kautta. Tarkastuslistaa voi hyödyntää pienempiin, tai suurempiin kokonaisuuksiin, kun sen sisältöä vertaa tutkittavan kohteen tarpeisiin. Opinnäytetyötä joudutaan täydentämään vielä muilla lausunnoilla ja selvityksillä suunnittelun kaikkien osa-alueiden kattamiseksi, mutta pohja ilmanvaihtoon löytyy opinnäytetyöstä.

## Lähteet

- Camfil. 2022a. Molekyylisuodattimet. <https://www.camfil.com/fi-fi/tuotteet/molekyylisuodattimet>. 04.11.2022.
- Camfil. 2022b. Opas hepa-suodattimille. <https://www.camfil.com/damdocuments/46978/1097011/opas-hepa-suodattimille---tietoa-ja-ohjeita.pdf>. 04.11.2022.
- Clean air technology inc. 2022. Cleanrooms. <https://www.cleanairtechnology.com/modular-cleanrooms-hardwall-iso-positive-negative-pressure-fda-electronic-manufacturing.php> 04.11.2022.
- FINVAC. 2019. Opas ilmanvaihdon mitoitukseen muissa kuin asuinrakennuksissa. <https://urly.fi/2VD5>. 04.11.2022.
- Fläkt Group. 2022a. Pyöreä kanavajärjestelmä veloduct. <https://www.flaktgroup.com/api/v1/Documents/47a2cc4b-ce98-4a6c-9274-9e5b5431a462?analytics=0>. 04.11.2022.
- FläktGroup. 2022b. Energiantalteenottoratkaisujen tuote-esittely. <https://www.flaktgroup.com/fi/products/ilmankasittelykoneet/energiantalteenottoratkaisut/>. 07.12.2022.
- Hautalampi, T. 2008. Teollisuustilojen ilman laadun ja lämpöolojen hallinta. Työterveyslaitos. <https://docplayer.fi/23496627-Teollisuustilojen-ilman-laadun-ja-lampoolojen-hallinta-timo-hautalampi-tyoterveyslaitos.html>. 14.11.2022.
- Kulmala, I., Heinonen, K., Riipinen, H., Säämänen, A., Welling, I. 2004. Tietoverkko pölyntorjunnan avuksi. <http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/polyverkko/index.htm>. 04.11.2022
- Mecart inc. 2022. <https://www.mecart-cleanrooms.com/learning-center/gmp-facility-understanding-grade-a-grade-b-grade-c-and-d/>. 01.12.2022
- Pasanen, P., Asikainen, V., Holopainen, R., Seppänen, O. 1999. Verification of cleanliness of HVAC-Systems. <https://docplayer.fi/1854613-lv-kanavien-puhdistusmenetelmien-vertailututkimus.html>. 06.11.2022.
- Projektia engineering Oy. 2022. Absorptio-ilmankuivaimet. [http://humitop.fi/wp-content/uploads/2018/02/DFRA-2016\\_Suomenkielinen.pdf](http://humitop.fi/wp-content/uploads/2018/02/DFRA-2016_Suomenkielinen.pdf). 13.11.2022
- Rakennustietosäätiö. 2012. LVI 31-10507 Hiukkassuodatuksen peruskäsitteet. Rakennustietosäätiö. 2018. RT 07-11299 sisäilmastoluokitus.
- Sandberg, E., Heinonen, J., Holmberg, R., Hyvärinen, K., Hänninen, R., Jokinen, L., Kauppila, K., Keinonen, P., Koivula, H., Koskela, H., Koskinen, E., Kosonen, R., Laine, T., Liljeström, J., Mustakallio, P., Mäkinen, P., Nykvist, A., Paasio, I., Pessi, P., Pettersson, H., Pihlajamaa, P., Railio, J., Rantama, M., Ripatti, H., Sahlsten, T., Silvan, J., Sundman, T., Säteri, J., Tammivaara, H., Valkeapää, H., Vuolle, M. 2014a. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät, ilmastotekniikka osa 2. Talotekniikka-Julkaisut Oy.
- Sandberg, E., Heinonen, J., Holmberg, R., Hyvärinen, K., Hänninen, R., Jokinen, L., Kauppila, K., Keinonen, P., Koivula, H., Koskela, H., Koskinen, E., Kosonen, R., Laine, T., Liljeström, J., Mustakallio, P., Mäkinen, P., Nykvist, A., Paasio, I., Pessi, P., Pettersson, H., Pihlajamaa, P., Railio, J., Rantama, M., Ripatti, H., Sahlsten, T., Silvan, J., Sundman, T., Säteri, J., Tammivaara, H., Valkeapää, H., Vuolle, M.

- 2014b. Ilmastointilaitoksen mitoitus, Ilmastotekniikka osa 2. Talotekniikka-Julkaisut Oy.
- Sosiaali- ja terveysministeriö. 545/2015. Asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista.
- Sosiaali- ja terveysministeriö. 654/2020. Asetus haitallisiksi tunnetuista pitoisuuksista.
- Suomen LVI-liitto SuLVI ry. 2016. Ilmanvaihtojärjestelmän puhtauden tutkiminen. <https://sulvi.fi/wp-content/uploads/2017/05/IVKT-2016-Ohje-4-Ilmanvaihtoj%C3%A4rjestelm%C3%A4n-puhtauden-tutkiminen.pdf>. 06.11.2022.
- Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 2001. SFS-EN ISO 14644-4:2001 Puhdastilat ja puhtaat alueet. Osa 4: Suunnittelu, rakentaminen ja käynnistys.
- Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 2015. SFS-EN ISO 14644-1:2015 Puhdastilat ja puhtaat alueet. Osa 1: Hiukkaspitoisuuden perusteella tehtävä puhtausluokitus.
- Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 2016. SFS-EN ISO 16890-1:2016 Yleisilmanvaihdon ilmansuodattimet. Osa 1: Tekniset määritelmät, vaatimukset ja hiukkasmaisen aineksen erotusasteeseen perustuva luokitusjärjestelmä (ePM).
- Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 2017. SFS-EN ISO 16798-3:2017 Osa 3: Muiden kuin asuinrakennusten ilmanvaihto- ja huoneilmastointijärjestelmien tehokkuusvaatimukset.
- Talotekniikkainfo. 2018. Sisäilmasto- ja ilmanvaihto opas. [https://talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/talotekniikkainfo\\_sisailmasto\\_ja\\_ilmanvaihto\\_opas\\_30.1.2018.pdf](https://talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/talotekniikkainfo_sisailmasto_ja_ilmanvaihto_opas_30.1.2018.pdf) 07.11.2022
- Talotekniikkainfo. 2021. Sisäilmasto- ja ilmanvaihto opas. <https://talotekniikkainfo.fi/sisailmasto-ja-ilmanvaihto-opas>. 06.11.2022.
- Talotekniikkainfo. 2022. Ilmanvaihtolaitosten paloturvallisuus opas. <https://talotekniikkainfo.fi/ilmanvaihtolaitosten-paloturvallisuus-opas>. 06.11.2022
- Tukes. 2021. Opas: vaarallisten kemikaalien käsittely ja varastointi. <https://tukes.fi/vaarallisten-kemikaalien-kasittely-ja-varastointi>. 09.11.2022.
- Tukes. 2022. Räjähdyksivaaralliset tilat. <https://tukes.fi/teollisuus/rajahdysvaaralliset-tilat>. 29.11.2022.
- Työterveyslaitos. 2022a. Vesihuoltolaitosten työturvallisuusopas. <https://www.ttl.fi/teemat/tyoturvallisuus/vesihuoltolaitosten-tyoturvallisuusopas/riskien-tunnistus-ja-hallintakeinot/ilmanvaihto-ja-ilmastointi>. 06.11.2022
- Työterveyslaitos. 2022b. OVA-ohjeet: Käyttäjän opas <https://www.ttl.fi/ova/ova-ohjeet-kayttajan-opas>. 08.11.2022
- Työterveyslaki 2002/738.
- Tähti, E., Selin, M., Railio, J., Sainio, S., Hagström, K., Niemelä, R., Kulmala, I., Sulamäki, H., Sjöholm, P., Laine, J., Kuoksa, T., Pöntinen, K. 2002. Teollisuusilmastoinnin opas.
- Valtioneuvosto. 856/2012. Valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien teollisen käsittelyn ja varastoinnin turvallisuusvaatimuksista.
- Ympäristöministeriö. 2012. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta.
- Ympäristöministeriö. 1009/2017. asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta.

## Eri pölynerotinmenetelmien vertailu, Ilpo Kulmala ym. 2004

Pölynerotin	Käyttökohteet	Edut	Haitat	Tyypillinen kuormitus (g/m <sup>3</sup> )	Paine-ero (Pa)
Kammiot, syklonit	Murskaus, hionta, työstö, hakkeen- ja purkuljettimet, pneumaattiset kuljetusjärjestelmät	Yksinkertainen ja huoltovapaa rakenne	Pölyn aiheuttama kuluminen, alhainen erotuskyky pienille hiukkasille, laskeutumiskammio vaatii paljon tilaa	0,1–100	500–1500
Kuitusuodattimet	Kaikki kuiva pöly	Korkea erotuskyky pienillekin hiukkasille	Korkea painehäviö, rajoitukset korkeissa lämpötiloissa, ei sovellu tahmeille pölyille	0,1–20	750–1500
Sähkösuodatin -yksiasteinen -kaksiportainen	Lentotuhka Hitsaushuurut	Alhainen painehäviö ja energi-ankutus, korkea erotuskyky pienillekin hiukkasille	Ei sovellu kaikille pölyille, kunnossapito vaatii asiantuntemusta	0,1–2 <1	100–2500
Venturipesuri	Kemialliset ja metallurgiset huurut	Erottavat myös tahmeita pölyjä, voidaan käsitellä myös syttyviä pölyjä, korrosioivat kaasut ja pölyt voidaan neutraloida	Korkea painehäviö, pesuneste käsiteltävä, jätevesilaitos usein tarpeen, laitteissa voi esiintyä korroosiota, laitteisto suojattava jäätymiseltä	0,1–100	500–4000



Ryhmät	ei-hapettavat epäorg.hapot	riikkihappo	typpi-happo	orgaaniset hapot	emäkset	ammoniakki	alfaattiset amiinit	aminoalkoholit	aromaattiset amiinit	amidit	orgaaniset anhydridit	isosyanaatit	vinyyliasetaatti	akrylaatit	allyyliyhdisteet	alkeenioksidit	epikloorihydrini	ketonit	aldehydit	alkoholit, glykolit	Fenolit, kresolit	kaprolaktaamiliuos	
18. ketonit		x	x				x	B															
19. aldehydit	A	x	x		x	x	x	x	x														
20. alkoholit, glykolit	E	x	x	F	x		x				x												
21. fenolit, kresolit		x	x		x		x			x													
22. kapro-laktaamiliuos		x			x		x				x												
30. alkeenit		x	x																				
31. alkaanit																							
32. aromaattiset hiilivedyt			x																				
33. hiilivetysseokset			x																				
34. esterit		x	x																				
35. vinyyli-halogenidit			x																				x
36. halogenoidut hiilivedyt		G			H		I																
37. ntriilit		x																					
38. rikkihiili							x	x															
39. sulfolaani																							
40. glykolieetterit		x									x												
41. eetterit		x	x																				
42. nitroyhdisteet					x	x	x	x	x														
43. vesi ja vettä sis. seokset		x									x												

Ohjeita kemikaalien yhteensopivuustaulukoon

X merkitsee, että reaktiivinen ryhmä muodostaa vaarallisen yhdistelmän ko. tuotteen kanssa.

Reaktiivisuuspoikkeamat kemikaaliryhmissä:

A Akroleiini (19), krotonaldehydi (19) ja 2-etyyli-3-propyyliakroleiini (19) eivät ole yhteensopivia ryhmän 1, ei-hapettavien epäorgaanisten happojen kanssa.

B Isoforoni (18) ja mesityylioksidi (18) eivät ole yhteensopivia ryhmän 8, aminoalkoholien kanssa.

C Akryylihapo (4) ei ole yhteensopiva ryhmän 9, aromaattisten amiinien kanssa.

D Allyylialkoholi (15) ei ole yhteensopiva ryhmän 12, isosyanaattien kanssa.

E Furfuryylialkoholi (20) ei ole yhteensopiva ryhmän 1, ei-hapettavien epäorgaanisten happojen kanssa.

F Furfuryylialkoholi (20) ei ole yhteensopiva ryhmän 4, orgaanisten happojen kanssa.

G Dikloorietyylieetteri (36) ei ole yhteensopiva ryhmän 2, rikkihapon kanssa.

H Trikloorietyleeni (36) ei ole yhteensopiva ryhmän 5, emästen kanssa.

Etyleenidiamiini ei ole yhteensopiva etyleenidikloridin (6) kanssa.

**Suomen säävyöhykkeet ja mitoituslämpötilat säävyöhykkeille,  
Ympäristöministeriö 2017**



Säävyöhyke	Mitoitettavan ulkoilman lämpötila, °C
I	-26
II	-29
II	-32
IV	-38

## Näytteenotto kohtien lukumäärä puhdastilassa suhteessa pinta-alaan, Suomen standardisoimisliitto 2015

Puhdastilan pinta-ala (m <sup>2</sup> ) yhtä suuri tai alle	Testattavien näytteenotto kohtien vähimmäislukumäärä (N <sub>L</sub> )
2	1
4	2
6	3
8	4
10	5
24	6
28	7
32	8
36	9
52	10
56	11
64	12
68	13
72	14
76	15
104	16
108	17
116	18
148	19
156	20
192	21
232	22
276	23
352	24
436	25
636	26
1000	27
> 1000	N <sub>L</sub> =27*(pinta-ala/1000)

HUOM. 1 Jos tarkasteltava pinta-ala osuu kahden taulukossa esitetyn arvon välille, käytetään arvoista suurempaa.

HUOM. 2 Jos tilassa on yhdensuuntainen ilmavirta, tässä tarkoitettuna pinta-alana voidaan pitää ilmavirtaan nähden kohtisuoraa pinta-alaa. Kaikissa muissa tapauksissa pidetään pinta-alana puhdastilan tai muun puhtaan vyöhykkeen vaakasuuntaista alaa