



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JONI KUOPPALA
ELEMENTTIRAKENTEISTEN PUHDASTILOJEN KEHITTÄMINEN

Diplomityö

Tarkastaja: lehtori Seppo Syrjälä
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
2. toukokuuta 2018

TIIVISTELMÄ

Joni Kuoppala: Elementtirakenteisten puhdastilojen kehittäminen

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 82 sivua

Syyskuu 2018

Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Energiatehokkuus

Tarkastaja: lehtori Seppo Syrjälä

Avainsanat: puhdastila, polyuretaanielementti, ohutlevy, energiaterhokkuus, epäpuhtaus

Tämä diplomityön aiheena ovat puhdastilat ja niihin liittyvä tuotekehitys. Työssä käsitellään erään polyuretaanielementtivalmistajan tuotteita, jonka tuotantomäärällisesti tärkeimmät tuotteet ovat kylmä- ja pakastuhuoneet, joihin myös suurin osa tuotekehityksen resursseista on suunnattu. Puhdastilatekniikan käytön jatkuvasti kasvaessa ja laajentuessa uusille tekniikan ja tieteen aloille on tällä tilavalmistajalla nähty ajankohtaisena panostaa tuotekehityksessä enemmän myös puhdastiloihin.

Työssä esitellään puhdastilatekniikan perusteet ja siihen keskeisimmin liittyvät fysikaaliset ilmiöt sekä puhdastilojen energiankäytön lähtökohdat. Tämän jälkeen esitellään tuotekehitysmahdollisuuksia liittyen valmistajan elementtirakenteisiin puhdastilahuoneisiin huomioiden erityisesti puhdastilatekniikan asettamat vaatimukset ja vapaudet verrattuna kylmähuonevalmistukseen, valmistustekniikka ja ratkaisujen energiaterhokkuus. Lisäksi työssä käydään läpi uusia teknisiä ratkaisuja, joilla voidaan vaikuttaa erityisesti puhdastilojen energiankäyttöön. Lisäksi eri tuotekehitysideat mallinnettiin CAD-ohjelmistolla, pääasiassa ohutlevyvalmistustekniikkaa hyödyntäen.

Työn lopputuloksena saatiin aikaan tuotekehitysideoita liittyen mm. puhdastiloissa käytettäviin materiaaleihin, elementtien valmistustekniikkaan, ilmanvaihtotekniikkaan ja automaatioon. Nämä ideat toimivat pohjana jatkossa ja osittain jo työn aikana tehdyille puhdastilojen modernisoinnille ja uudistamiselle.

ABSTRACT

Joni Kuoppala: Development of cleanrooms based on panel construction

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 82 pages

September 2018

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

Major: Energy efficiency

Examiner: University Lecturer Seppo Syrjälä

Keywords: cleanroom, polyurethane sandwich panel, sheet metal, energy efficiency, contamination

The subject of this master's thesis is cleanrooms and cleanroom related product development. Product development focuses on certain panel manufacturer's cleanrooms. Manufacturer's main products are sandwich panel type cold rooms. Cleanrooms are based on similar construction as cold rooms, so their product development has also been mostly following cold room product line's development. This thesis studies on how this manufacturer's cleanrooms could be developed to better meet requirements specifically set on cleanrooms.

Literature review presents the basics of cleanroom technology with special focus on energy use of clean rooms which is significantly higher than ordinary production or office spaces' energy use. Next these themes are related to the actual panel type cleanrooms. New product development ideas on how the panel-type cleanroom elements could be renewed to better meet cleanroom requirements are studied. In addition, some ideas on how energy efficiency of the cleanrooms could be improved with new type of exhaust air solution and with better integration of building automation systems. Presented ideas were also modelled with 3D CAD program.

Result of this thesis is a basis for further product development and modernization of the manufacturer's cleanrooms. Some presented ideas have already been selected for further development at the time of this thesis' completion.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty opinnäytetyöksi konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelmaan Tampereen teknillisessä yliopistossa marraskuun 2017 ja syyskuun 2018 välillä. Diplomityön teko on opettanut paljon tieteellisen tutkimuksen teosta, tiedonkeruusta sekä oman alani insinöörisuunnittelusta. Varsinaisen kirjallisuustutkimuksen lisäksi työssä on ollut tärkeässä roolissa erilaisten sidosryhmien kanssa työskentely, joka on ollut myöskin hyvin opettavaista.

Suuren apuna työn valmistumisessa ovat olleet Petteri Piirto sekä Seppo Syrjälä, jotka ovat tarjonneet apua työhön liittyvän tutkimuksen etenemisessä, sisällön jäsentelyssä, ulkoasun hiomisessa ja tekstin oikolukemisessa. Heille tahtoisin esittää kiitokset.

Tampereella, 19.9.2018

Joni Kuoppala

SISÄLLYS

1.	JOHDANTO	1
2.	PUHDASTILA.....	2
2.1	Puhdastilastandardit	3
2.2	Epäpuhtaus	6
2.2.1	Epäpuhtauden määrittely.....	6
2.2.2	Epäpuhtaushiukkasten käyttäytyminen ilmassa.....	7
2.2.3	Epäpuhtaushiukkasiin vaikuttavat adheesiovoimat	8
2.3	Epäpuhtauslähteet.....	11
2.3.1	Ulkoilma.....	11
2.3.2	Ihmiset.....	13
2.3.3	Laitteet ja materiaalit	16
2.4	Puhdastilan sähköstaattiset ominaisuudet	19
2.5	Puhdastilasuunnittelu	23
2.5.1	Ilman suodatus	23
2.5.2	Turbulenttisen ilmanvaihdon puhdastila.....	29
2.5.3	Yhdensuuntaisen ilmanvaihdon puhdastila.....	31
2.6	Tilasuunnittelu.....	32
2.6.1	Rakenteet.....	32
2.6.2	Kulku puhdastiloihin ja pukuhuoneet	33
2.6.3	Layout-suunnittelu	34
3.	PUHDASTILOJEN ENERGIANKÄYTTÖ.....	37
3.1	Ilmastointi.....	37
3.1.1	Lämpötilanhallinta	37
3.1.2	Kosteudenhallinta.....	39
3.2	Ilmanvaihtojärjestelmä.....	41
3.3	Sähkölaitteet.....	45
4.	PUHDASTILAVALMISTUS.....	46
4.1	Nykytilanne	46
4.1.1	Seinäelementit ja ovet	46
4.1.2	Valmistusprosessi.....	50
4.2	Tuotekehitysmahdollisuudet	51
4.2.1	Eristepaksuus	52
4.2.2	Pintamateriaalit	52
4.2.3	Ovet.....	53
4.3	Kehitysmahdollisuuksien arviointi ja toteutus	53
4.3.1	Uusi elementtiratkaisu.....	54
4.3.2	Pintamateriaalien soveltuvuus.....	60
4.3.3	Karmi	64
4.3.4	Eristepaksuuden pienentäminen.....	66
5.	ENERGIANKÄYTÖN TEHOSTAMINEN	68
5.1	Ilmanvaihtoratkaisut.....	68

5.1.1	FFU-puhaltimet.....	69
5.1.2	Poistoilmakanava	70
5.1.3	Suodattimet	73
5.2	Rakenteiden tiiveys	73
5.3	Automaatio	74
5.3.1	Partikkeliohjaus.....	75
5.3.2	Läsnäolo-ohjaus	76
6.	YHTEENVETO	78
7.	LÄHTEET.....	80

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CFU	Colony Forming Unit
cGMP	current Good Manufacturing Process
C-PVC	Chlorinated polyvinyl chloride
DFM	Design for Manufacturing
DG	Double Gasket
ErP	Energy related Products
FDA	Food and Drug Administration
Ffu	Fan filter unit
GMP	Good Manufacturing Process
HEPA	High Efficiency Particulate Air
PVC	Polyvinyl chloride
SFP	Specific Fan Power
SG	Single Gasket
ULPA	Ultra Low Particulate Air
UPS	Uninterruptible Power Supply
U-PVC	Unplasticized polyvinyl chloride
<i>A</i>	Hamakerin vakio
<i>D</i>	diffuusiokerroin
<i>c</i>	hiukkaspitoisuus
<i>c_p</i>	ominaislämpökapasiteetti
<i>d</i>	halkaisija
<i>E</i>	suodatustehokkuus
<i>F</i>	voima
<i>f_D</i>	Darcyn kitkakerroin
<i>G</i>	hiukkastuotto
<i>g</i>	putoamiskiihtyvyyys
<i>K</i>	Kuwabaran hydrodynaaminen kerroin
<i>K_E</i>	Coulombin vakio
<i>k</i>	Boltzmanin vakio
<i>L</i>	paksuus
<i>l</i>	pituus
<i>m</i>	massa
<i>n</i>	kierrosnopeus
<i>P</i>	teho
<i>Pe</i>	Pecletin luku
<i>V</i>	nopeus
<i>Q</i>	sähkövaraus
<i>q</i>	tilavuusvirta
<i>r</i>	pysäytysparametri
<i>R</i>	lämmönvastus
<i>T</i>	lämpötila
<i>x</i>	etäisyys
<i>α</i>	kulma
<i>β</i>	tilavuusosuus
<i>δ</i>	keskimääräinen vapaa välimatka

Δp	paineen nousu
ε	yksittäisen kuidun suodatustehokkuus
γ_{LV}	pintajännitys
ζ	kertavastuskerroin
η	dynaaminen viskositeetti
λ	lämmönjohtavuus
μ	hyötysuhde
ρ	tiheys

1. JOHDANTO

Puhtaus kasvattaa jatkuvasti merkitystään erilaisilla modernin tekniikan ja tieteen aloilla. Oli kyse sitten elektroniikkateollisuudessa mikropiirillä oikosulun aiheuttavasta mikroskooppisesta hiukkasesta tai lääketieteen mikrobista, pyritään näiden epäpuhtauksien määrää kriittisissä valmistus-, käyttö- tai tutkimusympäristöissä yhä tiukkenevissa määrin vähentämään ja näin parantamaan tuotannon ja toiminnan laatua. Edellytetyn puhtauden saavuttaminen vaatii erityisen tiukkaa olosuhdehallintaa käytettävältä tilalta. Tätä varten on kehitetty puhdistilakonsepti, jossa valmistukseen, tutkimukseen tms. toimintaan tarkoitettu tila on suunniteltu ja valmistettu ensisijaisesti saavuttamaan hyvin tiukasti määritelty puhtaustaso.

Nykyisin puhdistilojen rakentamisessa suositaan paljon useista, tyypillisesti noin 1 m levyisistä elementtiseinistä rakennettuja puhdistiloja. Elementtirakentaminen tuo tilasuunnitteluun paljon juostavuutta, sillä olemassa olevia tiloja voidaan hyödyntää tehokkaasti, kun tiloihin ei tarvitse rakentaa perinteisellä rakennustekniikalla ylimääräisiä väliseiniä. Tehdasvalmisteisia elementtejä käytettäessä tilan pystyttäminen tapahtuu myös perinteistä rakentamista nopeammin. Elementtien käyttö tuo tiloihin myös muuntojoustavuutta ja modulaarisuutta, kun yksittäisiä elementtejä pystytään purkamaan ja siirtämään. Myös työssä käsitellyn puhdistilavalmistajan tuotelinja perustuu näihin elementtirakenteisiin.

Diplomityössä käsitellyllä puhdistilavalmistajalla on kymmenien vuosien kokemus elementtirakenteisten kylmä- ja puhdistilojen valmistamisesta. Elementin perusrakenne on pysynyt samanlaisena valmistushistorian ajan, perustuen polyuretaanitäytteisiin teräslevy-sandwichrakenteisiin. Aluksi valmistus keskittyi kylmätiloihin, mutta myöhemmin tuotevalikoimaan lisättiin myös puhdistilat, joiden perusrakenne pohjautuu kylmähuoneissa käytettyyn rakenteeseen. Tuotantomäärissä kylmähuoneet ovat kuitenkin pysyneet tärkeimpänä tuotteena, joten myös tuotekehityksessä on panostettu ensisijaisesti kylmähuoneisiin. Puhdistilojen modernisointi on kuitenkin koettu ajankohtaiseksi, jota tässä diplomityössä käsitellään.

Työssä esitellään ensin puhdistilatekniikan perusteet ja keskeisimmät puhdistilatekniikkaan liittyvät fysiikan ilmiöt luvussa 2. Luvussa 3 käydään läpi puhdistilojen energiankäyttöä, joka on keskeisimpiä teemoja tuotekehitysmahdollisuuksia esitellessä myöhemmin luvussa 4 ja 5. Luvussa 4 esitellään puhdistilarakenteisiin liittyviä tuotekehitysideoita ja arvioidaan niiden toteutettavuutta puhdistilatekniikan, tuotantotekniikan, taloudellisuuden ja energiatehokkuuden lähtökohdista sekä arvioidaan niiden vaikutusta nykyisen tuotevalikoiman käyttöön. Luvussa 5 esitellään erilaisia teknisiä ratkaisuja erityisesti energiatehokkuuden parantamiseksi.

2. PUHDASTILA

Puhdastila terminä kuvaa jo hyvin sen luonnetta ja tarkoitusta. Puhdastila on tila, huone tai rakennuksen osa, jonka puhtauteen on kiinnitetty erityistä huomiota. Standardi SFS-EN ISO 14644-1 (2015) määrittelee puhdastilan huoneeksi ”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”. Puhtautta siis tutkitaan erityisesti ilman hiukkaspitoisuuden avulla, sillä hiukkaspitoisuuden kautta puhtaudelle voidaan antaa kvantitatiivinen arvo ja näin määritellä tilalle erilaisia puhtausluokituksia ja -vaatimuksia. Hiukkaspitoisuus ei ole kuitenkaan ainoa puhdastilan toimivuuden kannalta merkitsevä ominaisuus. Tilan käytöstä riippuen tärkeitä ominaisuuksia voivat olla myös esimerkiksi pintojen puhdistus erityisesti erilaisista mikrobeista, tilan sisäilmaston lämpötila, kosteus ja paine, ilman virtausnopeus ja suunta, äänieristys ja värinä sekä tilan sähköstaattiset ominaisuudet.

Tarve puhtaudeltaan, sisäilmastoltaan ja muilta ominaisuuksiltaan säädellyille tiloille syntyi 1960-luvun aikana valmistustekniikoiden kehittyessä ja toleranssien tiukentuessa. Ensimmäiset merkittävät panostukset ilman partikkelipitoisuuden hallintaan tehtiin toisen maailmansodan aikana kehitettyjen HEPA-suodattimien (High Efficiency Particulate Air) avulla. Tällöin tajuttiin puhtaan valmistusympäristön tuomat edut esimerkiksi suurta tarkkuutta ja pieniä toleransseja vaativien tähtäinten ja laakerien valmistuksessa (Whyte 2001, s. 15-16). Ensimmäinen moderni puhdastila oli yhdysvaltalaisen ydinaselaboratorio Sandia National Laboratoriesille työskennelleen fyysikko Willis Whitfieldin suunnittelema ja perustui HEPA-suodatettuun yhdensuuntaiseen laminaariin tai lähes laminaariin ilmanvaihtoon (Whitfield 1962). Aikaisempiin suureen ilmatiiveyteen ja säännölliseen imurointiin perustuviin puhdastiloihin verrattuna Whitfieldin puhdastila oli monikertaisesti tehokkaampi. Whitfieldin kehittämä puhdastila saavutti nopeasti suuren suosion, kun muun muassa sairaanhoidossa ja lääketieteellisyydessä huomattiin puhdastilatekniikan tuomat hyödyt. Esimerkiksi leikkaussaleissa pystyttiin tehokkaasti vähentämään erilaisia infektioita käyttämällä suodatettua yhdensuuntaista ilmanvaihtoa.

Nykyisten puhdastilojen käyttö voidaan jakaa karkeasti kahteen kategoriaan (Whyte 2001, s. 5-6). Ensimmäisessä kategoriassa erityisesti ilman partikkelipitoisuutta pyritään rajoittamaan, sillä valmistettavaan tuotteeseen päätyvillä partikkeleilla olisi haittaa tuotteen mekaaniselle tai elektroniselle toiminnalle. Näissä puhdastiloissa usein myös tilan sähköstaattisella toiminnalla on suuri painoarvo. Tämän kategorian puhdastiloja käytetään esimerkiksi elektroniikka-, puolijohde-, mikromekaniikka- ja optiikkateollisuudessa. Hyvänä esimerkkinä on jatkuvasti pienentyvät transistorit, jotka alkavat lähestyä 5 nm kokoluokkaa. Erittäin pienikin partikkeli voi tällöin aiheuttaa valmistettavaan mikropii-

riin oikosulun ja pilata tuotteen, joten valmistustiloilta edellytetään hyvin korkeaa puhdautta. Toisen kategorian puhdastiloissa käsitellään terveyteen liittyviä tuotteita tai suoritetaan terveyteen liittyviä operaatioita, joten näiltä puhdastiloilta edellytetään erityisesti hygieenisyyttä. Näissä puhdastiloissa pyritään rajoittamaan varsinaisten hiukkasten lisäksi myös erilaisten mikrobien pääsyä tilaan ja estämään tilaan mahdollisesti päässeiden mikrobien kasvu, mikä tavoitteena on estää infektioiden synty. Näitä puhdastiloja käytetään esimerkiksi lääkevalmistuksessa ja sairaaloissa. Myös joissain ruokateollisuuden prosesseissa ja laboratorioissa tarvitaan tämän kategorian puhdastiloja.

2.1 Puhdastilastandardit

Merkittävin puhdastilastandardi on kansainvälinen ISO 14644 standardisarja, joka on Suomessa käytössä SFS-EN ISO 14644 standardina. Standardin keskeisin sisältö on ilman partikkelipitoisuuden perusteella tehtävät puhdastilaluokitukset. Puhdastilaluokat perustuvat ilmasta mitattujen 0,1 – 5 µm halkaisijan partikkelien lukumääriin ja luokkia on yhteensä yhdeksän, nimityksiltään ISO-luokka 1 – ISO-luokka 9. Näistä ISO-luokka 9 on epäpuhtain ja jokaisen luokan välillä sallitut partikkelimäärät pienenevät kymmenesosaan edellisestä luokasta. Luokat pitoisuusvaatimuksineen on esitetty taulukossa 1. Pitoisuudet ovat kumulatiivisia, eli hiukkaskoolle ilmoitettu määrä sisältää tämän koon kanssa yhtä suuret tai suuremmat partikkelit. Myös 5 µm isommille hiukkasille, joita standardissa nimitetään makrohiukkasiksi, voidaan määrittellä pitoisuusrajat erillisen M-termin avulla. M-terminissä ilmastaan hiukkaskoko, sen sallittu pitoisuus sekä mittausmenetelmä pitoisuuden määrittämiseksi. ISO-luokka 9 on käytännössä saavutettavissa jo normaaleissa huoneolosuhteissa, eikä sitä usein käytetä varsinaisissa puhdastiloissa, kun taas puhtain ISO-luokka 1 vaatii äärimmäistä panostusta tilan puhtauteen. Tyypillisesti luokitukset painottuvat matalimpiin ISO-luokkiin 7-8 ja vain harvoissa tapauksissa käytetään ISO-luokka 5:ttä tiukempia luokituksia. Esimerkiksi Suomessa ISO-luokan 1-2 tiloja ei tiedetä viime vuosina otetun käyttöön yhtään (Vasara et al. 2018). ISO-luokilla voidaan siis kuvata hyvin laajasti eri puhdastiloja. Standardi mahdollistaa myös väliluokkien käytön, joita merkitään esimerkiksi ISO-luokka 5,5.

Luokitukset voidaan määrittellä kolmessa olotilassa, jotka ovat rakennusvalmis, jossa tilassa ei ole laitteita, kalusteita tai ihmisiä, mutta se on muuten toimintakunnossa, lepotila, jossa laitteet ovat asennettuina ja toiminnassa, mutta käyttäjiä ei ole tilassa ja toiminnassa, jossa tila on varsinaista käyttöä vastaavassa tilassa. Näistä olotila ”toiminnassa” on haastavin ja luokitukset tehdään yleensä tässä tilassa. Muita olotiloja voidaan kuitenkin käyttää esimerkiksi asettamaan välitavoitteita haastavimman olotilan puhtauden saavuttamiseksi tai määrittelemään pienempi puhtausvaatimus tilaan silloin, kuin tilassa ei tapahdu varsinaista toimintaa ja näin parantaa puhdastilan energiatehokkuutta.

Taulukko 1. Puhdastilaluokitukset (SFS-EN ISO 14644-1 2015)

ISO-luokka	Suurin sallittu hiukkaspitoisuus (määrä/m ³)					
	0,1 µm	0,2 µm	0,3 µm	0,5 µm	1 µm	5 µm
1	10					
2	100	24	10			
3	1000	237	102	35		
4	10 000	2 370	1 020	352	83	
5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	
6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
7				352 000	83 200	2 930
8				3 520 000	832 000	29 300
9				35 200 000	8 320 000	293 000

Myös muita puhdastilaluokituksia käytetään. Erityisesti Yhdysvalloissa on edelleen laajalti käytössä Federal Standard 209 (FED-STD-209), joka on virallisesti korvattu ISO 14644:llä. FED-STD-209 A–D revisioissa puhdastilat luokitellaan perustuen 0,5 µm halkaisijallisten partikkelien määrään yhdessä kuutiojalassa. Luokitukset alkavat luokasta 100 000 ja luokkien välillä pitoisuusvaatimus laskee kymmenesosaan, vastaavasti kuin ISO 14644:ssä. Molempien luokitusten perustuessa samaan kymmenkantaiseen järjestelmään, voidaan näiden eri luokkien välille saada yhteys. Viimeisimmässä E-revisiossa luokittelu muutettiin perustumaan metriseen järjestelmään, jossa luokka lasketaan perustuen 0,5 µm halkaisijan ja suurempien partikkelien määrän 1000-kantaiseen logaritmiin yhdessä kuutiometrissä. ISO 14644:n ja FED-STD-209:n välinen yhteys on esitetty taulukossa 2. Kolmas yleinen luokitusjärjestelmä on EudraLex:n GMP-luokitukset. EudraLex on Euroopan Unionin lääketuotteita koskeva laki- ja säädöskokoelma. EudraLex määrittelee muun muassa lääkkeiden valmistukseen liittyvät hyvät tuotantotavat GMP-ohjeissa (Good Manufacturing Process), sekä antaa ohjeita niiden toteuttamiseen. Ohjeissa annetaan käytettäväksi neljä puhdastilaluokkaa, joita merkitään A-D, joista A on puhtain (EudraLex 2008). Luokille on annettu erikseen rajat lepotilassa sekä toiminnassa. Luokitukset on suunniteltu yhdessä ISO 14644:n kanssa ja luokkien väliset yhteydet on esitetty taulukossa 2. Huomattavaa on kuitenkin, että ISO 14644:n uudistuttua 2015 vaativat luokkien A ja B erottaminen lisämäärittelyjä. Uudistuksen myötä ISO-luokalta 5 poistu vaatimus 5 µm partikkelipitoisuudesta, joka oli 29 ja vastasi GMP-luokkaa B. GMP-luokalle A vastaava raja on 20 partikkelia. ISO-luokka 5 vaatii siis lisämäärittelynä M-termin, jos sen avulla määritellään GMP-luokkia A tai B. On olemassa myös muita alueellisia GMP-tyyppisiä säädöksiä, esimerkiksi USA:ssa käytetty FDA:n (Food and Drug Administration) määrittelemä cGMP (current Good Manufacturing Process).

Taulukko 2. Puhdastilaluokitusten väliset yhteydet

ISO-luokka	FED-STD-209 A-D	FED-STD-209 E	GMP lepotilassa	GMP toiminnassa
1				
2				
3	1	M 1.5		
4	10	M 2.5		
5	100	M 3.5	A/B	A
6	1 000	M 4.5		
7	10 000	M 5.5	C	B
8	100 000	M 6.5	D	C
9				

GMP-ohjeissa annetaan myös suositellut raja-arvot mikrobipohjaiselle puhtaudelle pesäkkeen muodostavien yksikköjen, eli CFU:n (Colony Forming Unit), määrän mukaan mitattuna. Näiden pitoisuuksien mittaaminen ja rajoittaminen on tärkeää erityisesti tiloissa, joissa suoritetaan aseptisia operaatioita. Mikrobipuhtausrajat eri GMP-luokille on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Mikrobipuhtausuositukset GMP-luokituksille (EudraLex 2008)

Luokka	Ilma-näyte cfu/m ³	Laskeumamalja, halkaisija 90 mm, cfu/4 h	Kosketuslevy, halkaisija 55 mm, cfu/levy	Käsinejälki, 5 sornea, cfu/käsine
A	< 1	< 1	< 1	< 1
B	10	5	5	5
C	100	50	25	-
D	200	100	50	-

Puhdastilastandardi mahdollistaa puhtauden määrittelyn myös muuten kuin ilman hiukkaspitoisuuden avulla. Standardin osassa ISO 14644-8 (2013) puhtausluokkamäärittelyt tehdään perustuen erilaisten kemikaalien pitoisuuteen ilmassa. Luokassa määritellään kemikaali tai kemikaaliryhmä, jonka massapitoisuudelle yhdessä kuutiometrissä grammoina annetaan raja-arvo ja luokan numero perustuu tämän pitoisuuden kymmenpotenssimuodon potenssin arvoon. Käytännössä luokat ovat miinusmerkkisiä. Osassa ISO 14644-9 (2013) määritellään puhtausluokat pintojen puhtaudelle. Luokkien määrittely perustuu samaan periaatteeseen kuin ilman hiukkaspitoisuuden avulla luokkia määriteltessä, kuitenkin sillä erolla, että pintapuhtausluokissa tutkitaan hiukkaskokoja laajemmin, kokoluokissa 0,05 – 500 µm. Pintapuhtaus voidaan määrittellä myös kemikaalipitoisuuden avulla vastaavasti kuin ilmalle, jolloin pitoisuutta kuitenkin mitataan yhdelle neliölle.

2.2 Epäpuhtaus

Määritellesä puhdastilalle haitallista epäpuhtautta on huomioitava useita asioita. Epäpuhtaus ja sen haitallisuus riippuvat ensisijaisesti puhdastilan käytöstä ja yleisen kaikkia puhdastiloja koskevan epäpuhtauden määrittely ei ole mielekäästä. Esimerkiksi elektroiikkateollisuudessa haitallinen epäpuhtaus voi olla hyvinkin pieni kiinteä partikkeli, lääkeketeollisuudessa epäpuhtaus voi olla valmistuksessa syntyvä kaasumainen tai jauhemainen päästö, jonka päätyminen toiseen valmistettavaan lääketuotteeseen, eli ristikontaminaatio, on estettävä ja sairaanhoidossa epäpuhtaus voi olla ilmaitse leviävä bakteri. Jossain tapauksissa epäpuhtaus pyritään pitämään päinvastaisesti nimenomaan puhdastilan sisällä, esimerkiksi kun tilassa käsitellään terveydelle vaarallisia aineita tai mikrobeja. Eri epäpuhtauksien syntymekanismit ja tavat päätyä puhdastilaan poikkeavat siis paljon toisistaan, joten myös niiden hallintatavat eroavat paljon. Toisaalta ei ole myöskään järkevää pyrkiä turhaan rajoittamaan ja hallitsemaan puhdastilan käytössä ei-haitallisia epäpuhtauksia. Esimerkiksi kaasumaisten aerosolien suodattaminen ja poistaminen tilasta on monesti hankalampaan kuin kiinteiden partikkelien. On siis tunnettava puhdastilassa suoritettavat prosessit sekä niihin vaikuttavien epäpuhtauksien luonne, kun määritellään minikäläista epäpuhtautta puhdastilassa tulisi hallita.

2.2.1 Epäpuhtauden määrittely

ISO-luokituksissa keskeisin huomio on epäpuhtauspartikkelien koossa ja kokojakoumassa. Epäpuhtauden tutkiminen ilman mukana kulkeutuvina pieninä hiukkasina on yleisin tapa määritellä tilan puhtautta, sillä ilman hiukkaspitoisuus on mitattavissa ja näin ilmalle saadaan numeerinen arvo kuvaamaan sen puhtautta. Hiukkasen koostumukseen standardi ei ota kantaa, joten se voi olla mikä tahansa kiinteä tai nestemäinen partikkeli, kuten pölyhiukkanen, kuitu tai hius. Tutkittavat hiukkaskoot ovat esitetty edellä taulukossa 1. Hiukkaskoon SFS-EN ISO 14644-1 määrittelee olevan ” sellaisen pallon halkaisija, joka aikaansaa vasteen hiukkaslaskurilla ja joka on ekvivalenttinen mitattavan hiukkasen aikaansaamaan vasteeseen”.

Epäpuhtauksia voidaan luokitella myös monella muulla tavalla hiukkaskoon lisäksi. Partikkeli voi olla esimerkiksi elollinen tai eloton, joista erityisesti elolliset partikkelit voivat olla hyvin haitallisia niiden lisääntymiskyvyn takia. Tällöin pelkkä epäpuhtauden läsnäolo tuo kasvavan epäpuhtauskuorman puhdastilaan. Luokitus voi perustua myös epäpuhtauden alkuperään. Epäpuhtaus voi olla peräisin esimerkiksi tilan ulkopuolelta ja päätyä tilaan ilmanvaihdon tai vuotoilman mukana, tilan laitteista tai tilassa tapahtuvasta valmistuksesta tai epäpuhtaus voi syntyä tilaa käyttävistä ihmisistä.

2.2.2 Epäpuhtaushiukkasten käyttäytyminen ilmassa

Puhdastilastandardissa käsiteltyihin μm -kokoluokan hiukkasiin liittyy tärkeänä ominaisuutena laskeutumisenopeus. Pienellä hiukkasella on vastaavasti myös pieni massa, jolloin siihen vaikuttava gravitaatiovoima on myös pieni. Tällöin ilman aiheuttama kitkavastus suhteessa gravitaatiovoimaan on suuri, ja hiukkasella kestää kauan laskeutua. Pienimmillä partikkeleilla myös Brownin liike on merkittävässä roolissa tutkittaessa niiden käyttäytymistä. Brownin liikkeessä hiukkaseen vaikuttaa ympäröivien atomien lämpöliikkeestä aiheutuvia törmäysimpulseja, jotka saavat hiukkasen liikkumaan näennäisen satunnaisesti. Brownin liikkeen vaikutuksesta pienimmät hiukkaset eivät välttämättä koskaan laskeudu tilan lattialle tai pinnoille.

Pienen partikkelin liikettä voidaan kuvata Stokesin lailla

$$F_D = 3\pi\eta V d_p \quad (1)$$

jossa F_D on partikkeliin vaikuttava kitkavoima, η on dynaaminen viskositeetti, V on partikkelin nopeus ja d_p partikkelin halkaisija. Stokesin laissa on oletettu virtausaineen olevan kokoonpuristumaton, partikkelin olevan kaukana seinästä, liikkeen olevan tasaista, partikkelin olevan pallo ja virtausnopeuden olevan nolla partikkelin pinnalla. Laskeutumisenopeus saadaan, kun Stokesin lain kitkavoima ja hiukkaseen vaikuttava noste ovat yhtä suuret kuin gravitaatiovoima, eli

$$F_g = mg = \frac{\pi d_p^3}{6} \rho_k g \quad (2)$$

$$F_B = \frac{\pi d_p^3}{6} \rho_k g \quad (3)$$

$$F_D + F_B = F_g \quad (4)$$

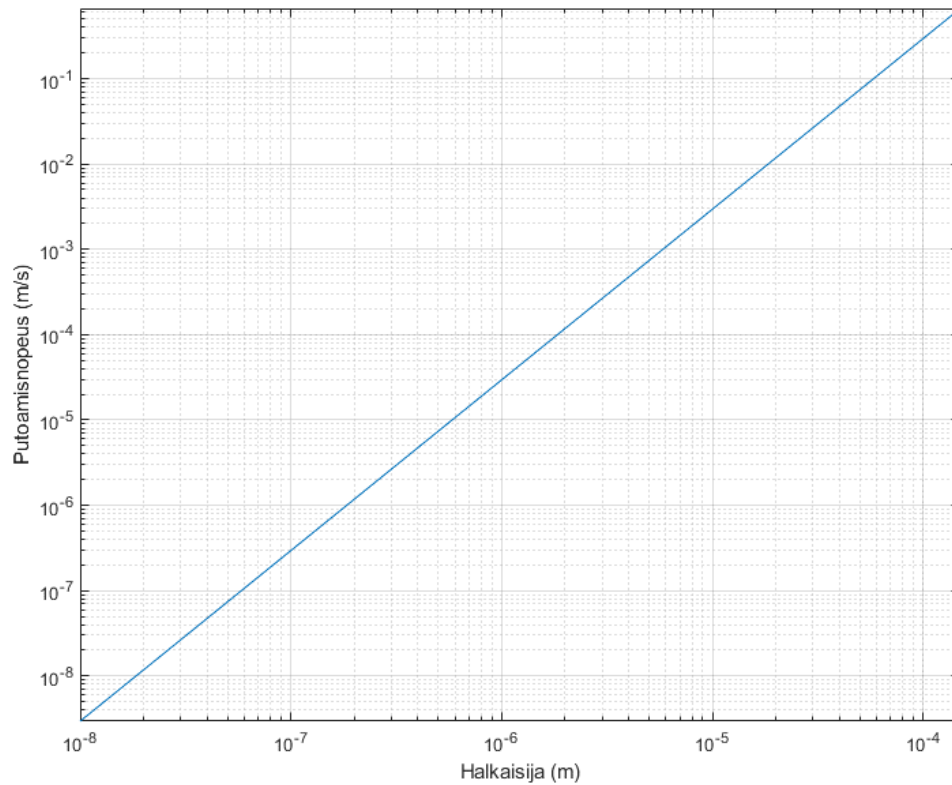
joissa F_g on gravitaatiovoima, g putoamiskiihtyvyyys, m partikkelin massa, ρ_p partikkelin tiheys ja ρ_k ympäröivän kaasun tiheys. Sijoitusten jälkeen saadaan

$$3\pi\eta V d_p = \frac{(\rho_p - \rho_k)\pi d_p^3 g}{6} \quad (5)$$

josta partikkelin laskeutumisenopeudeksi saadaan

$$V_L = \frac{\rho_p d_p^2 g}{18\eta} \quad (6)$$

Koska ympäröivän kaasun tiheys on tyypillisesti huomattavasti partikkelin tiheyttä pienempi, se on jätetty huomioimatta kaavassa (6) (Dixon 2007, s. 11). Kuvassa 1 on laskeutumisenopeus hiukkasen halkaisijan funktiona, kun hiukkasen tiheys on 1000 kg/m^3



Kuva 1. Hiukkasen ($\rho=1000 \text{ kg/m}^3$) putoamisnopeus halkaisijan funktiona

Kuvasta 1 nähdään syy, miksi standardeissa tutkitaan juuri kokoluokan $5 - 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ hiukkasia. Näiden hiukkasten saavuttama putoamisnopeus on pieni, alle $0,1 \text{ cm/s}$, joka mahdollistaa niiden kertymisen ilmaan. Suuremmat hiukkaset putoavat nopeammin ja näin niitä ei merkittävästi ehdi kertyä puhdistilan ilmaan, vaan ne laskeutuvat nopeasti vaakapinnoille. On siis perusteltua kiinnittää erityistä huomiota juuri alle $5 \text{ }\mu\text{m}$ halkaisijan hiukkasiin, sillä hitaasti laskeutuvien hiukkasten pitoisuuden voidaan olettaa olevan huomattavasti korkeampi suhteessa suurempiin hiukkasiin. Käytännössä puhdistiloissa ei kuitenkaan vallitse Stokesin lain oletus virtaamattomasta ilmasta, vaan tiloissa on aina tehokas ilmanvaihto, joka nopeuttaa hiukkasten laskeutumista. Stokesin laki kuitenkin mahdollistaa esimerkiksi vertailuhalkaisijoiden määrittämisen todellisille partikkeleille niiden laskeutumisaikojen perusteella.

2.2.3 Epäpuhtaushiukkasiin vaikuttavat adheesivoimat

Epäpuhtaushiukkasten μm -kokoluokassa on huomioitava useita normaalisti merkityksetömiä voimia, etenkin tutkittaessa epäpuhtaushiukkasten kertymiseen vaikuttavia adheesivoimia. Pienten hiukkasten käyttäytyminen lähestyy molekyylien käyttäytymistä, jo-

ten erityisesti hiukkasten sähköiset ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi niiden käyttäytymiseen. Merkittäviä adheesiovoimia ovat Van der Waalsin voima, sähkömagneettinen vuorovaikutus, kapillaarivoimat ja kemialliset reaktiot (Welker et al. 2006, s. 3-9).

Van der Waalsin voimat syntyvät kappaleiden lähestyessä toisiaan ja toisen kappaleen elektronitiheyden satunnaisesti vaihdellessa niin, että kappaleeseen syntyy paikallinen elektronikeskittymä. Tällöin kappaleiden samanmerkkiset sähkövaraukset hylkivät ja erimerkkiset varaukset vetävät toisiaan puoleensa. Jos myös toisen kappaleen elektronit pääsevät liikkumaan helposti, syntyy tällöin paikalliset varauskeskittymät, jotka lisäävät hiukkasten välistä vetovoimaa. Kappaleiden yhä lähestyessä alkavat samanmerkkisten varauksien hylkivä voima kumota paikallisten varauskeskittymien aikaansaaman vetovoiman, kunnes nämä voimat ovat tasapainossa. Van der Waalsin voimat ovat heikoimpia epäpuhtauksia pintoihin sitovista voimista, mutta erityisesti helposti muotoaan muuttavien materiaalien kanssa ne on kuitenkin huomioitava. Voiman suuruus riippuu suoraan sen aikaansaamien pintojen alasta, joten joustavien materiaalien, kuten esimerkiksi elastomeerien kanssa van der Waalsin voimat voivat vaikuttaa huomattavasti materiaalien puhdistettavuuteen. Van der Waalsin voima pallon ja pinnan välillä määritellään kaavalla

$$F_{VdW} = \frac{Ad}{12x^2} \quad (7)$$

jossa A on materiaaleista riippuva Hamakerin vakio, d pallomaisen partikkelin halkaisija ja x partikkelin ja pinnan etäisyys. Huomattavaa on, ettei partikkeli ja pinta voi olla täysin kiinni toisissaan, eli x :n arvo on aina suurempi kuin 0.

Toinen epäpuhtaushiukkasiin vaikuttava voima on sähkömagneettinen vuorovaikutus, joka vaikuttaa erityisesti tilanteissa, joissa epäpuhtaushiukkanen on sähköisesti varautunut ja pinta on eristävä. Pinta voi olla joko varautunut tai varaukseltaan neutraali. Neutraalin pinnan tapauksessa tapahtuu vastaava ilmiö kuin van der Waalsin voimassa, jossa partikkelin sähkövaraus saa aikaan pintaan paikallisen varauskeskittymän ja näin vetää partikkelin puoleensa. Sähköisesti varautunut pinta ei kuitenkaan merkittävästi vedä neutraalia partikkeliä puoleensa, tosin epäpuhtaupartikkelit harvoin ovat varaukseltaan neutraaleja (Welker et al. 2006, s. 5). Sähkömagneettisen vuorovaikutuksen aikaansaama partikkeliä pintaan kiinnivä voima määritellään

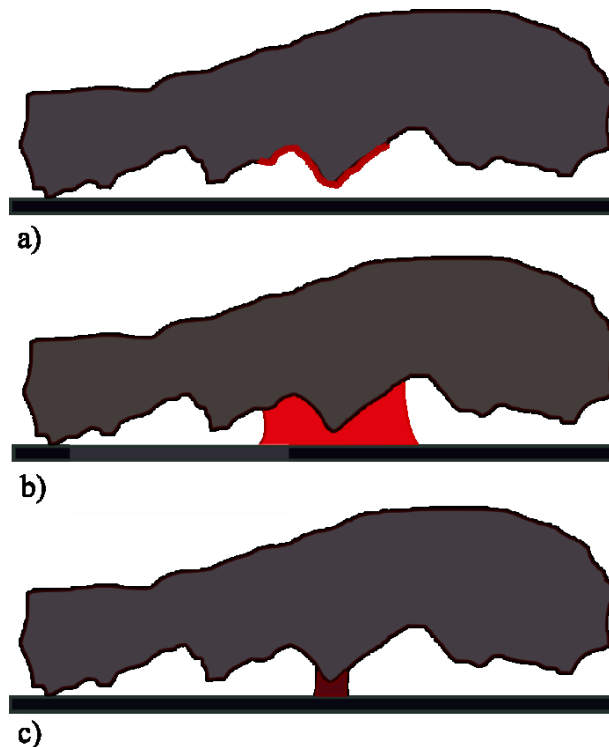
$$F_{Sm} = \frac{K_E Q^2}{d^2} \quad (8)$$

jossa K_E on Coulombin vakio $9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$, Q on partikkelin varaus Coulombeina ja d partikkelin halkaisija. Pintaan muodostuva sähkövaraus saa aikaan sähkökentän, joka edelleen kiihdyttää varautuneiden partikkelien kertymistä, joten sähkömagneettisen voima on itseään kiihdyttävä epäpuhtauskertymämekanismi. Epäpuhtauskertymän lisäksi syntynyt sähkövaraus voi aiheuttaa myös sähköstaattisen purkauksen. Sähköstaattisen purkauksen haitallisuus riippuu puhdistilan käytöstä, mutta etenkin puolijohdteollisuudessa sähköstaattinen purkaus voi olla hyvin haitallinen tuhoten komponentteja.

Jos epäpuhtauspartikkelin ja pinnan väliin pääsee nestettä, voi kontaktipisteeseen syntyä nesteen muodostama kapillaarinen silta. Syntyvä kapillaari vaikuttaa partikkelin adheesioon monella tavalla. Ensinnäkin kapillaarin synnyttämä meniskus lisää partikkelin ja pinnan välistä kontaktipinta-alaa ja näin kasvattaa näiden välistä van der Waalsin voimaa. Meniskus vetää lisäksi partikkeliä kiinni pintaan pintajännityksen ja alenevan paineen vaikutuksesta. Näitä kahta voimaa voidaan kuvata kaavalla

$$F_m = 2\pi d\gamma_{LV} \sin \alpha_n \sin(\alpha_m + \alpha_n) + 2\pi d\gamma_{LV} \cos \alpha_m \quad (9)$$

jossa γ_{LV} on pintajännityksen suuruus (J/m^2), α_n kulma pinnan normaalin ja meniskuksen partikkelin kosketuspisteen välillä ja α_m on meniskuksen kosketuskulma partikkeliin. Kaavan ensimmäinen termi kuvaa pintajännityksen aiheuttamaa voimaa ja toinen termi kapillaarisen paineen voimaa. Kulma α on usein pieni, joten ensimmäisen termin vaikutus on vähäinen (Ranade 1987). Kapillaarin vaikutuksesta partikkelin ja pinnan välille voi syntyä myös kiinteä sidos. Jos epäpuhtauspartikkeli tai sen pinnalle oleva kemikaali liukenee kapillaarin muodostavaan nesteeseen, voi nesteen haihtuessa siihen liuennut aine muodostaa vahvan kiinteän sidoksen partikkelin ja pinnan välille. Kuvassa 2 on havainnollistettu tämä kiinteän sidoksen muodostumista.



Kuva 2. Kapillaarin muodostama sidos partikkelin ja pinnan välillä: a) partikkelin pinnassa on liukenevaa ainetta, b) aine liukenee meniskukseen, c) meniskuksen muodostanut liuotin haihtuu, perustuu lähteeseen (Welker et al. 2006, s. 9)

Kemiallisesti syntyvien adheesiovoimien arviointia varten on tunnettava tilan epäpuhtaudet ja tilassa käytetyt materiaalit hyvin. Lisäksi myös tilan puhdistuksessa käytettyjen kemikaalien vaikutus kemiallisten sidosten syntymiseen ja purkautumiseen on ymmärrettävä. Mahdollisia reaktiota on vaikea kuvata kattavasti, joten ne on arvioitava tapauskohtaisesti, mutta esimerkiksi happo-emäs -reaktiot ovat usein merkittäviä adheesiovoimien aiheuttajia, erityisesti polymeeripinnoilla. Jotkin kemialliset sidokset voivat olla hyvin vahvoja, joihin tyypilliset puhdistustoimet eivät tehoa. Etenkin näissä tilanteissa on tunnettava tilan epäpuhtauksien kemiallinen toiminta, jotta löydetään puhdistusaine, jolla syntyneet sidokset pystytään purkamaan.

2.3 Epäpuhtauslähteet

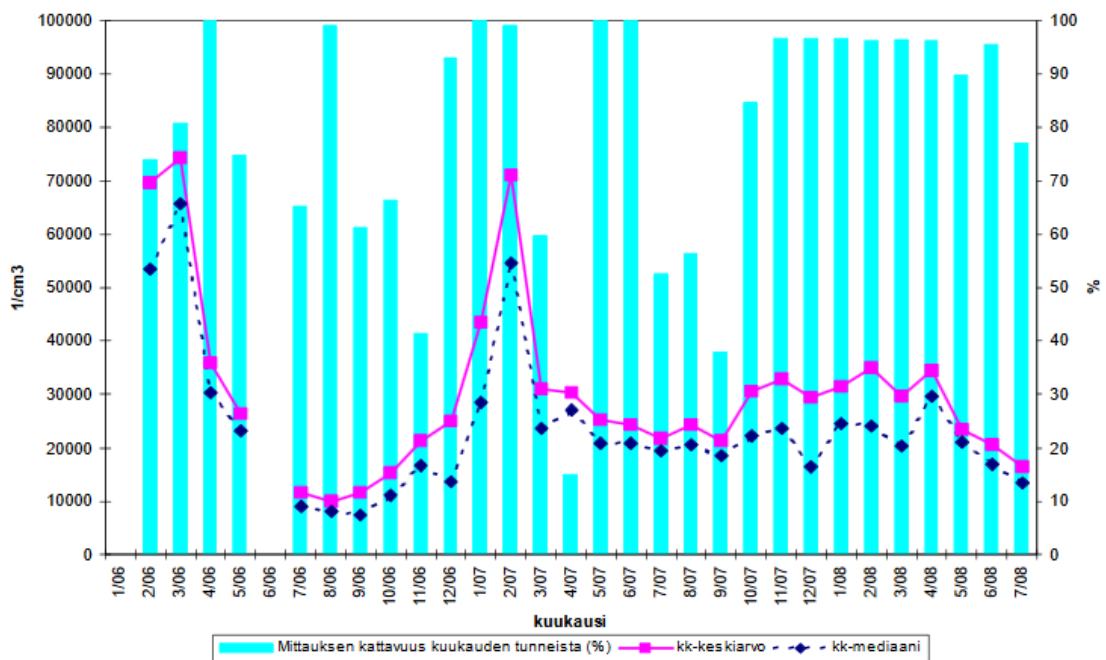
Epäpuhtaus voi päätyä puhdistilaan pääasiassa kahdella tavalla, joko kulkeutumalla puhdistilan ulkopuolelta tai syntymällä sen sisällä. Ulkopuolelta tulevia epäpuhtauksia pystytään rajoittamaan useilla verraten yksinkertaisilla passiivisilla toimenpiteillä, kuten tehokkaalla ilmanvaihdolla ja oikeilla painesuhteilla ja nämä ovat usein ensisijaisia toimenpiteitä alempien luokkien puhdistiloissa. Tilassa syntyvien epäpuhtauksien, kuten laitteiden ja tilan käyttäjien synnyttämät epäpuhtaudet, ovat vaikeammin hallittavissa ja vaativat yleensä aktiivisia toimia käyttäjiltä. Tällöin käyttäjille on järjestettävä kattava opastus tilan oikeaan käyttöön, joten näitä toimia sovelletaan usein vasta pyrittäessä korkeimpiin puhtausluokkiin.

2.3.1 Ulkoilma

Merkittävin ja helpoiten hallittava epäpuhtauslähde on puhdistilan ilmanvaihtoon käytetty ulkoilma. Käytännössä kaikki puhdistilaan tuotu ilma on peräisin rakennuksen ulkopuolelta. Yksi ensimmäisiä keinoja hallita tilan puhtautta, ennen tehokkaan ilmansuodatuksen keksimistä, olikin sijoittaa puhtautta vaativa tila kauas kaupungin keskusta, jolloin ulkoilma sisälsi vähemmän epäpuhtauslähteitä ja näin myös itse tila pysyi puhtaampana. Nykyisin lähes kaikki ilmanvaihtojärjestelmät sisältävät ilmansuodatuksen, jonka avulla myös kaupunki-ilmasta saadaan tehokkaasti poistettua epäpuhtauksia. Tyypillisen ilmanvaihtokoneen ilmansuodatin ei kuitenkaan poista pienimpiä hiukkasia, mutta myöhemmin esitellyt HEPA ja ULPA -suodattimet (Ultra Low Particulate Air) poistavat erittäin tehokkaasti myös pienimpiä, puhdistiloissa haitallisia hiukkasia. Puhdistilaan tuotavan suodatetun ilman puhtaus asettaa perustason tilan puhtaudelle, sillä tilan ilman partikkelipitoisuus voi olla enintään samalla tasolla kuin sinne tuotavan ilman pitoisuus.

Ulkoilman laatua ja erityisesti sen hengitettävien hiukkasten PM_{10} ($< 10 \mu m$), pienhiukkasten $PM_{2.5}$ ($< 2,5 \mu m$) ja ultrapientien hiukkasten ($< 0,1 \mu m$) pitoisuuksia on tutkittu paljon ja näitä pitoisuuksia myös seurataan jatkuvasti. Syynä tähän on näiden hiukkasten

haitallisuus terveydelle. Pienimmät $PM_{2.5}$ luokan hiukkaset kulkeutuvat syvälle hengityselimistöön ja ultrapienet hiukkaset voivat päästä aina verenkiertoon asti aiheuttaen erilaisia oireilua, hengitystieinfektioita ja sydän- ja verisuonitauteja. Nämä partikkelit, etenkin $PM_{2.5}$ kokoluokassa, ovat pääasiassa palamisreaktioiden tuotteita, kuten liikenteen polttomoottoreista, puun ja hiilen poltosta ja erilaisista teollisuusprosesseista (Pope & Dockery 2006). $PM_{2.5}$ ja PM_{10} hiukkasten sijoittuessa samaan kokoluokkaan kuin puhdistilaluokituksissa tutkittavat hiukkaset, voidaan aiheesta tehtyjä tutkimuksia hyödyntää arvioidessa ulkoilman sisältämiä puhdistiloissa haitallisia hiukkasia. Ulkoilman hiukkaspitoisuuksista löytyy reilusti tutkimuksia, esimerkiksi Aalto *et al.* ja Puustinen *et al.* (Aalto *et al.* 2005; Puustinen *et al.* 2007) ovat tutkineet hiukkaspitoisuuksia eri eurooppalaisissa kaupungeissa useiden vuosien jaksossa. Molemmissa tutkimuksissa esimerkiksi Helsingin keskimääräiseksi hiukkaspitoisuudeksi on saatu noin 12 000 hiukkasta kuutiosenttimetrissä. Lisäksi esimerkiksi Tampereen kaupungin toimesta on suoritettu pienhiukkaspitoisuusmittauksia (Hiili-Lukkarinen 2009). Kuvassa 3 on esitetty näiden mittausten tuloksia.



Kuva 3. Pienhiukkaspitoisuusmittaustuloksia Tampereella 1/2006 – 7/2008 (Hiili-Lukkarinen 2009)

Pitoisuudet vaihtelevat paljon kellonajan, viikonpäivän ja kuukauden mukaan. Pitoisuus-
huippuihin vaikuttaa erityisesti liikennemäärät, viikoittaisten huippujen ollessa arkipäivinä päiväaikaan. Lisäksi vuodenajalla on suuri merkitys, vuotuisten huippujen ollessa talvikuukausina, jonka on selitetty aiheutuvan muun muassa lämmitysenergian tuotosta erilaisten polttoprosessien kautta sekä liikenteen nastarenkaiden nostamalla hiekoituspö-

lyllä. Matalimmat pitoisuudet on mitattu kesäisin. Kaikkia vaihteluja ei pystytä selittämään paikallisilla tekijöillä, vaan myös hiukkasten kaukokulkeumalla on monesti suuri vaikutus paikallisiin pitoisuuksiin. Kuten luvussa 2.2.2 on esitetty, pysyvät pienimmät hiukkaset ilmassa pitkiä aikoja ja voivat näin kulkeutua kymmeniä ja jopa satoja kilometrejä ilmassa mukana. Tutkimuksissa hiukkasmääriä on mitattu aina äärimmäisen pieniin, kokoluokan 7 nm (0,007 μm), hiukkasiin asti, joten tulokset sisältävät myös paljon myös puhdistilaluokituksissa käytettyjä kokoluokkia pienempiä hiukkasia. Tulokset antavat kuitenkin vertailukohdan ulkoilman pitoisuuksien ja puhdistiloilta vaadittujen pitoisuuksien välille. Esimerkiksi ISO-luokan 6 puhdistilassa 0,1 μm ja suurempien partikkelien sallittu määrä kuutiometrissä on 1 000 000, joka on 1/12 000-osa tutkimuksissa mitatuista ulkoilman hiukkasmääristä.

Ulkoilman hiukkaspitoisuuksien lisäksi on tutkittu paljon vastaavia sisäilman pitoisuuksia sekä erityisesti ulkoilman ja sisäilman pitoisuuksien suhdetta. Chen ja Zhao (2011) ovat keränneet usean sisäilmantutkimuksen aineistosta katsauksen tutkimuksissa saatuihin hiukkaspitoisuuksien suhteeseen. Tutkimuksissa on keskitytty asuinrakennuksiin, mutta tuloksia voidaan pitää suuntaa-antavina tyypillisen ilmanvaihdon kyvystä suodattaa pienhiukkasia. Useissa tutkimuksissa hiukkaspitoisuuksien suhteen on havaittu olevan lähellä yhtä ja joissain tapauksissa sisäilman pitoisuus on ollut jopa korkeampi kuin ulkoilman, etenkin pienimmillä < 2,5 μm hiukkasilla. Nämä tulokset kertovat tyypillisen ilmanvaihtokoneen huonosta kyvystä suodattaa pienempiä hiukkasia ilmapirrasta, sekä pienhiukkasten kyvystä päästä rakennukseen helposti vuotoilmavirtojen mukana rakenteiden läpi ja toisaalta edelleen korostavat puhdistilojen erillisen ja tehokkaan ilman-suodatuksen sekä rakenteiden tiiveyden tärkeyttä.

2.3.2 Ihmiset

Tyypillisessä puhdistilassa tilaa käyttävät ihmiset ovat usein suurin epäpuhtauslähde. Ihmiset sekä kuljettavat mukanaan vaatteissa ja kengissä likaa ja erilaisia mikrobeja sekä tuottavat jatkuvasti epäpuhtauksia esimerkiksi ihon hilseilyn, irtoavien hiusten ja hikoilun kautta. Myös ihon pinnalla olevat rasvat, öljyt ja erilaiset kosmetiikkatuotteet ovat epäpuhtausriski sekä puhuessa ilmaan pisaroituva sylki. Iho on lisäksi luonnollinen alusta erilaisille mikrobeille. Partikkelien lisäksi niiden kemiallinen koostumus voi olla riski puhdistilassa. Ihmisperäisiä kemikaaleja on esimerkiksi kalium, kloridi, kalsium, magnesium ja natrium.

Ihon ja hiusten tarkoituksena on kehon suojeleminen ulkoisia haittatekijöitä vastaan, kuten mekaanista kulutusta, mikrobeja lämpöä ja kylmää, joka edellyttää ihon ja hiusten jatkuvaa kasvamista ja uusiutumista. Ihon uloimmassa kerroksessa, orvaskedessä, ihosolut elävät noin kuukauden, jonka jälkeen solut irtoavat mekaanisen kulutuksen ja hilseilyn kautta, joka on edellytyksenä ihon tehokkaalle suojaamistoiminnalle. Vuodessa ihminen tuottaa noin 2 kg ihosoluja, yhden solun ollessa keskimäärin kokoluokkaa 35-50

µm. Irtoavien ihosolujen mukana kulkeutuu myös ihon pinnan bakteeristoa, joka voi aiheuttaa ongelmia erityisesti lääketieteellisissä puhdastiloissa. Vastaavasti myös hiukset kuluvat jatkuvasti. Vaikka yksittäinen hius, kokoluokaltaan 60-80 µm, ei ole erityisen haitallinen puhdastilassa, tuottaa hius myös jatkuvasti paljon pienempiä partikkeleita. Aina hiusta koskettaessa, esimerkiksi kammatessa, tapahtuu hiuksen pintakerroksessa pieniä murtumia. Murtumien seurauksena syntyy kokoluokan 0,5 µm partikkeleita, jotka puolestaan ovat hyvin haitallisia puhdastiloissa. Jatkuvan hiukkastuoton lisäksi ihosolut ja hiukset ovat ongelmallisia puhdastiloissa siksi, että ihosolut ovat kehittyneet täyttämään niiltä vaaditun suojaustoiminnan mahdollisimman hyvin, eli ne kestävät myös hyvin erilaisia puhdistustoimenpiteitä. Jos ihosoluja yritetään poistaa mekaanisella hankauksella, on lisäksi riskinä solun rikkoutuminen ja soluliman pääsemisen pinnalle. Myös solulimaa on hankala poistaa mekaanisella hankauksella. Solulima sisältää lisäksi erilaisia ionisoituneita yhdisteitä, jotka edistävät korroosiota. Ihon ja hiusten pinnassa on myös kehon tuottamia öljyjä ja hikeä, jotka voivat aiheuttaa kemiallista epäpuhtautta. Yleisiä hien sisältämiä kemikaaleja ovat kloridi, kalium ja natrium. (Welker et al. 2006, s. 410-414)

Ihon ja hiusten lisäksi ihmisten käyttämä vaatetus, tupakointi ja kosmetiikkatuotteet ovat myös merkittävä hiukkaslähte. Vaatteissa tyypillisesti käytettävät kuidut ovat lyhyitä ja heikkoja, jonka seurauksena yksittäiset kuidut irtoavat helposti hankauksen seurauksena. Samalla myös kuituihin mahdollisesti kiinnittyneet pienemmät hiukkaset pääsevät puhdastilaan. Myös korujen ja kellojen käyttöä, erityisesti näkyvillä olevien, tulisi välttää. Useat kosmetiikkatuotteet sisältävät yhdessä käyttömäärässä satoja miljoonia, jopa miljardeja yli 0,5 µm halkaisijaisia partikkeleita. Kosmetiikkatuotteet ovat myös mahdollisia lähteitä erilaisille kemikaaleille, kuten raudalle, natriumille, kaliumille, silikonille ja lanoliinille. Toisaalta kosteuttavien voiteiden on havaittu vähentävän ihon hilseilyn kautta tapahtuvaa ihosoluhiukkasten vapautumista, sillä voiteiden muodostama kerros sitoo irtoavia ihosoluja tehokkaasti kiinni ihon pintaan. Tupakointi kasvattaa lisäksi merkittävästi uloshengityksen hiukkaspitoisuutta, erityisesti juuri tupakoinnin jälkeen. Korkeaa puhtautta tavoitellessa voi olla tarpeen vaatia, ettei puhdastilakäyttäjä ole tupakoinut useaan tuntiin ennen puhdastilaan saapumista. (Welker et al. 2006, s. 415-417)

Vaikka ihmisten tuottamien epäpuhtaushiukkasten merkitystä usein korostetaan, on varsinaisia ihmisten tuottamia hiukkasmääriä tutkittu vähän. Käytetyin lähde ihmisperäisiä epäpuhtauksia määriteltessä on edelleen 60-luvulla julkaistu Austin Contamination Index (Austin & Timmerman 1965, Ramstrop et al. 2005 mukaan). Tutkielmassaan Austin ja Timmerman antavat arvioita ihmisen tuottamille > 0,3 µm partikkeleille erilaisissa vaateuksissa ja erilaisissa liiketiloissa. Nämä arvot on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Ihmisen tuottamat $> 0,3 \mu\text{m}$ hiukkaset minuutissa (Austin contamination index)

Toiminta	Takki	Haalari	Tyvekhaalari	Membraanihaalari
Istuminen, seisominen	100 000	10 000	1 000	10
Kevyt liike	500 000	50 000	5 000	50
Runsas liike	1 000 000	100 000	10 000	100
Istuutuminen, seisomaan nousu	2 500 000	250 000	25 000	250
Kävely 0,9 m/s	5 000 000	500 000	50 000	500
Kävely 1,6 m/s	7 500 000	750 000	75 000	750
Kävely 2,2 m/s	10 000 000	1 000 000	100 000	1 000

Austinin ja Timmermanin mittausmenetelmiä ei kuitenkaan tunneta ja annetut tulokset ovat mittausdataan perustuvia keskimääräisiä arvioita. Lisäksi puhdistilatekniikka on kehittynyt paljon 60-luvun jälkeen. Tältä pohjalta ihmisen hiukkastuottoa ja puhdistilavaatetuksen vaikutusta hiukkastuottoon ovat myöhemmin tutkineet Ramstorp *et al.* (2005). Tutkimuksessaan Ramstorp *et al.* pyrkivät kehittämään toistettavissa olevan mittausmenetelmän ja tuloksia tutkimuksessa annettiin vain yhden henkilön mittauksista. Nämä tulokset ovat esitetty taulukossa 5. Myös VTT on suorittanut hiukkaspäästömittauksia ihmisestä osana sairaaloiden korkean hygienian hallinnan tutkimushanketta (Enbom *et al.* 2012). Enbom *et al.* mittaukset on suoritettu body box -menetelmällä ja tulokset on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 5. Ramstorp *et al.* suorittamat hiukkaspäästömittaukset ihmisestä (kpl/min)

Toiminta	Alusasu	Puhdistilavaate	Suhde
Paikoillaan istuen	40 000	40 000	1
Istuen, käsiliikkeitä	90 000	70 000	1,3
Istuen, vartaloa liikuttaen	140 000	60 000	2,0
Kävellen	400 000	180 000	2,2

Ramstorp *et al.* tulokset poikkeavat jonkun Austinin ja Timmermanin tuloksista. Ositain tämä johtuu eri mittausalueesta, joka oli Ramstorp *et al.* mittauksista $> 0,53 \mu\text{m}$, mittausten eri menetelmistä ja Ramstorp *et al.* mittausten suppeasta määrästä.

Taulukko 6. *Body box -menetelmällä mitatut hiukkaspäästöt ihmisestä ja asusta (kpl/s)*

Asu	0,3 – 10 µm	3 – 10 µm
T-paita (CO -neulos) ja farkut (CO -kangas), hiukset kiinnit	70 028	9 084
Työasu A, monikäyttö, PES -mikrokuitukangas, hiukset kiinni	40 260	2 035
Työasu A, monikäyttö, PES -mikrokuitukangas, hius- ja suusuoja	14 999	1 208
Työasu A, monikäyttö, PES -mikrokuitukangas, hius-, kaula- ja suusuoja	10 851	2 078
Työasu B, monikäyttö, PES/CO -sekoitekangas, hius- ja suusuoja	26 408	2 511
Vilutakki, kertakäyttö (+työasu A, hius- ja suusuoja)	18 659	1 967

Myös Enbom *et al.* suorittamat mittaukset poikkeavat hieman muista. Tulokset antavat kuitenkin kuvan ihmisten tuottamista epäpuhtauspäästöistä ja Enbom *et al.* tuloksista myös nähdään hiukkaskokojen painottuvan pienempiin, alle 3 µm hiukkasiin. Esimerkiksi paikoillaan istuva vähäisesti suojattu henkilö tuottaa noin minuutissa ISO-luokka 6:ssa sallitun maksimimäärän partikkeleita yhdessä kuutiometrissä. Tämä toisaalta korostaa tehokkaan ilmanvaihdon tärkeyttä puhdastiloissa ja toisaalta tehokkaan puhdastilavaatetuksen tärkeyttä

2.3.3 Laitteet ja materiaalit

Puhdastiloissa käytettävät laitteet ja erilaiset materiaalit ovat potentiaalisia epäpuhtauslähteitä. Laitteiden ja materiaalien tavat tuottaa epäpuhtauksia noudattavat samoja periaatteita kuin ihmisten tapauksessa, jotka ovat kuljettuminen tilan ulkopuolelta tai syntyminen tilan sisälle. Esimerkiksi tilassa käytettävän tuotteen pakkausmateriaalin mukana voi kulkeutua hiukkasia tilan ulkopuolelta, tilojen rakennusmateriaaleista voi purkautua kaasuja ja tilassa käytettävä laite voi synnyttää mekaanisen kulumisen kautta hiukkasia tai laitteen voitelu voi pisaroitua ilmaan. Näiden lähteiden tunnistaminen ja huomioiminen tilan suunnittelussa ja toimintatavoissa on tärkeässä roolissa vaaditun puhtauden saavuttamiseksi.

Puhdastiloissa käytettävät materiaalit voidaan jaotella tilan rakennusmateriaaleihin sekä tiloissa käytettävien tuotteiden ja esineiden materiaaleihin. Molempien ryhmien materiaaliominaisuuksien tunteminen ja soveltuvuuden arvioiminen tilan käyttötarkoitukseen on tärkeää ja erityisesti rakennusmateriaalien osalta tehtävä jo tilan suunnitteluvaiheessa. Rakennusmateriaaleille ja erityisesti pintamateriaaleille on puhdastiloissa useita perinteisestä rakentamisesta poikkeavia ja tiukempia vaatimuksia. Materiaalien on kestettävä hyvin kulutusta ilman, että niistä irtoaa partikkeleita ja pintojen on kestettävä iskuja ilman lohkeilua. Rakenteiden ja mahdollisesti käytettävien tiivisteaineiden päästämät kaasut on tunnettava ja niiden haitallisuus tilan käytössä on arvioitava. Kaasumaiset päästöt eivät vaikuta tilan partikkelipitoisuuksiin, mutta erityisesti puolijohdevalmistuksessa erilaiset

kaasumaiset päästöt rakenteista voivat olla haitallisia. Pintojen soveltuvuus tiloissa käytettävien kemikaalien kanssa on myös arvioitava. Puhdastiloissa voidaan vaatia käytettävän erityisen vahvoja puhdistus- ja desinfiointiaineita, jotka voivat haurastuttaa, värjätä, läpäistä tai syövyttää niiden kanssa epäsoivia pintamateriaaleja. Myös myöhemmin esiteltävät pintojen sähköiset ominaisuudet voivat olla tärkeitä, erityisesti elektroniikkateollisuudessa. Pintojen ja rakenteiden saumojen on oltava mahdollisimman tasaisia, jotta ne eivät keräisi vaikeasti puhdistettavissa olevaa likaa. Teräviä saumoja ja kulmia tulisi myös välttää, sillä erityisesti terävät sisäkulmat ovat vaikeasti puhdistettavissa ja terävät saumat voivat rikkoa puhdistuksessa käytettäviä välineitä ja näin synnyttää tilaan epäpuhtauksia. Tarvittaessa rakenteiden kulmiin voidaan asentaa pyöreitä kouruja helpottamaan puhdistusta. Rakenteet tulisi myös pyrkiä suunnittelemaan niin, että asennusvaiheessa tapahtuvat poraukset ja rakenteisiin tehtävät muutokset saataisiin minimoitua, jotta tilan rakentamisesta syntyneet epäpuhtaudet saadaan pidettyä alhaisina, joka helpottaa ja nopeuttaa tilan käyttöönottoa. ISO 14644-4 -standardissa ohjeistetaan laatimaan puhtaan rakentamisen protokolla, jossa esimerkiksi aikataulutetaan työvaiheet niin, että eniten hiukkasia tuottavat työt pyritään suorittamaan ensimmäisenä ja määritellään käytännöt syntyneiden hiukkasten poistamiseksi.

Rakennusmateriaalien lisäksi muita tyypillisiä puhdastiloissa esiintyviä materiaaleja ovat valmistuksessa käytettävät materiaalit, erilaiset pakkausmateriaalit, siivouksessa käytettävät materiaalit, puhdistilavaatetuksen materiaalit ja erilaiset kertakäyttöesineiden materiaalit. Tiloissa käytetään usein myös erilaisia laitteita valmistukseen, huoltoon ja kalibrointiin. Nämä kaikki ovat mahdollisia epäpuhtauslähteitä ja niiden sopivuus tilan käytön ja muiden materiaalien kanssa on arvioitava. Erityistä huomiota on kiinnitettävä seuraaviin tuotteisiin ja ominaisuuksiin (Whyte 2001, s. 91-93)

- jauheet ja hiovat materiaalit
- aerosolit
- puiset, kumiset, paperiset, nahkaiset, villaiset ja muut helposti kuluvat luonnonmateriaalit
- ruostesuojaamaton teräs ja muut ruostuvat tai hapettuvat materiaalit
- lyijykynät, pyyhekumit ja muut kirjoitusmateriaalit jotka voivat tuottaa hiukkasia
- henkilökohtaiset tavarat
- kertakäyttötavarat

Useista yllä luetelluista tuotteista on saatavilla erityisesti puhdistilakäyttöön suunniteltuja versioita. Esimerkiksi kirjoitus- ja siivousvälineitä on paljon saatavilla puhdistilakäyttöön suunniteltuina ja näitä tulisi pyrkiä ensisijaisesti puhdastiloissa käyttämään.

Tarvittaessa materiaalien soveltuvuus voidaan varmistaa laboratoriotesteillä. Tyypillisissä testeissä kaksi materiaalia asetetaan joko kiinni toisiinsa tai hyvin lähelle toisiaan, etäisyydelle 0,25 mm – 1,27 mm, ja materiaaleja pidetään 70 – 80 °C lämpötilassa ja 70

– 85 % suhteellisessa kosteudessa 4 -7 päivää. Testissä tutkitaan materiaalien värjäytymistä ja korroosiota ja jos näitä ilmenee, eivät materiaalit sovi käytettäväksi yhdessä. Lisäksi voidaan tutkia yksittäisen materiaalin ominaisuuksia, kuten partikkeli-, ionituottoa. Materiaalin partikkelituottoa voidaan tutkia esimerkiksi asettamalla kappale mietoon liuotinnesteeseen, jonka partikkelipitoisuus tunnetaan ja altistamalla kappale ultraäänelle määrättyksi ajaksi ja mittaamalla nesteen partikkelimäärän kasvu. (Welker et al. 2006, s. 293-297)

Puhdastilaan tuotavien tuotteiden pakkaus ja pakkausmateriaalit sekä kuljetus on suunniteltava sopivaksi puhdastilakäyttöön. Tuotteet tulisi olla joko valmistettu vastaavan luokituksen puhdastilassa, tai tuotteet on puhdistettava ennen käyttöä, sillä tuotteen pakkauksen yhteydessä pakkaukseen päätyy aina myös ympäröivän tilan epäpuhtauksia. Jos tilaan kuljetetaan säännöllisesti isoja laitteita tai tuotteita, jotka vaativat kuljetukseen rullakkoa tms. apulaitetta, on tilassa syytä käyttää erillistä ilmasulkua. Tällöin tuotteet voidaan tuoda ensin ilmasulkuun, jolloin vältetään tuomasta rullakon mukana epäpuhtauksia puhdastilaan. Ilmasulkua voidaan käyttää myös tuotteiden pakkausmateriaalien purkamiseen, jolloin myös pakkausmateriaalien mukana kulkeutuvat epäpuhtaudet saadaan pidettyä tehokkaammin puhdastilan ulkopuolella. Erityisesti isot koneet tulisi pyrkiä tuomaan puhdastilan ollessa muusa tilassa kuin toiminnassa. Ohjeita tähän annetaan esimerkiksi standardin ISO 14644-5 liitteessä D. Ilmasulun sijaan voidaan myös käyttää seinään asennettavaa läpiantokaappia, jos tilaan kuljetetaan vain pieniä esineitä.

Puhdastilassa käytettävät laitteet tulisi myös valita tarkoin. Mekaanista liikettä tekevät laitteet kuluvat jatkuvasti ja tuottavat samalla partikkeleita, joista hyvänä esimerkkinä on sähkömoottorin harjojen kulumisen käytössä. Useat laitteet vaativat voiteluaineita, jotka voivat pisaroitua ilmaan liikkeen vaikutuksesta, tai sisältävät runsaasti nesteitä, joita on vaikea täydellisesti eristää ulkoilmasta tiivisteillä. Erityisen ongelmallisia ovat hydrauliliikkalaitteet, joille on ominaista hydraulikanesteen vuotaminen laitteen ulkopuolelle. Puhdastiloissa tulisikin pyrkiä käyttämään harjattomia sähkömoottoreita sekä hermeettisiä rakenteita. Jos mahdollista, tulisi laitteet pyrkiä sijoittamaan osittain puhdastilan ulkopuolelle niin, että vain tarvittava osa laitteesta sijaitsee puhdastilan sisällä. Tällöinkin on kuitenkin huolehdittava, ettei puhdastilan ilmanvaihto kuljeta ulkopuolella syntyneitä epäpuhtauksia tilan sisäpuolelle. Vaihtoehtoisesti voidaan pyrkiä sijoittamaan laitteen epäpuhtauksia tuottavat osat mahdollisimman kauaksi valmistettavasta tuotteesta ja yhdensuuntaisen ilmanvaihdon tiloissa alavirtaan tuotteesta. Etenkin uuden laitteen soveltuvuutta puhdastilakäyttöön voi olla vaikea kuitenkin ennustaa. Tätä varten puhdastilastandardin osassa ISO 14644-14 on annettu ohjeita laitteen puhdastilakäyttöön soveltuvuuden arvioimiseksi.

2.4 Puhdastilan sähköstaattiset ominaisuudet

Sähkövarauksien kertymistä ja mahdollisesti kertyneiden varausta nopeaa purkautumista, eli sähköstaattista purkautumista, tulisi pyrkiä estämään puhdastiloissa. Pintaan kertynyt varaus toisaalta kerää epäpuhtauksia syntyneen sähkökentän avulla luvussa 2.2.3 esitetyin menetelmin ja toisaalta varauksien kertymisen kautta syntyvä sähköstaattinen purkaus voi vahingoittaa sähköisiä komponentteja, aiheuttaa radiotaajuushäiriöitä tai jopa aiheuttaa tulipalon. Erityisen huomioita puhdastilojen sähköisiin ominaisuuksiin on kiinnitettävä elektroniikkateollisuuden puhdastiloissa, mutta myös yleisesti epäpuhtauksia keräävien voimien takia sähköiset ominaisuudet tulisi huomioida puhdastilaa suunniteltaessa.

Kappale voi varautua, eli luovuttaa tai vastaanottaa elektroneja usealla tavalla. Puhdastiloissa yleisimmät varautumismekanismit ovat varautuminen johtumalla, induktiolla ja tribosähköisen ilmiön kautta (Welker et al. 2006, s. 56-60). Kun valmiiksi varautunut kappale tuodaan kosketuksiin toisen sähköä johtavan kappaleen kanssa, kappaleiden välinen potentiaaliero tasaantuu ja varauksettomaan kappaleeseen syntyy sähkövaraus. Sähköä eristäviin materiaaleihin, esimerkiksi useat muovit ja keraamit, ei tätä varausta kuitenkaan synny. Varautunut kappale voi synnyttää varauksen toiseen kappaleen myös ilman kosketusta sähkökentän vaikutuksesta, eli induktiolla. Sähkökentän vaikutuksesta sähköä johtavaan kappaleeseen syntyy sähkövirta, kun kappale tuodaan kenttään. Kun kappale tai kenttä liikkuu pois, syntyy vastaavasti sähkövirta, mutta eri suuntaan. Jos kappale maadoittuu tilapäisesti sen ollessa sähkökentän vaikutuksessa, esimerkiksi kosketuksesta, voi kappaleeseen jäädä pysyvä varaus myös sen poistuttua sähkökentästä. Tämä varaus taas voi purkautua sähköstaattisen purkauksena. Tribosähköinen ilmiö, eli hankaussähkö, syntyy kun kaksi eri materiaalista valmistettua kappaletta hankaavat toisiinsa. Ilmiö on hyvin yleinen ja monesti huomattavissa joka päiväisessä elämässä. Tribosähköisen ilmiön synnyttämän varauksen suuruus riippuu paljon kosketuksissa olevasta materiaaliparista. Eri materiaaliparien tribosähköisiä ominaisuuksia on tutkittu paljon ja tutkimusten perusteella on muodostettu tribosähköisiä sarjoja, jotka kuvaavat materiaalien taipumusta kerätä varausta hankauksessa. Taulukossa 7 on esitetty puhdastiloissa yleisten materiaalien tribosähköinen sarja (Welker et al. 2006, s. 59-60).

Taulukko 7. Puhdastilamateriaalien tribosähköinen sarja

Ihmisen kädet
 Plexiglas
 Lasi, kvartsi
 Nailon
 Ihmisen hius
 Villa
 Lyijy
 Silkki
 Alumiini
 Paperi
 Puuvilla
 Teräs

↑
 Positiivinen varaus

Puu
 Kova kummi
 Nikkeli, kupari
 Messinki, hopea
 Kulta, platina
 Polystyreenivaaho
 Akryyli
 Viskoosi
 Polyesteri
 Polyuretaani
 Polyeteeni, polypropeeni
 PVC
 Teflon

Negatiivinen varaus
 ↓

Mitä kauempana materiaalit ovat toisistaan tribosähköisessä sarjassa, sitä suurempi varaus niiden välille syntyy hankauksessa. Sarjassa on myös esitetty syntyvän varauksen tyyppi. Mitä ylempänä materiaali on sarjassa, sitä herkemmin se luovuttaa elektroneja tribosähköisessä ilmiössä, eli materiaali saa positiivisen varauksen. Tribosähköinen sarja on kuitenkin vain suuntaa antava arvio varauksien synnystä, sillä syntyvän varauksen suuruuteen vaikuttaa useita muitakin tekijöitä kuin vain kappaleiden materiaali. Vaikuttavia tekijöitä on muun muassa kosketuspinta-ala, pinnan puhtaus, pintojen erottamisen nopeus ja suhteellinen kosteus.

Sen lisäksi, että varautuneet pinnat ja kappaleet keräävät epäpuhtauksia, voivat keräytyneet varaukset ja sähköstaattiset purkaukset vaikuttaa monella tavalla myös puhdastiloissa tapahtuvaan toimintaan ja valmistukseen. Jos tiloissa käytetään laitteita, jotka sisältävät mikroprosessoria, voi sähköstaattinen purkaus tai sähkömagneettinen häiriö aiheuttaa häiriötä niiden toimintaan, kaataa ohjelmiston, jota mikroprosessorilla suoritetaan tai hajottaa järjestelmän. Prosessori voi ohjata esimerkiksi arvokkaan tuotteen tai aineen automaattista valmistusta, jolloin häiriöt prosessissa voivat olla kalliita. Syntyneet viat

voivat olla myös latentteja ja ne voivat ilmetä vasta päivien tai viikkojen jälkeen altistumisesta sähköstaattiselle purkaukselle.

Puhdastiloissa käytettävät materiaalit luokitellaan yleensä kolmeen luokkaan sähkönjohtavuuden mukaan, sähköä johtaviin, sähköä heikosti johtaviin ja eristäviin materiaaleihin. Taulukossa 8 on esitelty eri luokkien resistiivisyysarvot (Welker et al. 2006, s. 76)

Taulukko 8. Sähkönjohtavuusluokat

Luokka	Pintaresistanssi (Ω/sq)	Tilavuusresistanssi (Ω/cm)
Johtava	$< 10^6$	$< 10^5$
Heikosti johtava	$10^6 \dots 10^{12}$	$10^5 \dots 10^{11}$
Eristävä	$> 10^{12}$	$> 10^{11}$

Tavoiteltava luokka, erityisesti pintamateriaaleilla, on heikosti johtava. Hyvin maadoitettuna johtavat materiaalit eivät pääse keräämään varausta, mutta jos maadoitusta ei ole tai se ei toimi, materiaaliin mahdollisesti kertynyt varaus purkautuu sopivien olosuhteiden esiintyessä nopeasti, aiheuttaen voimakkaan sähköstaattisen purkauksen. Toisaalta sähköä tehokkaasti johtava pintamateriaali mahdollistaa myös puhdastilassa käsiteltävän tuotteen tai laitteen mahdollisen varauksen purkautumisen pinnan kautta. Eristävä pintamateriaali estää staattisen sähkön purkautumisen pinnan kautta, mutta eristäviin materiaaleihin voi syntyä paikallisia varauskeskittymiä, jotka keräävät epäpuhtauksia. Heikosti sähköä johtavat materiaalit johtavat kosketuksiin tulevat varaukset hitaasti ja näin vähentävät sähköstaattisen purkauksen aiheuttamia vaurioita ja toisaalta heikosti johtaviin materiaaleihin syntyneet varaukset poistuvat maadoituksen kautta.

Puhdastilan sähköistä käyttäytymistä voidaan materiaalien lisäksi hallita sisäilmaston ominaisuuksilla. Kaksi pääasiallista keinoa, joilla staattisen sähkön kertymiseen voidaan vaikuttaa, ovat sisäilmaston suhteellinen ilmankosteus sekä ilman ionisointi. Korkea ilman suhteellinen kosteus vaikuttaa alentavasti staattisen sähkön tribosähköisen ilmiön vaikutuksesta tapahtuvaan kertymiseen, monissa tapauksissa merkittävästikin. Syynä tähän on, että kosteaan ilmaan sitoutuneet vesimolekyylit päätyvät materiaalien pinnoille ja tällöin materiaalien hangatessa toisiinsa osassa pintaa kosketuksissa ovat vain materiaalien pintaan kiinnittyneet vesimolekyylit. Kaksi samaa materiaalia ei muodosta tribosähköistä varausta, joten mitä enemmän hankaavien materiaalien pinnassa on vesimolekyylejä, sitä vähemmän niiden välille syntyy tribosähköistä varausta. Tiloissa, joissa pyritään rajoittamaan staattisen sähkön syntymistä, pyritään yleensä 25 – 40 % suhteellisen kosteuteen. Vaikka korkea suhteellinen kosteus vähentää staattisen sähkön muodostumista, on kuitenkin huomioitava sen vaikutus muuhun toimintaan. Korkea kosteus esimerkiksi nopeuttaa korroosiota, vaikuttaa tuotteiden fyysisiin ominaisuuksiin, kuten dimensioihin ja lujuuteen, sekä voi aiheuttaa kemiallisia reaktiota tuotteisiin jääneiden kemikaalijäämien kanssa (Welker et al. 2006, s. 88-90).

Jos sisäilmaston suhteellista kosteutta ei pystytä riittävästi hallitsemaan tai suhteellinen kosteus joudutaan pitämään matalana, voidaan staattisen sähkön kertymistä vähentää ilman ionisointilaitteiden avulla. Ionit, eli positiivisesti tai negatiivisesti varautuneet atomit tai molekyylit neutralisoivat pintojen varauksia osuessaan niihin. Varautuneet pinnat lisäksi vetävät eri merkkisiä varauksia puoleensa, joka tehostaa ionien neutralisoivaa vaikutusta. Ulkoilmassa syntyy jatkuvasti ioneja, joiden elinikä on kuitenkin yleensä lyhyt, sillä ilmassa syntyneet eri merkkiset ionit vetävät toisiaan puoleensa ja neutralisoivat kohdatessaan varauksensa. Lisäksi puhdastiloihin oleellisena osana kuuluvat ilmansuodattimet poistavat tehokkaasti ulkoilman ioneja. Tämän takia puhdastiloissa on käytettävä erillisiä ioneja tuottavia laitteita. Ionisointi, erityisesti laitteiden sijoittaminen, on suunniteltava tarkasti. Ionisoivat laitteet tuottavat sekä positiivisia että negatiivisia ioneja ja näiden tehokas leviäminen puhdastilaan on varmistettava, jotta vältytään tilanteilta, joissa syntyneet ionit neutralisoivat toisensa, tai toinen ionityyppi maadoittuu välittömästi, jolloin ionisointi tuottaa tilaan tarkoitustaan päinvastaisesti varausepätasapainon. Puhaltimien käyttö ionien levittämisessä voi olla tarpeen, erityisesti turbulenttisen ilmanvaihdon puhdastiloissa, mutta laminaari-ilmanvaihdon tiloissa puhallin voi synnyttää epätoivottua turbulenssia. Ionisointilaitteet vaativat myös säännöllistä huoltoa. Ionisoinnin ei tarvitse kuitenkaan olla jatkuvaa, vaan sitä voidaan käyttää ilman suhteellisen kosteuden perusteella. Kun suhteellinen kosteus laskee liian alas, esimerkiksi alle 25 %, käynnistetään ionisointi ja näin estetään liiallinen staattisen sähkön kertyminen myös matalan suhteellisen kosteuden vallitessa.

Kuten hiukkasepäpuhtauksien kanssa, myös staattisen sähkön syntymisessä puhdastilan käyttäjät ovat suurin aiheuttaja. Puhdastilassa käveleminen ja työskentely aiheuttaa hankausta erilaisten materiaalien välillä, joka taas synnyttää edellä esitetyin menetelmin tribosähköisen varauksen. Keskeisimmät keinot käyttäjien aiheuttaman staattisen sähkön vähentämiseen ovat oikeanlainen puhdastilavaatetus sekä maadoitus. Erityistä huomiota on kiinnitettävä lattian ja jalkineiden sähköisiin ominaisuuksiin ja yhteensopivuuteen. Lattian tulisi olla maadoitettu ja sähköä johtavaa materiaalia sekä tribosähköisesti yhteensopiva jalkinemateriaalien kanssa. Jalkineiden tulisi myös olla maadoitettuja esimerkiksi jalkineeseen kiinnitetyn maadoituslenkin avulla tai erillisen maadoittavan kengänpäällisen avulla. Maadoituksen kautta tilan käyttäjän mahdollisesti kehossa sisältyvä varaus pääsee tasaantumaan ja näin estetään käyttäjäperäiset sähköstaattiset purkaukset. Toinen vaihtoehto maadoitukseen etenkin tiloissa, joissa työskennellään paljon istuvaltaan, on työpisteellä ranteeseen kiinnitettävä maadoituslenkki. Jalkineiden kautta tapahtuva maadoitus on kuitenkin yleensä parempi ratkaisu, sillä rannelenkillä on rajallinen mitta, joka rajoittaa liikkuvuutta, maadoituslenkin johto voi takertua ja aiheuttaa vaaratilanteita ja lenkki on kiinnitettävä aina erikseen työpisteelle tullessa, joka voi käyttäjältä unohtua.

2.5 Puhdastilasuunnittelu

Tyypillisesti keskeisin keino puhtauden hallintaan puhdastiloissa on tehokas ilmanvaihto ja yleensä puhdastilat jaetaan kahteen päätyyppiin ilmanvaihdon toteutuksen perusteella. Ilmanvaihto voidaan toteuttaa joko sekoittavana, eli turbulenttina, tai yhdensuuntaisena, eli laminaarina, tai lähes laminaarina. Yhdensuuntainen ilmanvaihto voi olla lisäksi joko vaaka- tai pystysuuntainen. Ilmanvaihdon tehtävänä on laimentaa ilman hiukkaspitoisuutta, kuljettaa epäpuhtaushiukkaset pois puhdastilasta sekä yhdensuuntaisen ilmanvaihdon tapauksessa puhdistaa pintoja. Sekoittava ilmanvaihto on tyypillisempi matalamman luokituksen puhdastiloissa, ISO luokissa 9-5 ja yhdensuuntaista ilmanvaihtoa käytetään ISO luokissa 6-1.

Virtaustyyppin lisäksi yleensä määritellään joko ilmanvaihtojen määrä tunnissa, eli kuinka monta kertaa puhdastilan ilmatilavuus vaihtuu, tai yhdensuuntaisen ilmanvaihdon ilman virtausnopeus. Ilmanvaihtojen lukumäärä riippuu puhtausluokituksesta ja on kymmenistä satoihin vaihtoihin tunnissa, joka on moninkertaisesti normaaliin ilmanvaihtoon verrattuna. Ilmanvaihdon avulla voidaan myös hallita muita tärkeitä ominaisuuksia puhdastilassa, kuten lämpötilaa ja ilman kosteutta. Ilmanvaihdon avulla tilat luodaan myös ylipaineisiksi, tai erikoistapauksissa alipaineisiksi, ympäröiviin tiloihin nähden, jolla estetään hallitsemattomien ilmavirtojen pääsy tilaan tai tilasta, esimerkiksi rakenteiden läpi.

2.5.1 Ilman suodatus

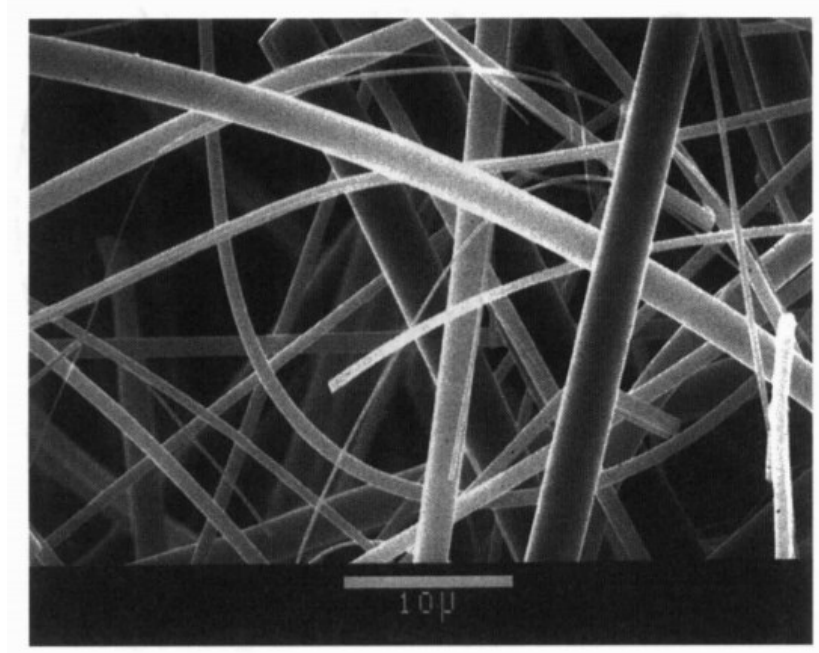
Ilmanvaihdon tehtävä on laimentaa puhdastilan epäpuhtauspitoisuutta ja kuljettaa tilassa syntyneet partikkelit pois, joten puhdastilaan tuotavan ilman on oltava puhtaampaa kuin puhtaustaso jota tilassa edellytetään. Ulkoilma sisältää kuitenkin hyvin runsaasti puhdastiloissa haitallisia hiukkasia, kuten luvussa 2.3.1 on esitetty, joten puhdastiloihin tuotavaa ilmaa on puhdistettava suodattamalla. Normaaliin rakennusilmanvaihtoon kuuluu raitisilman suodatus, mutta tyypillinen ilmanvaihtokoneen ilmansuodatin ei poista hiukkasia ilmasta puhdastilojen edellyttämällä tehokkuudella. Esimerkiksi yleinen SFS-EN 779 -standardin F7-luokan hienosuodatin poistaa 80-90% 0,4 µm kokoluokan hiukkasista, kun puhdastilasuodattimilta vaaditaan yli 99% tehokkuutta. Ilman riittävä puhtaus saavutetaan käytännössä käyttämällä puhdastiloissa lisäksi omia erillisiä HEPA tai ULPA -suodattimia. Korkeatehoisille suodattimille määritellään luokituksia standardeissa SFS-EN 1822 ja SFS-ISO 29463. SFS-EN 1822 standardissa suodattimille määritellään kahdeksan luokkaa, jotka jatkuvat SFS-EN 779 standardin luokista ollen 10-17, ja luokat ovat jaettu kolmeen ryhmään E, eli EPA, H, eli HEPA ja U, eli ULPA. Luokat suodatustehokkuuksineen ja vastaavine SFS-ISO 29463 luokituksineen on esitetty taulukossa 9. Tehokkuus määritellään sen partikkelikoon sieppaustehokkuutena, joka läpäisee suodatinta eniten, joka on yleensä noin 0,3 µm. Standardissa SFS-ISO 29463 on lisäksi luokat taulukossa ilmoitettujen luokkien puolella välissä, esimerkiksi ISO 30 E, jonka tehokkuus on 99,99%.

Taulukko 9. Korkeatehoisten suodattimien luokitukset (SFS-EN 1822-1 2010; SFS-ISO 29463-1 2017)

EN 1822 luokka	ISO 29463 luokka	Keskimääräinen tehokkuus (%)	Paikallinen tehokkuus (%)
E 10		≥ 85	-
E 11	ISO 15 E	≥ 95	-
E 12	ISO 25 E	≥ 99,5	-
H 13	ISO 35 H	≥ 99,95	≥ 99,75
H 14	ISO 45 H	≥ 99,995	≥ 99,975
U 15	ISO 55 U	≥ 99,999 5	≥ 99,997 5
U 16	ISO 65 U	≥ 99,999 95	≥ 99,999 75
U 17	ISO 75 U	≥ 99,999 995	≥ 99,999 9

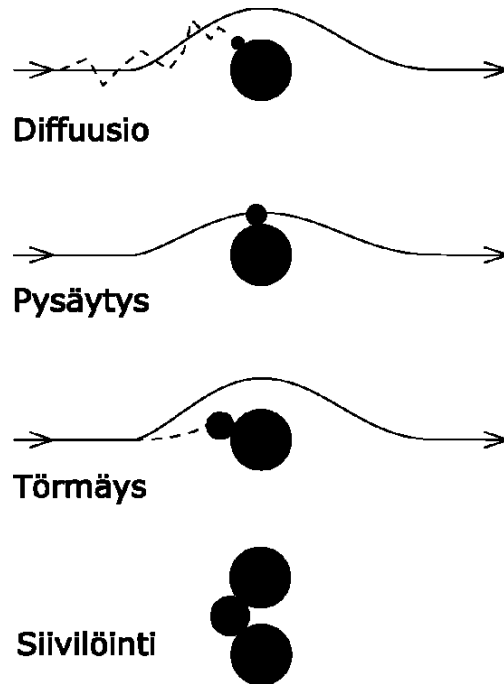
Erot luokkien välillä voivat vaikuttaa merkityksettömiltä kaikkien ollessa lähes 100%. Tutkittaessa kuitenkin suodattimen läpäiseviä hiukkasmääriä (100% - tehokkuus) nähdään, että luokan kasvaessa yhdellä suodattimen läpäisevä hiukkasmäärä laskee kymmenesosaan.

Suodatinmateriaalina HEPA-suodattimissa käytetään satunnaisesti järjestäytyneistä 0,1 – 10 µm halkaisijan lasikuiduista muodostuvaa mattoa. Kuidut muodostavat tiheän verkon, mutta keskimääräinen kuitujen välinen etäisyys on kuitenkin huomattavasti suurempi kuin suodatettavien hiukkasten halkaisija. Matto on yleensä taitettu kerroksiin virtaus-suuntaisesti ja kerroksien välissä on virtausta ohjaavat levyt, jotka ovat usein alumiinisia, tai vaihtoehtoisesti taitokset voivat olla erotettu nauhojen tai narujen avulla, joka mahdollistaa useampien taitosten mahdollistamisen samaan tilavuuteen. Kuvassa 4 on esitetty suurennois suodattimen muodostavasta kuituverkosta. Suodattimen runko on yleensä muovia tai metallia, johon taiteltu suodatinmatto on liimattu kiinni mahdollisimman tiivistä, jotta kaikki ilma kulkisi suodatinmateriaalin läpi.



Kuva 4. HEPA-suodattimen kuitumaton mikroskooppikuva (Whyte 2001)

Suodattimilla on viisi perusmekanismia, joiden avulla ne poistavat hiukkasia ilmavirrasta. Nämä ovat törmäys, pysäytys, diffuusio, sähköinen vetovoima ja siivilöinti. Nämä mekanismit on esitetty kuvassa 5. Mekanismi, joka hiukkasen kiinnittää suodattimeen, riippuu hiukkasen koosta ja hiukkasen käyttäytymisestä suodattimen läpi virtaavassa ilmavirrassa. Eri hiukkaskokoihin vaikuttavat suodatusmekanismit on esitetty hiukkaskoon funktiona kuvassa 6. Kokonaissuodatustehokkuus, joka on eri suodatusmekanismien tehokkuuksien summa, vaihtelee vastaavasti partikkelikoon mukaan. Sähköinen vetovoima ja diffuusio suodattavat hyvin tehokkaasti pienempiä, noin 0,01 μm hiukkasia, tehokkuuden laskiessa hiukkaskoon kasvaessa ja pysäytys ja törmäys suodattavat tehokkaasti noin 10 μm hiukkasia.



Kuva 5. HEPA-suodattimen suodatusmekanismit, perustuu lähteeseen (Whyte 2001, s. 107)

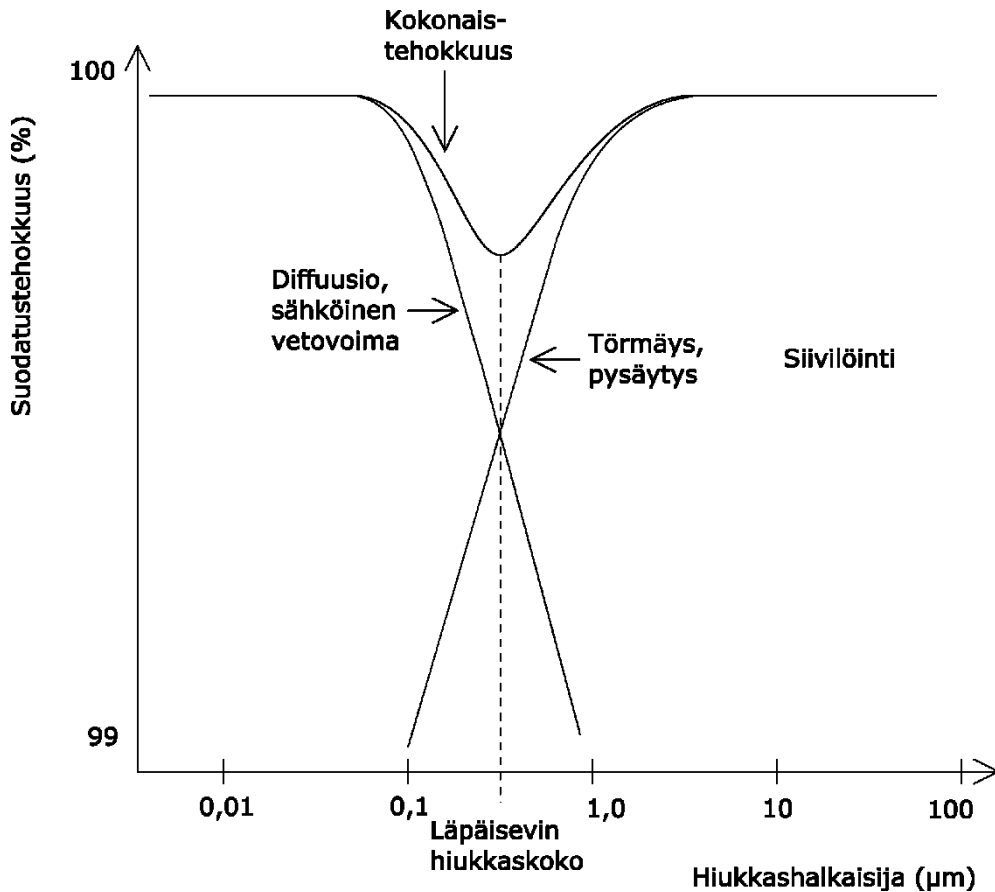
Tutkittaessa suodattimen tehokkuutta teoreettisesti, yleinen menettely on määrittellä yksittäisen suodatinkuidun hiukkaskeräystehokkuus ja tämän perusteella määrittellä koko suodattimen tehokkuus. Eri mekanismien oletetaan usein toimivan toisistaan riippumattomasti, jolloin ne voidaan tutkia yksittäin ja kokonaistehokkuus saadaan näiden osatehokkuuksien summana. Lee ja Liu (1980) ovat johtaneet teorian suodattimen tehokkuudelle keskittyen erityisesti suodatinta eniten läpäiseviin hiukkasiin, joihin vaikuttaa merkittävästi vain diffuusio- ja pysäytyssuodatus. Yksittäisen kuidun tehokkuudeksi Lee ja Liu antavat

$$\varepsilon = 2,6 \left(\frac{1-\beta}{K} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} + \left(\frac{1-\beta}{K} \right) \frac{r^2}{1+r} \quad (10)$$

jossa β on suodatinkuitujen tilavuusosuus koko suodattimen tilavuudesta, $K = -\frac{1}{2} \ln \beta - \frac{3}{4} + \beta - \frac{\beta^2}{4}$ on Kuwabaran hydrodynaaminen kerroin, $Pe = Vd_f/D$ on Pecletin luku, V on ilman virtausnopeus suodattimessa, d_f on suodatinkuidun halkaisija, D hiukkasten diffuusiokerroin, $r = d_p/d_f$ on pysäytysparametri ja d_p on hiukkasen halkaisija. Kun yksittäisen kuidun tehokkuus tiedetään, voidaan laskea suodattimen kokonaistehokkuus tietylle hiukkaskoolle kaavalla

$$E = 1 - \exp \left(\frac{-4\varepsilon\beta L}{\pi d_f(1-\beta)} \right) \quad (11)$$

jossa L on suodattimen paksuus.



Kuva 6. Tyypillinen HEPA-suodattimen suodatustehokkuus hiukkaskoon funktiona, perustuu lähteeseen (Welker et al. 2006, s. 163)

Ongelmallisimpia ovat noin 0,3 µm kokoluokan hiukkaset, jotka eivät ole kummankaan suodatusmekanismiryhmän tehokkaimmalla alueella. Läpäisevimmän hiukkaskoon laskemiseksi on kehitetty teorioita, joista esimerkkinä Leen ja Liun (1980) antama kaava

$$d_{p,min} = 0,885 \left[\left(\frac{K}{1-\beta} \right) \left(\frac{\sqrt{\delta kT}}{\eta} \right) \left(\frac{d_f^2}{V} \right) \right]^{2/9} \quad (12)$$

jossa δ on ilmamolekyylien keskimääräinen vapaa välimatka, k on Boltzmanin vakio, T on lämpötila ja η on kaasun viskositeetti.

Ilmavirran kohdatessa suodatinkuidun virtauksen suunta kääntyy. Jos virtauksen mukana kulkevan hiukkasen massa ja siten liikemäärä on tarkasteltavaan mittakaavaan nähden suuri, se reagoi hitaasti virtauksen suunnan muutoksiin ja törmää suodatinkuituun. Hiukkasen ja kuidun kosketuksessa vaikuttavat erilaiset adheesiovoimat, joita on kuvattu luvussa 2.2.3, joista tärkeimpänä Van der Waalsin voimat. Hiukkanen, joka muuttaa suuntaansa ennen törmäystä kuituun, mutta joka seuraa enintään hiukkasen säteen etäisyydeltä kuidusta kulkevaa virtaviivaa, kiinnittyy kuituun tangentialisessa suunnassa pysähty-

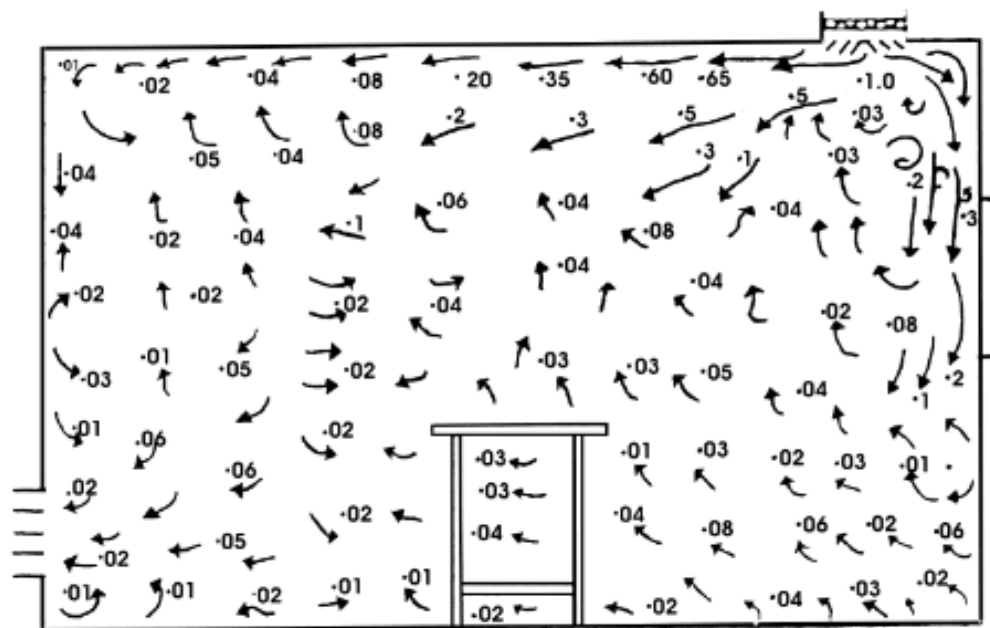
mällä. Hiukkanen voi kulkeutua myös kuidun taakse mahdollisesti syntyvään turbulenteeseen pyörrealueeseen ja kiinnittyä siellä suodatinkuituun. Virtauksessa hiukkaset lisäksi törmäilevät toisiinsa ja ympäröiviin kaasumolekyyleihin, joka aiheuttaa hiukkasiin diffuusioliikettä. Voimakkainta diffuusio on pienimmillä hiukkasilla, joihin kaasumolekyylit eivät enää törmää tasaisesti eri puolille hiukkasta, eli niihin vaikuttaa luvussa 2.2.2 kuvattu Brownin liike. Diffuusion tapahtuessa suodatinkuitujen läheisyydessä, on mahdollista, että hiukkanen törmää kuituun ja kiinnittyy siihen. Hiukkaset voivat kiinnittyä myös sähköisen vetovoiman vaikutuksesta. Tyypillisesti korkeatehoiset suodattimet keräävät pienimpiä hiukkasia hyvin tehokkaasti, joihin kuuluvat muun muassa ionit. Ionien vaikutuksesta suodatinkuidut saavat sähköisen varauksen ja näin vetävät varautuneita hiukkasia puoleensa. Edellä mainitut neljä suodatusmekanismia vaikuttavat pienempiin hiukkasiin ja ovat siten tärkeimmät mekanismit ilman puhdistuksessa puhdistiloja varten. Isoimpiin hiukkasiin vaikuttaa lisäksi siivilöinti, eli hiukkasten tarttuminen kahden suodatinkuidun väliin. Tyypillisesti kuitenkin isoimmat hiukkaset ovat suodattuneet virtauksesta jo ilmanvaihtokoneen suodattimissa.

Suodattimien vaihtoväli on tapauskohtainen ja perustuu yleensä suodattimen yli tapahtuvaan painehäviöön. Mielenkiintoista on, että suodattimen tehokkuus ei laske käytön myötä, vaan pikemminkin tehokkuus kasvaa. Tämä on yleisesti havaittu ilmiö ja se perustuu suodattimeen kertyvien hiukkasten suodatuspinta-alaa kasvattavaan vaikutukseen. Suodattimien käyttäytymistä on myös tutkittu paljon, esimerkiksi Thomas *et al.* (2001) tutkivat empiirisesti HEPA-suodattimen käyttäytymistä hiukkaskuormituksen alaisena. Kokeessaan Thomas *et al.* totesivat suodatustehon kasvavan kertyvän hiukkasmassan funktiona. Suodattimen painehäviön kehitys suhteutettuna ilman virtausnopeuteen todettiin lisäksi olevan riippumaton nopeudesta sekä ilmavirran hiukkastiheydestä. Hiukkaskoko kuitenkin vaikutti tapahtuvaan painehäviöön. Sama massa pieniä hiukkasia aiheutti kokeessa suuremman painehäviön kuin suuremmat hiukkaset.

HEPA- ja ULPA-suodattimet on suunniteltu poistamaan kiinteitä hiukkasia ilmavirrasta ja niiden kyky poistaa kaasumaisia, molekylaarisia epäpuhtauksia on heikko. Jos puhdas-tilassa täytyy hallita myös kaasumaisien epäpuhtauksien määrää, on käytettävä lisäksi molekyyli-suodatusta. Kaasumolekyylejä poistetaan fyysisen adsorption avulla. Adsorptiossa molekyylit lukkiutuvat huokoisen materiaalin onkalojen pintaan. Aktiivihiili on yleinen suodatinmateriaali molekylaarisissa suodattimissa sen hyvin huokoisen rakenteen ja siten suuren pinta-alan ansiosta. Molekyyli-suodatin ei luonnollisesti voi poistaa kaikkia ilman molekyylejä, vaan sen suodatus kohdistuu johonkin tiettyyn kemikaaliryhmään, johon voidaan vaikuttaa esimerkiksi suodattimen kemiallisella käsittelyllä. Molekyyli-suodatuksen suunnittelu vaatiikin usein tarkempaa tuntemusta suodatettavasta kaasumaisesta epäpuhtaudesta kuin perinteisen, kaikkiin kiinteisiin hiukkasiin vaikuttavan HEPA-suodatuksen suunnittelu.

2.5.2 Turbulenttisen ilmanvaihdon puhdastila

Turbulenttisen ilmanvaihdon, jota kutsutaan myös ei-yhdensuuntaiseksi ja sekoittavaksi, puhdastilojen ilmanvaihto muistuttaa tyypillistä huoneilmanvaihtoa. Erona kuitenkin puhdastilojen ja normaalien huonetilojen välillä on puhdastiloihin tuotava huomattavasti suurempi ilmamäärä ja tehokkaampi suodatus. Tuloilman tehtävänä on laimentaa ilman hiukkaspitoisuus vaadittuun arvoon ja poistoilman tehtävänä on kuljettaa tilassa syntyneet epäpuhtaushiukkaset pois. Yleinen ratkaisu on sijoittaa tuloilmasuodattimet puhdastilan kattoon ja poistoilmakanavat seiniin lattiatasoon. Tällöin ilman keskimääräinen virtaussuunta ylhäältä alas, eli yhdensuuntainen painovoiman kanssa. Poistoilmakanavien sijoittamisella lattiatasoon pyritään myös estämään ilmavirran ”oikosulku”, eli tuloilman kulkeutuminen suoraan poistokanavaan, joka voisi tapahtua poistoilmakanavien sijaitessa katon tasossa. Esimerkki sekoittavan ilmanvaihdon puhdastilasta mitatusta virtauskentästä on esitetty kuvassa 7 (Whyte et al. 2010). Poistoilmakanavien sijoittamista katon tasoon voidaan kuitenkin harkita, jos tuloilmalaitteessa käytetään ilmanhajotinta, jolla varmistetaan tuloilma tehokas leviäminen tilaan. Jos tilassa on paljon suuria lämpötehoja tuottavia laitteita, voi syntyvä luonnollinen konvektio haitata ylhäältä alas suuntaavaa ilmanvaihtoa, jolloin myös poistokanavien sijoittaminen ylätasoon voi olla järkevää (Lin et al. 2011). Sekoittavaa ilmanvaihtoa käytetään tyypillisesti ISO-luokissa 9-5 ja GMP luokituksissa B-D.



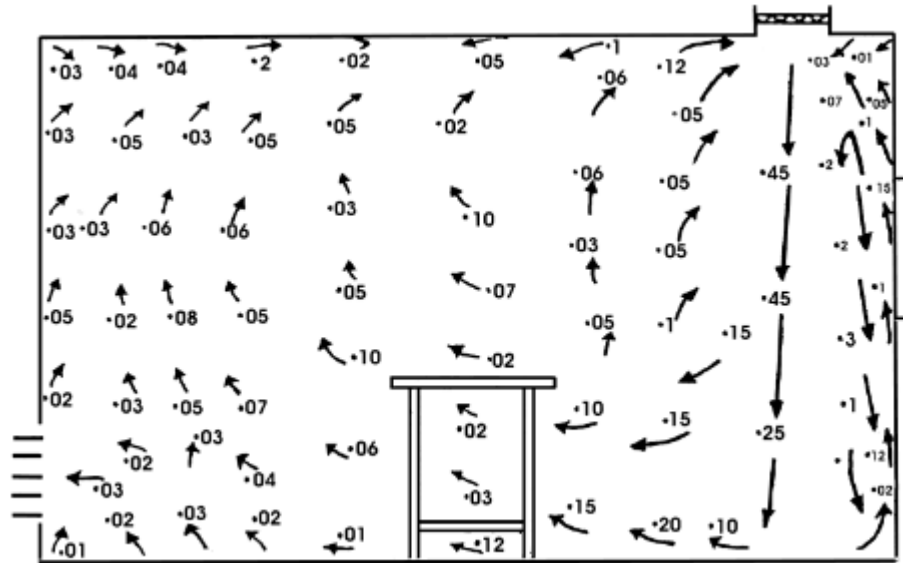
Kuva 7. Mitattu virtauskenttä sekoittavan ilmanvaihdon puhdastilassa (m/s)
(Whyte et al. 2010)

Tarvittava ilmamäärä halutun puhtauden saavuttamiseksi olettaen ilman täydellinen sekoittuminen ja suodatuksen täydellinen toiminta voidaan arvioida kaavalla

$$c = \frac{G}{q} \quad (13)$$

jossa c on hiukkaspitoisuus kpl/m^3 , G on tutkittavien hiukkasten tuotto tilassa kpl/s ja q on ilman tilavuusvirta m^3/s . Yleensä hiukkastuottoa ei kuitenkaan tunneta kovin tarkkaan tilaa suunnitellessa, erityisesti tilan laitteiden synnyttämää hiukkaskuormaa voi olla vaikea arvioida, jonka seurauksena usein käytetään hyväksi havaittuja luokituskohtaisia taulukkoarvoja (Whyte et al. 2014). Arvot on yleensä annettu suositeltuna miniminä ja maksimina, joiden välit voi olla suuria ja jotka voivat poiketa paljon eri lähteiden välillä. Varkioarvojen käyttö usein taas johtaa ilmanvaihdon ylimitoittamiseen, mutta tällöin kuitenkin varmistetaan vaaditun puhtaustason täytyminen haastavimmissakin tiloissa. Esimerkiksi ISO-luokan 5 puhdistilalle suositellaan eri lähteissä ilmanvaihtomääräksi 250-700 vaihtoa tunnissa, kun alhaisimmillaan luokan vaatimukset on pystytty täyttämään jo noin 100 vaihdolla tunnissa (Thomas et al. 2011, s. 3-8). Lisäksi, kuten kaavasta (13) nähdään, tilan puhtaus riippuu ilmanvaihdon tilavuusvirrasta, eikä vaihtojen määrästä. Vaihtojen määrä on riippuvainen tilan korkeudesta, toisin kuin tilavuusvirta, joka edelleen voi johtaa etenkin korkeiden tilojen ylimitoittamiseen.

Vaikka ilmanvaihto suunniteltaisiin sekoittavaksi ja turbulenttiseksi, on ilman virtauskuviota ja turbulenssin suuruutta kuitenkin syytä miettiä. Suurimmat hiukkaset laskeutuvat pinnoille kaavan (6) mukaisella nopeudella ja poistuvat näin ilman hiukkaspitoisuudesta, mutta pintojen läheinen vahva turbulenssi voi nostattaa nämä hiukkaset takaisin ilmaan. Sekoittavassa ilmanvaihdossa voi helposti muodostua myös seisovia kiertovirtauksia, joista epäpuhtauksien poistuminen on hidasta. Nämä alueet tulisi tunnistaa ja työpisteiden sijoittamista näihin kohtiin tulisi välttää. Edullisia alueita kiertovirtauksien synnylle, etenkin kun poistoilmakot ovat sijoitettu tilan alarajaan ja tuloilmansuodatin keskelle tilaa, ovat seinän vierustat, katon raja ja tilan keskiosa, jossa virtaus kääntyy kohti poistoilma-aukkoja. Ongelmallinen on etenkin keskelle tilaa syntyvä pystyvirtaus, joka voi nostattaa lattialle laskeutuneita epäpuhtauksia takaisin ilmaan (Welker et al. 2006, s. 166-168). Kiertovirtausten syntyyn ja niiden paikalliseen puhtausvaikutukseen voidaan vaikuttaa tuloilmansuodattimien sijoittamisella ja ryhmittämisellä tärkeimpien kohteiden ja alueiden yläpuolelle. Paikallisesti korkea puhtaus voidaan saavuttaa etenkin, jos käytetään suodatinta ilman hajottajaa, jolloin virtaus on paikallisesti lähellä laminaaria. Esimerkki tällaisen ratkaisun mitatusta virtauskentästä on esitetty kuvassa 8 (Whyte et al. 2010). On kuitenkin tärkeä huomioida, että puhtausluokitus tehdään suurimman mitatun hiukkaspitoisuuden perusteella, eli ilmanvaihdon keskittäminen yhdelle alueelle voi korottaa hiukkaspitoisuutta muualla tilassa ja laskea luokitusta.



Kuva 8. Mitattu paikallinen yhdensuuntainen ilmanvaihto (m/s) (Whyte et al. 2010)

2.5.3 Yhdensuuntaisen ilmanvaihdon puhdastila

Vaadittaessa korkeimpia puhtausluokituksia, yleensä alkaen ISO-luokasta 5, toteutetaan ilmanvaihto yhdensuuntaisena, eli muistuttaen laminaarivirtausta. Yhdensuuntaisen ilmanvaihdon virtaus voi olla myös turbulenttinen, mutta keskimääräinen virtaussuunta on kuitenkin selkeästi yhteen suuntaan. Tavoitteena tällöin on estää pyörteiden synty tilaan, jolloin tilassa syntyvät epäpuhtaudet poistuvat nopeasti ilmavirran työntäessä ne mätä-mäisesti pois puhdastilasta. Tämä edellyttää tuloilman tuomista ja poistamista hyvin laajalta alueelta. Tyypillisesti yli puolet yhdensuuntaisen ilmanvaihdon tilan katosta on peitetty HEPA-suodattimilla, puhtaimmissa luokissa jopa koko katto voi olla HEPA-suodattimien käytössä. Poistoilma-aukot ovat joko seinissä lattiatasossa, tai lattia voi olla rei'itetty. Rei'itetty lattia on tyypillinen elektroniikkateollisuuden puhdastiloissa, joissa myös luokitukset ovat tyypillisesti tiukimpia, kun taas lääketeollisuuden ja terveydenhuollon puhdastiloissa rei'itystä ei käytetä, sillä se muodostaa hankalasti puhdistettavan pinnan ja näin tarjoaa hyvän kasvualustan mikrobeille.

Vaikka tuloilma tulisikin tasaisena yhdensuuntaisena virtauksena, on ilmavirran kuitenkin käännyttävä lattiatasossa kohti poistoilma-aukkoja, joka mahdollistaa kiertovirtauksen synnyn tilan keskiosaan lähelle lattiaa. Tämän takia tilojen suositeltu suurin leveys on 6-7 metriä käytettäessä seinän alarajaan sijoitettuja poistoilma-aukkoja (Whyte 2001, s. 73; Welker et al. 2006, s. 170). Rei'itetyn lattian avulla saadaan mahdollisimman suoraviivainen ilman virtaus itse puhdastilassa, kun virtauksen kääntyminen poistoilma-aukoihin tapahtuu lattian alapuolella ja jos rei'ityksen avautumaa voidaan säätää, pystytään sen avulla lisäksi edelleen tasaamaan tilan virtauskenttää. Rei'itetty lattia kuitenkin vaatii enemmän tilaa kuin perinteinen ratkaisu ja on usein kallis toteuttaa.

Yhdensuuntaisessa ilmanvaihdossa ilmanvaihtojen määrä ei yleensä ole puhtauden kannalta merkitsevä, vaan ilman virtausnopeus. Usein kuitenkin myös ISO-luokille 5 – 1 on annettu eri suunnitteluohjeissa suosituksia ilmanvaihtojen määrälle. Standardin SFS-EN ISO 14644-4 liitteessä B on puolestaan annettu suosituksia ilman keskimääräisille virtausnopeuksille, jotka ovat 0,3 – 0,5 m/s (SFS-EN ISO 14644-4 2011). Ilmamäärät ovat siis yhdensuuntaisella ilmanvaihdolla huomattavasti suuremmat kuin turbulentsissa ilmanvaihdossa. Esimerkiksi 2,4 m korkealle tilalle vaihtojen määräksi tunnissa saadaan 450 – 750. Yhdensuuntaisen ilmanvaihdon puhdistilan rakentaminen ja käyttö on tämän takia turbulentsista huomattavasti kalliimpaa, joten tilan suunnittelussa on tärkeä arvioida, onko ehdotonta edellyttää ilmanvaihdon olevan yhdensuuntainen.

2.6 Tilasuunnittelu

Tyypillinen puhdistila on kokonaisuus, joka koostuu useasta puhdistilahuoneesta, joilla on eri käyttötarkoitukset ja eri puhtausluokitukset. Suurissa puhdistilakokonaisuuksissa on tällöin tärkeä suunnitella esimerkiksi materiaalivirrat ja henkilöiden kulku tilojen välillä niin, että epäpuhtauksien kulkeutuminen tilan ulkopuolelta ja alemman luokituksen tiloista puhtaampiin tiloihin minimoidaan. Tilojen väliset paine-erot ja ilmavirrat on myös suunniteltava vastaavasti. Myös yksittäisen tilan sisällä työvälineiden, laitteiden, säilytystilojen yms. sijoittelu on tärkeä miettiä, etenkin ilmanvaihdon toimivuuden kannalta.

2.6.1 Rakenteet

Puhdistila voidaan rakentaa usealla tavalla. Jos tila rakennetaan alusta alkaen muun rakentamisen yhteydessä, voidaan rakenteet suunnitella tällöin rakennettavaksi jo alun perin materiaaleista ja menetelmin, jotka täyttävät tilalle asetetut vaatimukset. Vaihtoehtoisesti olemassa oleva tila voidaan muuttaa puhdistilaksi asentamalla puhdistilaan sopivat seinäpaneelit olemassa olevien rakenteiden päälle koolauksen avulla, tai puhdistila voidaan rakentaa valmiista modulaarisista puhdistilaelementeistä. Toteutustavasta riippumatta rakenteille pätee samat vaatimukset (Whyte 2001, s. 91):

- pintojen tulisi olla mahdollisimman tasaisia, huokoisuutta ja karheutta tulisi välttää ja pintojen tulisi olla yleisesti helposti puhdistettavissa
- pintojen on kestettävä tilassa käytettäviä kemikaaleja, eivätkä ne saa sitoa kosteutta itseensä
- pinnat eivät saa halkeilla helposti, niiden on oltava iskunkestäviä ja hankauksessa niistä ei saa irrota pölyä
- rakenteiden tulisi olla ilmatiiviitä, jotta hallitsemattomat ilmavirrat saadaan estettyä ja vaadittu painetaso saadaan pidettyä ilman tarpeettoman suurta tulo- ja poistoilmavirtojen erotusta
- tilassa tulisi välttää pieniä koloja ja onkaloita, jotka ovat hankala puhdistaa
- rakenteiden nurkat ja reunat tulisi olla pyöristettyjä, joka helpottaa puhdistusta

- pintojen sähköjohtavuus ja tribosähköiset ominaisuudet on oltava sopivat tilan käyttötarkoitukseen
- joissain tapauksissa rakennusmateriaalien ja erityisesti tiivisteaineiden kaasujen tuottoon on kiinnitettävä huomiota

Tyypillisiä pintamateriaaleja ovat teräkset ja alumiinit, jotka voivat olla pintakäsitelt esimerkiksi polyesterimaaleilla, erilaiset muovilevyt, esimerkiksi polypropeeni ja polyvinyylikloridi ja korkeapainelaminaatit. Elementeissä ydin voi olla esimerkiksi kivivillaa, polyuretaania tai se voi koostua alumiinisesta kennorakenteesta. Ikkunoiden ja ovien suunnittelun tulisi myös noudattaa yllä mainittuja periaatteita. Tavoiteltavaa olisi, että ikkunat sekä ovet olisivat samassa tasossa ympäröivien pintojen kanssa. Ikkunoiden sijoitteluun kannattaa myös kiinnittää huomiota. Sopivalla ikkunoiden sijoittamisella voidaan välttää turhaa kulkemista tilojen välillä ja kulkemista puhdistilasta pois ja sisään, jos tilan toimintaa voidaan tarkkailla ulkopuolelta. Ovet suunnitellaan yleensä aukeavan korkeapaineisempaan tilaan, jolloin tilan ylipaine painaa ovea kiinni parantaen sen tiiveyttä. Ovia ei kuitenkaan yleensä suunnitella täydellisen tiiviiksi, vaan niiden kautta hallitaan tilojen välisiä, paine-eroista syntyviä ilmavirtoja. Ovien käyttö on myös helpompaa, kun paine-erojen vaihtelu ei tapahdu nopeasti ovia avattaessa tai suljettaessa.

2.6.2 Kulku puhdistiloihin ja pukuhuoneet

Sisääntulo puhdistiloihin tapahtuu yleensä erillisen hallitun pukuhuoneen kautta, jossa käyttäjät pukevat puhdistilavaatetuksen ja joka toimii eristävänä välitulana puhdistilan ja ympäröivän puhtaudeltaan hallitsemattoman tilan välillä. Tilassa säilytetään käyttäjien ulko- ja puhdistilavaatetus, jotka on tärkeä pitää erillään toisista. Pukuhuone voi olla yksittäinen tila, tai se voi koostua useammasta osasta, joissa suoritetaan pukeutumisen eri vaiheet, yleensä ensimmäisessä osassa ulkovaatteiden, korujen yms. riisuminen, toisessa osassa puhdistilavaatteiden pukeminen ja kolmannessa asusteiden viimeistely ja puhdistus. Näin puhtainta vaatekerrosta pukiessa myös ympäröivä tila on puhtaampi. Tällöin on myös mahdollista erottaa paremmin puhdistilaan tulevat ihmiset sieltä poistuvista ja näin ehkäistä henkilöiden välillä tapahtuvaa epäpuhtauksien siirtymistä. Tila tulisi olla ylipaineinen suhteessa ympäröiviin epäpuhtaisiin tiloihin, mutta alipaineinen suhteessa puhdistilaan. Ovet pukuhuoneesta tilan ulkopuolelle ja puhdistilaan eivät saa olla samanlaisesti auki. Tämän varmistamiseen käytetään usein interlock-järjestelmäksi kutsuttua lukitusautomaatiota, jossa toinen ovi lukkiutuu toisen ollessa auki.

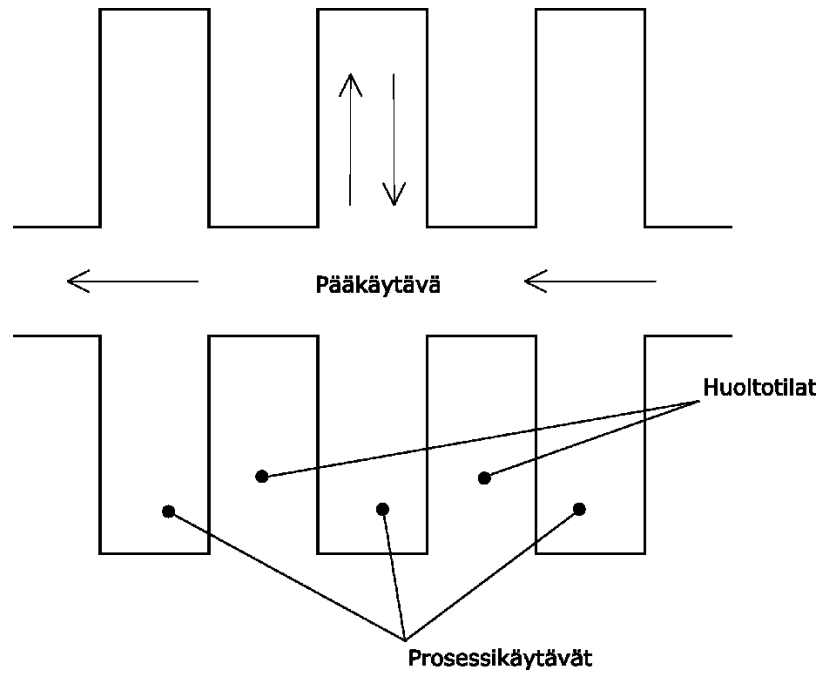
Toiminta pukuhuoneessa liikkumisen ja vaatetuksen vaihtamisen suhteen on tarkkaan suunniteltu, jotta ulkopuolelta vaatteiden, ihmisten tai ilman kautta kulkeutuvien epäpuhtauksien määrä saadaan minimoitua. Tämän takia pukuhuoneen oikea mitoittaminen käyttäjämäärän mukaan on tärkeää, etenkin tiloissa, joissa käyttäjät työskentelevät yhtenevissä vuoroissa ja käyttävät pukuhuonetta yhtä aikaa. Liian ahtaissa pukuhuoneissa yhden henkilön käyttämä aika tarvittaviin toimiin puhdistilaan kulkemista tai sieltä poistumista

varten voi olla moninkertainen verrattuna riittävän väljästi mitoitettuun pukuhuoneeseen. Ahtaissa tiloissa myös osa vaadituista toimista voidaan jättää tekemättä, tai ne tehdään huolimattomasti (Welker et al. 2006, s. 451-454). Oikealla suunnittelulla voidaan myös tehostaa suunniteltua pukeutumisjärjestystä, esimerkiksi sijoittamalla penkit jalkineiden vaihtamista varten lähelle pukuhuoneen sisään- ja ulostuloa.

Jos puhdastilaan kuljetetaan runsaasti materiaaleja ja tuotteita, on tarpeen toteuttaa materiaalsiirtoja varten oma ilmasulku puhdastilan ja ulkopuolisen tilan välille. Periaate on sama kuin pukuhuoneissakin, eli tilassa on ovet puhdastilaan ja ympäristöön, jotka eivät saa olla samaan aikaan auki. Puhdastilaan tuotavat tuotteet on usein pakattu kaksinkertaiseen pakkausmateriaaliin. Toiminta materiaalsiirrossa tuotaessa tuotteita puhdastilaan on yleensä suunniteltu niin, että likaiselta puolelta tuotetta tuova henkilö poistaa uloimman pakkausmateriaalin, joka on ollut hallitsemattomissa puhtausolosuhteissa, ja kuljettaa pakkausmateriaalin pois ilmasulusta. Tämän jälkeen puhdastilan puolelta tulee henkilö noutamaan tuotteen ja poistaa sisemmän pakkausmateriaalin, jonka tarkoitus on ollut suojata tuotetta materiaalsiirron ajan. Jos tilasta tarvitsee siirtää vain vähän materiaaleja, esimerkiksi tutkimuskäyttöön tarkoitetuissa puhdastiloissa, voidaan siirrot toteuttaa myös seiniin rakennettujen läpiantokaappien avulla. Myös kaapit noudattavat edellä kuvattua periaatetta, mutta pienemmässä mittakaavassa. Kaappi avataan, tuote asetetaan kaappiin ja ovi suljetaan, jonka jälkeen toisen puolen ovi voidaan avata ja tuote ottaa kaapista. Kaappien ja siirrettävien tuotteiden puhtautta voidaan parantaa esimerkiksi ilmasuihkun avulla.

2.6.3 Layout-suunnittelu

Puhdastiloja on hyvin erilaisiin käyttötarkoituksiin, joten yleisiä suunnitteluohjeita itse puhdastilojen sijoitteluun ja suunnitteluun on vaikea antaa. Yleistä kuitenkin on ryhmitellä tiloja niiden puhtausvaatimuksien mukaan ja tarvittaessa toteuttaa tilojen sisälle erityisiä puhtaampia alueita jotain tiettyä valmistusvaihetta varten ja toteuttaa tilojen väliset painesuhteet niin, että puhtaimmat tilat ovat korkeimmassa ylipaineessa. Yleiset suunnitellut painetasot ovat 15 Pa puhdastilojen ja ulkopuolisten tilojen välillä ja 10 Pa eri puhtausluokkaisten puhdastilojen välillä. Puolijohdeteollisuudessa, optisessa litografiassa ja kiintolevyvalmistuksessa, joissa prosessityökalut voidaan järjestää yhteen tai kahteen riviin, on kuitenkin yleinen kuvan 9 mukainen tunneliratkaisu. Prosessikäytävissä tarvittavat laitteet voidaan sijoittaa joko käytävän keskelle, tai käytävän sivuille seiniä vasten. Sijoitettaessa laitteet seinien viereen on ne mahdollista sijoittaa osittain puhdastilan ulkopuolelle, joka vähentää tarvittavaa puhdastilapinta-alaa sekä mahdollistaa huoltojen tekemisen tilan ulkopuolelta. Tällöin myös laitteiden vaatimat sähkö-, neste ja kaasukytkennät voidaan tehdä tilan ulkopuolelta.



Kuva 9. Tunnelipuhdastila

Laitteiden sijoittelu, erityisesti suhteessa ilmavirran suuntaan, on usein myös tärkeässä roolissa puhdastilaa suunniteltaessa. Esimerkiksi jos edellä esitellyssä tunnelipuhdastilassa laitteet sijoitetaan seinien viereen, on käyttäjä tuloilman ja laitteen välissä, olettaen että poistoilma-aukot on sijoitettu seinien alatasoon. Tällöin käyttäjän, joka on yleensä suurin epäpuhtauslähde, hiukkaspäästöt kulkeutuvat työtason tai laitteen kautta. Laitteet voidaan sijoittaa myös tilan keskelle, jolloin käyttäjä on alavirtaan laitteesta, mutta tällöin menetetään edellä kuvatut edut laitteiden sijoittamisesta seiniin. Yhdensuuntaisen ilmanvaihdon tiloissa on myös tärkeä huomioida etenkin virtaukseen kohtisuorien pintojen vaikutus virtauskuviioon. Yleensä nämä ovat työtasoja, jolloin myös virtauksen luonne tasolla on hyvä tuntee. Esimerkiksi tasolle, joka on kiinni seinässä, syntyy pyörteinen alue pinnan seinän puoleiseen päähän. Ilman vaihtuvuus on tällä alueella muuta tilaa huonompi ja valmistettavaa tuotetta ei tulisi pitää tällä osaa tasoa. Toisaalta taso kääntää virtauksen kohti käyttäjää, joka estää käyttäjäperäisten epäpuhtauksien päätyminen tuotteeseen. Pyörteistä aluetta voidaan pienentää raolla pinnan ja seinän välissä, josta osa pintaan törmäävästä ilmasta pääsee virtaamaan. Jos työskentelytason läheisyydessä ei ole pystypintoja jakautuu ilmavirta tasaisesti molemmille puolille tasoa. Kuitenkin käyttäjän tullessa työskentelytason läheisyyteen voi ilmavirta kääntyä suuntautumaan käyttäjältä pois päin käyttäjän muodostaman esteen takia ja näin kuljettaa käyttäjältä epäpuhtauksia tuotteeseen. Tällöin voi olla tarpeen sijoittaa tason taakse pystypinta, joka ohjaa virtausta käyttäjään päin.

Useissa puhdastiloissa käytetään myös erillisiä puhtaampia pientiloja. Puhdastilaprosessissa voi olla vain muutama vaihe, jotka vaativat korkeaa puhtautta ja vain vähän tilaa, jolloin ei ole järkevää määrittää koko tilaa vastaamaan tätä puhtausvaatimusta. Tilasta voidaan esimerkiksi erottaa verhojen avulla osa, jonka ilmanvaihtoa tehostetaan ja näin parannetaan tämän osan puhtausluokitusta. Verhoilla toteutettu tilan erottaminen on helppo toteuttaa ja joustava ratkaisu, mutta suurta puhtausluokkaeroa sillä ei voida saada aikaan. Valmistustila voi olla myös esimerkiksi koteloitu tila lisäilmanvaihdolla, jolla saadaan paikallisesti suurempi puhtausero aikaan. Koteloinnilla ja erillisilmanvaihdolla voidaan myös esimerkiksi toteuttaa laminaarivirtaus työpisteelle muuten turbulentsissa puhdastilassa. Virtaus on yleensä vaakasuuntainen, jolloin virtaus kulkee työtason suuntaisesti eikä sen tarvitse vaihtaa suuntaa, joka synnyttää helposti pyörteisyyttä. Jos pientila on varustettu lisäsuodatuksella ja se käyttää ympäröivän puhdastilan ilmaa ilmanvaihtoon, on sillä myös ympäröivää puhdastilaa puhdistava vaikutus, sillä korkeamman puhtausluokituksen poistoilma on puhtaampaa kuin ympäröivässä matalammassa luokituksessa, etenkin jos laitteessa käytetään poistoilmasuodatinta. Pientilan ei välttämättä tarvitsi edes sijaita puhdastilassa, jos tuotteen käsittely valmistuksen jälkeen voidaan suorittaa puhtaudeltaan hallitsemattomassa tilassa.

3. PUHDASTILOJEN ENERGIANKÄYTTÖ

Puhdastiloilta vaaditaan huomattavasti normaaleja tiloja tehokkaampaa ilmanvaihtoa sekä usein hyvinkin tarkkaa lämpötila- ja kosteushallintaa, jonka takia myös tilojen energiankäyttö on hyvin suuri. Pinta-alaan suhteutettu vuosittainen energiankäyttö voi puhdastiloissa olla yli 10-kertainen, jopa 100-kertainen, tyypillisiin toimistotiloihin verrattuna (Mills et al. 2008). Esimerkiksi Suomen Rakentamismääräyskokoelma asettaa uuden toimistorakennuksen E-luvun raja-arvoksi 100 kWh/(m²a), kun taas ISO-luokka 5 puhdastila voi käyttää yli 8000 kWh/(m²a) (Levy et al. 2015).

Merkittävä osa energiankulutuksesta liittyy juuri ilmanvaihtoon. Suurien ilmamäärien siirtäminen ja painehäviöiden kompensointi kuluttaa energiaa, mutta myös kosteudenhallinta, esimerkiksi ilmaa jäähdyttämällä ja uudelleen lämmittämällä vaatii runsaasti energiaa. Tehokas ilmanvaihto toisaalta edesauttaa tilojen lämpötilanhallintaa, eli tiloihin ei tarvitse yleensä tuoda suuria erillisiä lämmitys- tai jäähdytystehoja. Ilmastoinnin lisäksi tilojen sähkölaitteet, kuten valaistus ja prosessilaitteet, kuluttavat energiaa. Energiankäytön tehostaminen on kuitenkin tilojen suunnittelussa usein toissijaista ensisijaisesti pyritäessä varmistamaan tilassa käsiteltävien tuotteiden korkea laatu, sillä valmistettavien tai käsiteltävien tuotteiden arvo on monesti huomattavasti tilan olosuhdehallinnan käyttämän energian hintaa korkeampi. Tämän takia useista puhdastiloista löytyy runsaasti energiansäästöpotentiaalia.

3.1 Ilmastointi

Korkean puhtauden ja pienin hiukkaspitoisuuden lisäksi puhdastiloilta edellytetään usein myös muiden ilman ominaisuuksien tarkkaa hallintaa, joita ovat ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus. Näitä ominaisuuksia hallitaan myös normaalien tilojen ilmastoinnissa, mutta puhdastilojen ilmastoinnilta edellytetään jossain tapauksissa hyvin paljon tiukempaa hallintaa. Normaalilla ilmastoinnilla pyritään luomaan lämpötilaltaan ja kosteudeltaan tilan käyttäjälle miellyttävät olosuhteet, kun taas puhdastiloissa valmistusprosessi asettaa rajoitukset sallituille olosuhteille, jotka ovat tiukemmat kuin käyttömukavuuden asettamat rajoitteet.

3.1.1 Lämpötilanhallinta

Puhdastilojen lämpötilanhallintaan on kiinnitettävä normaaleja huonetiloja enemmän huomiota. Tyypillisesti puhdastiloissa ei tarvita erillistä lämmityslaitteistoa tilojen sijaitessa keskellä rakennusta ja sisäisten lämpökuormien ollessa suuria, mutta jäähdytys on joissain tapauksissa tiloissa tarpeellinen. Perustarpeen jäähdytykselle muodostaa jo puhdastilavaatetus ja käyttömukavuus, sillä tiloissa käytettävä puhdastilavaatetus on yleensä

perusvaatetusta huomattavasti paksumpaa, jolloin lämpötilan kohoaminen vaikuttaa nopeasti työskentelymukavuuteen. Kohonnut lämpötila lisää myös hikoilua ja täten lisää käyttäjien aiheuttamaa partikkelikuormaa, joten lämpötilanhallinnalla on myös vaikutusta puhtauteen. Jos tilassa tapahtuva toiminta ei aseta erityisiä vaatimuksia lämpötilalle, kannattaa puhdastilan lämpötila kuitenkin suunnitella hieman tyypillistä huonetilaa alhaisemmaksi. Tyypillisessä puhdastilassa käyttömukavuus onkin ensisijainen lämpötilaa ohjaava tekijä. Muita lämpötilahallintaan vaikuttavia tekijöitä on esimerkiksi valmistuksen tarkat mittatoleranssit, joiden pysyvyyteen valmistuksessa voidaan vaikuttaa hallitsemalla lämpötilaa ja näin materiaalin lämpölaajenemista tarkasti ja tarkka suhteellisen kosteuden hallinta, joka edellyttää myös tarkkaa lämpötilan hallintaa suhteellisen kosteuden ollessa riippuvainen lämpötilasta.

Vaikkei tiloissa varsinaista lämmitystä tarvittaisi, on tuloilmaa kuitenkin usein lämmitettävä. Puhdastiloissa tarvittavat suuret ilmamäärät tarkoittavat myös suurta energia- ja tehotarvetta ilmanvaihdon lämmitykseen. Yksinkertaisimmillaan ilmanvaihdon lämmityksen tehontarvetta voidaan arvioida kaavalla

$$P = q\rho c_p(T_{ti} - T_u) \quad (14)$$

jossa P on lämmitysteho, q ilmanvaihdon ulkoilman tilavuusvirta, ρ ilman tiheys, c_p ilman ominaislämpökapasiteetti, T_{ti} tilaan puhallettavan tuloilman asetustemperatuurilämpötila ja T_u ulkoilman lämpötila. Tehoon ja siten energiankäyttöön voidaan ensisijaisesti vaikuttaa ulkoilman tilavuusvirran kautta. Mitä enemmän voidaan tiloissa käyttää kierrätysilmaa, sitä vähemmän tarvitaan ulkoilmaa. Puhdastiloissa lämmitetyllä kierrätysilmalla voidaan myös osittain lämmittää ulkoa puhallettavaa tuloilmaa, jolloin ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin asetustemperatuurilämpötilaa T_{ti} voidaan pitää alhaisempana. Huonelämpötilaa alhaisemmalla tuloilman lämpötilalla saadaan aikaan myös tiloja jäähdyttävä vaikutus. Tyypillisesti suurien ilmanvaihtomäärien ansiosta ilmanvaihdon jäähdytyskapasiteetti on myös suuri.

Lämpökuorma ja jäähdytystarve puhdastiloihin syntyy käytettävistä laitteista ja mahdollisesti prosessien sivutuotteena, tiloissa työskentelevistä ihmisistä, valaistuksesta yms. apulaitteista, viereisistä tiloista johtumalla ja FFU-laitteita käytettäessä puhaltimien hukatehosta. Lisäksi kosteutta tuottavat prosessit ja ihmiset synnyttävät tilaan latenttia lämpökuormaa, joka on poistettava kiertoilmaa käytettäessä, etenkin jos tilassa vaaditaan tiukkaa kosteudenhallintaa. Kiertoilman osuus ilmanvaihdosta vaikuttaa muutenkin jäähdytystarpeeseen, sillä mitä suurempi osuus ilmanvaihdosta on kierrätysilmaa, sitä vähemmän tilaan tuodaan jäähdyttävää raitisilmaa. Jäähdytys voi tapahtua välillisesti jäähdytetyn veden avulla, joka soveltuu hyvin etenkin suuren lämpökuorman prosessilaitteisiin. Nestekiertoainen jäähdytys voi olla myös ainoa mahdollinen ratkaisu etenkin suuren lämpötehoisuuden laitteissa ja komponenteissa. Nestekiertoainen jäähdytys helpottaa toisaalta lämpötilanhallintaa, kun poistettava lämpökuorma ei lämmitä huoneilmaa, mutta

toisaalta vaatii putkituksien tuonnin tilaan, joka vaatii läpivientejä rakenteisiin. Jäähdytysjärjestelmän energiankulutukseen vaikuttaa poistettavien lämpökuormien lisäksi kylmäntuottojärjestelmän kylmäkerroin sekä pumppauksen hyötysuhde.

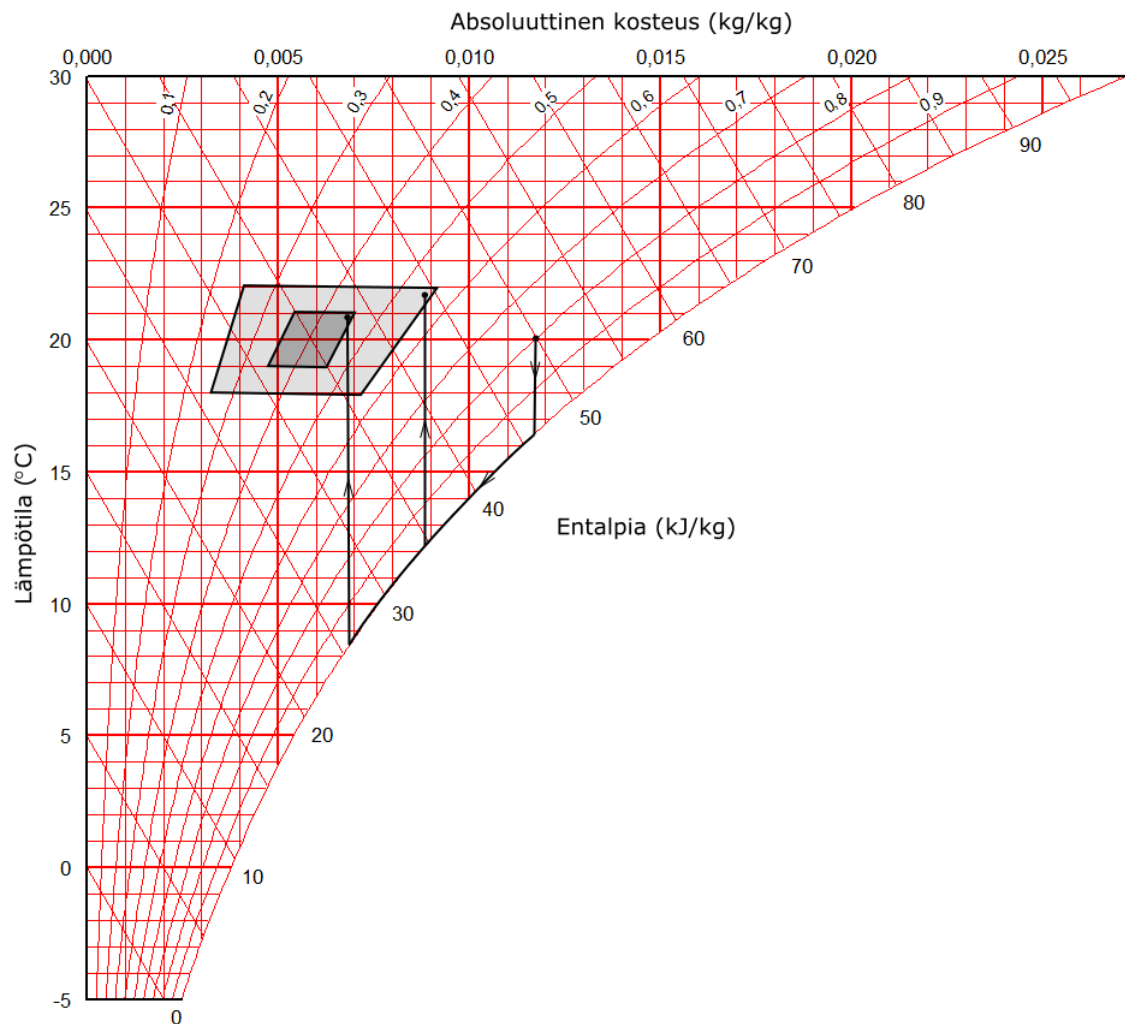
3.1.2 Kosteudenhallinta

Suhteellinen kosteus on lämpötilan lisäksi tärkeimpiä puhdastiloissa hallittavista ilman ominaisuuksista. Tyypillisesti puhdastiloissa lämpötilan sallittu vaihteluväli on samaa luokkaa kuin yleisesti talotekniikassa, mutta suhteelliselle kosteudelle voidaan asettaa hyvinkin tiukka toleranssi, erityisesti puolijohdetekniikan puhdastiloissa. Kosteuden asetusarvo on yleensä 30 – 50 % välillä, toleranssin ollen tiukimmillaan jopa ± 1 % optisen litografian valmistusmenetelmiä käyttävissä puhdastiloissa. Toleranssin tiukkuus myös vaikuttaa suoraan energiankäyttöön.

Suhteellisen kosteuden hallinnalle on useita syitä, puolijohdetekniikan valmistusteknisten syiden lisäksi. Jatkuva korkea, yli 80% suhteellinen kosteus edesauttaa mikrobikasvua, erityisesti yhdistettynä kertyneeseen pölyyn (Dannemiller et al. 2017). Terveysteen ja lääkevalmistukseen liittyvissä puhdastiloissa tämä on erityisen haitallista. Vaikka puhdastilojen hiukkas- ja pölypitoisuudet ovat matalia, on tiloissa kuitenkin usein joitain hankalasti puhdistettavia alueita, joihin pölyä mahdollisesti pääsee kertymään. Kiertoilmaa käytettäessä kiertoilman kanavat ovat myös tällaisia paikkoja. Toisaalta korkea suhteellinen kosteus vähentää puhdastiloissa haitallisen staattisen sähkön muodostumista, sillä kosteus muodostaa kappaleiden pinnalle ohuen johtavan vesikerroksen ja mitä suurempi suhteellinen kosteus on, sitä tiheämpi tämä pintakosteus on. Korkea suhteellinen kosteus nopeuttaa myös korroosiota (Dehri & Erbil 2000). Kokessaan Dehri ja Erbil tutkivat erityisesti polyesteripinnoitetun, mutta pinnoitukseltaan vaurioituneen tai puutteellisen teräslevyn korroosiota korkeissa ilmankosteuksissa. Suhteellisen kosteuden ylittäessä 70% pinnoitteen suojaava vaikutus laski nopeasti. Levyn pintaresistanssi 100% kosteudessa oli vain 2% matalamman 70% kosteuden pintaresistanssista. Kuten lämpötilan kanssa, myös kosteudenhallinnan vähimmäisvaatimukset tulevat käyttömukavuudesta. Korkea suhteellinen kosteus hidastaa kehosta tapahtuvaa haihtumisjäähdytystä ja saa näin ilman tuntumaan lämpimämmältä. Sopiva käyttömukavuuden takaava kosteuden asetusarvo riippuu henkilöstä ja puhdastilavaatetuksesta, mutta tyypillinen arvo on 30 – 60% välillä.

Mollier-diagrammin avulla voidaan havainnollistaa olosuhdehallintaa hyvin. Kuvassa 10 on esitetty Mollier-diagrammissa 20 °C lämpötilan ja 40 % suhteellisen kosteuden asetusarvossa ± 1 °C ja ± 5 % sekä ± 2 °C ja ± 15 % toleroidun sisäolosuhteen sallittu alue. Tuloilman ollessa esitetyn alueen ulkopuolella joudutaan sitä käsittelemään, joka vaatii energiaa. Tästä on kuvassa annettu myös esimerkkinä, kuinka 20 °C ja 80 % kosteaa tuloilmaa joudutaan kuivaamaan molempiin toleransseihin. Kuivaus tapahtuu jäähdyttämällä ilmaa, jolloin sitoutunut kosteus kondensoituu pois ilmasta. Myös muita kuivausmenetelmiä on olemassa, esimerkiksi silikageeliin perustuvat kuivauskiekot, mutta jääh-

dytyspatterilla tapahtuva kuivaus on yleisin menetelmä. Vaikka ilman lämpötila on valmiiksi asetusarvossa, joudutaan kosteudenpoiston takia sitä käsittelemään reilusti. Väljemmällä toleranssilla ilma on ensin jäädytettävä noin 12 °C:een, jonka jälkeen ilma lämmitetään uudelleen 22 °C:een, tiukemmalla toleranssilla ilma on jäädytettävä 8,5 °C asti. Entalpiana laskettuna väljemmällä toleranssilla on ensin poistettava $50-35=15$ kJ/kg ja tämän jälkeen tuotava $45-35=10$ kJ/kg ja tiukemmalla toleranssilla poistettava $50-26=24$ kJ/kg ja tuotava $38-26=12$ kJ/kg. Suhteellisen kosteuden tiukka toleranssi näkyy etenkin poistettavan entalpian määrässä, joka on 60% suurempi tiukemmalla toleranssilla. Uudelleenlämmityksen ei tarvitse kokonaan tapahtua ilmanvaihtokoneessa, vaan siinä voidaan hyödyntää myös tilojen lämpökuormaa. Ero uudelleenlämmityksen energiankäytössä jää siis vähäisemmäksi eri toleranssien välillä kuin jäädytyksen ja kosteuden poiston vaatiman energian välillä.



Kuva 10. Sisäolosuhteiden tolerointi Mollier-diagrammissa. Sisempi alue esimerkkinä tiukasta toleroinnista, ulompi väljemmästä

Mollier-diagrammista nähdään hyvin myös lämpötilan ja suhteellisen kosteuden yhteys. Tyypillisen 20 °C ja 40% suhteellisen kosteuden alueella asteen muutos lämpötilassa muuttaa suhteellista kosteutta noin 2%, joka on huomioitava määritellessä toleransseja.

3.2 Ilmanvaihtojärjestelmä

Ilmanvaihdon ollessa puhdastilatekniikan keskeisin osa, on se myös merkittävässä roolissa tilojen energiankäytössä. Puhaltimien toimintaa ja energiankäyttöä tutkittaessa tärkeimmät ominaisuudet ovat puhaltimien kierrosnopeus, tilavuusvirta, paineenkorotus ja teho. Puhaltimen kierrosnopeuden muutoksen vaikutus muihin ominaisuuksiin voidaan esittää affiniteetilakien avulla, jotka ovat

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (15)$$

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad (16)$$

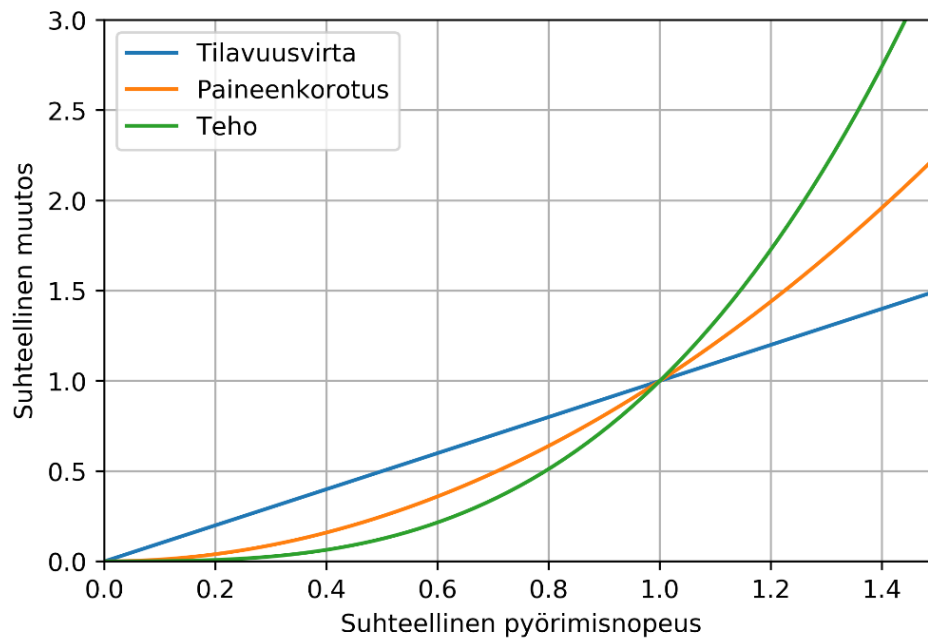
$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad (17)$$

joissa q on tilavuusvirta, n kierrosnopeus, Δp puhaltimen paineenousu ja P puhallinteho. Puhallinteho lasketaan kaavalla

$$P = \frac{\Delta p q}{\mu} \quad (18)$$

jossa μ puhaltimen hyötysuhde.

Kuvassa 11 on havainnollistettu affiniteetilakien vaikutusta pyörimisnopeuden funktiona. Affiniteetilait olettavat puhaltimen hyötysuhteen vakioksi, joten todellisten puhaltimien käyttäytyminen noudattaa hieman alhaisempia potensseja. Lisäksi esimerkiksi lämmitys- ja jäähdytysenergiankäytön muutos riippuu lineaarisesti ilman tilavuusvirran muutoksesta. Lait antavat kuitenkin arvion saavutettavasta teoreettisesta säästöpotentiaalista.



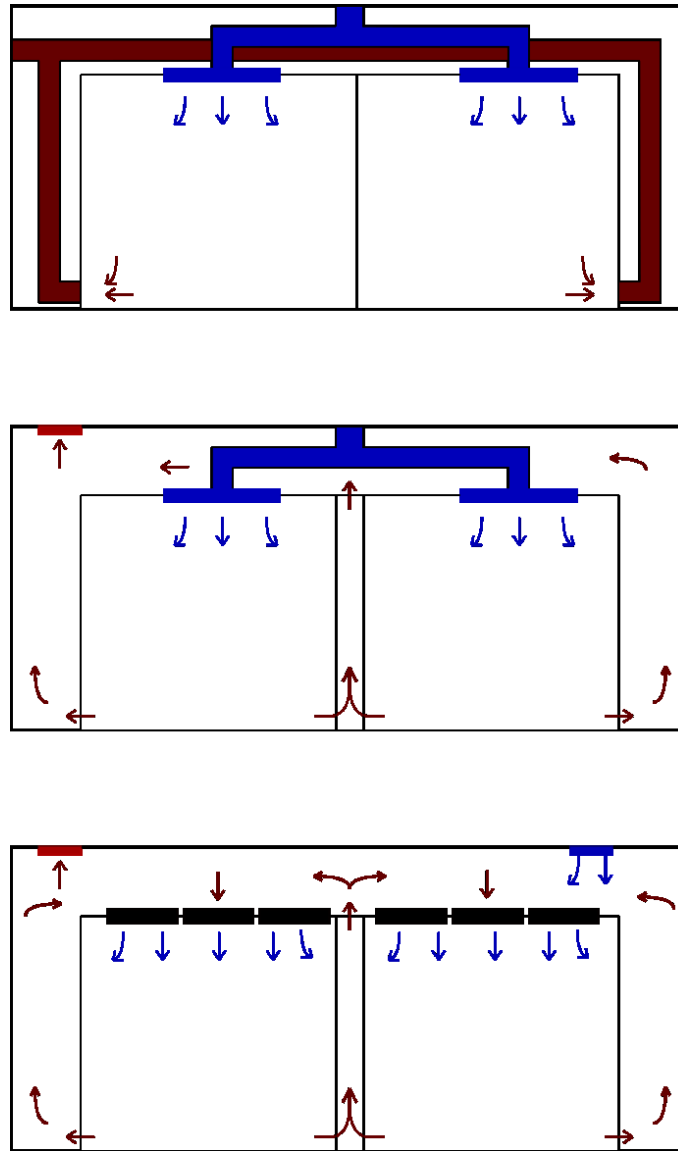
Kuva 11. Puhaltimen pyörimisnopeuden teoreettinen vaikutus tilavuusvirtaan, paineenkorotukseen ja tehoon

Ilmanvaihtojärjestelmän ja etenkin ilmanvaihtomäärien suunnittelu vaikuttavat keskeisesti ilmanvaihdon energiankäyttöön. Kuten kaavasta (18) nähdään, vaikuttavat tilavuusvirta ja järjestelmän painehäviö suoraan puhallintehoon. Eri puhdistilojen välillä voi olla siis suuria eroja ilmanvaihtojärjestelmän energiankäytössä, vaikka tilat olisivatkin luokiteltu samaan puhtausluokkaan. Mills *et al.* (2008) havaitsivat tutkimuksessaan suurimmillaan yli kuusinkertaisen eron ISO-luokka 5 puhdistilojen ilmanvaihtokertoimissa, alhaisimmillaan ilmanvaihtomäärien ollessa hieman alle 100 vaihtoa tunnissa ja suurimmillaan yli 600 vaihtoa tunnissa. Tutkituista 12 puhdistilasta kuitenkin 7 alitti tyypillisen suositellun ilmanvaihdon suunnittelumäärän, joka tutkimuksessa oli 250–625 vaihtoa tunnissa ISO-luokka 5:lle, kaikkien tilojen täyttäen kuitenkin puhtausvaatimukset, jonka perusteella voidaan kuitenkin olettaa ilmanvaihtosuunnittelun olevan pääsääntöisesti tarpeeseen perustuvaa. Ilmamäärien lisäksi myös kanavointi ja ilman siirtoon liittyvät ratkaisut vaikuttavat energiankulutukseen. Suurilla ilmamäärillä kanavapainehäviöt tulisi pyrkiä pitämään pieninä, joka edellyttää riittävän väljiä kanavia, matalia virtausnopeuksia ja lyhyitä kanavia. Käytännössä kuitenkin asennuksiin käytettävissä oleva tila rajoittaa suunnittelua ja kanavan mitoituksessa joudutaan hakemaan sopiva kompromissi eri ominaisuuksien välillä (Vasara *et al.* 2018).

Myös usein virtausmäärältään ja -osuudeltaan suuren kiertoilman käsittely voi vaikuttaa huomattavasti etenkin ilman lämmitys- ja jäähdytysenergiankäyttöön. Poistoilman käsit-

tely vaikuttaa myös merkittävästi energiatehokkuuteen. Tavoiteltavaa olisi, että lämmityskauden aikana poistoilmasta siirrettäisiin lämmöntalteenoton avulla lämmitysenergiaa tuloilmaan ja ulkoilman ollessa sisäilmaa lämpimämpi poistoilmalla jäähdytettäisiin tuloilmaa. Poistoilma voi kuitenkin sisältää haitallisia tai myrkyllisiä yhdisteitä, jotka on poistettava tilasta, joka rajoittaa lämmöntalteenottomenetelmien käyttöä ja joissain tilanteissa lämpöä ei voida ottaa talteen ollenkaan. Usein tiloissa käytetään erillisiä vetokaappeja käsitellessä myrkyllisiä tai muuten päästöiltään haitallisia materiaaleja, joiden poistoilma hoidetaan erillispoistojen avulla. Tällöin tilaan on tuotava poistoilmaa vastaava määrä ylimääräistä tuloilmaa, jotta tilan paineistus säilyy oikeana. Tämä luonnollisesti kasvattaa ilmanvaihtojärjestelmän energiankäyttöä, joten vetokaappeja tulisi pitää päällä vain tarpeen vaatiessa.

Lisäksi ilman tuontimenetelmä vaikuttaa järjestelmän energiankäyttöön, erityisesti painehäviön kautta. Tyypillisimmät ilmanjakojärjestelmät ovat kanavoidut päätelaitteet, kammio puhdastilan päällä, johon puhdastilojen poistoilma tuodaan ja poistetaan keskitetysti ja tuloilma huoneisiin tuodaan kanavoituna ja kolmantena jakojärjestelmänä erilliset suodatin-puhallin -laitteet, eli FFU-puhaltimet (Filter Fan Unit). Eri ilmanjakotavat ovat esitetty kuvassa 12. Tilan yläpuolista kammiota käyttäessä ilma voidaan kierrättää joko keskusilmanvaihtokoneen avulla, tai erillisten kierrätysilmapuhaltimien avulla. Tyypillisesti kammiolla toteutettu ilman tuonti on energiatehokkain tapa tuoda ja kierrättää ilmaa puhdastilassa. Kanavoitujen päätelaitteiden ja FFU-laitteilla toteutetun ilmanvaihdon energiatehokkuus on suunnilleen samaa luokkaa (Tschudi et al. 2001; Kircher et al. 2010). Toisaalta FFU-tekniikkaa on otettu puhdastiloissa käyttöön laajamittaisesti vasta 2000-luvulla, joten etenkin vanhempien FFU-laitteiden energiatehokkuuksissa voi olla suuriakin eroja, tekniikan ollessa vielä kehittymätöntä. Esimerkiksi Xu (2005) on mitannut yli 3 kertaisia eroja saman luokituksen tiloissa samojen ilmamäärien siirtämisessä, tehokkuuksien vaihdellessa 1276 – 4224 cfm/kW (1,66 – 0,50 kW/(m³/s)) välillä. Viime vuosina etenkin EU:n alueella on kiinnitetty kasvavissa määrin huomiota puhaltimien energiatehokkuuksiin, esimerkiksi tiukkenevien SFP-lukuvaatimusten (Specific Fan Power) ja ErP-direktiivin (Energy related Products) asettamien energiatehokkuusvaatimusten myötä, joten modernien FFU-laitteiden voidaan olettaa saavuttavan entistä korkeampia tehokkuuksia.



Kuva 12. Ilmanvaihtomenetelmät puhdistiloissa, kanavoidut päätelaitteet, kammio, ja FFU-laitteet

Kaavasta (18) nähdään, että ilman tilavuusvirran lisäksi myös paineenkorotus, eli ilmanjakojärjestelmän painehäviö vaikuttaa puhaltimen tehoon ja energiankulutukseen. Paineenkorotustarve muodostuu kanaviston kitkapainehäviöistä, suodattimien kertahäviöistä sekä tilojen paineistuksen asettamista vaatimuksista. Kanaviston painehäviö voidaan laskea kaavalla

$$\Delta p = \left(f_D \frac{l}{d_h} + \sum \zeta \right) \frac{\rho}{2} V^2 \quad (19)$$

jossa f_D on Darcyn kitkakerroin, ρ virtaavan aineen tiheys, V on virtaavan aineen kesimääräinen nopeus, d_h hydraulinen halkaisija, l kanavan pituus ja ζ on mutkien, suodattimien yms. kertavastuskerroin. Kammiollisen ilmanjaon tehokkuus voidaan selittää

poistoilman vapaan virtausreitillä avulla, jolloin poistoilmakanavan painehäviö korvautuu vapaan virtauksen merkittävästi pienemmällä häviöllä. On tärkeä myös huomata tilan paineistuksen vaikutus energiankäyttöön, sillä se kasvattaa suoraan ilmanvaihtopuhaltimelta vaadittua paineenkorotusta.

3.3 Sähkölaitteet

Erilaisten sähköisten tuotanto- ja apulaitteiden energiankäyttö on myös puhdastiloissa usein normaaleja tiloja suurempi. Valaistus on yleisin sähköinen apulaite, joka löytyy käytännössä kaikista puhdastiloista. Erilaisia puhdastilojen tuotanto- ja prosessilaitteita on paljon ja niiden käyttö riippuu puhdastilan tarkoituksesta, mutta etenkin puolijohdetoimisuudessa näiden laitteiden merkitys puhdastilan kokonaisenergiankäytöstä voi olla hyvinkin suuri, jopa 50 – 80 % (Chang et al. 2016). Korkeamman puhtausluokituksen puhdastiloissa usein myös sähköenergian osuus kokonaisenergiankäytöstä kasvaa (Mathew 2008), joka on osittain seurausta korkeammista ilmanvaihtomääristä ja suuremmasta puhallintehosta, mutta myös suuremmasta tilojen sähkölaitteiden energiankulutuksesta. Yleisiä apulaitteita ovat esimerkiksi veden puhdistukseen liittyvät laitteet ja paineilman ja höyryn tuottolaitteet. Sähkölaitteisiin liittyy olennaisesti usein myös virransyötön turvaaminen UPS-laitteilla (Uninterruptible Power Supply), jotka myös kuluttavat energiaa. Vetokaapit käsitellään yleensä myös ilmanvaihdosta erillisinä prosessilaitteina tutkittaessa puhdastilojen sähköenergiankulutusta.

Erilaisten apu- ja prosessilaitteiden energiankäyttöön vaikuttaa pääasiassa niiden järjestelmäkohtainen hyötysuhde ja niille asetetut toiminnalliset vaatimukset. Keinot näiden energiankäytön tehostamiseen järjestelmän ulkopuolelta ovat usein rajalliset, rajoittuen yleensä erilaisiin automaattoratkaisuihin. Esimerkiksi paineilman tuoton energiankäyttöön vaikuttaa ensisijaisesti vaadittu painetaso, painehäviöt ja kompressorin hyötysuhde. Automaatioilla, erityisesti tarve- tai aikaohjelmalla voidaan vaikuttaa järjestelmien päällä olemiseen ja näin vähentää energiankäyttöä kytkemällä niitä pois silloin kuin tiloissa ei ole käyttäjiä. Esimerkiksi valaistusta voidaan ohjata joko läsnäolo- tai aikaohjelmalla.

4. PUHDASTILAVALMISTUS

Työn yhtenä keskeisenä teemana oli tutkia erään puhdastilavalmistajan puhdastilojen tuotekehitysmahdollisuuksia. Kyseisen tilavalmistajan puhdastilat ovat alun perin kehitetty melko suoraan perustuen saman valmistajan päätuotteena tuottamiin kylmähuoneisiin, joten myös puhdastilojen tuotekehitys on seurannut ensisijaisesti kylmähuoneiden kehitystä. Diplomityössä oli tarkoituksena tutkia, miten puhdastiloja voitaisiin kehittää nimenomaan puhdastilatarpeet huomioiden.

4.1 Nykytilanne

Suurin osa työssä käsitellyn tilavalmistajan tehtaan tuotannosta on kylmä- ja pakastehuoneiden pikalukkokiinnitteisiä polyuretaanieristeisiä elementtiseiniä, kattoja ja ovia. Elementtejä on kahta päätyyppiä, naaras-naaras -pontillisia mittavarioitavia walk in -elementtejä sekä uros-naaras -pontillisia vakiohuone-elementtejä, jotka nimensä mukaisesti pyritään valmistamaan tietyillä vakio mitoilla. Käytetyt eristepaksuudet kylmähuone-elementeillä ovat 80, 100 ja 150 mm. Keskeisiä ominaisuuksia elementtien suunnittelussa ovat pieni lämmönjohtavuus, eli esimerkiksi kylmäsiltoja on pyritty rakenteessa välttämään, sekä palonkestävyys, joka ilmoitetaan CE-merkinnän suoritustasoilmoituksessa. Puhdastilaelementti perustuu walk in -elementtiin, merkittävimpana erona ollen pienempi 65 mm eristepaksuus. Suurin osa kyseisen tilavalmistajan toteuttamista puhdastilaprojekteista on liittynyt lääketieteellisiin puhdastiloihin, joka on myös pyritty huomioimaan pohdittaessa tuotekehitysmahdollisuuksia.

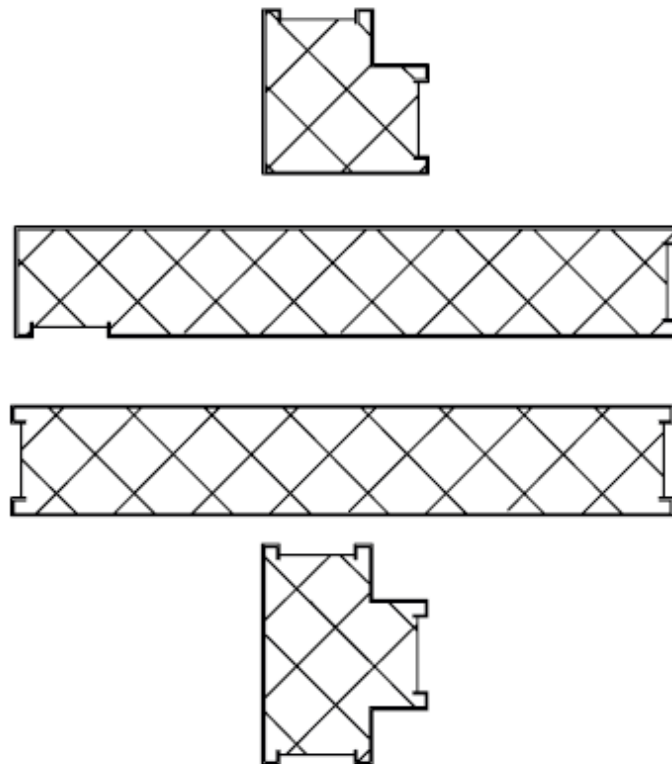
4.1.1 Seinäelementit ja ovet

Puhdastilaelementti koostuu kahdesta pintalevystä, polyuretaanieristeestä pintalevyjen välissä sekä pikalukoista, joilla elementit kiinnitetään toisiinsa. Pikalukko on toteutettu epäkeskomekanismilla, joka mahdollistaa lukon kiristämisen avulla vedon muodostamisen elementtien välillä ja näin tiiviin liitoksen muodostamisen. Elementin kaikilla sivuilla on suorakulmainen 10 mm syvä naarasponntti. Elementtiin voidaan asentaa ikkuna ja sähkörasioita putkituksineen. Lisävarusteena seinäelementteihin on mahdollista saada myös läpiankkaappi, joka on myös tilavalmistajan valmistama. Lisäksi tuotevalikoimaan kuuluu erillinen tekniikkaelementti, johon voidaan asentaa käyttövesiputkituksia ja pesuallas, sekä ilmakeinavaelementti poistoilmaa varten. Vaihtoehtoisesti poistoilmakanava voidaan toteuttaa elementeistä huoneen nurkkaan muodostetulla kulmalla. Tekniikka- ja ilmanvaihtokanavaelementtiin ei tule polyuretaanieristettä. Huoneen kulmat voidaan toteuttaa joko seinäkulmana, jossa elementti liitetään toisen elementin kylkeen päädyn sijaan, tai erillisen kulmaelementin avulla. Seinäkulmat ovat käytetympiä ratkaisuja kulmien toteu-

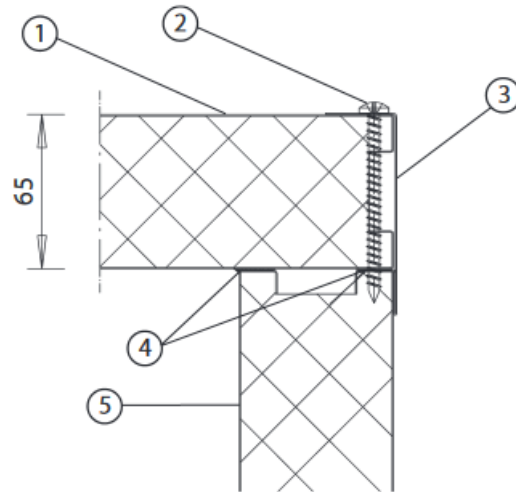
tuksessa kulmaelementtien hankalan valmistuksen takia. Vastaavasti elementtien T-liitokset voidaan toteuttaa joko erillisen asennuslistan avulla tai T-kulmaelementillä, joista myös lista-asennus on käytetympi. Nämä elementtityypit on esitetty kuvassa 13.

Huoneiden katot ovat myös elementtirakenteisia ja toteutukseltaan vastaavat seinäelementtejä, merkittävimpana erona ruuvikiinnitteisten reunalistojen käyttö ulkoseinä-katto-liitoksessa, joka on esitetty kuvassa 14. Elementin pätyyn asennetaan pontin peittävä lista, jonka läpi porataan ruuvi, joka kiinnittää katon seinään tukevasti. Kattoelementit ripustetaan elementtien väliseen ponttiin asennettavien ripustustukikappaleiden avulla ulkopuolisen tilan kattoon joko säätötangon ja messinkiankkurin avulla tai silmukkaruuvien ja vaijerin avulla. Kattoon voidaan lisäksi asentaa HEPA-suodattimellinen tuloilmalaite, joka kytketään muun rakennuksen ilmanvaihtoon, ja valaisinluukkuja.

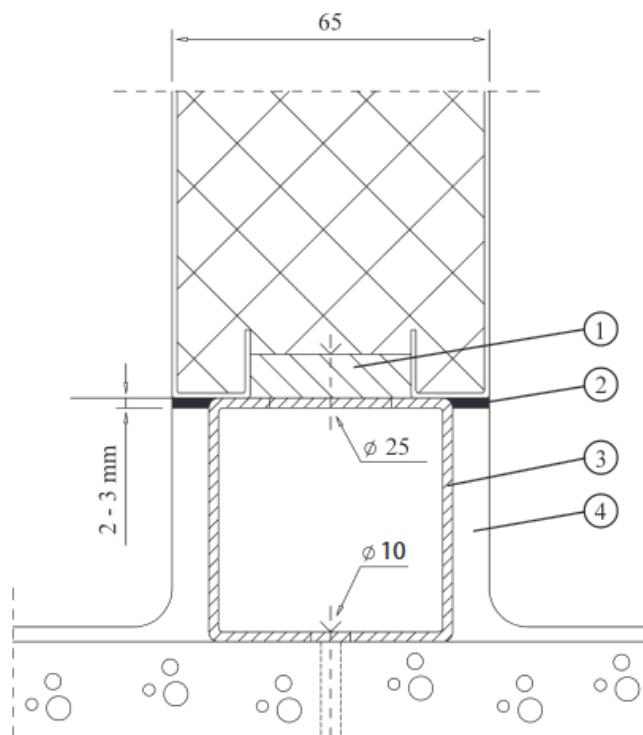
Liitos lattian ja seinäelementin välillä tehdään asentamalla polyeteenistä valmistettu pontin mittojen mukainen suorakulmainen tanko joko erillisen sokkeliprofiilin päälle tai suoraan lattiaan. Sokkeliprofiilia käytettäessä lattiapinnoite, esimerkiksi vinyyli, valetaan sokkelin päälle ja näin saadaan aikaan saumaton kulma lattian ja seinän rajaan. Seinän ja lattian liitos sokkelin avulla on esitetty kuvassa 15. Väliseinien liitoksissa risteäviin seiniiin ja kattoon käytetään ponttiin tulevaa piilokiinnityslistaa kuvan 16 mukaisesti.



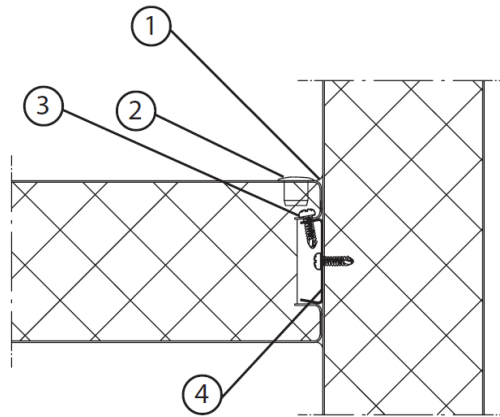
Kuva 13. Elementtityypit, kulma-, seinäkulma-, perus- ja T-haaraelementti



Kuva 14. Ulkoseinä-kattoliitos, 1) kattoelementti, 2) yleisruuvi, 3) reunalista 4) silikonimassa, 5) seinäelementti

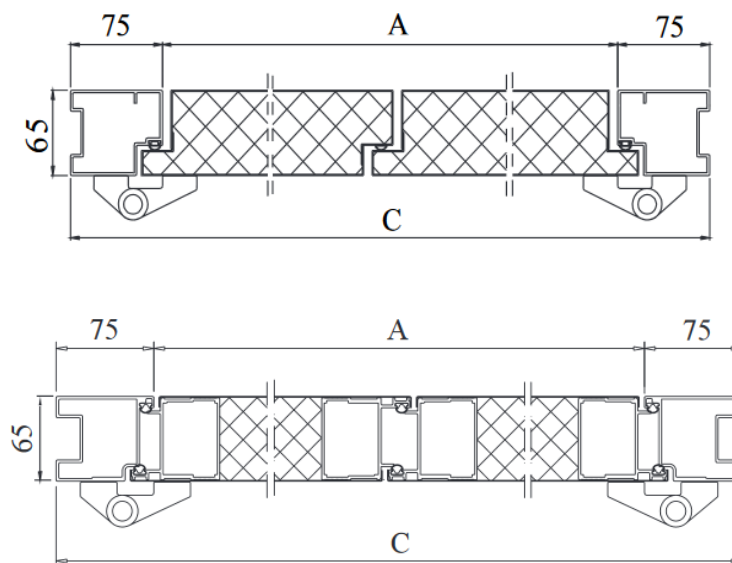


Kuva 15. Lattialiitos, 1) PE-latta, 2) silikonimassa, 3) sokkeliprofiili, 4) pinnoite



Kuva 16. Väliseinäliitos seinään ja kattoon, 1) silikonimassa, 2) peitetulppa, 3) levyruuvi, 4) piilokiinnityslista. Seinäliitoksessa ei käytetä ruuvia.

Puhdastilaovia on kahta tyyppiä, SG-ovi (Single Gasket), eli yhden tiivisteiden ovi, jossa tiiviste on asennettu karmiin ja DG-ovi (Double Gasket), eli kahden tiivisteiden ovi, jossa karmen lisäksi ovessa on tiiviste. Ovien pintamateriaalina käytetään seinäelementtejä vastaavasti teräslevyä, yleensä polyesterimaalattuna ja oven karmi voi olla valmistettu joko alumiiniprofiilista tai ruostumattomasta teräksestä. Ovityyppi valitaan tiiveysvaatimuksen perusteella, SG-mallin ollessa tiiveydeltään väljempi ja DG-mallin tiiviimpi. Ovia on mahdollista saada yksilehtisinä ja kaksilehtisinä, eli pariovina. Erilaisia varusteluvaihtoehtoja, esimerkiksi vetimien, lukituksen ja ikkunoiden suhteen on runsaasti, yhtenä tärkeimpänä interlock-järjestelmä. Kuvassa 17 on esitetty nämä ovet kaksilehtisinä. Yksilehtiset ovet ovat rakenteeltaan samanlaisia, mutta ilman keskisaumaa ja toista saranaa.



Kuva 17. Kaksilehtiset SG-ovi alumiinikarmilla (yllä) ja DG-ovi (alla)

4.1.2 Valmistusprosessi

Elementtivalmistuksessa on neljä päävaihetta, pintalevyjen valmistus joko levyradalla tai levytyökeskuksella, esikokoonpano, jos elementtiin tulee esimerkiksi sähkörasioita, elementtivalu ja pakkaus. Pintalevyt, jotka puhdastilojen elementtiseinissä ovat 0,6 mm pak-sua ruostumatonta terästä, pyritään ensisijaisesti valmistamaan levyradalla, jossa pintalevy valmistetaan levykelalta oikaisemalla ja leikkaamalla haluttuun mittaan. Oikaisun ja leikkauksen lisäksi levyradalla tehdään muovaukset pontteja varten rullamuovaamalla levyn pystysivut ja kanttaamalla päätypontit. Mahdolliset mitat levyradalla valmistettavalla levyllä ovat leveys 300 – 1250 mm ja pituus 1000 – 6000 mm. Jos pintalevyyn tarvitsee tehdä reikiä, valmistetaan pintalevyn reiät ensin levytyökeskuksella levyarkkiin, jonka jälkeen kantit tehdään käsikäyttöisellä särmäyspuristimella. Kulmaelementtien pintalevyjä ei voida kulman takia valmistaa levyradalla, vaan ne on tehtävä särmäyspuristimella. Esikalustuksessa pintalevyihin asennetaan tämän jälkeen mahdolliset lisävarustelut.

Valmiit pintalevyt kuljetetaan vaahdotuspuristimelle. Vaahdotuspuristimella kasataan ensin valulistojen avulla halutun kokoinen muotti elementille nostopöydälle. Valulistojen tehtävänä on pitää uretaani elementin sisällä, muodostaa pontit elementtiin, tukea päällimmäinen pintalevy ja tarjota kiinnityspinta pikalukkojen asettamiseen. Valulistat ovat valmistettu alumiiniprofiilista ja niitä on useissa eri mitoissa erilaisia elementtimittoja varten. Tämän jälkeen pintalevyt asetetaan muottiin, valulistat kiilataan tiiviiksi ja muotti siirretään vaahdotuspuristimeen. Elementti siis kootaan vaakatasossa, joka on tärkeä huomioida suunnittelussa. Vaahdotuspuristimessa elementtimuottiin ruiskutetaan polyuretaani valupistoolilla ja polyuretaanin annetaan paisua ja kuivua 30 minuuttia. Uretaanin kuivuttua ja kovettunutta elementti poistetaan puristimesta, valulistat irrotetaan talttojen avulla ja pintalevyille mahdollisesti päätyynyt uretaani siistitään pois. Kovettunut polyuretaani muodostaa jäykän, kuormaa kantavan ja ponneaineena käytetyn n-pentaanin muodostaman solurakenteen ansiosta hyvin lämpöä eristävän rakenteen. Kulmaelementtien rakenteen poiketessa merkittävästi seinäelementeistä, on ne valmistettavalla erillisellä kulmamallisella vaahdotuspuristimella. Lopuksi naaraspontteihin liimataan eristenauhaa täyttämään naaras-naaras -liitoksessa syntyvä elementtien välinen tyhjä tila.

Puhdastilaovi koostuu kolmesta pääosasta, ovilehdestä, karmista ja heloista. Ovilehti muodostuu ulko- ja sisälevystä. SG-ovessa ulkolevy on leveämpi kuin sisälevy, jonka tarkoituksena on muodostaa vastinpinta karmin tiivisteeseen. DG-ovessa ulko- ja sisälevy ovat taivutettu alumiinisen päätyprofiilin ympärille, jossa on sekä tiiviste että vastinpinta karmin tiivisteelle. Ulko- ja sisälevy valmistetaan levytyökeskuksella ja oven rakenteesta riippuen kalustukset tehdään joko ennen valua ja valun jälkeen. Polyuretaanin valamien tapahtuu oviin samalla tavalla kuin elementteihinkin vaahdotuspuristimella. Karreja on kolme tyyppiä, SG-oville teräslevystä valmistettu tilavalmistajan omavalmisteinen karmi sekä alihankintana ostettu alumiiniprofiilikarmi ja DG-oville alumiiniprofiilikarmi. Alumiiniprofiilia toimitetaan pitkinä tankoina, jotka sahataan tilavalmistajan toimesta

vaadittuun mittaan. Kulmat tehdään 45° sahauksella ja karmin osat liitetään toisiinsa erilisen kulmapalan avulla ruuvi- ja liimaliitoksella. Erilaisia helavaihtoehtoja on runsaasti esimerkiksi vetimien ja telkien suhteen ja niitä toimitetaan myös asiakkaan erikoisvaatimuksien mukaan.

4.2 Tuotekehitysmahdollisuudet

Nykyinen puhdastilaelementti perustuu edellä esiteltyyn walk in -kylmähuone-elementtiin eroten ainoastaan eristepaksuudeltaan, joka on puhdastiloissa 65 mm. Puhdastilalla ja kylmähuoneella on kuitenkin erilaiset vaatimukset tilan toiminnalle, joten diplomityössä oli tarkoitus selvittää miten puhdastilaelementtiä ja muita puhdastilatuotteita voitaisiin kehittää vastaamaan paremmin puhdastilojen vaatimuksia. Eroja kylmähuoneen ja puhdastilan välillä on esimerkiksi:

- Kylmähuoneissa tärkeintä on elementin hyvä lämmöneristyskyky, minkä takia rakenteissa tulee välttää esimerkiksi kylmäsiltoja. Puhdastilat taas yleensä ovat ulkopuolisten tilojen kanssa samassa lämpötilassa, jolloin seinien lämmöneristävyyden ei ole tärkeä ominaisuus.
- Puhdastilat ovat ulkopuolisiin tiloihin nähden huomattavan ylipaineisia, kun taas kylmähuoneet eivät ole. Puhdastiloissa rakenteiden on oltava tiiviimpiä kuin kylmähuoneissa, jotta paine-ero saavutetaan hallitusti.
- Elementin pintamateriaalin ominaisuudet, kuten puhdistettavuus, kemikaalikestävyys ja sähkönjohtavuus ovat puhdastiloissa tärkeämmässä roolissa kuin kylmähuoneissa.
- Puhdastiloissa ilmanvaihto on huomattavasti tärkeämmässä roolissa kuin kylmähuoneissa.

Tulevaisuudessa etenkin terveydenhuollossa puhdastilat ja puhdastilaperiaatteiden mukaiset tilatoteutukset ovat entistä merkittävämmässä roolissa tällä hetkellä luonnosteluasteella olevan CEN/TC156/WG18 sairaalailmanvaihtostandardin astuessa voimaan. Esimerkiksi leikkaussaleilta tullaan standardissa edellyttämään ISO-luokka 5 ja 6 mukaista ilmanpuhtautta, kun nykyisin suomalaisissa sairaaloissa ei ole yleisesti käytetty puhtausluokitusjärjestelmiä. Leikkaussalien lisäksi standardissa on suunnitteilla määritellä myös eristystiloille ilmanpuhtausvaatimuksia. Sairaalatiloissa myös elementtirakenteiden paloturvallisuus ja modulaarisuus ovat entistä tärkeämmässä roolissa. Kulkutiheys -reitit tiloista sisään ja ulos ovat myös sairaaloissa hyvin erilaiset kuin puhdastiloissa, joka edellyttää tiloilta myös tiheämpää ja tehokkaampaa puhdistusta, joka on hyvä huomioida elementtirakenteen suunnittelussa. (Vasara et al. 2018)

Nämä näkökulmat huomioiden työssä suunniteltiin puhdastilatuotelinjan kehitysmahdollisuuksia ja pohdittiin, mitä uusia ominaisuuksia puhdastiloihin voitaisiin tuoda. Tuotesuunnittelussa keskeisessä roolissa on lisäksi valmistusmenetelmien ja valmistettävyyden, eli DFM (Design for Manufacturing) huomiointi. Elementtivalmistus sisältää paljon

käsityötä, jolloin komponenttien yksinkertaisuus ja eri variaatioiden pieni määrä tehostaa tuotantoa, vähentää virheitä ja lyhentää läpimenoaikaa.

4.2.1 Eristepaksuus

Koska elementtien lämmöneristävyys ei ole puhdastiloissa kovin olennaista, tutkittiin yhtenä tuotekehitysmahdollisuutena eristepaksuuden pienentämistä. Vähentämällä polyuretaanin määrää elementeissä säästettäisiin materiaalikustannuksissa.

Tilanteissa, joissa puhdastiloissa on suuria lämpökuormia, helpottaisi eristyksen vähentäminen lämmönpoistoa seinien läpi. Toisaalta jos ympäröivän tilan lämpötila on puhdastilaa korkeampi, siirtyy tällöin seinien kautta tilaan suurempi lämpöteho. Elementin rakenteellisen lujuuden on myös säilyttävä riittävänä eristepaksuutta pienennettäessä, etenkin kattoelementeissä.

4.2.2 Pintamateriaalit

Kuten edellä on esitetty, ovat puhdastilojen pintojen materiaalit tärkeässä roolissa tilan toiminnassa ja puhtauden ylläpitämisessä. Työssä käsitellyn puhdastilavalmistajan pintamateriaalivalikoimaan kuuluu kuitenkin vain pinnoitettuja teräslevyjä, joista yleisimpänä polyesterimaalattu teräslevy, joten yhtenä tuotekehitysmahdollisuutena tutkittiin uusien pintamateriaalien käyttöönottoa. Monilla erityisesti puhdastilaelementteihin erikoistuneilla valmistajilla on runsaasti erilaisia pintamateriaalivaihtoehtoja ja näitä tuotteita vertailemalla, eli ns. bechmarkingin kautta kartoitettiin erilaisia materiaalivaihtoehtoja. Valmistajia, joiden tuotevalikoimiin perehdyttiin, olivat mm. Terra Universal, American Cleanrooms, Portafab, Connect 2 Cleanrooms, Plascore, Kingspan, Cleangrad, Clean Rooms West, ja Clean Air Products. Tuotevertailun pohjalta yleisimmiksi pintamateriaaleiksi saatiin:

- Polykarbonaatti
- Lujitemuovi
- Akryyli
- Polyvinyylidikloridi (C-PVC, chlorinated polyvinyl chloride ja U-PVC, unplasticized polyvinyl chloride)
- Polypropeeni
- Korkeapainelaminaatit

Eri materiaalien ominaisuudet poikkeavat paljon toisistaan, joten niiden soveltuvuus valmistajan elementtituotantoon oli arvioitava. Puhdastilavalmistajan nykyisen elementtituotannon perustuessa pääasiassa ohutlevyvalmisteisiin pintalevyihin, on etenkin eri materiaalien valmistettavuusnäkökulmat nykyisellä laitekannalla otettava huomioon. Toisaalta on myös tärkeä arvioida vaihtoehtoisten materiaalien tuomat uudet ominaisuudet suhteessa niiden hintaan. Uusia ominaisuuksia, joita pintamateriaaleilta tutkittiin, olivat

mm. mekaaninen kestävyys kulutusta ja iskuja vastaan ja entistä parempi hygieenisuus, joka on toivottu ominaisuus etenkin lääketieteellisissä puhdastiloissa, joihin tilavalmistajan tuotanto on keskittynyt.

4.2.3 Ovet

Tilavalmistajan puhdastilatuotannon keskittyessä elementtivalmistukseen, ovat rakenteeltaan ja varusteluvaihtoehdoiltaan monimutkaisemmat puhdastilaovet usein valmistusmääriltään pienessä roolissa puhdastilaprojekteissa. Kuten seinäelementeissä, myös puhdastilaovet pohjautuvat samaan valmistustekniikkaan kuin kylmähuoneovet ja puhdastiloissa myös ovilta vaaditaan erilaisia ominaisuuksia kuin kylmähuoneissa. Erilaista valmistustekniikkaa hyödyntämällä voitaisiin ovelle asetetut puhdastilavaatimukset, joita ovat esimerkiksi tiiveys ja puhdistettavuus, saavuttaa paremmin kuin tilavalmistajan käyttämällä ohutlevytekniikalla. Ovien valmistus sisältää lisäksi paljon käsityötä vaatien käytännön tuntemusta, niin sanottua hiljaista tietoa ja usean pitkäaikaisen ovivalmistuksen työntekijän eläköityessä lähiaikoina, on puhdastilaovivalmistuksen tulevaisuus nähty haasteellisena.

Tältä pohjalta on harkittu puhdastilaovien alihankintaa. Tämä mahdollistaisi tuotannossa keskittymisen neliömääräisesti laskettuna valmistusmääriltään huomattavasti suuremmissa roolissa olevaan elementtivalmistukseen ja usein projektien haasteellisemmän osuuden, eli ovien suunnittelun ja valmistuksen, karsimisen pois. Tämä nopeuttaisi projektien läpivientiaikoja. Ulkopuolinen, erityisesti ovivalmistukseen keskittynyt yritys, pystyisi tarjoamaan ovivaihtoehdot joustavammin ja mahdollisesti laajemmalla lisävarustevalikoimalla. Tämä myös parantaisi yleisesti puhdastilojen laatua, kun tiiveydeltään haastavat ovet tulisivat alihankkijalta, jos alihankintana ostettu ovi saavuttaisi paremman tiiveyden kuin nykyinen omavalmisteinen ovi. Alihankinta suunniteltiin kuitenkin toimivan niin, että puhdastilaoven karmi olisi edelleen tilavalmistajan suunnittelema, jolloin oven yhteensopivuus puhdastilaelementteihin on tilavalmistajan tuotekehityksen hallinnassa ja karmin immateriaalioikeudet säilyisivät tällöin myös tilavalmistajalla, jolloin ovien myynti puhdastiloihin olisi edelleen mahdollista vain tilavalmistajan kautta.

4.3 Kehitysmahdollisuuksien arviointi ja toteutus

Edellä esiteltyjä tuotekehitysmahdollisuuksia arvioitiin vertailemalla kilpailijatuotteita, kehittämällä uusi puhdastilaelementtirakenne, joka sopii ohutlevyvalmistuksen lisäksi myös muille materiaaleille sekä suorittamalla kustannusvertailua erilaisten ratkaisujen välillä. Lisäksi suunniteltiin ovien alihankintaa ja kehitettiin uudenlainen mahdolliseen alihankintaoveen soveltuva puhdastilakarmi. Erilaiset tuotekehitysideat mallinnettiin lisäksi tilavalmistajan käyttämällä CAD-ohjelmistolla ja tarvittavin osin malleista tehtiin myös valmistuspiirustukset prototyypivalmistusta varten.

4.3.1 Uusi elementtiratkaisu

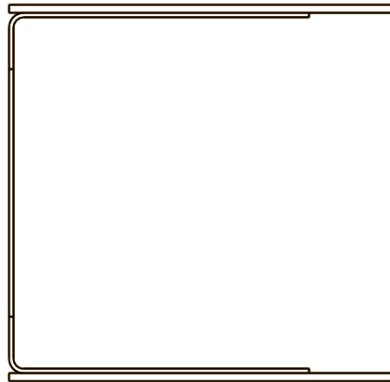
Nykyisen puhdistilaelementin valmistuksen nojatesa ohutlevyvalmistuksen tarjoamiin mahdollisuuksiin, erityisesti levyjen taivuttamiseen, vaatisi uusien pintamateriaalien käyttöönotto myös elementtiratkaisun uudistamista. Lähtökohtana uuden elementin suunnittelussa oli, ettei uudelle pintamateriaalille pystyttäisi tekemään nykyisen valmistusprosessin mukaisia taivutuksia. Uutta elementtiä suunnitellessa tutkittiin myös mahdollisuutta kaventaa eristepaksuutta nykyisestä 65 mm:stä 50 mm:iin, rakenne pyrittiin pitämään mahdollisimman yksinkertaisena valmistaa ja eri variaatioiden määrä pienenä. Lähtökohtana uuden elementin suunnittelussa oli nykyinen walk in -kylmähuone-elementtiin pohjautuva puhdistilaelementti, joka on perinyt tarpeettomana joitain kylmähuoneilta, muttei puhdistiloilta vaadittavia ominaisuuksia ja näiltä osin elementtiä pyrittiin myös uudistamaan vastaamaan paremmin puhdistilavaatimuksia.

Elementtivalmistuksen keskeisin osa on elementin kasaus ja täyttö vaahdotuspuristimella ja tämä on myös huomioitava elementtisuunnittelussa. Käytännössä elementti täytyy pysyä kasaamaan vaakatasossa joko elementin levyjen itse muodostaen ja kantaen rakenteensa tai rakenteen muodostuen valulistojen tukemana. Pintalevyjen ja muiden elementtien on oltava helposti asetettavissa paikoilleen ja myös pysyttävä paikoillaan kasauksessa.

Uudessa elementtiratkaisussa pintalevyjen väliin pystysivuille tulee erillinen päätylevy, joka korvaa nykyisen naaraspontin ja valulistan käytön. Tällä ratkaisulla saavutetaan useita hyötyjä. Nykyisellä naaraspontilla ei ole välttämätöntä toiminnallista merkitystä, vaan se tulee elementteihin pikemminkin valmistusteknisten syiden sivutuotteena ja joudutaan jälkikäteen täyttämään eristenauhalla. Ainostaan väliseinien kiinnityksissä hyödynnetään ponttia piilokiinnityslistaa käytettäessä. Päätylistaa käytettäessä tätä ponttia ei synny ja jälkityöstönä tehtävä eristenauhan kiinnitys jää pois. Uudessa elementissä elementtien väliset pinnat ovat koko sauman mitalta teräslevyä, kun nykyisessä elementissä metallipintaa on vain noin 30 mm ja muuten liitospinta on huokoista polyuretaania tai eristenauhaa. Elementtien välin ollessa täysin metallia, on elementtien väliselle silikoni-tiivisteelle käytettävissä enemmän pinta-alaa ja voidaan olettaa, että uudella ratkaisulla saavutetaan parempi ilmantiiveys. Pyrittäessä korkeaan energiatehokkuuteen, on etenkin elementtisaumojen tiiveys tärkeässä roolissa. Usein käytetty tavoitearvo ilmavuodolle tiloissa on $0,05 \text{ l}/(\text{sm}^2) \text{ 25 Pa}$ paine-erolla (Vasara et al. 2018).

Valmistuksessa päätylistalla voidaan korvata osittain nykyinen valulista. Alumiiniprofiiliset valulistat ovat kalliita valmistaa, etenkin jos otetaan käyttöön uusi 50 mm eristepaksuus, jolloin joudutaan tekemään täysin uudet valulistat tälle eristepaksuudelle. Käytettäessä päätylevyä voidaan elementti tukea sivuilta esimerkiksi standardimittaisilla suorakaideteräsprofiileilla, jotka ovat huomattavasti mittatilaustyönä tehtäviä alumiiniprofiileja halvempia. Päätelevyn voidaan olettaa myös vähentävän polyuretaanin leviämistä

valussa pintalevyille, joka vähentää jälkityöstönä tehtävän siistimisen tarvetta. Palokes-tävyuden voidaan olettaa olevan myös parempi, kun suurimman palokuorman aiheuttava polyuretaani on ympäröity levyillä myös elementin päistä, jolloin palon tunkeutuminen elementtisaumoista elementin sisään hidastuu. Suunnittelun tässä vaiheessa ei ole otettu kantaa pintalevyn materiaaliin, vaan pintalevynä voidaan käyttää mitä vain levymäistä materiaalia. Myöskään eristepaksuudella ei ole rakenteen toimivuuden kannalta merki-tystä, vaan ratkaisua voidaan käyttää sekä nykyisellä 65 mm eristepaksuudella sekä uu-tena harkitulla 50 mm paksuudella. Pikalukko kuitenkin asettaa rajoituksen elementin si-säpaksuudelle pikalukon vaatiessa 45 mm tilaa syvyysuunnassa. Käytettäessä 50 mm eristepaksuutta pintalevyjen maksimipaksuus on siis 2,5 mm. Vastaavaa päätylevyratkai-sua ei ole kylmähuoneissa voitu käyttää päätylevyn muodostaman kylmäsilan takia, mutta kuten edellä on todettu, ei puhdastiloissa kylmäsilloilla ole merkitystä.

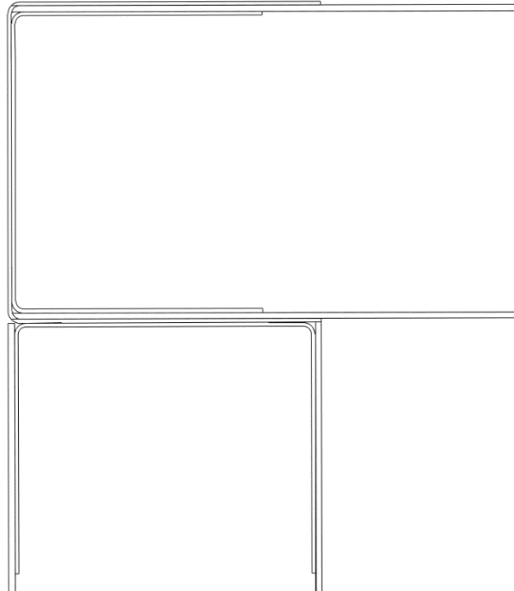


Kuva 18. Elementin toteutus päätylistan avulla

Elementin kasaaminen vaahdotuspuristimella ei merkittävästi muutu nykyisestä. Ele-menttimuottiin asetetaan ensin toinen pintalevy pohjalle, jonka jälkeen päätylevyt laite-taan pintalevyn päälle ja lopuksi päällimmäinen pintalevy asetetaan päätylevyjen kanttien päälle. Päätylevyn asema suhteessa pintalevyihin ei ole kasaussvaiheessa lopullinen, sillä vaahdotuspuristimessa elementtiin ruiskutettava polyuretaani paisuessaan työntää pää-tylevyjä kiinni elementtimuottiin ja näin päätylevy ja pintalevyt päätyvät samaan tasoon. Tämä helpottaa kasaamista, kun kasauksessa ei tarvitse varmistaa päätylevyn lopullista asemaa.

Seinäkulmien toteutus onnistuu myös helposti päätylevyrakenteella. Päätylevyyn tehdään pintalevyä vasten tuleviin kantteihin reiät pikalukkoja varten ja pintalevyyn jyrsitään vas-taaviin kohtiin aukot. Elementin pääty peitetään U-listalla, jolloin pintalevyjen päät ja päätylevy saadaan peitettyä ja näin ulkonurkasta siisti. Seinäkulma voidaan tällöin siis toteuttaa samoilla elementeillä kuin suorat seinät. Seinäkulma on esitetty kuvassa 19. U-listan näkyviin jäävä pääty tulisi joko pyöristää tai taittaa kaksin kerroin, jotta vältetään

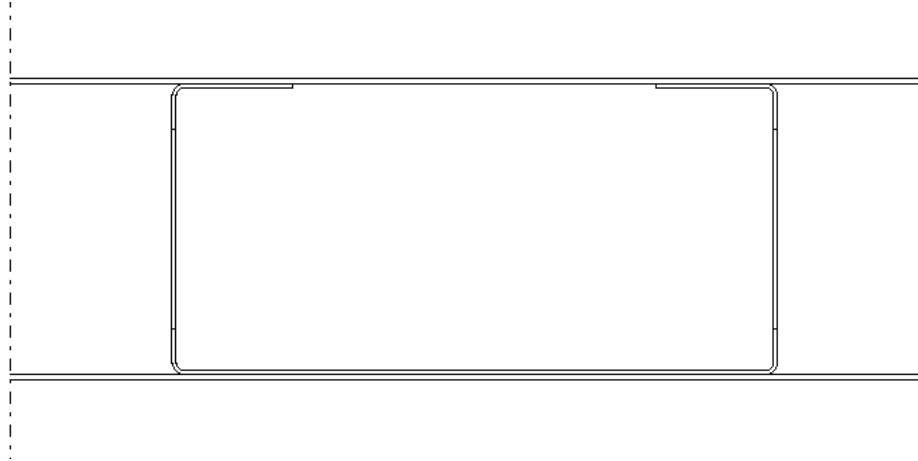
terävä reunan syntyminen elementin pintaa. Osavariaatioiden määrää voitaisiin vielä vähentää, jos kaikkiin päätylevyihin tehtäisiin seinäkulmien vaatimat pikalukkoaukot. Tällöin päätylevyjen valmistukseen tulisi peruselementeille ylimääräinen työvaihe levytyökeskuksella, joten on arvioitava, onko variaatioiden vähentäminen tämän ylimääräisen työvaiheen arvoista. Päätylevyt on kuitenkin joka tapauksessa työstettävä levytyökeskuksella päädyn pikalukkoreikien takia, joten täysin uutta työvaihetta tässä ei syntyisi. Pikalukon käyttö poikittain elementissä ei kuitenkaan onnistu lukon vaatiessa 70 mm tilaa syvyysuunnassa. Vakiohuoneissa käytettyä mitoiltaan erilaista pikalukkoa voitaisiin kuitenkin tässä rakenteessa käyttää sen naarasmallin vaatiessa vain 47 mm tilaa syvyysuunnassa. Vakiohuoneissa käytetty pikalukkomalli soveltuu muutenkin esiteltyyn elementtiratkaisuun paremmin kuin nykyinen walk in –pikalukko, sillä walk in –pikalukko tulee hieman asennuspinnan ulkopuolelle, joka on tasaista elementtipäättyä käytettäessä ongelmallista, kun taas vakiohuone-pikalukko tulee asennuspinnan kanssa samaan tasoon ja näin soveltuu paremmin esiteltyyn uuteen ratkaisuun.



Kuva 19. *Seinäkulma*

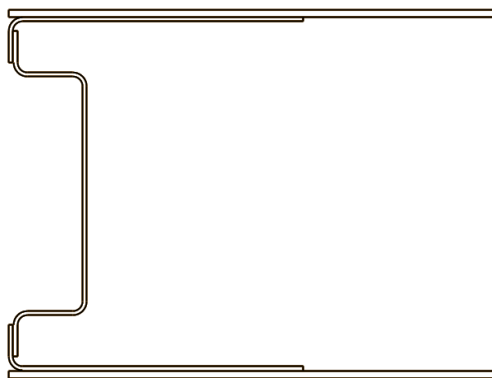
T-haarojen toteutukseen mietittiin kahta ratkaisua. Uudenlaisessa ratkaisussa haaran päätyelementtiin tehtäisiin elementin sisälle tyhjä tila U-mallisen listan avulla kuvan 20 mukaisesti. Elementti täytettäisiin tällöin kahdella ruiskutuksella. Lista on asennettuna irtopinnat pikalukkokiinnityksiä (eivät näy kuvassa 20) varten ja pintalevyyn on jyrstetty vastaaviin kohtiin aukot risteävän elementin urospikalukon kieltä varten. Listaa ei kuitenkaan voida sijoittaa elementtiin täysin mielivaltaisesti, sillä elementin täyttö tapahtuu päädyn valulistaan tehtyjen reikien kautta, joita on päädyn valulistassa kaksi kappaletta ja joiden on jäätävä listan molemmiin puolin. Tämä tuo taas huonesuunnitteluun lisähaastetta, kun T-haaroihin on mitoitettava risteävä elementti huomioiden U-listan asennusmahdollisuudet. T-haaran kohtisuora tuenta heikkenisi, kun kiinnityslistan tuoma tuki

poistuu, tosin tällöin tuenta vastaisi normaalin elementin tuentaa, eli sen voidaan olettaa olevan riittävä. Kiinnityslistan tuoma joustavuus seinän paikan suhteen huonetta kasattaessa voidaan myös osittain säilyttää, kun käytetään riittävän leveää U-listaa ja pikalukko-kiinnitystä varten jyrityt aukon elementissä ovat leveitä, jolloin risteävä elementti voidaan asentaa melko joustavasti suhteessa kuvan 20 elementtiin.



Kuva 20. U-listalla tehty aukko elementissä

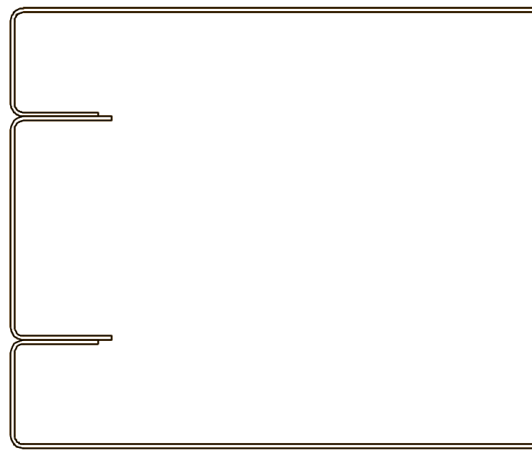
Toinen mahdollisuus olisi käyttää nykyistä, mitoitukseltaan ja asennettavuudeltaan joustavampaa kiinnityslista-asennusta. Tämä kuitenkin vaatisi pontin elementin päädyssä, joka uudesta elementistä on poistunut. T-haaraelementtien päädyssä voitaisiin kuitenkin käyttää erilaista, ponttimaista päätylevyä. Tällaisen päätylevyn valmistaminen on kuitenkin hieman hankalaa ja käytännössä se jouduttaisiin valmistamaan kolmesta osasta hitaamalla kuvan 21 mukaisesti.



Kuva 21. Ponttimallinen T-haarapääty

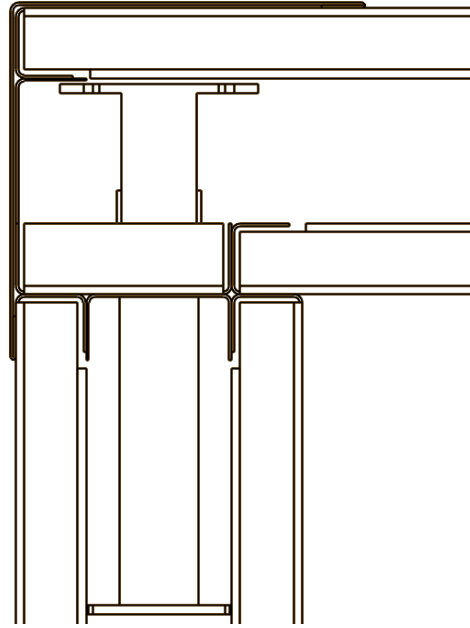
Kattoelementtien ripustusratkaisu jouduttaisiin uutta elementtiä käytettäessä muuttamaan. Ulkoseinä-katto -liitos olisi mahdollista toteuttaa edelleen nykyisellä kiinnityslistaratkaisulla, mutta elementtien ripustus ympäröivän tilan kattoon ei olisi mahdollista tehdä ponttiin asennettavien ripustuskappaleiden avulla pontin jäädessä pois elementin pitkiltä sivuilta uudessa rakenteessa. Mahdollinen ratkaisu olisi esimerkiksi kiinnittää uudenlainen ripustuskappale elementtien päälle ruuveilla. Lopullista ripustusratkaisua ei kuitenkaan lähdetty kehittämään, vaan myöhemmin esitellään uudenlainen paremman ilmanvaihtotekniikan mahdollistava kattoratkaisu.

Päätylevyratkaisua sovellettiin myös nykyiselle ohutlevyvalmisteiselle pintalevyille. Nykyiselle pintalevyille päätylevy olisi helpon käytettävissä, kun pintalevystä jätettäisiin viimeinen elementin sisään suuntautuva taivutus tekemättä, jolloin voitaisiin käyttää suoraan edellä esiteltyä päätylevyä myös käytettäessä teräslevyä pintalevynä. Levyradalla ei ole kuitenkaan mahdollista valmistaa pintalevyä, josta tämä taivutus olisi jätetty pois, joten samanlaista päätylevyä ei ole teräslevylle mahdollista käyttää. Käytännössä tämä on kuitenkin mahdollista saavuttaa käyttämällä eri mittoja päätylevyille kuvan 22 mukaisesti. T-haarapäätyjen toteuttaminen onnistuisi helposti tällä rakenteella, kun päätylevy asetettaisiin elementtiin toisin päin, jolloin päätyyn muodostuu nykyisen kaltainen pontti ja asennus kiinnityslistan avulla on mahdollinen



Kuva 22. *Päätylevy käytettäessä nykyistä pintalevyä*

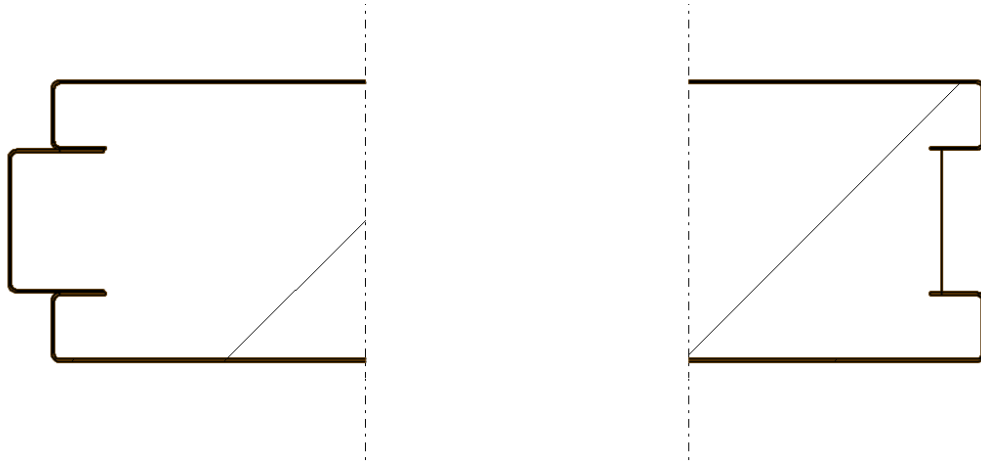
Seinäkulman toteutus onnistuu myös helposti käytettäessä nykyistä pintalevyä ja päätylevyä. Päätylevy jatketaan seinäkulmassa elementin pintalevyn puoleiselle sivulle kuvan 23 mukaisesti ja elementtiliitoksen ulkokulma peitetään listalla. Seinäkulmaliitoselementin päätylista on mitoitettu niin, että elementtien pintalevyt menevät osittain päällekkäin, jolloin liitoskulman sisäpuolen saumasta saadaan siistimpi, eikä sisäkulmassa välttämättä tarvita erillistä peitelistaa. Tämä myös parantaa sauman palokestävyyttä, joka on keskeisessä roolissa tehtäessä elementtien polttotestauksia.



Kuva 23. Seinäkulma päätylevyllä ja nykyisellä pintalevyllä. Kuvassa esitetty myös pikalukot

Elementtivalu suunniteltiin toteutettavan nykyisten valulistojen avulla, jolloin ei tarvitse teetättää uusia kalliita valulistoja, sillä myöhemmin esiteltävistä syistä johtuen päädyttiin nykyinen 65 mm eristepaksuus säilyttämään. Nykyisten pitkien sivujen ja uudessa elementtirakenteessa päätylevyllä peitetyn sivun valulistat käännetään ympäri ja listaan porataan paikat pikalukkojen kiinnitystapeille. Käännettäessä listat profiilissa oleva pontin muodostava uloke siirtää listoja 10 mm sisäänpäin, mutta tämä siirtymä voidaan kompensoida asentamalla vaakasivun valulistaan vastaavan mittaiset lisäpalat. Päätylevyt tuetaan valukokoonpanossa alemman pintalevyn särmäykseen, jonka lisäksi myös valulistaan pintalevyn päälle kiinnitettävät pikalukot tukevat listaa ja pitävät sen paikoillaan, kun päällimmäinen pintalevy asetetaan päätylevyjen ja päädyn valulistojen muodostaman tuen päälle.

Kuvan 22 mukaisen rakenteen vaatimien mittatoleranssien ja geometrinen toleranssien saavuttaminen kuitenkin nähtiin haastavaksi tehtaan tuotannon puolelta prototyypin valmistusta suunnitellessa. Pitkien ja kapeiden vastakkain tulevien päätylevyjen särmäyksessä levystä tulee helposti hieman kiero, jolloin kahden elementin vastinpinnat eivät täysin kohtaa. Lisäksi valussa on todettu, että elementtien ala- ja ylälevyt eivät välttämättä ole valun jälkeen päädyistään täysin samassa tasossa. Näiden geometrinen virheiden summautuessa ei elementtien välisestä liitospinnasta välttämättä saada riittävän tiivistä. Tältä pohjalta rakennetta jatkokehitettiin niin, että suora päädyn sijaan elementtien välissä käytettäisiin ponttia kuvan 24 mukaan. Urosponnissa käytetään edelleen listaa, mutta naarasponnissa on nykyisen rakenteen mukainen paljas uretaanipinta.



Kuva 24. Pontillinen elementtirakenne

Ponttia käytettäessä voidaan elementtien välille pontin sisään mitoittaa valmistustekniikan vaatima välys, joka tuo joustoa vaadittuihin toleransseihin. Edellä esitellyt päätylevyn tuomat hyödyt saavutetaan hyvin yhdelläkin levyllä, sillä elementtien kiinnityksen jälkeen urosponntin levy peittää myös naarasponntin uretaanipintaa. Pontti tekee rakenteesta myös tukevamman. Valussa naarasponntti saadaan aikaan käyttämällä nykyistä valmistusmenetelmää. Urosponnttia varten valulistan kääntöpuolelle on kiinnitettävä pitkä ja kapeat lisäpalat, jotka muodostavat pontin vastinmuodon valulistaan. Tämä on kuitenkin helposti toteutettavissa esimerkiksi pulttikiinnitteisillä alumiinikiskoilla, kun nykyisen valulistan kääntöpuolelle tehdään kiinnityskierteet pulteille.

4.3.2 Pintamateriaalien soveltuvuus

Edellä esiteltyjen puhdastiloissa yleisten pintamateriaalien ominaisuuksia vertailtiin keskenään sekä nykyiseen polyesterimaalattuun teräslevyyn. Lähtökohtaisesti maalattu teräslevy on hyvä ja kustannustehokas vaihtoehto, joka täyttää yleiset puhdastiloilta vaaditut ominaisuudet kuten pinnan sileyden, kemikaalikestävyys ja sähköiset ominaisuudet. Suuria heikkouksia teräslevyllä ei ole. Ohuen 0,6 mm paksun levyn käyttäytyminen teräviä iskuja vastaan voidaan nähdä sen heikoimpana ominaisuutena levyn taittuessa herkästi plastisesti. Rikkoutunut pinta voi myös altistua ruostumiselle, joka tuottaa hiukkasia puhdastilaan. Tiloissa, joissa käytetään vahvoja desinfiointiaineita kuten vetyperoksidikaasutusta, pinnoitettujen teräslevyjen heikkoutena on ollut desinfiointiaineen tunkeutuminen pinnoitteen ja levyn väliin saumoista tai rikkoutuneesta pinnasta, missä aine on kuplinut ja rikkonut pinnoitetta (Vasara et al. 2018). Ensisijaisesti tutkituilta uusilta pintamateriaaleilta haettiin uusia hyödyllisiä ominaisuuksia, sillä nykyinen teräslevyrakenne täyttää jo perusvaatimukset hyvin.

Materiaalivertailun perusteella korkeapainelaminaatit nähtiin yhtenä mahdollisena uutena pintamateriaalivaihtoehtona. Korkeapainelaminaatit muodostuvat kuitupitoisesta

ydinmateriaalista, yleensä erilaisista papereista, sekä hartseista, jotka puristetaan korkeassa paineessa (5-10 MPa) ja korkeassa lämpötilassa (150 °C) homogeeniseksi levyksi. Hartsi tunkeutuu korkean paineen ansiosta kuitumateriaaliin ja rakenne kovettuu muovimaiseksi. Materiaalina korkeapainelaminaatit ovat kovia, tiiviitä, jäykkiä, helposti puhdistettavia ja hyvin kulutusta kestäviä. Ydinmateriaalin ja hartsin valinnalla voidaan vaikuttaa laminaatin ominaisuuksiin, esimerkiksi sähköjohtavuuteen, kemikaalikestävyyteen ja palonkestävyyteen. Materiaaliin on mahdollista seostaa myös erilaisia lisäaineita. Tämä mahdollistaa puhdistiloissa hyödyllisten ominaisuuksien lisäämisen materiaaliin, kuten esimerkiksi antimikrobisten lisäaineiden avulla saavutettavan entistä paremman hygieenisyyden. Antibakteerisuus on etenkin terveydenhuoltoon liittyvissä puhdistiloissa toivottava ominaisuus.

Korkeapainelaminaattien käyttöönotto kuitenkin tuo useita haasteita, etenkin materiaalien työstöön. Korkeapainelaminaatteja valmistetaan vain tietyissä valmiissa levyko'oissa, jotka usein vastaavat kuitenkin hyvin tyypillistä puhdistilaelementin kokoa, eli noin 1200x2700 mm. Nykyisiä puhdistilaelementtejä tarjotaan hyvin joustavilla mitoilla teräslevyn hyvän valmistettavuuden ansiosta, usein jopa yhden millimetrin tarkkuudella, joten mitoiltaan rajoitetumman levymateriaalin käyttöönotto joko tarkoittaisi tarjottavien mittavaihtoehtojen rajaamista saatavilla olevien levykokojen mukaisiksi, rajoittamista saatavien levykokojen ympäristöön tai suurta materiaalihävikkiä, jos nykyinen mittajoustavuus halutaan säilyttää. Käytännössä levyjen mittatyöstöt eivät ole nykyisellä laitekannalla järkeviä, koska työstöt jouduttaisiin tekemään joko levytyökeskuksella, jos materiaali sopii levytyökeskuksella työstettäväksi, joka kuormittaisi levytyökeskusta liikaa etenkin suurissa projekteissa, tai työstöt olisi tehtävä käsin, jolla ei päästäisi kovin tarkkoihin mittatoleransseihin. Jyrsinnät ja levyn sisäiset leikkaukset esimerkiksi sähkörasioita ja ikkunoita varten vaativat korkeapainelaminaateilla myös erityishuomioita. Terävät kulmat voivat aiheuttaa halkeilua materiaalissa, jonka takia leikkauksilla täytyy olla riittävän suuret säteet. Tämä pitäisi kuitenkin olla helposti huomioitavassa valmistuksessa.

Korkeapainelaminaattien käyttäytyminen kosteusvaihteluissa aiheuttaa myös haasteita suunnitteluun ja varastointiin. Laminaateissa käytetyn kuitumateriaalin takia ympäristön suhteellisen kosteuden muutokset aiheuttavat niihin mittamuutoksia niin, että kosteuden kohotessa levyn mitat kasvavat. Tyypillisesti puhdistiloissa suhteellisen kosteuden vaihtelut ovat rajallisia ja ilmastoinnilla hallittu. Ongelmallisia ovat kuitenkin tilanteet, jossa elementti rajaa puhdistilan ja ympäröivän tilan, esimerkiksi kattoelementit. Vaikka puhdistilassa kosteus olisi hallittu, ei näin välttämättä ole ympäröivässä tilassa, jolloin elementin ulkopuoli voi pyrkiä laajenemaan tai kutistumaan enemmän kuin sisäpuoli, joka aiheuttaa jännityksiä elementtiin ja voi aiheuttaa pinnan käyristymistä tai jopa irtoamista polyuretaanista. Tämä kosteustoiminta olisi tarkkaan tutkittava ennen korkeapainelaminaattien käyttöönottoa. Jos syntyvät jännitykset ovat liian suuria, olisi mahdollinen rat-

kaisu käyttää elementin ulkopinnalla eri materiaalia, esimerkiksi kosteusvaihtelujen mukaan mitoiltaan muuttumatonta teräslevyä. Kosteuskäyttäytyminen on huomioitava myös tuotannossa. Pintalevyt tulisi pyrkiä säilyttämään ja valmistamaan käyttökohteen mukaisissa kosteusolosuhteissa, jotta elementeissä ei tapahtuisi asennuksen jälkeisiä mittavaihteluita ja näin elementteihin syntyisi jännityksiä. Nykyisissä tuotantotiloissa ei ole mahdollista varastoida levyjä kosteushallituissa olosuhteissa. Korkeapainelaminaattien kosteuskäyttäytyminen tulisi myös huomioida elementtisuunnittelussa niin, ettei kahden elementin pintalevyt ole täysin kiinni toisissaan, jolloin kosteuslaajentumiselle jää liikkumavaraa. Yleisesti suositus kahden levyn väliseksi raoksi on noin 3 mm, tosin voidaan olettaa, että puhdastiloissa, joissa kosteusolosuhteet ovat normaalia paremmin hallitut, voidaan käyttää pienempääkin rakoa. Tämä kuitenkin tarkoittaisi, että elementtien välissä olisi käytettävä riittävän joustavaa tiivisteenä, jotta vältetään puhdastiloissa haitallisten rakojen muodostuminen elementtien väliin. Silikoni, jota myös nykyisissä puhdastiloissa käytetään eristeenä, soveltuu ominaisuuksiltaan tiivisteeksi pintalevyjen väliin, mutta sen tuottamien kaasumaisten päästöjen takia se ei välttämättä kuitenkaan sovellu kaikkiin puhdastiloihin. Suurimmat haitat kaasumaisista epäpuhtauksista syntyvät elektroniikkateollisuuden puhdastiloissa, jotka toisaalta ovat vain pieni osa tilavalmistajan toteuttamista puhdastilaprojekteista. Käytännössä kuitenkin raon aikaansaaminen elementtivalmistuksessa voi olla haastavaa.

Toinen uusia ominaisuuksia tuova materiaali olisi PVC. PVC:n merkittävin etu on sen muokattavuus ja levyjen saumaton liitettävyyys liuottimien avulla. Tämä mahdollistaa elementtirakenteisissa puhdastiloissa syntyvien elementtien välisten saumojen tasoittamisen sulattamalla vierekkäisten elementtien saumapinnat yhteen, joka vähentää puhdastiloissa haitallisten epätasaisuuksien määrää seinäpinnoissa. Saumojen liittäminen yhteen toisaalta vähentää tilan modulaarisuutta, kun elementtien irrottaminen ja uudelleenjärjestely ei ole enää mahdollista, joten menetelmä soveltuu vain tilanteisiin, kun tilaa tai seinää ei ole tarkoitus jälkikäteen siirtää tai laajentaa. PVC:tä on yleisesti saatavilla valmiiksi sopivissa levyko'oissa, mutta sen valmistettavuuteen liittyy samat ongelmat kuin edellä esiteltyihin korkeapainelaminaatteihin. PVC:n heikko lämmönjohtavuus, noin sadasosa ruostumattoman teräksen lämmönjohtavuudesta, ja lämpökestävyys aiheuttaisivat ongelmia elementtivalussa. Uretaanin oikean paisumisen takaamiseksi elementin lämpötila tulisi olla vaahdotuspuristimessa noin 50 °C ja PVC:n yleisesti suositeltu maksimikäyttölämpötila on 60 °C, joka saattaa ylittyä vaahdotuspuristimessa pienen lämmönjohtavuuden takia. PVC:stä on kuitenkin olemassa enemmän klooria sisältävä seos ja näin lämmönkestävyydeltään hieman parempi PVC-C, jonka maksimikäyttölämpötila on noin 20 °C korkeampi ja näin sopisi paremmin nykyiseen valmistukseen.

PVC:n palokäyttäytyminen, erityisesti usein PVC:hen liitetty mielikuva myrkyllisistä palokaasuista, on myös sen heikkous. Materiaalina PVC on kuitenkin heikosti palava, itseltään sammuva palotuotteena syntyvän vetykloridin ansiosta ja sen palokuorma on pieni. Vetykloridi on kuitenkin myrkyllinen kaasu ja osittain tähän liittyy PVC:n maine palaessa

vaarallisena aineena ja osittain PVC:n epätäydellisessä palamisessa syntyviin myrkyllisiin dioksiineihin. Pistävän hajun takia vetykloridi on kuitenkin helposti havaittavissa ennen vaarallisen pitoisuuden muodostumista ja syntyvän vetykloridin määrä on usein pieni verrattuna esimerkiksi hiilimonoksidiin, joka on palotilanteissa yleensä vaarallisin syntyvä kaasu.

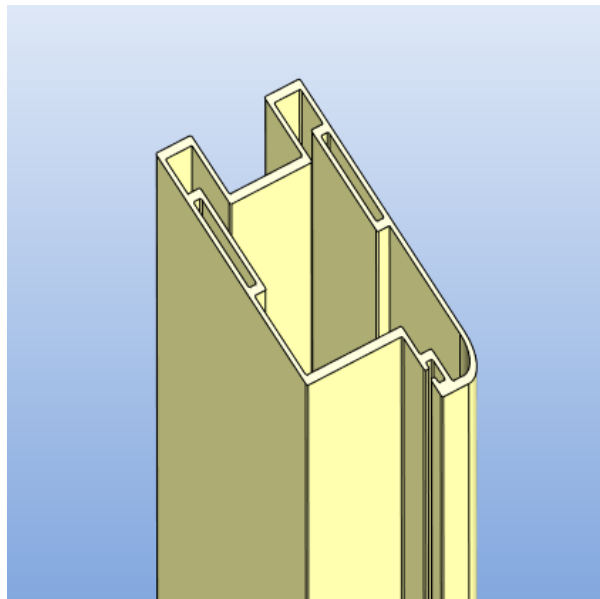
Kustannusvertailua varten pyydettiin tarjous kolmelta korkeapainelaminaattien maahan-
tuojalta ja valmistajalta ja PVC:n osalta vertailtiin verkosta saatavilla olevia hinnastoja. Kustannusmuutosten arviointia varten selvitettiin myös nykyisen elementin kustannus-
rakenne ja uusien pintamateriaalien vaikutus valmistuskustannuksiin arvioitiin tältä poh-
jalta. Nykyisen elementin kustannuksista merkittävä osa syntyy pintamateriaaleista, joten
uuden pintamateriaalin vaikutus kustannusmuutoksen oli merkittävä. Nykyisen teräsle-
vyn ollessa verraten halpa materiaali, tarkoittaisi etenkin huomattavasti kalliimpien kor-
keapainelaminaattien käyttöönotto myös kustannusten suurta kasvua. PVC-C:n arvioitiin
olevan suunnilleen samassa hintaluokassa teräslevyn kanssa, ollen mahdollisesti hieman
halvempi. Materiaalihävikki tulisi todennäköisesti myös uusilla, hankalammin nykyisellä
laitekannalla työstettävillä materiaaleilla kasvamaan, joka kasvattaisi kustannusmuutosta.

Elementtien pintamateriaalin lisäksi uusia materiaaleja olisi mahdollista käyttää element-
teihin asennettavissa ikkunoissa, jotka nykyisessä rakenteessa ovat 4 mm karkaistua lasia.
Lasin tiheyden ollessa noin 2400 kg/m^3 , on lasitetun elementtinelion massa, noin 10 kg/m^2 ,
noin kaksinkertainen teräslevyiseen verrattuna. Etenkin suuria ikkunoita käytettä-
essä elementin massa kasvaa reilusti, joka hankaloittaa elementin käsittelyä. Vaihtoehtoi-
sia materiaaleja lasille olisi esimerkiksi polymetyylimetakrylaatti eli akryyli ja polykar-
bonaatti, jotka ovat läpinäkyviä muoveja. Molempien tiheyden ollessa noin 1200 kg/m^3
ei nykyistä lasia vastaavaa materiaalipaksuutta käytettäessä elementtinelion massa kas-
vaisi teräslevyiseen verrattuna. Yleisesti lasille saatavilla oleva minimipaksuus on ny-
kyisin käytetty 4 mm, mutta akryyli- ja polykarbonaattilevyjä on saatavilla myös ohuem-
missa paksuuksissa, joita käyttäessä elementin massa jopa pienenee.

Akryyli sekä polykarbonaatti ovat myös iskunkestävyydeltään huomattavasti lasia pa-
remmat, akryylin Izod-iskunkestävyyden ollessa 60-190 J/m ja polykarbonaatin vielä
huomattavasti korkeampi 370-960 J/m (Utracki & Wilkie 2014, s. 1023-1115; Sastri
2014). Murtuessaan karkaistua lasi murenee pieniksi paloiksi, kun taas akryyli ja polykar-
bonaatti halkeavat. Naarmutuskestävyys toisaalta molemmilla materiaaleilla on lasia hei-
kompi, joka vaatii erityishuomioita materiaalien puhdistuksessa, etenkin hankaavia me-
netelmiä käytettäessä. Materiaaleissa voidaan kuitenkin käyttää naarmutuskestävyyttä
parantavia pinnoitteita.

4.3.3 Karmi

Uutta karmia lähdettiin suunnittelemaan erään mahdollisen yhteistyökumppanin tarjoaman oven mittojen perusteella. Keskeisin mitta karmia suunnitellessa oli oven paksuus, joka mahdolliselle uudelle ovelle on 40 mm. Lisäksi ovi vaatii tiivistettä varten 3 mm välyksen ennen vastinpintaa. Lähtökohtana käytettiin nykyistä alumiiniprofiilikarmia. Karmin toteutusta mietittiin sekä nykyiselle 65 mm paksulle elementille, että uudelle 50 mm elementille. Kapeammalla 50 mm paksulla elementillä tiivisteuran ja oven vastinpinnan muotoilu oli ongelmallista pienen käytettävän syvyyden takia, joka oli vain 7 mm oven vaatiessa 43 mm syvyysuuntaista tilaa. Tiivisteurasta ja -pinnasta tulisi joko hankalan muotoinen, karmista terävästi ulos pistävä ohut ulkonema, jollaisia muotoja tulisi puhdistiloissa välttää, tai karmin olisi oltava elementtiä paksumpi. Nykyiselle, 65 mm paksulle elementille, karmi pystytään muotoilemaan paremmin puhdistiloihin sopivaksi. Tiivisteuran puoleinen kulma voidaan pyöristää ja näin esimerkiksi helpottaa kulkuaukon puhdistamista. Kuvassa 25 on esitetty 65 mm elementtipaksuudelle suunniteltu karmiprofiili. 50 mm paksulla karmilla kuvassa oleva oikeanpuoleinen seinämä alkaisi suoraan tiivisteuran kohdalta ja pyöristystä ei olisi mahdollista saada nurkkaan.



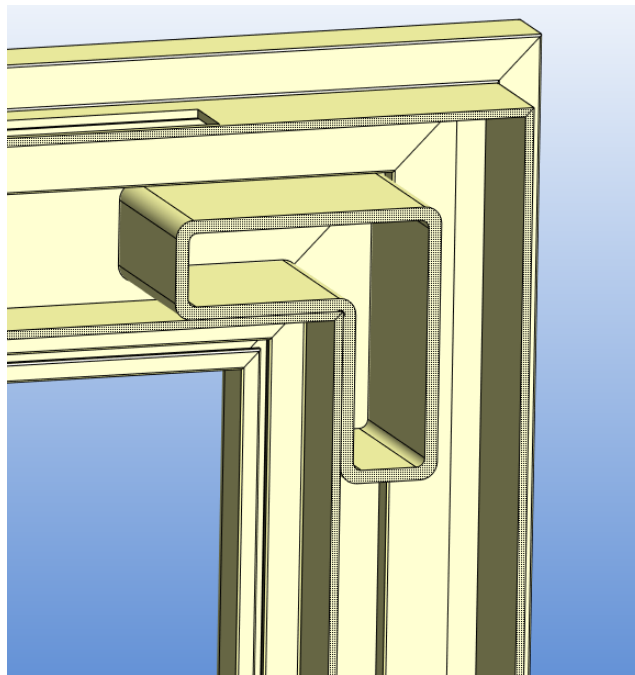
Kuva 25. Karmiprofiili

Uutena ominaisuutena suunniteltiin karmin kiinnitys elementtien tapaan pikalukkojen avulla. Nykyinen karmi asennetaan ruuvien avulla ponttiin kiinnitettäviin sovitelevyihin. Pikalukkokiinnitys parantaisi puhdistilojen modulaarisuutta ja helpottaisi asennusta, kun karmi pystyttäisiin kiinnittämään ja irrottamaan samalla tavalla kuin elementit. Tämä helpottaisi myös esimerkiksi isojen koneiden tai tuotteiden kuljettamista tilaan, kun karmi voidaan irrottaa helposti ja näin tehdä enemmän tilaa tuoda laitteita tilaan. Pikalukkokiin-

nitys toteutettaisiin jyrsimällä karmin seinäelementin puoleiseen seinämään kiinnityspinna pikalukolle. Pikalukkokiinnityksen lisäksi karmi suunniteltiin niin, että myös nykyinen ruvikiinnitys on mahdollinen, sillä joissain tapauksissa karmi voidaan asentaa myös paikkaan, jossa karmin viereen ei ole mahdollista saada pikalukkoja.

Pikalukkokiinnityksessä ongelmana on kuitenkin karmin tuenta pikalukkoa kohtisuorassa suunnassa, kuvassa 25 tiivisturaa kohtisuorasti, joka pikalukolla on hyvin heikko. Tätä tuentaa on pyritty parantamaan lisäämällä karmin alaosaan aukko sokkelille ja lisäämällä profiilin sisään tukipala, joka tulisi sokkelin ja karmin väliin ja näin tukisi karmia kohtisuorassa. Karmin yläosa tuettaisiin elementin päätyyn kiinnitettävän U-mallisen asennuspalan avulla, samaan tapaan kuin väliseinät. Jos sokkeliä ei voida käyttää, voitaisiin tuenta suorittaa koko karmin matkalta U-listalla, tai käyttää nykyistä ruvikiinnitystä.

Vaaka- ja pystykarmit tuetaan toisiinsa lisäksi kiinnityskappaleella, joka asennetaan karmiin sisään jiirin sahattuihin nurkkiin. Nykyisessä karmissa käytetään koko karmin sisäosan täyttävää kulmapalaa. Karmiin asennetaan usein erilaisia sähkökytkentöjä, esimerkiksi interlock-järjestelmän sähkölukituksia avauspainikkeineen, joiden sähkökytkennät on vietävä puhdastilan ulkopuolelle. Tämä olisi mahdollista muuten tehdä onton karmin sisällä, mutta karmin sisäosan täyttävä kulmapala estää johdotuksien viennin karmien yläpuolelle. Uuteen karmiprofiiliin suunniteltiin tämä huomioiden uudenlainen kiinnityskappale, joka ei täytä koko karmia kuvan 26 mukaisesti, ja näin mahdollistaa johdotuksien viennin myös karmien sisällä.



Kuva 26. Tukipala karmien jiirikulmaan, leikkaus karmien sisältä

4.3.4 Eristepaksuuden pienentäminen

Eristepaksuuden pienentämisen vaikutuksia ja mahdollisuuksia tutkittiin eri vaiheissa suunnittelua ja lisäksi suoritettiin kustannusvertailua nykyisen ja uuden 50 mm eristepaksuuden välillä. Eristepaksuuden muuttaminen vaatisi käytännössä uusien valulistojen teettämistä, sillä 50 mm paksuista elementtiä ei ole tuotannossa ikinä ollut. Valulistojen teettäminen on myös melko kallista, etenkin jos nykyinen kaikilta neljältä sivulta ponttilinen elementti säilytetään tuotannossa, jolloin eri elementtileveyksiä varten on oltava runsaasti eri mittaisia valulistoja. Täyden alumiinipursotetun valulistasarjan teettämisen kustantaa noin 30 000 e ja kustannusvertailun perusteella elementin kaventamisella säästettäisiin alle 2 e yhtä elementtiä kohden, jolloin takaisinmaksuaika olisi kohtuuttoman pitkä. Pikalukon mahtuminen elementtiin saattaa myös tuottaa ongelmia, lukon leveyden ollessa 45 mm, etenkin jos uusia pintamateriaaleja otetaan käyttöön. Käytännössä uuden pintamateriaalin maksimipaksuus rajoittuu tällöin 2,5 mm:iin. Edellisessä luvussa esitelty karmiprofiilin suunnittelu on myös haastavaa 50 mm elementille.

Eristepaksuus vaikuttaa myös tilan energiankäyttöön. Puhdastilan lämpötila on usein ympäröiviä tiloja tarkemmin hallittu, jolloin tilojen välille voi syntyä lämpötilaero ja näin myös lämpövirta. Eristepaksuuden vaikutus lämpövirtaan ja sen hyödyllisyyteen on kaksijakoinen. Puhdastiloilla on yleensä vain vähän yhteistä seinäpinta-alaa rakennuksen ulkoseinien kanssa ja tilojen sisäiset lämpökuormat ovat yleensä suuret, eli tiloista on käytännössä aina poistettava lämpöä ja lämmitystä ei tarvita. Eristepaksuuden pienentäminen on tällöin hyödyksi tilanteissa, joissa ympäröivien tilojen lämpötila on puhdastiloja alhaisempi ja haitaksi, kun ympäröivä lämpötila on korkeampi. Tätä lämpötilakäyttäytymistä voidaan arvioida esimerkiksi U-arvon perusteella. U-arvo määritellään

$$U = \frac{1}{\sum R} \quad (20)$$

$$R = \frac{L}{\lambda} \quad (21)$$

jossa R on rakenneaineen lämmönvastus, L on rakenneaineen paksuus ja λ on rakenneaineen lämmönjohtavuus. Tutkittavalle puhdastilaelementille U-arvo lasketaan siis

$$U_{pt} = \frac{1}{2\frac{d_t}{\lambda_t} + \frac{d_{pu}}{\lambda_{pu}} + 2R_p} \quad (22)$$

jossa d_t on teräslevyn paksuus, λ_t teräslevyn lämmönjohtavuus, d_{pu} on polyuretaanin paksuus, λ_{pu} polyuretaanin lämmönjohtavuus ja R_p lämmönsiirron pintavastus. Kuva 27 havainnollistaa laskentaa ja materiaaliominaisuuksia.



Kuva 27. Materiaaliarvot laskettaessa elementin U -arvoa

Käyttäen arvoja $d_t=0,0006$ m, $\lambda_t=16,2$ W/(mK), $d_{pu}=0,0638$ m ja $\lambda_{pu}=0,027$ W/(mK) ja pintavastuksille arvoa $R_p=0,13$ m²K/W nykyisen elementin U -arvoksi saadaan 0,38 W/(m²K), joka vastaa hyvin VTT:n mittaamaa U -arvoa 0,35 W/(m²K). Samaa laskentamenettelyä käyttäen 50 mm elementin U -arvoksi saadaan 0,48 W/(m²K). Seinien kautta tapahtuvan lämmönsiirron suhdetta sisäisiin lämpökuormiin voidaan havainnollistaa esimerkkien avulla. Neliskulmaiselle 10 m sivuiselle puhdistilalle kokonaislämpövirraksi 3 °C lämpötilaerolla seinien ja katon läpi saadaan nykyisellä 65 mm eristepaksuudella 224 W ja 50 mm eristepaksuudella 284 W. Sisäiset lämpökuormat ovat puhdastiloissa usein korkeat ja maltillisella 50 W/m² arviolla esimerkkitalalla saadaan sisäiseksi lämpökuormaksi 5000 W, josta lämpövirrat seinän läpi ovat vain noin 5 %. Tilan koon kasvaessa rakenteiden läpäisevien lämpövirtojen osuus pienenee entisestään. Usein voidaan myös olettaa lämpötilaeron olevan suurimman osan ajasta energiankäytön kannalta epäedulliseen suuntaan, eli ympäröivien tilojen olevan korkeammassa lämpötilassa, sillä ympäröivät tilat voidaan olettaa lämmitetyiksi, mutta ei välttämättä jäähtytyiksi. Voidaan siis olettaa, että tilojen alimmat lämpötilat eivät poikkea paljoa toisistaan, mutta kesäaikaan ympäröivien tilojen huippulämpötila voi nousta useita asteita puhdastilaa korkeammaksi. Tällöin suurempi eristepaksuus pienentää lämpökuormaa puhdastilaan ja laskee tilan energiankulutusta.

Polyuretaanieriste muodostaa merkittävän osan elementin rakenteellisesti jäykkyydestä, joten eristemäärän pienentäminen heikentää rakenteen kuorman kantokykyä. Pystyseinissä kuorma kantokyky ei ole merkittävässä roolissa katon ollessa kannatettu ripustusrakenteiden avulla, mutta kattoelementtien on kyettävä kantamaan yhden henkilön massa tilan päällä tehtäviä asennuksia varten. Elementtien kantokykyä on tilavalmistajalla tutkittu sekä simuloinnein että käytännön kuormituskokein. Simulointien on huomattu vastaavan huonosti kokeellisia tuloksia, joten käytännössä uuden elementtirakenteen kantokyky olisi varmistettava kuormituskokeella. Nykyisen elementin kantokykyksi on kuitenkin saatu moninkertainen arvo verrattuna siltä vaadittuun kantokykyyn, joten voidaan olettaa, että polyuretaanimassan vähentäminen 15 mm:llä ei kuitenkaan kriittisesti heikennä elementin kantokykyä.

5. ENERGIANKÄYTÖN TEHOSTAMINEN

Työn toisena aihealueena oli tutkia puhdastilojen energiankäyttöä ja sen tehostamista sekä näiden tekniikoiden soveltamista puhdastilavalmistajan tuottamiin puhdastiloihin. Kuten luvussa 3 on esitetty, liittyy suurin osa puhdastilojen energiankäytöstä talo- ja valmistusteknisiin järjestelmiin, joiden toimintaan puhdastilavalmistaja voi vain rajallisesti vaikuttaa. Tässä luvussa esitellään keinoja vaikuttaa puhdastilan energiankäyttöön sekä yleisesti, että puhdastilavalmistajan näkökulmasta.

5.1 Ilmanvaihtoratkaisut

Keskeisimmät ilmanvaihdon energiankäyttöön vaikuttavat tekijät ovat ilmanvaihtomäärä ja ilmanvaihtojärjestelmän paineenkorotus, kuten luvussa 3.2 on esitelty. Olennaista on siis määritellä puhtausluokitusta vastaava riittävä, muttei liian suuri ilmanvaihto. Oikea ilmanvaihtomäärä tulisi määritellä jo suunnitteluvaiheessa. Ylimoitettua ilmanvaihtoa voidaan jälkikäteen laskea, mutta tämä vaikuttaa tyypillisesti myös puhaltimen hyötysuhteeseen. Kun oikea ilmanvaihtomäärä saadaan määriteltä jo suunnitteluvaiheessa, voidaan myös puhallin mitoittaa oikein tälle ilmamäärälle. Tilan epäpuhtaushiukkastuottoa on kuitenkin vaikea määritellä tarkasti suunnitteluvaiheessa, joten järjestelmä joudutaan usein ylivoimittamaan, jotta vaadittu luokka varmasti saavutetaan. Tämä näkyy myös standardeissa ja ohjeissa. Standardeissa ja ohjeissa annetaan yleensä vain yksittäisiä luokkakohtaisia taulukkoarvoja sopivalle ilmanvaihtomäärälle, joka ei ota tilassa tapahtuvaa toimintaa ja hiukkastuottoa huomioon. Suositusarvojen käyttö johtaa yleensä ilmanvaihdon reiluun ylivoimittamiseen, mutta toisaalta takaa vaaditun luokan saavuttamisen. Suositusarvoilla ei myöskään ole jäljitettävissä tieteellistä pohjaa, vaan ne ovat usein periytyneet vanhemmista standardiversioista, joihin ne ovat päätyneet hyväksi havaituista mittaus tuloksista (Faulkner et al. 1996; Wirtanen & Salo 2014, s.127-137). GMP-säädöksissä määritellään myös vaatimus palautumisajasta, joka tarkoittaa aikaa jossa ilmanvaihtojärjestelmä laskee tilan hiukkaspitoisuuden sadasosaan alkupitoisuudesta, alkupitoisuuden ollessa vähintään 100-kertainen tavoitepitoisuuteen verrattuna, vaaditun ajan ollessa 15-20 min. Lyhyen palautumisajan vaatiminen voi myös johtaa ilmanvaihdon ylivoimittamiseen, jos palautumisaika on mitoittava tekijä ja kun käytönaikainen puhtaus saavutetaan pienemmällä ilmavirralla, mitä palautumisaika vaatii.

Ilmamäärää voidaan pienentää myös tilasuunnittelulla. Kun vaadittu ilmanvaihto määritellään ilmanvaihtokertojen avulla, vaikuttaa tilan koko suoraan ilmanvaihdon määrään. Tilan pinta-ala tulisi siis pitää alhaisena ja myös tilojen koon suhteen tulisi ylivoimittamista välttää. Pinta-alan lisäksi myös tilan korkeus luonnollisesti vaikuttaa tilavuuteen ja näin myös tilan korkeus tulisi pitää alhaisena. Yhdensuuntaisen ilmanvaihdon tiloissa,

joissa ensisijaisesti määritellään ilman virtausnopeus tilassa, ei tilan koko vaikuta yhtä merkittävästi ilmanvaihdon määrään.

5.1.1 FFU-puhaltimet

FFU-puhaltimiin pohjautuva ilmanvaihto on muodostunut vakioratkaisuksi etenkin nykyaikaisissa elektroniikan puhdastiloissa, mutta FFU-puhaltimia käytetään myös muissa puhdastiloissa kasvattamaan ilmanvaihtokerrointa tarvittaessa. Etuna FFU-puhaltimia käytettäessä on etenkin järjestelmän joustavuus. Laitteiden energiatehokkuus on usein nähty toissijaisena ominaisuutena, sillä laitteiden palvelemissa tiloissa tapahtuvan tuotannon arvo on usein paljon FFU-puhaltimien käyttämän energian arvoa korkeampi. Itsenäisinä yksikköinä toimivia ja vakiokokoisina valmistettavia FFU-puhaltimia on helppo asentaa, siirtää ja tarvittaessa lisätä tai poistaa. Pienten yksittäisten puhaltimien avulla tehokkain ilmanvaihto voidaan myös kohdistaa kriittisimmän puhtauden alueelle. Vakioiduilla moduulikokoisilla laitteilla tilan rakentaminen on myös usein nopeampaa kuin tilakohtaisesti suunnitelluilla kanavoiduilla laitteilla. Ilmanvaihdon toteuttaminen useiden puhaltimien avulla luo järjestelmään myös redundanssia, joka parantaa puhdastilan toimintavarmuutta, ilmanvaihdon ollen tyypillisesti tärkein osa-alue puhtauden ylläpitämisessä. Yhden puhaltimen vikaantuessa tilan puhtaus ei välittömästi vaarannu ja vika koskee vain yksittäistä huonetta. Joissain järjestelmissä vikaantumista voidaan myös kompensoida nostamalla muiden saman tilan puhaltimien kierrosnopeutta, jolloin ilmanvaihtokerroin ei muutu. Vika voidaan myös korjata keskeyttämättä koko tilan käyttöä, kun vikaantunut puhallin palvelee vain yhtä huonetta, mahdollisesti jopa keskeyttämättä kyseisen huoneenkaan toimintaa. Saneerauskohteissa, joissa tilan luokitusta pyritään nostamaan, FFU-puhaltimia voidaan myös käyttää tilanteissa, joissa ilmanvaihtojärjestelmän ilmavirta tai painehäviö kasvaisi suuremmaksi kuin mitä nykyisellä ilmanvaihtokoneella pystyttäisiin tuottamaan. Tällöin koko ilmanvaihtokoneita ei jouduta uusimaan, vaan lisäilmanvaihto voidaan toteuttaa FFU-puhaltimilla.

Vaikka FFU-laitteille toteutettu ilmanvaihto ei ole tyypillisesti kaikkein energiatehokkain ratkaisu (Tschudi et al. 2001; Mathew et al. 2010), kiinnitetään aiheeseen jatkuvasti enemmän huomiota. Ekologisuus ja hiilijalanjalan pienentäminen kasvattavat suosiota teknologiayritysten asettamissa arvoissa, joka näkyy myös puhdastilojen energiankäyttöön panostamisena. Myös EU-direktiiveillä ohjataan puhallinsuunnittelua energiatehokkaampaan suuntaan asettamalla tehokkuusvaatimuksia uusille puhaltimille, tärkeimpänä ErP-direktiivi 2009/125/EC ja siihen liittyvä puhaltimien ekologista suunnittelua koskeva asetus 327/2011. Olennaisesti puhaltimien energiatehokkuuden parantamiseen liittyy siirtyminen vaihtovirtamoottoreiden käytöstä tasavirtamoottorien käyttöön. FFU-puhaltimien yleistyessä laitteissa käytettiin vaihtovirtamoottoreita niiden tasavirtamoottoreita alhaisemman hankintahinnan takia. Moderneissa harjattomissa tasavirtamoottoreissa käytettävät taajuusmuuntaja ja kestopuhtaus tekivät moottorista vaihtovirtamoottoria mo-

nimutkaisemman ja kalliimman, mutta toisaalta hyötysuhde tasavirtamoottoreilla on parempi. Parempi hyötysuhde myös vähentää moottorin aiheuttamaa ylimääräistä lämpökuormaa puhdastilaan. Kestomagneettisten moottorien hyötysuhde on myös tasaisempi eri pyörimisnopeuksilla ja säädettävä pyörimisnopeusalue laajempi kuin vaihtovirtamoottoreilla, joka parantaa säädettävyyttä ja tehokkuutta osatehoilla. (Goetzler et al. 2013)

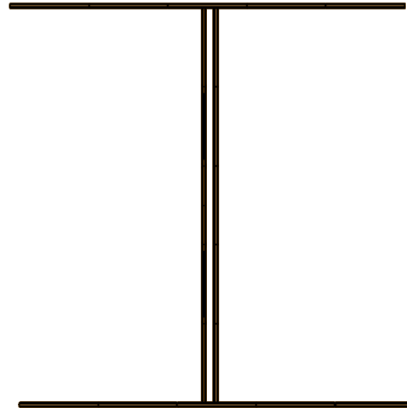
FFU-puhaltimille on käytössä vakiintunut 1200*600 mm moduulikoko. Tyypillisesti FFU-puhaltimia käytettäessä puhdastilan katto rakennetaan T-profiilisista alumiinikoista, joista muodostetaan puhallinmoduulia vastaava kehikko. Yhteen moduuliin voidaan tällöin asentaa joko puhallin, valaisin tai muu apulatteita tai tyhjä paneeli. Valaisimia voidaan asentaa myös kiskoon, jolloin puhaltimien määrä voidaan maksimoida.

Tilavalmistajan käyttämään nykyiseen elementtirakenteiseen kattoon FFU-puhaltimet kuitenkin sopivat huonosti. Tekniikan käyttöönotto tilavalmistajan puhdastiloissa vaatisi joko oman kiskokehikkokattojärjestelmän kehittämisen, tai seinäelementtien sovittamisen johonkin olemassa olevaan kehikkomalliin. Kummassakin tapauksessa kehikkojärjestelmän kehityksessä olisi tärkeä huomioida erityisesti seinän ja katon välisen liitoksen tiiveys. Elementeistä ei kuitenkaan jouduttaisi täysin luopumaan kattorakenteissa, sillä tyhjiissä kehikkomodueleissa olisi mahdollista käyttää nykyistä elementtiä kehikon moduulin ollessa suurempi kuin valmistettavan elementin minimimitat. Ennen kehikkokattojärjestelmän suunnittelua olisi kuitenkin arvioitava tarve lisätä FFU-puhallinjärjestelmän mahdollistava kattorakenne tuotevalikoimaan, sillä suurin osa tilavalmistajan toteuttamista puhdastilaprojekteista liittyy terveydenhuoltoon, jossa FFU-puhaltimia käytetään vain harvoin (Vasara et al. 2018).

5.1.2 Poistoilmakanava

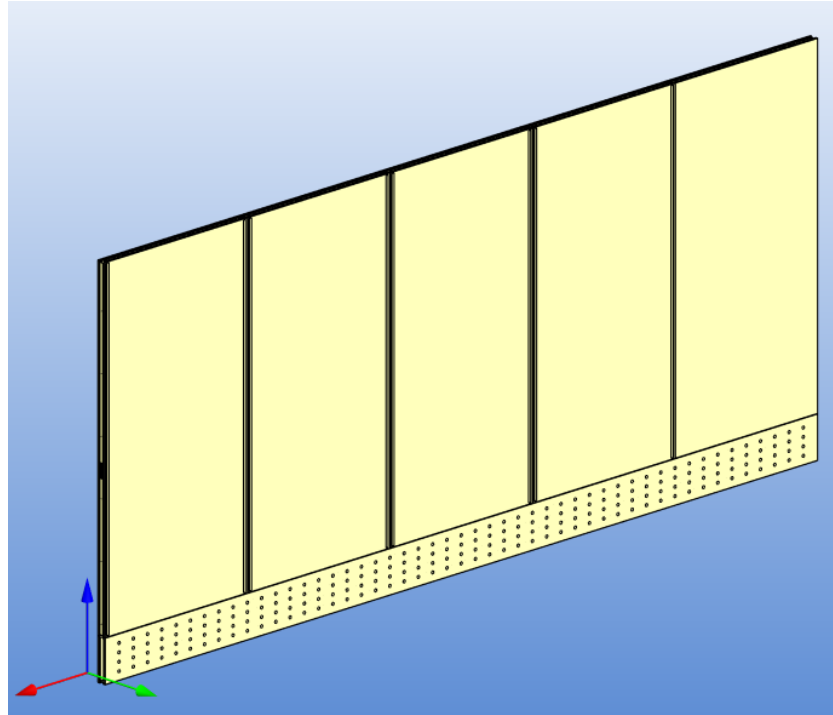
Luvussa 3.2 esitellyistä ilmanvaihtojärjestelmistä tilavalmistajan puhdastilatuotevalikoimalla on mahdollista toteuttaa ainoastaan kanavoituja päätelaitteita käyttävä ratkaisu. Poistoilmakanavat on mahdollista rakentaa tiloihin joko erityisen ilmanvaihtoelementin avulla, jossa säleikkö ja kanava on rakennettu seinäelementtiin, tai tilan nurkkaan elementeistä rakennettavalla kulmalla, johon yhdistetään säleiköt ja kanava. Poistoilmaelementti on kuitenkin huomattavasti normaalia puhdastilaelementtiä vaativampi valmistaa ja sen käyttömahdollisuudet ovat rajallisia sisäisen kanavan pienen koon takia. Isoimmissa tiloissa suuren poistoilman tilavuusvirran takia ilman virtausnopeus kasvaisi pienessä kanavassa liian suureksi, joka aiheuttaa suuren painehäviön ja melua. Kulmaan rakennettava poistoilmakanava taas rikkoo huoneen muotoa ja yhdestä nurkasta tehtävällä ilman poistolla on vaikea saavuttaa yhdensuuntaista ilmavirtaa tilaan, joka vaaditaan korkeamman puhtaustuokituksen tiloissa.

Yleinen ratkaisu etenkin toteutettaessa kammiollinen poistoilma, on muodostaa poistoilmakanavat kaksinkertaisen seinärakenteen avulla. Kuvassa 28 on esitetty tämä rakenne. Seinien etäisyys toisistaan on vapaasti suunnittelijan valittavissa, jolloin virtauskanava voidaan mitoittaa vastaamaan tilan poistoilmavirtaa.

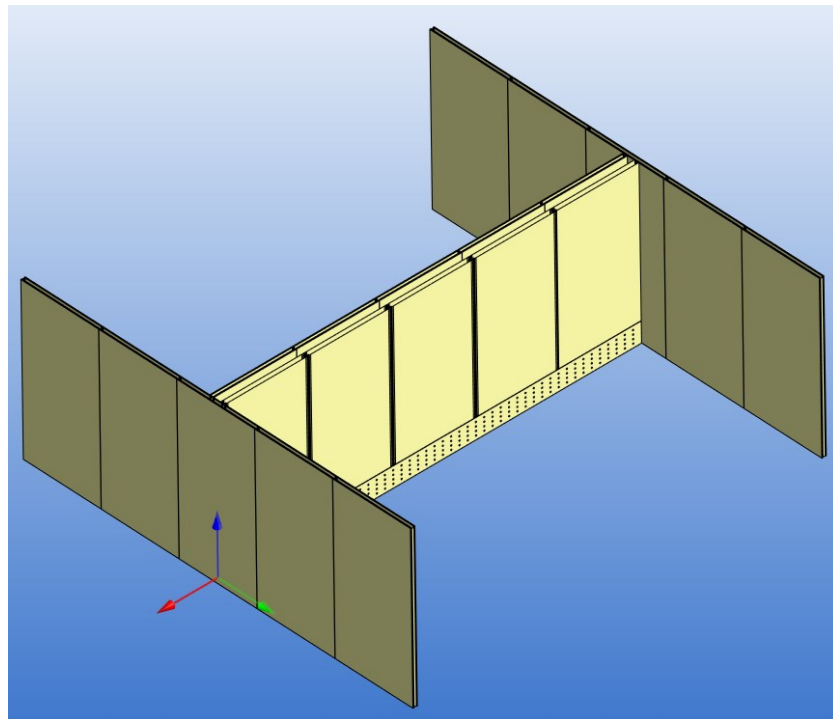


Kuva 28. Poistoilmakanava kaksinkertaisen seinärakenteen avulla

Kuvan 28 mukaista poistoilmaratkaisua varten kehitettiin malli uudenlaisesta elementtien alle asennettavasta sokkelimaisesta säleiköstä, jonka avulla poistoilma pystytään johtamaan kaksoisseinän väliseen kuiluun. Säleikkö elementtien alla on esitetty kuvassa 29 ja seinäratkaisu kuvassa 30. Sokkelisäleikkö on helposti toteutettavissa nykyisellä valmistustekniikalla, levyradan mahdollistaessa 300 – 6000 mm levyjen valmistamisen. Käytettäessä tyypillistä 1200 mm elementtileveyttä, olisi yhden sokkelisäleikön päälle mahdollista kasta 5 elementtiä. Säleikön rei'ittäminen levyyn kuitenkin jouduttaisiin tekemään levytyökeskuksella, jolla ei ole mahdollista käsitellä täyttä 6000 mm mittaista levyä, joten käytännössä jouduttaisiin käyttämään lyhyempää sokkelisäleikköä, ellei rei'itykseen kehitetä vaihtoehtoista menetelmää. Sokkelisäleikön kyky kantaa päälle asetettavien elementtien massa on lisäksi vielä varmistettava.



Kuva 29. Poistoilmasokkeli asennettuna elementtien alle



Kuva 30. Poistoilmakanavan toteutus seinäelementtien avulla

5.1.3 Suodattimet

Olennaisena osana puhdastilailmanvaihtoon kuuluvat erilaiset ilmansuodattimet vaikuttavat myös järjestelmän painehäviöön ja siten energiankulutukseen. Kanavissa tapahtuvaan painehäviöön on haastava merkittävästi vaikuttaa, ilman minimivirtausnopeuden ja kanavan pituuden määrittellessä perustason niissä tapahtuvalle häviölle, mutta suodattimien painehäviöön voidaan erilaisilla valinnoilla vaikuttaa monipuolisemmin. Suodattimen aiheuttama painehäviö yleensä kasvaa suodattimen tehokkuuden kasvaessa. Suodatinvalinnassakin tulisi välttää ylimitoitusta ja suodatin olisi valittava tarpeen mukaan, jolloin tutkittaessa puhdastilan elinkaarikustannuksia, voidaan saavuttaa huomattavia energiasäästöjä. Esimerkiksi tilanteissa, joissa kierrätysilman määrä tiloissa on pieni tai olematon ja merkittävä osa tilan hiukkaskuormasta syntyy tilan sisällä, olisi järkevä harkita pienempitehoisen suodattimen käyttöä. Suodatinluokan H14 päästää enintään 0,005 % tuloilman hiukkasista ja H13 0,05 %. Lähtökohtaisesti tulisi suosia pienen painehäviön suodatinmalleja, erityisesti jos suodatin muodostaa merkittävän osan järjestelmän painehäviöstä, jolloin suodatinvalinnalla voidaan huomattavasti vaikuttaa energiankäyttöön. Pienen painehäviön suodattimilla saavutetaan myös välillisiä hyötyjä. Suodattimien vaihtoväli määritellään usein sen yli tapahtuvan painehäviön perusteella, jolloin alkupainehäviön ollessa pieni myös vaihtoväli kasvaa ja tilan käytössä tapahtuu vähemmän katkoksia.

Suodattimen painehäviö sekä tehokkuus tyypillisesti kasvavat käytössä kertyvän hiukkasmassa kasvattaessa keräyspinta-alaa, kuten luvussa 2.5.1 on esitetty. Energiankäyttöä optimoitaessa myös tämä ominaisuus tulisi huomioida. Jos tilassa käytetään runsaasti kierrätysilmaa, voidaan mahdollisesti ilmanvaihtoa hieman laskea suodatintehon kasvaessa ja näin kompensoida kasvavaa painehäviötä. Menetelmän luotettava käyttö kuitenkin vaatisi reaaliaikaisen hiukkaspitoisuusmittaustiedon tilasta.

5.2 Rakenteiden tiiveys

Mitä tiukemmat olosuhdevaatimukset puhdastilan ilmalle on asetettu, sitä enemmän energiaa näiden saavuttamiseen vaaditaan ja sitä arvokkaampaa puhdastilailman voidaan ajatella olevan. On siis tärkeää pyrkiä pitämään ilma puhdastilan sisällä ja kierrättämään sitä. Toisaalta tiloilta vaaditaan tyypillisesti ylipaineisuutta, joka saa aikaan ilmavirran tilan ja alemmassa paineessa olevan ympäristön välille. Ympäröivä, pienemmän paineen tila voi olla joko alemman puhtausluokituksen puhdastila tai puhdastilan ulkopuolinen luokittelematon tila. Molemmissa tapauksissa vuotoilma kulkee väljemmän vaatimuksen ympäristöön ja näin vuotoilmaa vastaanottava tila saa tarpeettoman tiukasti käsiteltyä ilmaa. Suurin häviö tapahtuu vuotoilman päästessä tilan ulkopuolelle. Pyrittäessä saavuttamaan mahdollisimman suuri paine-ero mahdollisimman pienellä ilmavirralla rakenteiden läpi, rakenteiden ilmantiiveys on keskeisessä roolissa. Kun rakenteet ovat ilmatiiviitä, eli niiden yli tapahtuu suuri painehäviö suhteessa ilmavirtaan, vaadittu paine-ero aiheuttaa vain pienen ilmavirran rakenteiden läpi.

Elementtirakenteisilla puhdastiloilla hyvän ilmantiiveyden saavuttaminen on kuitenkin haasteellista useiden elementtien välille muodostuvien saumojen takia. Lisäksi erilaisten läpivientien, kuten käyttövesiputkien, läpiantokaappien ja ilmanvaihdon päätelaitteiden saumat muodostavat helposti vuotokohtia, kuten myös ovet ja niiden tiivisteet. Yleensä myöskään rakenteiden tai valmiin huoneen ilmatiiveyttä ei tunneta ilmanvaihtoa suunniteltaessa, joka johtaa helposti liian suuren tulo- ja poistoilmamääräerotuksen käyttöön, joka nostaa paine-eron tarpeettoman korkeaksi ja lisää ilmanvaihtojärjestelmän energiankulutusta. Toisaalta äärimmäisen ilmatiivis rakenne tekee paine-eron hallinnasta haasteellista, sillä pienikin muutos ilmanvaihdon erotuksessa aiheuttaa suuren muutoksen paineessa. Kokeellisesti aihetta on kuitenkin tutkittu vain vähän, mutta simuloimalla aihetta ovat tutkineet esimerkiksi Wen ja Sun (2009). Wen ja Sun muodostivat Simulink-mallin, jolla voitiin tutkia puhdastilojen ilmantiiveyden ja paineistuksen vaikutusta näiden energiankäyttöön. Simuloinnissa tutkittiin kolmen yleisen tilaratkaisun, yksihuoneisen, sisäkkäisten huoneiden ja kahden rinnakkaisen huoneen energiankäyttöä. Pinta-alaltaan tilat olivat noin 50 m². Sekä paine-ero puhdastilan ja ympäröivien tilojen välillä että rakenteiden tiiveys vaikuttivat energiankäyttöön niin, että paine-eron kasvattaminen 2,5 Pa:lla nosti energiankulutusta 2 – 3 % ja kokonaisilmanvuodon kasvaessa 240 (l/s)/Pa^{0,65} energiankulutus nousi 10 %. Mielenkiintoista simuloinnissa oli, että sisäkkäisten tilojen tapauksessa sisemmän tilan ilmantiiveys vaikutti enemmän energiankulutukseen kuin ulomman tilan ilmantiiveys. Myös nämä tulokset korostavat rakenteiden tiiveyden tärkeyttä.

5.3 Automaatio

Automaation hyödyntäminen on yleisesti talotekniikassa tehokas keino säästää energiaa, kun sisäilmasto-olosuhteet pystytään pitämään hallitusti vaaditulla tasolla tätä tarpeettomasti ylittämättä. Etenkin tiloissa, joiden kuormitus muuttuu paljon, voidaan tarpeenmukaisella talotekniikan ohjauksella saavuttaa merkittäviäkin säästöjä. Näin on usein myös puhdastiloissa. Puhdastilojen keskeisin hallittava sisäilmasto-ominaisuus, eli ilman hiukkaspitoisuus, riippuu tyypillisesti hyvin paljon tilan käyttäjämäärästä, kuten luvussa 2.3.2 on esitetty. Ilmanvaihdon tarpeenmukaiselle ohjaukselle on siis puhdastiloissa hyvin käyttömahdollisuuksia. Lisäksi ilmanvaihtomäärien ollessa puhdastiloissa hyvin suuria, voidaan jo pienelläkin ilmamäärän vähennyksellä saavuttaa suuria säästöjä puhallintehon ollessa teoreettisesti verrannollinen pyörimisnopeuden muutossuhteen kolmanteen potenssiin kaavan (17) mukaisesti.

Energiansäästön lisäksi automaatio on keskeisessä roolissa myös puhtauden ylläpitämisessä ja laadunvarmistuksessa. Automaation avulla voidaan tehokkaasti hallita kulkua tilassa ja estää ilmavirtoja eri puhtausluokiteltujen tilojen välillä, kun tilojen välillä on erillinen ilmasulku. Yksinkertaisimmillaan automaatio lukitsee toisen ilmasulun oven, kun toinen on auki ja näin estää ilman kulkeutumisen suoraan kahden ison tilan välillä. Tyy-

pillisesti korkeamman luokituksen tila on ylipaineinen, jolloin puhtaampi ilma virtaa tarpeettomasti matalamman luokituksen tilaan ja ulos virtaava ilma joudutaan korvaamaan, joka kasvattaa energiankulutusta.

Ilmanvaihtomäärän muuttamiseen suunnitteluarvosta liittyy kuitenkin usein käyttäjien puoleista huolia. Nopeiden ilman virtausnopeuden muutoksien pelätään irrottavan hiukkasia suodattimista, hiukkastuoton ja ilmanvaihtotarpeen kasvaessa ollaan huolissaan uuden tarpeen saavuttamisnopeudesta ja valmistuksen laadun pelätään kärsivän tarveohjauksesta ilmanvaihdosta, kun määriteltyjä luokkia ei hetkellisesti mahdollisesti saavuteta. Ilmamäärien laskeminen liian alas voi myös saada tilan alipaineiseksi ympäristöön verrattuna, jolloin tilaan tapahtuu suodattamattoman ilman vuotoa rakenteiden läpi ja hiukkaspitoisuus tilassa kasvaa. Tiloissa tapahtuvan valmistuksen korkean arvon vuoksi usein energiansäästöpotentiaali nähdään kuitenkin toisarvoisena laadunvarmistuksen rinnalla. (Faulkner et al. 1996; Vasara et al. 2018)

Automaation vaatimien anturien asentaminen tilaan mahdollistaa ohjauksen lisäksi myös reaaliaikaisen ja tallentavan tilamonitoroinnin. Etenkin lääketieteen varastotiloissa edellytetään useissa GMP-säädöksissä ja -ohjeissa tallentavaa olosuhdemonitorointia. Monitoroinnin tavoitteena on laadunvarmistus, kun tallennetuista kosteus-, lämpötila- ja painesuhdearvoista voidaan varmistaa varastoinnin tapahtuneen lääkkeen tms. aineen säilymisen kannalta vaadituissa olosuhteissa. Painesuhdemittausdatan perusteella voidaan lisäksi varmistua, ettei varastoinnissa ole tapahtunut ristikontaminaatiota, kun tila on säilynyt jatkuvasti riittävän ylipaineisena.

5.3.1 Partikkeliohjaus

Suorin tapa arvioida puhdastilan ilmanvaihtotarvetta reaaliaikaisesti on käyttää tilassa partikkelimittareita. Partikkelimittari kerää ilmaa puhdastilasta, tyypillisesti muutama kymmenen litraa minuutissa, ja laskee kerätyn näytteen 0,3 – 10 µm hiukkasten määrän (Whyte 2001, s.153). Hiukkasten määrän ja kokojakauman laskemiseen on olemassa useita tekniikoita, mutta useimmat mittarit perustuvat joko hiukkasten aiheuttamaan varjostukseen tai sirontaan valolähdettä vasten. Mittarissa on valolähde, jota kuvataan tarkalla ja nopealla kameralla ja hiukkasten ohittaessa valolähteen kameran kuvaamista muutoksista valolähteessä analysoidaan ohjelmallisesti hiukkasten kokoa ja määrää. Toinen partikkelimittareissa käytetty mittaustekniikka perustuu hiukkasten aiheuttamaan kondenssiin kylläisessä kaasussa. Kylläisessä ja hyvin puhtaassa kaasussa kondensaatio tapahtuu kaasuun tuotavan puhdastilailman sisältämien hiukkasten ympärillä, sillä kondensaatio vaatii kiinteän pinnan. Kondensoituva neste puolestaan kasvattaa hiukkasten kokoa ja näin mahdollistaa hyvin pientenkin hiukkasten mittauksen. Kondenssia hyödyntävissä partikkelimittarissa on kuitenkin varmistuttava käytetyn nesteen sopivuudesta puhdastilaan.

Partikkelimittarilla saadun mittausdatan avulla voidaan puhdistilan ilmanvaihtoa ohjata reaaliaikaisesti niin, että vaadittu puhtaus saavutetaan tarkasti. Taajuusmuuntajaohjatun puhaltimen kierrosnopeutta kasvatetaan, kun tilan hiukkaspitoisuus nousee ja kierrosnopeutta lasketaan pitoisuuden laskiessa. Reaaliaikaista mittausdataan hyödyntäessä vältytään usein ongelmalliselta ja energiaa tuhlaavalta ilmanvaihdon ylikäytöltä ja näin säästetään puhaltimien sähköenergiankulutusta. Partikkelimittaukseen perustuvan tarveohjatun ilmanvaihdon säästöpotentiaalia ovat selvittäneet esimerkiksi Faulkner *et al.* (1996). Kokeellisessa tutkimuksessaan Faulkner *et al.* käyttivät partikkelimittaukseen käyttöluonteeltaan tarveohjatulle ilmanvaihdolle hyvin sopivassa puhdistilassa, jota käytettiin vain muutamia tunteja päivässä, ohjaamaan tilan ilmanvaihtoa. Ohjauksella saavutettiin merkittäviä puhallinenergian säästöjä. Verrattuna tilassa aiemmin käytettyyn aikaohjelmaan, jossa puhallintehoa laskettiin yöksi, saavutettiin 60 – 64 % energiansäästö ja verrattuna tilanteeseen, jossa puhallintehoa ei ohjattu ollenkaan, saavutettiin 83 – 84 % säästö. Puhdistilaluokitus kokeen aikana hetkittäin alitettiin, mutta pääosin vain muutamia minuutteja yhden päivän aikana.

Ongelmaksi kuitenkin edelleen jää ilmanvaihtojärjestelmän ylimitoittaminen ja käyttö optimaalisen mitoituspisteen alapuolella, joka vähentää automaatiolla saatavaa säästöä energiankulutuksessa. Lisäksi ongelmana voidaan kokea partikkelimittarien korkea hinta. Tutkittavien hiukkasten pienen kokoluokan takia myös mittarilta vaaditaan suurta tarkkuutta, joka nostaa laitteiden hintaa. Lisäksi yhdellä mittarilla voidaan seurata vain yhden tilan hiukkasmäärää, jolloin useista pienistä huoneista koostuvaan puhdistilaan joudutaisiin asentamaan useita mittareita. Useiden huoneiden tilanteessa usein kuitenkin käytetään ratkaisua, jossa yhdelle mittarille tuodaan sulkuventtiilillä varustetut mittausyhteet useista huoneista ja vain yhtä yhdettä pidetään kerralla auki, jolloin yhdelle mittarilla voidaan seurata useaa tilaa. Täysin reaaliaikaista seurantaa tällöin ei kuitenkaan saada kuin mitattavasta huoneesta. Lisäksi yhteet eivät voi olla kovin pitkiä, jotta mittaustulos ei vääristy. Partikkelimittareilla saavutetaan myös välillistä hyötyä, sillä mittareita käytettäessä tiloissa ei tarvitse tehdä yleensä vuosittain suoritettavaa puhtausluokan tarkistusmittausta.

5.3.2 Läsäolo-ohjaus

Ilmanvaihtotarvetta voidaan arvioida myös välillisesti käyttämällä läsnäoloantureita. Tyypillisesti suurin epäpuhtauskuorma puhdistilassa aiheutuu tilan käyttäjistä, ja toisaalta jos tilassa käytetään eri luokituksia tilan ollessa lepotilassa ja toiminnassa, on läsnäolo hyvä indikaattori tilan olemisesta toiminnassa. Läsäoloanturit perustuvat myös partikkelimittareita yksinkertaisempaan tekniikkaan, joka tekee niistä huomattavasti partikkelimittareita halvempia. Tyypillisesti läsnäoloanturit perustuvat Doppler-ilmiöön, jossa anturin lähettämässä ja vastaanottamassa signaalissa tapahtuu muutos, kun signaalin kentässä tapahtuu liikettä. Signaali voi olla esimerkiksi ultraääni tai mikroaalto. Läsä-

oloanturien kanssa käytetään yleensä myös yksinkertaisempaa ilmanvaihdon ohjauslogiikkaa kuin partikkelimittarien kanssa. Kun tilassa havaitaan läsnäolo, ohjataan puhaltimet täydelle teholle ja kun läsnäolosignaalia ei enää saada, ohjataan puhaltimet määrätylle pienemmälle teholle jonkin viiveen jälkeen. Jos tilaan on määritelty lepotilaluokitus, on kuitenkin syytä varmistua mittauksin, että tämä luokitus täyttyy pienemmälläkin teholla. Vaikkei lepotilaluokitusta olisikaan, on myös hyvä tiedostaa, että pitkän poissaolojakson jälkeen voi tilan puhtaus olla hetkellisesti luokitusta alhaisempi tilaan tultaessa uudelleen.

Puhdastilan tyypistä ja käytöstä riippuen voidaan jo yksinkertaisella läsnäolo-ohjauksella saavuttaa merkittäviä energiansäästöjä. Läsnäoloon ja partikkelimittaukseen perustuvien säätöjen vaikutusta ja eroa energiansäästöissä ja tilan puhtaudessa on tutkinut muun muassa Faulkner *et al.* (2007). Kokeellisessa tutkimuksessaan Faulkner *et al.* asensivat teollisen ja normaalin työaikarytmin mukaan käytettyyn puhdastilaan sekä partikkelimittarit että läsnäoloanturit. Läsnäoloon perustuvalla säädöllä saavutettiin lähes yhtä suuri energiansäästö kuin partikkelimittauksella. Läsnäolosäädöllä säästettiin 36% energiaa verrattuna tilanteeseen, jossa puhaltimet olivat jatkuvasti päällä ja partikkelimittauksella vastaava säästö oli 40%. Yksinkertaiseen iltaisin ja viikonloppuisin tehoa laskevaan aikaohjelmaan verrattuna säästö läsnäolosäädöllä oli 12% ja partikkelimittauksella 17%. Oleellinen heikkous läsnäolosäädöllä kuitenkin oli tila luokituksen nopea laskeminen sen ohjatussa puhaltimien kierrosnopeutta pienemmälle, joka kokeessa oli puolittainen nopeus 30 min viimeisen läsnäolohavainnon jälkeen. Tällöin luokitus laski ISO-luokka 3:sta ISO-luokka 5:een. Luokitus kuitenkin myös palasi nopeasti puhaltimien ohjautuessa takaisin täydelle teholle, noin 3-4 minuutissa. Läsnäolo-ohjaus sopii siis ensisijaisesti tiloihin, joissa voidaan sallia matalampi luokitus tilan ollessa lepotilassa.

6. YHTEENVETO

Tässä diplomityössä käsiteltiin puhdastiloja ja niihin liittyvää tuotekehitystä. Työn kirjallisuussiosiossa perehdyttiin puhdastilatekniikan perusteisiin sekä olennaisimpiin fysikaalisiin ilmiöihin, jotka liittyvät pienten partikkelien liikkeeseen ilmassa. Erityishuomiota kiinnitettiin lisäksi puhdastilojen energiankäyttöön, joka puhdastiloille on tyypillisesti moninkertainen normaaleihin sisätiloihin verrattuna. Soveltavassa osiossa käsiteltiin erään suomalaisen kylmälaitteita, -huoneita ja puhdastiloja valmistavan yrityksen puhdastiloja ja kehitettiin erilaisia tuotekehitysmahdollisuuksia tämän tilavalmistajan puhdastiloille.

Tuotekehitysmahdollisuuksina tutkittiin erilaisia keinoja uudistaa tilavalmistajan puhdastilaelementtejä, -ovia ja kehittää puhdastiloihin liittyviä teknisiä ominaisuuksia. Puhdastilaelementtiin liittyen tutkittiin uusia mahdollisia pintamateriaaleja, elementin eristepaksuuden pienentämisen taloudellisuutta ja keinoja uudistaa elementtirakennetta vastaamaan paremmin puhdastilavaatimuksia ja toisaalta huomioiden puhdastilojen tuomat vapaudet verrattuna kylmähuoneisiin. Elementtien lisäksi suunniteltiin puhdastilaovien alihankintaa ja uuden mahdollisesti alihankittavan oven karmin rakennetta. Alihankinnan tavoitteena on suoraviivaistaa puhdastilaprojektien läpivientä, kun valmistusteknisesti monimutkaisimmat ja runsaasti valmistusaikaa kuluttavat ovet hankintaan ulkopuoliselta, ovivalmistukseen keskittyneeltä toimijalta. Uusia teknisiä ominaisuuksia pohdittiin etenkin energiatehokkuuden kannalta. Tilavalmistaja pystyy kuitenkin vain rajallisesti vaikuttamaan tilojen energiankäyttöön, ilmanvaihdon ja muun puhdastilatoimittajan vastuualueen ulkopuolisen talotekniikan muodostaessa valtaosan tilojen energiankäytöstä, mutta kirjallisuustutkimuksen perusteella löydettyjä keinoja energiatehokkuuden parantamiseksi sovellettiin tilavalmistajan kannalta toteutettavin osin, ensisijaisesti kehittämällä uudenlainen tapa toteuttaa tilojen poistoilmanvaihto. Toinen keskeinen keino energiatehokkuuden parantamiseksi olisi rakennusautomaation lisääminen tiloihin, johon tilavalmistajan osana kuuluvasta konsernista löytyy paljon aiempaa osaamista.

Ehdotetuista tuotekehitysmahdollisuuksista puhdastilaelementin rakenteeseen liittyvät uudistukset ovat edenneet jo työn aikana jatkokehitykseen ja työn valmistumisen aikaan tutkitaan prototyypivalmistuksin elementin sopivuutta tuotantoon. Jos rakenteesta saadaan sopiva tuotantoon, etenee uusi elementti palotestaukseen, jonka tulosten perusteella tehdään päätös uuden rakenteen käyttöönotosta. Etenkin palonkestävyyden parantuminen on nähty toivottavana ominaisuutena uudella elementillä, sillä kuten aiemmin on esitetty, tullaan tulevaisuudessa puhdastilatekniikkaa ottamaan käyttöön kasvavissa määrin sairaalataloissa, joissa rakenteiden palokäyttäytyminen on entistä tärkeämmässä roolissa. Lisäksi ovien alihankinnan kehitysyhteistyö jatkuu työn jälkeen hyödyntäen työssä kehitet-

tyä alumiinipursotettua puhdastilakarmia. Tilavalmistajan konsernin automaatio-osaimista ollaan myös tuomassa puhdastiloihin aluksi siirtymällä konsernin oman automaatiojärjestelmän käyttöön interlockien toteutuksessa. Tuomalla oman automaatiojärjestelmän perustoiminnallisuudet tiloihin interlockien mukana, on modulaarinen järjestelmä myöhemmin helposti laajennettavissa ja hyödynnettävissä muussakin tilan automaatioissa.

7. LÄHTEET

Aalto, P., Hämeri, K., Paatero, P., Kulmala, M., Bellander, T., Berglind, N., Bouso, L., Castano-Vinyals, G., Sunyer, J., Cattani, G., Marconi, A., Cyrus, J., Klot, S., Peters, A., Zetzsche, K., Lanki, T., Pekkanen, J., Nyberg, F., Sjövall, B. & Forastiere, F. (2005). Aerosol Particle Number Concentration Measurements in Five European Cities Using TSI-3022 Condensation Particle Counter over a Three-Year Period during Health Effects of Air Pollution on Susceptible Subpopulations, *Journal of the Air & Waste Management Association*, s. 1064-76

Austin, P.R. & Timmerman, S.W. (1965). Design and operation of clean rooms, *Business News Publishing Co, Detroit*, s. 235-251.

Chang, C., Lin, T., Hu, S., Fu, B. & Hsu, J. (2016). Various energy-saving approaches to a TFT-LCD panel fab, *Sustainability*, Vol. 8 907 s.

Chen, C. & Zhao, B. (2011). Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor, *Atmospheric Environment*, Vol. 45(2), s. 275-288.

Dannemiller, K.C., Weschler, C.J. & Peccia, J. (2017). Fungal and bacterial growth in floor dust at elevated relative humidity levels, *Indoor air*, Vol. 27(2), s. 354-363.

Dehri, I. & Erbil, M. (2000). The effect of relative humidity on the atmospheric corrosion of defective organic coating materials: an EIS study with a new approach, *Corrosion Science*, Vol. 42(6), s. 969-978.

Dixon, A.M. (2007). *Environmental monitoring for cleanrooms and controlled environments*, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 230 s.

Enbom, S., Heinon, K., Kalliohaka, T., Mattila, I., Nurmi, S., Salmele, H., Salo, S. & Wirtanen, G. (2012). *High-tech sairaala - Korkean hygienian hallinta sairaaloissa*, VTT, 58 s.

EudraLex, *The Rules Governing Medicinal Products in the European Union, Volume 4 EU Guidelines to Good Manufacturing Practice Medicinal Products for Human and Veterinary Use, Annex 1 Manufacture of Sterile Medicinal Products*, (2008).

Faulkner, D., DiBartolomeo, D. & Wang, D. (2007). *Demand Controlled Filtration in an Industrial Cleanroom*, USDOE Director, Office of Science, Berkeley, California, United States, 11 s.

Faulkner, D., Fisk, W. & Walton, J. (1996). Energy Savings in Cleanrooms from Demand-Controlled Filtration, *Journal of the IES*, Vol. 39(6), s. 21-27.

Goetzler, W., Sutherland, T. & Reis, C. (2013). *Energy Savings Potential and Opportunities for High-Efficiency Electric Motors in Residential and Commercial Equipment*, U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Building Technologies Office, Burlington, MA, 80 s.

Hiili-Lukkarinen, M. (2009). *Pienhiukkasten lukumääräpitoisuus ja terveysvaikutukset (aktiivinen pinta- ala) vuosina 2005–2007 Tampereella*, Ympäristönsuojelun julkaisuja, 46 s.

Kircher, K., Shi, X., Patil, S. & Zhang, K.M. (2010). Cleanroom energy efficiency strategies: Modeling and simulation, *Energy and Buildings*, Vol. 42(3), s. 282-289.

Lee, K.W. & Liu, B.Y.H. (1980). On the Minimum Efficiency and the Most Penetrating Particle Size for Fibrous Filters, *Journal of the Air Pollution Control Association*, Vol. 30(4), s. 377-381.

Levy, J.M., Ohadi, M.M. & Choo, K. (2015). Energy analysis of cleanrooms in an academic research building, *ASHRAE Transactions*, s. 71-83.

Lin, T., Tung, Y., Hu, S. & Chen, Y. (2011). Experimental study on airflow characteristics and temperature distribution in non-unidirectional cleanrooms for electronic industry, *Building and Environment*, Vol. 46(6), s. 1235-1242.

Mathew, P.A. (2008). An Estimate of Energy Use in Laboratories, Cleanrooms, and Data Centers in New York, Lawrence Berkeley National Laboratory, 13 s.

Mills, E., Shamshoian, G., Blazek, M., Naughton, P., Seese, R.S., Tschudi, W. & Sartor, D. (2008). The business case for energy management in high-tech industries, *Energy Efficiency*, Vol. 1(1), s. 5-20.

Mathew, P.A., Tschudi, W., Sartor, D. & Beasley, J. (2010). Cleanroom Energy Efficiency, *ASHRAE Journal*, Vol. 52(10), s. 24.

Pope, C.A. & Dockery, D.W. (2006). Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect, *Journal of the Air & Waste Management Association*, Vol. 56(6), s. 709-742.

Puustinen, A., Hämeri, K., Pekkanen, J., Kulmala, M., de Hartog, J., Meliefste, K., ten Brink, H., Kos, G., Katsouyanni, K., Karakatsani, A., Kotronarou, A., Kavouras, I., Meddings, C., Thomas, S., Harrison, R., Ayres, J.G., van der Zee, S. & Hoek, G. (2007). Spatial variation of particle number and mass over four European cities, *Atmospheric Environment*, Vol. 41(31), s. 6622-6636.

Ramstorp, M., Gustavsson, M. & Gudmundsson, A. (2005). Particle generation from humans—a method for experimental studies in cleanroom technology, *Indoor Air 2005*, International Academy of Indoor Air Sciences, s. 1572-1576.

Ranade, M.B. (1987). Adhesion and Removal of Fine Particles on Surfaces, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 7(2), s. 161-176.

Sastri, V.R. (2014). *Plastics in Medical Devices, Properties, Requirements and Applications*, *Plastics Design Library*, s. 121-172.

SFS-EN 1822-1 (2010), High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA). Part 1: Classification, performance testing, marking, Suomen Standardoimisliitto, Helsinki,

SFS-EN ISO 14644-1 (2015), Puhdastilat ja puhtaat alueet. Osa 1: Hiukkaspitoisuuden perusteella tehtävä puhtausluokitus, Suomen Standardoimisliitto, Helsinki

SFS-EN ISO 14644-4 (2011), Puhdastilat ja puhtaat alueet. Osa 4: Suunnittelu, rakentaminen ja käynnistys, Suomen Standardoimisliitto, Helsinki

SFS-EN ISO 14644-8 (2013), Cleanrooms and associated controlled environments. Part 8: Classification of air cleanliness by chemical concentration (ACC), Suomen Standardoimisliitto, Helsinki

SFS-EN ISO 14644-9 (2013), Cleanrooms and associated controlled environments. Part 9: Classification of surface cleanliness by particle concentration, Suomen Standardoimisliitto, Helsinki

SFS-ISO 29463-1 (2017), High efficiency filters and filter media for removing particles from air -- Part 1: Classification, performance, testing and marking, Suomen Standardoimisliitto, Helsinki

Thomas, D., Penicot, P., Contal, P., Leclerc, D. & Vendel, J. (2001). Clogging of fibrous filters by solid aerosol particles Experimental and modelling study, *Chemical Engineering Science*, Vol. 56(11), s. 3549-3561.

- Thomas, J., Bulger, N., Sau, A., Spratt, D., McDonald, J., Weale, J., Rumsey, P., Mahdavi, R., Mathew, P., Sartor, D. & Tschudi, B. (2011). High Performance Cleanroom, Pacific Gas and Electric Company, 62 s.
- Tschudi, W.F., Benschine, K., Fok, S. & Rumsey, P. (2001). Cleanroom Energy Benchmarking in High-Tech and Biotech Industries, ACEEE 2001 Paper #66.
- Utracki, L.A. & Wilkie, C.A. (2014). Polymer Blends Handbook, Second Edition, Springer, s. 1023-1115.
- Vasara, J., Miettinen, T. & Jäntti, M. (2018) Granlund Oy, Kuopio, Haastattelu 10.4.2018.
- Welker, R.W., Nagarajan, R. & Newberg, C.E. (2006). Contamination and ESD control in high-technology manufacturing, Wiley, Hoboken, NJ, 498 s.
- Wen, J., Sun, W. & Dost, S. (2009). Impact of pressurization on energy consumption for laboratories and cleanrooms, ASHRAE Transactions, Vol. 115(1), 496 s.
- Whitfield, W. (1962), Ultra-clean room, US3158457A, 14 s.
- Whyte, W. (2001). Cleanroom technology, John Wiley & Sons Ltd, 296 s.
- Whyte, W., Hejab, M., Whyte, W.M. & Green, G. (2010). Experimental and CFD Airflow Studies of a Cleanroom with Special Respect to Air Supply Inlets, International Journal of Ventilation, Vol. 9(3), s. 197-209.
- Whyte, W., Whyte, W.M., Eaton, T. & Lenegan, N. (2014). Calculation of air supply rates for nonunidirectional airflow cleanrooms, European Journal of Parenteral and Pharmaceutical Sciences, Vol. 19(4), s. 121-129.
- Wirtanen, G. & Salo, S. (2014). 45th R3Nordic Symposium, Cleanroom technology, contamination control and cleaning, VTT Technology; Vol. 168, s. 127-137.
- Xu, T.T. (2005). Best Practice for Energy Efficient Cleanrooms: Fan/Filter Units, Lawrence Berkeley National Laboratory, 9 s.