



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

KAASAEGSED ÕHU DESINFITSEERIMISE TEHNOLOOGIAD

MODERN TECHNOLOGIES FOR AIR DISINFECTION

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Julia Vinogradova

Üliõpilaskood 192167

Juhendaja: Marina Kritševskaja, vanemlektor

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“26” mai 2021.

Autor:

/ digitaalselt allkirjastatud /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“26” mai 2021

Juhendaja:

/ digitaalselt allkirjastatud /

Kaitsmisele lubatud

“26” mai 2021 .

Kaitsmiskomisjoni esimees prof Marina Trapido

/ digitaalselt allkirjastatud /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Julia Vinogradova

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Kaasaegsed õhu desinfitseerimise meetodid, mille juhendaja on Marina Kritševskaja,
 - 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
 2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
 3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.
-

26.05.2021

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Julia Vinogradova, 192167

Õppekava, peeriala: KAKM02/18, Keemia- ja keskkonnakaitse tehnoloogia

Juhendaja(d): vanemlektor, Marina Kritševskaja, 6202851

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Kaasaegsed õhu desinfitseerimise tehnoloogiad

(inglise keeles) Modern technologies for air disinfection

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida siseõhu saastatuse probleemi
2. Kirjeldada õhus leiduvaid saasteaineid
3. Kirjeldada õhu desinfitseerimise meetodeid ja nende omadusi

Lõputöö etapid ja ajakava:

| Nr | Ülesande kirjeldus | Tähtaeg |
|----|---|------------|
| 1. | Õhu saastatuse probleemi ja saasteainete kirjelduse ülevaate koostamine | 30.03.2021 |
| 2. | Õhu desinfitseerimise meetodite ülevaate koostamine. Meetodite analüüs | 30.04.2021 |
| 3. | Magistritöö kirjutamine ja vormistamine | 25.05.2021 |

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "26" mai 2021 a

Üliõpilane: Julia Vinogradova ".....".....201....a

/allkiri/

Juhendaja: Marina Kritševskaja ".....".....201....a

/allkiri/

Programmijuht: ".....".....201....a

/allkiri/

Sisukord

| | |
|--|----|
| Sissejuhatus | 7 |
| 1. Siseõhu kvaliteedi probleem | 8 |
| 1.1. Põhilised õhu saastajad | 8 |
| 1.1.1 Tahked osakesed..... | 9 |
| Peened osakesed (PM ₁₀) | 9 |
| Eriti peened osakesed (PM _{2,5}) | 9 |
| Ultrapeened osakesed (PM _{0,1}) | 10 |
| 1.1.2 Gaasilised saasteained | 10 |
| Süsinikdioksiid CO ₂ | 10 |
| Süsinikmonooksiid (CO)..... | 11 |
| Lämmastikdioksiid NO ₂ | 12 |
| Väeveldioksiid SO ₂ | 12 |
| Radoon | 12 |
| Lenduvad orgaanilised ühendid (LOÜ ehk VOC)..... | 13 |
| 1.1.3 Mikroorganismid..... | 15 |
| 1.2 Siseõhu bioloogiline saastatus..... | 15 |
| Naha, juuste, loomakarva osakesed | 16 |
| Seened, hallitus, õietolm..... | 17 |
| Tolmulestade ja muude putukate jäänused | 17 |
| Nakkusetekitajad | 17 |
| 1.2.1 Levik ja toksilisus | 18 |
| 2 Õhu desinfitseerimise tehnoloogiad | 19 |
| 2.1 Ultraviolettkiirgus (UV-kiirgus) | 20 |
| 2.1.1 Bakteritsiidid ja neid sisaldavad seadmed | 22 |
| Desinfektsioonirobot..... | 24 |
| Kaelaskantav õhupuhasti Respiray | 25 |
| <i>Far-UVC light</i> ehk kaug-UVC valgus..... | 26 |
| 2.2 Filtrid..... | 27 |
| 2.2.1 Eelfilter | 28 |
| 2.2.2 HEPA filter..... | 28 |
| 2.2.3 Aktiivsöefilter..... | 30 |
| 2.2.4 Fotokatalüütiline filter | 32 |
| 2.2.5 Ioonfilter (elektrostaatiline filter)..... | 35 |
| Plasma süsteemiga õhupuhasti ionisaatori tehnoloogiaga | 36 |
| Bipolaarne ionisatsioon | 38 |
| 2.2.6 Viimased tehnoloogiad | 38 |

| | |
|--|----|
| Katehiin õhufilter | 38 |
| SOP-filter | 38 |
| Polüakrüülnitriilfilter | 39 |
| 2.2.7 Filtrite kasutamisega seotud puudused..... | 39 |
| 2.3 Osoon | 40 |
| 3 Optimaalse õhupuhasti valik..... | 43 |
| 3.1 Õhupuhasti valik vastavalt probleemile | 47 |
| Kokkuvõte | 49 |
| Summary | 50 |

Sissejuhatus

Välisõhus leiduvate saasteainete kohta on ilmselt kõigile teada ning saasteallikaid leidub igalt poolt: tehased, liiklus, põlemisprotsessid jm. Kahjuks aga väga vähesed inimesed on teadlikud sellest, et siseruumide õhukvaliteet võib olla kordades halvem ning õhust leidub nii keemilisi, füüsikalisi kui ka bioloogilisi saasteaineid.

Saasteallikad, mis eraldavad õhku gaase ja tahkeid osakesi, on kõige levinumad ruumiõhu saastajad. Ebapiisav ventilatsioon langetab veelgi õhukvaliteeti, sest õhuringlust ei toimu piisavalt ning saasteainete kontsentratsioon tõuseb. Peamised saasteallikad on kütust kasutavad põletusseadmed, ehitus- ja sisustusmaterjalid, mööbel, kodukeemia, tubakatooted, liigne niiskus ning ebakorrektselt hooldatud keskkütte- ja niisutusseadmed.

Iga saasteaine võib mõjuda inimestele erinevalt ning kindlasti mängib suurt rolli selle kontsentratsioon õhus ja kokkupuuteaeg ainega. Lühiajaline sissehingamine võib põhjustada silmade, nina ja kurgu ärritust, võib tekkida peavalu- ja ringlus ning kiire väsimus. Riskirühmas olevatel inimestel võivad süveneda kroonilised haigused, sellised nagu astma. Osad tervisemõjud võivad ilmneda pärast pikaajalist kokkupuudet ning sellisel juhul võib olla tegu tõsisemate probleemidega, nagu näiteks südamehaigused või vähk.

Oluline rühm saasteaineid on bioloogilise päritoluga, kuhu kuuluvad bakterid, viirused, karva ja naha osakesed, õietolm, seened, ning putukad ja nende jäänused. Nende mõju võib olla väga erinev, alustades allergiast ja lõpetades epideemiaga, sest nakkushaigused levivad just läbi õhu kõige kiiremini. Maailmas toimuv koroonapandeemia näitas, kui kergelt levivad viirused piisnakkuse kaudu ja kui oluline on õhku desinfitseerida. Mikroobse saastatuse tase õhus sõltub asustustihedusest, inimeste aktiivsusest ja nende terviseseseisundist, ruumi suurusest, sanitaarsetest tingimustest ja õhuliikumise kiirusest.

Antud töö eesmärk on uurida kaasaegseid õhu desinfitseerimise tehnoloogiaid, mis aitavad hoida õhku puhtana ning vähendada mikroorganismide levikut. Õhupuhastite valikule eelneb õhus sisalduvate saasteainete kirjeldus ja nende mõju inimese tervisele. Selle põhjal said valitud desinfitseerimise meetodid, mis hõlmavad UV-kiirguse antibakteriaalset mõju, fotokatalüütilisi filtreid, mõningaid mehaanilisi filtreid ning osoonit kasutamist. Töös on kirjeldatud kõikide tehnoloogiate tööpõhimõtet, nende kasutusalasid ning ka eelised ja puudused, mis kaasnevad nende kasutamisega.

Võtmesõnad: õhu desinfitseerimine, siseõhu saastajad, UV-kiirgus, fotokatalüüs, osoon, magistritöö

1. Siseõhu kvaliteedi probleem

Kõik on harjunud kuulma, et linnaõhk kahjustab tervist, kuid tegelikult võib ruumi siseõhu reostus olla mitu korda suurem, kui välisõhu oma. See on tingitud suurematest saasteainete kontsentratsioonidest ning halvast õhuliikumisest. Halb siseõhu kvaliteet võib põhjustada mitmeid haiguseid ja allergilisi reaktsioone eriti riskirühmas olevatele inimestele. Puhas õhk on eriti oluline krooniliste kopsuhaigustega inimeste jaoks ning seepärast on oluline tagada korrektne siseõhu puhastus. Otsene mõju tervisele oleneb kokkupuuteajast konkreetse saasteainega ning inimese üldisest tervislikust seisundist.

Seoses ülemaailmse koroonapandeemiaga on viimasel ajal õhu desinfitseerimisele pööratud eriti palju tähelepanu. Suur osa viiruseid ja baktereid levib läbi õhu, kaasa arvatud nakkushaigused. COVID-19 hämmastav nakatumiskiirus pani teadlased uurima viiruse levikut soodustavaid tegureid ning hindama võimalikke ennetavaid meetmeid haiguse vastu võitlemiseks. On tulnud järeldusele, et tahkete osakeste, osooni, lämmastikdioksiidi, vingugaasi ja vääveldioksiidi olemasolu õhus soodustavad viiruse levikut. [1]

Saasteainete päritolu on väga erinev - nad tulenevad nii kütteallikatest, ehitusmaterjalidest, mööbliesemetest, puhastusvahenditest, välisõhust kui ka ventilatsioonisüsteemidest. Õhu kvaliteedi tõstmiseks piisab mõnikord ka saasteallika välja tõstmisest ruumist, kuid kahjuks enamasti juhtudel vajab probleem muud lahendust. Kindlasti suudab korrapäraselt töötav ventilatsioon olukorda parandada ning vähendada saasteainete ja mikroorganismide levikut. Peale sellele on tihtipeale tarvis lisaks olemasolevatele seadmetele kasutada ka õhupuhasteid, mis on viimasel ajal hakanud eriti kiiresti arenema. Nende abil saab eemaldada õhust mikroorganismid, tahked osakesed, lenduvad ained, lõhnad ja allergeenid.

1.1. Põhilised õhu saastajad

Inimene veedab kuni 90% oma ajast kinnises ruumis ning see on põhjuseks, miks peaks suhtuma ümbritseva õhu kvaliteeti täie tähelepanuga [2].

Kaks peamist õhu saastajat, mis võivad tervisele halvasti mõjuda, on tahked osakesed ja gaasifaasis olevad orgaanilised ja anorgaanilised ühendid. Osakeste alla kuulub tolm, hallitusseened ja nende eosad, tolmulestad, õietolm ning näiteks ka koduloomade kõõm. Õhku saastavateks gaasideks on süsinikoksiid ehk vingugaas, süsihappegaas, radoon ning lenduvad orgaanilised ühendid (*ingl* volatile organic compounds ehk VOC). Osad saasteallikad võivad eraldada õhku nii gaase kui ka osakesi, selliseks allikaks on näiteks tubakasuits.

Olukorda, kus suur osa elanikke kogeb akuutset tervisemõju ja ebamugavustunnet ilma kindlate ühiste sümptomiteta, kuid mis on otseselt seotud antud hoones viibimisega, nimetatakse "haige hoone sündroomiks" või "ruumiõhusündroomiks" [3]. See võib esineda kas mingis konkreetsetes ehitise ruumis/osas või siis terves hoones terviklikult ning leeveneda

või täitsa kaduda hoonest lahkudes. Tavaliselt on "haige hoone sündroomist" põhjustatud sümptomid peavalu, väsimus, õhupuudus, ninaeritus, köha, aevastamine, silmade, nina ja kurgu ärritus, nahaärritus, pearinglus ja iiveldus. Selle põhjustajaks võib olla ükskõik mis õhu saastajatest või mitme saastaja koostoime.

1.1.1 Tahked osakesed

Õhus levivad tahked osakesed on sellised osakesed, mis piisavalt kerged, et hõljuda õhus ning on niivõrd väikesed, et inimsilm neid ei märka. Tahked osakesed varieeruvad oma mõõtmetelt ning jaotuvad vastavalt oma suurusele ehk aerodünaamilisele diameetrile kolme kategooriasse: peened, eriti peened ja ultrapeened. Nende keemilised koostised võivad olla väga erinevad ning võivad sisaldada nii metalle (räni, raskmetallid jm) ja vedelaid komponente kui ka ainult tahket materjali. Osakeste tekkeallikaid on mitmeid ning nad võivad olla nii loodusliku päritoluga kui ka tekkida inimtegevuse tagajärjel, seetõttu on nende täpsem koostis suuresti sõltuv nende tekkekohast.

Peente osakeste toimemehhanism inimorganismis on üsna keeruline ning nende poolt tekitatavatel haigustel on ülimalt harva mingisugune üks kindel põhjus. Nende puhul on tegu pikaajalise kompleksse mõjuga, kus saastunud õhk on üks suurimatest mõjuritest ja selle koostoimel arenevad eri laadi haigused. Tahkete osakestega seostatakse enamike hingamisteede ja südame-veresoonkonna haiguste teket.

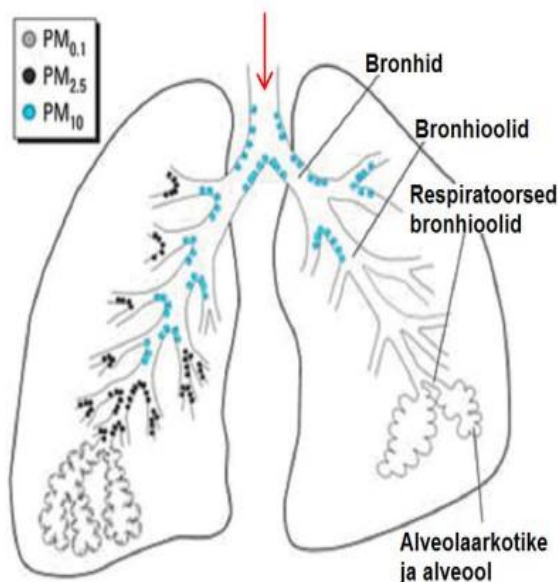
Peened osakesed (PM₁₀)

Osakesed, mille aerodünaamiline diameeter on 10 µm kuni 2,5 µm [4]. Kuigi sellised osakesed liigituvad suurte alla, pole nad, valdaval juhul, inimsilmaga nähtavad. Võrdluseks võib tuua juuksekarva, mille diameeter on tavaliselt 17-181 µm vahel. Selle kategooria osakeste osakaal on siseruumi õhus küllalt väike – nad moodustavad kõigest 1% kõikidest lenduvatest osakestest ning võivad ärritada inimese hingamisteid ja silmi [5]. Levinumad selliste osakeste tekkeallikad on õietolm ja seente eosed.

Eriti peened osakesed (PM_{2,5})

Sia kuuluvad kõik, mille diameeter on alla 2,4 µm ning nende osakaal õhus on juba suurem – 9% kõikidest hõljuvatest õhus osakestest [5]. Kuna osakeste puhul kehtib seaduspärasus, et mida väiksem, seda ohtlikum inimesele, siis just tänu oma pisikesele suurusele on eriti peened osakesed võimelised tungima kopsu alveoolidesse ning põhjustama hingamiseldkonna haiguseid, selliseid nagu astma, bronhiit ning kopsuemfüseem ehk kopsupuhitus. Peale selle on selle kategooria osakesed võimelised suurendama südame ja veresoonkonna haiguste tekkimise tõenäosust. Peamine nende mõju avaldubki just põletikulistes protsessides, sest tihtipeale sisaldavad peened osakesed toksilist raskemetalli oma koostises.

Eriti peente osakeste alla kuuluvad lemmikloomade kõõm, tolmulestad, majapidamistolm, bakterid, millest mitmed võivad olla patogeensed. Lemmikloomade kõõm, karvad ja sülg tekitavad inimestel allergiat ning kodudes, kus on vähemalt üks kass, varieerub allergeenide kontsentratsioon 250-1140 ng/m³ vahel [6]. Peente osakeste hulgas on ka osad põlemisproduktid.



Joonis 1 Peente osakeste jaotumine hingamisteedes [25]

Ultrapeened osakesed (PM_{0,1})

Ultrapeenete osakeste suurus on 0,1 µm ja väiksemad ning osakaal siseruumi õhus on kõige suurem – nad moodustavad 90% kõikidest osakestest [4;5].

Kuna nende suurus on kõige väiksem, siis nad on tänu sellele ka kõige ohtlikumad inimese tervise jaoks. Koos sissehingatava õhuga satuvad nad läbi membraani organismi ning on võimelised tungima edasi otse vereringesse, kust liiguvad edasi kõikidesse elutähtsatesse organitesse, sinna hulka ka aju. Joonisel 1 on näidatud erineva suurusega tahkete osakeste jaotumine hingamisteedes.

Levinumad allikad on autode heitgaasid, tulekahjud ja muud põlengud, tubakasuits, viirused jm.

1.1.2 Gaasilised saasteained

Gaasilised saasteained tulenevad peamiselt põlemisprotsessidest, kuid leidub ka muid allikaid, nagu näiteks värvid, lakid, kodukeemia, kust eraldub õhku ohtlikke ühendeid. Tihtipeale kaasneb gaaside eraldumisega õhku ka lõhna teke.

Süsinikdioksiid CO₂

CO₂ on lõhnatu ja värvitu gaas ja on põhiliseks siseõhu saastajaks. Süsihappegaasi eraldub pidevalt inimese hingamisprotsessis, kusjuures väljahingatava CO₂ kogus on palju suurem, kui sissehingatava hapniku kogus. Inimese poolt sissehingatav õhk sisaldab 21% hapnikku ning 0,3% süsihappegaasi, hingab välja aga 16% O₂ ja 4,5% CO₂, mis näitab, et välja hingatava süsinikdioksiidi kogus suurenes 15% võrra. CO₂ tekkimise kogus sõltub inimese aktiivsusest - kergelt tööd teostav täiskasvanud inimene eritab 20 liitrit süsinikdioksiidi tunnis. Kui aga on tegemist istuva vaimse tööga, siis eritatav kogus on 12-24 liitrit tunnis. [7;8]

Tähtsuselt teine süsihappegaasi produtseerija ruumis on gaasi, petrooleumi või puidu põletamine.

Süsihappegaasi tase ise ei ole otseselt tervishäirete põhjustaja, küll aga on ebaefektiivne või puudulik ventilatsioon, mis ei suuda piisavalt eemaldada ruumis olevaid saasteaineid, sinna hulka CO₂. Liigne CO₂ sisaldus õhus võib tuua esile mürgistuse, mille sümptomiteks on iiveldus, oksendamine, peapööritus, peavalu, kiire hingamine ja südame löögisageduse tõus ning tõsisemates olukordades võivad tekkida krambid ning kaduda teadvus. Maailma Terviseorganisatsioon (*ingl* World Health Organisation, WHO) ei ole CO₂-le piinormi seadnud kuid Eesti õigusaktides on olemas piinormid, mis reguleerivad lasteasutuste tervisekaitsenõudeid, milleks on ruumiõhus lubatud CO₂ kontsentratsioon kuni 1000 ppm (1,8 g/m³), mis on 0,1% ruumis olevast õhust. [9]

Süsinikmonooksiid (CO)

Süsinikmonooksiid ehk vingugaas tekib peamiselt mittetäielikes põlemisprotsessides, kus osaleb süsinikku sisaldav kütus, sinna hulka kuulub kivisüsi, puit, mootorikütus, looduslik gaas, petrooleum, propaan ning protsess muutub ohtlikuks siis, kui põlemiskohas pole piisavalt hapnikku. Siseruumidest rääkides on suureks vingugaasi allikaks ka gaasipliit või gaasiboiler, kust CO võib emiteeruda õhku halvasti ventileeritud seadmest. Lisaks eelnimetatud allikatele on ka täitsa tavaline tubakasuits oluline vingugaasi allikas.

Kuna gaas on värvitu, maitsetu ja mitte-ärritav, siis inimene ei pruugi kohe selle olemasolu tuvastada ning sellel põhjusel on väga oluline paigutada ruumis vinguandur. Tegemist on väga mürgise gaasiga, mis ühineb sissehingamisel hemoglobiiniga ja kandub väga kiiresti vere kaudu kudedesse laiali, samal ajal aeglustades hapniku transporti kudedesse, mis põhjustab organismis hapnikuvaeguse, mille suhtes on aju, närvisüsteem ja südamelihase kõige tundlikumad. Väiksemate dooside korral tunneb inimene uimasust, nõrkust kehas ja liigestes, peavalu, virvendust silmade ees, iiveldust, silmad jooksevad vett ning tekib kohin kõrvades. Seejärel võivad tekkida ka kuulmis- ja nägemishallutsinatsioonid, tõuseb vererõhk ja kiireneb pulss, tekib unisus ja esinevad hingamishäired. Raske mürgituse korral kaotab inimene teadvuse, tema ajutegevus lakkab ning saabub surm [10].

Seoses sellega, et gaas on väga toksiline, on WHO poolt toodud välja soovituslikud piinormid erinevate ajaliste ekspositsioonide korral:

- 15 minutit – 100 mg/m³ (87,3 ppm)
- 1 tund – 35 mg/m³ (30,6 ppm)
- 8 tundi – 10 mg/m³ (8,7 ppm)
- 24 tundi – 7 mg/m³ (6,1 ppm) [7]

Üheks ohtlikuks vingugaasile sarnase toimega organismile aineks on tsüaniidiühendid, mis pääsevad organismi veel kiiremini ning mille tappev toime on veelgi tõhusam. Tsüaniidiühendid tekivad plastmassi ja tekstiili põlemisel, seega on oluline omada head ventilatsiooni ruumides, kus põletatakse erinevaid kangaid, villa, plastikut, porolooni jm.

Tsüaniidimürgitus tekib kiiremini kui vingumürgitus, piisab vaid paarist minutist, kui tekivad esimesed mürgitusnähud, mis süvenevad suhteliselt kiiresti [7].

Lämmastikdioksiid NO₂

Lämmastikdioksiid NO₂ on saasteaine, mida leidub samuti nii välis- kui ka siseõhus ning allikateks, sarnaselt vingugaasile, on erinevad põlemisprotsessiga seotud seadmed, tubakasuits jm. NO₂ sisaldus õhus sõltub kütteseadme liigist, selle ventilatsiooni kvaliteedist, ruumi suurusel, õhuvahetusest ning ka õhuniiskusest.

Lämmastikoksiid NO on samuti üks silmi ja limaskesta ärritavatest saasteainetest, mis õhus reageerib NO₂-ks ja normaalsetes tingimustes jääb gaasilisse vormi. Lämmastikdioksiid on värvuselt pruunikas-punane, õhust raskem ja lenduv. Samuti omab teravat lõhna, kui selle kontsentratsioon ületab 188 µg/m³ [7].

Suur lämmastikoksiidi sisaldus õhus on ohtlik inimese tervise jaoks. Võimalikuteks tervisehäireteks võib olla silmade ja hingamisteede ärritus ning immuunsüsteemi nõrgenemine. Lisaks sellele suurendab vastuvõtlikkust ägedate hingamisteede, näiteks kopsupõletik, haiguste suhtes. Pikaajaline NO₂ sissehingamine võib põhjustada krooniliste haiguste (astma, bronhiit) teket.

WHO soovituslikud NO₂ piirnormid on järgmised:

- 200 µg/m³ – 1 tunni keskmine kontsentratsioon
- 40 µg/m³ – aasta keskmine kontsentratsioon [7]

Vääveldioksiid SO₂

Tegemist on gaasilise saasteainega, mis ei oma värvust, kuid on ägeda lõhnaga. See tekib kivisöe või kütuse põlemisel, aga ka näiteks vulkaanipursete ajal. Tänapäeval on autode mootorkütusele seotud ranged nõuded väävli osas ning seetõttu on välisõhus SO₂ kontsentratsioonid tunduvalt alla piirväärtuse, kuid aga pole sarnaseid nõudeid seotud laevakütusele ning sellel põhjusel võib välisõhus sisaldava vääveldioksiidi kogus olla sadamate piirkonnas kõrgem [7].

SO₂ pikaajaline mõju avaldub hingamiskustena ja hingamisteede haiguste esile tulekuga, mis toob kaasa kopsude vastupanuvõime vähenemise ning südame ja veresoonekonna haiguste ägenemisena [11].

Radoon

Radoon on looduslik radioaktiivne gaas, mis tekib raadiumi või uraani lagunemisprotsessi käigus. Peamisteks allikateks on pinnas ja kivimid, eriti uraani sisaldavad tüübid, näiteks graniit ja kiltsavi. Radoon siseneb siseõhku läbi vundamendis, seintes ja torudes leiduvate pragude ning kõige suuremad kontsentratsioonid on mõõdetud ehitiste keldrites, mis on tingitud sellest, et tegemist on raske gaasiga, mis vajub alla. Peale kivimite võib radooni sisaldada ka põhjavesi, kust võib seda ka siseõhku eralduda.

Kuna tegemist on radioaktiivse gaasiga, siis pikaajaline kokkupuude radooniga tõstab kopsuvähi haigestumise riski ning selle tõttu on radoon kantserogeensete ainete nimekirjas [7].

WHO on seadnud soovituslikud piirnormid eluaegsele radooniga kokkupuutele vastavalt kopsuvähi juhu esinemise riskile:

- Suitsetajatel 1 juht 100 inimese kohta – 67 Bq/m³ ja 1 juht 1000 inimese kohta – 6,7 Bq/m³
- Mittesuitsetajatel 1 juht 100 inimese kohta – 1670 Bq/m³ ja 1 juht 1000 inimese kohta – 167 Bq/m³ [7]

Lenduvad orgaanilised ühendid (LOÜ ehk VOC)

Orgaanilised ühendid, mille päritolu võib olla väga erinev ning neid leidub nii sise- kui ka välisõhus, kuid peab märkima seda, et tihtipeale just siseruumides on nende kontsentratsioonid tavaliselt suuremad ning vahe välisõhuga võib olla kuni sajakordne. Lenduvate orgaaniliste ühendite kontsentratsioon õhus sõltub mitte ainult ventilatsioonist, kuid ka ruumi õhutemperatuurist, suhtelisest õhuniiskusest ja inimtegevusest.

LOÜ-d erinevad oma keemistemperatuuri poolest ning sõltuvalt sellest on olemas kergelt lenduvaid, lenduvaid ja vähelenduvaid ühendeid. Need ühendid võivad eralduda väga paljudest igapäevases kasutuses olevatest materjalidest, nagu näiteks ehitusmaterjalid, värvid, tapeet, liimid, põrandakatted, kodukeemia, mööbliesemed, tubakasuits jm.

Kuna tekkeallikaid on väga palju, siis ka ühendite keemiline koostis võib olla väga erinev ning võivad sisaldada süsivesinikke, aldehyide, alkohole, ketoone ja muid orgaanilisi ühendeid. Ühed tihedamini esinevad siseruumides ühendid on näiteks tetrakloroetüleen, trikloroetüleen, formaldehyd ja benseen. Olenevalt ühendi koostisest on kõrvalmõjud väga erinevad. Kergematel juhtudel võivad LOÜ-d põhjustada hingamisteede ja silmade ärritust. Pikaajalise kokkupuute korral tunneb inimene peavalu, nõrkust, tekib väsimus, pearinglus ning nägemine võib muutuda häguseks. Kõrgemate kontsentratsioonide sissehingamine põhjustab kesknärvisüsteemi, maksa- ja neerukahjustusi kuna sellisel juhul on tegemist potentsiaalsete narkootiliste ainetega.

- Tetrakloroetüleen (C₂Cl₄) on lenduv, värvitu ja eetri lõhnaga vedelik, mida sisaldavad peamiselt puhastusvahendid, mis on mõeldud rasva ja õli eemaldamiseks pindadelt. Samuti leidub seda tekstiili- ja värvitööstuses tööstusliku lahuse kujul. WHO poolt on sätestatud aastakeskmise piirnorm - 0,25 mg/m³, mis on välja arvatud tänu uuringule, mis viidi läbi keemilise puhastuse töötajate seas. Loomade suhtes on see ühend kantserogeenne [7].
- Trikloroetüleen (C₂HCl₃) omab, erinevalt tetrakloroetüleenist, magusat lõhna, muude omaduste poolest on vedelikud sarnased. Seda kasutatakse näiteks värvide tootmisel

ja keemilisel puhastamisel ning peamine kokkupuude toimub sissehingamisel või kontaktil nahaga, harvematel juhtudel võib ühend sattuda joogivette või toitu. Olukorras, kus siseruumis asub saasteainet emiteeriv allikas, võib selle kontsentratsioon õhus olla alla $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [7].

WHO poolt seatud piirnormid eluaegsel kokkupuutel riskiga haigestuda vähki on järgmised:

- 1 juht 10000 elaniku kohta - $230 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (42,8 ppm)
- 1 juht 100000 elaniku kohta - $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (4,28 ppm)
- 1 juht 1000000 elaniku kohta - $2,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0,43 ppm) [7]

Loomade suhtes on ühend kantserogeenne.

- Formaldehüüd on orgaaniline ühend, mida võivad sisaldada paljud ehitusmaterjalid, sh vineerid, puitlaasplaadid ja sellest valmistatud mööbel, värvid, lakid, paljud plastikud, sünteetilised kiud ja ka sigaretisuits. Formaldehüüd omab omapärast lõhna, mille järgi on kerge tuvastada selle olemasolu õhus, kuid tuleb arvestada seda, et lõhna kadudes ei pruugi ohtlike ühendite kontsentratsioon olla normi piires.

Nagu ka muud LOÜ-d, ärritab formaldehüüd silmi ja hingamisteid ning võib tekitada peavalu ja iiveldust.

Aine on kantserogeenne ning WHO soovituslik piirnormiks on 30-minuti keskmine kontsentratsioon $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$ (0,08 ppm) [7].

- Benseeni (C_6H_6) leidub siseõhus gaasilisel kujul ja see on läbipaistev, kergesti süttiv, värvitu ja magusa lõhnaga ühend. Kuna ta lahustub väga hõlpsasti vees, siis seda kasutatakse õlides ja vahades kui lahustit ning läbi nende jõuab ta ka siseruumidesse, sest suur osa PVC materjale, plastmasse ja vineere sisaldavad just benseeni ühendeid. Siinkohal tuleb silmas pidada seda, et emissioonid on tavaliselt kõrgemad uutes värsketes hoonetes, kus remonditööd on alles tehtud ning aja jooksul emissioonid langevad.

Teine peamine benseeni allikas siseruumides on tubakasuits. Siseõhku võib benseeni sattuda ka väljast, kus tekkeallikateks on kütusetanklad ja liiklus.

Benseen kuulub kantserogeensete ühendite alla ning tervisele avaldatavad mõjud sõltuvad inimese ainevahetuse kiirusest, ruumi suurusest ja ventileeritavuse tasemest.

WHO ei ole kehtestanud kindlat piirnormi, millest allpool tervisemõju ei avalduks, seega on mõistlik alandada benseeni kontsentratsiooni ruumis nii madalale kui võimalik [12].

1.1.3 Mikroorganismid

Üks oluline saasteainete rühm, mis kuulub osakeste alla, on bioloogilisi ohutegureid sisaldavad organismid, mille alla käivad viirused, bakterid, seened, parasiidid jm. Osad neist ei ole inimese jaoks ohtlikud, kuid teised võivad olla patogeensed ning mõjuda tervisele halvasti. Peale selle võib meid ümbritsevas õhus esineda ka nakkushaiguseid, mis levivad üpris kiiresti ning võivad suurendada ohurühmas olevate inimeste nakatumise ohtu. Samuti võivad nad kutsuda esile epideemia, mil suur hulk inimesi puutub nakkusega kokku ja seab oma tervise ohtu.

Mikroorganismid ja bakterid satuvad õhku kehapiinnalt ja levivad õhus koos muude kuivade osakestega ning läbi välja hingatava õhu. Suurem osa mikroorganisme tulenebki just inimese ninaneelust ning satuvad õhku hingamisel, rääkimisel, aevastamisel, köhimisel. Koos lima ja süljepiiskadega tulevad välja ka bakterid ning tänu neid ümbritsevale niiskusele on mikroorganismid võimelised sellises keskkonnas elama kauem ning levima kaugemale. See on põhjuseks, miks piisknakkuse kaudu levib suur osa hingamisteede haiguseid, näiteks gripp, leerid, kopsupõletik, difteeria, Covid jm [13].

Mikroobse saastatuse tase õhus sõltub asustustihedusest, inimeste aktiivsusest, nende tervises seisundist, ruumi suurusest, sanitaarsetest tingimustest (sinna hulka ka tolmureostusest), ventilatsioonist, õhutamise tihedusest ja muudest tingimustest. Kõige rohkem baktereid ja mikroorganisme leidub tihedalt rahvastatud kohtades, milleks on näiteks busi- ja raudteejaamad, haiglad, koolid, lasteaiad jm.

1.2 Siseõhu bioloogiline saastatus

Bioloogilised saasteained õhus on suureks probleemiks ning võivad olla väga paljude nakkushaiguste, viiruste ja allergiate põhjustajateks. Selle põhjusel on oluline nende organismide tuvastamine ja eemaldamine siseõhust ning läbi selle nende poolt põhjustatud haiguste leviku minimaliseerimine.

Mikroorganismide kogus ja nende levik sõltub ruumi õhutemperatuurist, suhtelisest õhuniiskusest, toitainete olemasolust ja õhu liikumisest. Osade organismide kasv ei sõltu teistest elusorganismidest ja nende olemasolust, näiteks bakterid ja seened. Teised on parasiidid, mis kasutavad teisi elusorganisme oma kasvuks ja arenguks.

Bioloogilised saasteained kas on või on enne olnud elusorganismid või nende elutegevuse jääkproduktid, ehk sinna hulka loetakse tavaliselt bakterite ja seente eoseid, viiruseid, parasiite, algloomi, tolmulestade ja kahjurputukate allergeene, õietolmu ning elusolendite elutegevuse jääkaineid. Nende olemasolu võib muuta siseõhu kvaliteeti halvemas suunas ning olla terviseprobleemide põhjuseks. Osad organismid, näiteks seened, võivad kahjustada ruumis olevat mööblit ja muid pindasid [14].

Õhus elavate mikroorganismide hulgas on nii saprofüüte kui ka parasiite, kes on kohanenud elama loomse või taimse päritoluga organismides ning paljud neist soodustavad inimestel, loomadelt ning ka taimedel nakkushaiguste teket.

Enamus õhus leiduvatest mikroorganismidest niivõrd väikese suuruse ja kaaluga, et nad on võimelised viibima õhus väga pikalt ning selle tõttu hajuma laiali hõlmates suuremaid alasid. Kuna nad on väga tundlikud välismõjude suhtes, siis nad seonduvad õhus veepiiskadega ning seetõttu on suure epidemioloogilise tähendusega, sest just nii saavad nad levida õhus kaotamata oma elujõudu ning sellisel moel levivad paljud viirused, sinna hulka gripid, leetrid, läkaköha jm [13].

Hoone siseõhus olevate saasteainetega saab otseselt seostada ka väga paljusid allergiaid ja infektsioone. Leegionäride haigus ja hüpersensitiivne pneumoniit on ühed näited seda tüüpi haigustest, mis võivad põhjustada tõsiseid terviseseisundeid. Tüüpilised allergilised haigused, mis on seotud saastunud siseõhuga on järgmised:

- riniit koos heinapalaviku sümptomitega – ninakinnisus, nohu, aevastamine, konjunktiviit, pisarate vool
- astma
- hüpersensitiivne pneumoniit koos akuutsete kopsupõletikulaadsete palavikupuhangutega, köha, raskustunne rinnus, kopsuinfiltmaat või kroonilise köha teke, õhupuudus
- õhuniisutajatest põhjustatud palavik, külmavärinad, lihasvalu ja üldine halb enesetunne (puudub otsene toime hingamisteedele) [15]

Peamised ruumis levivad bioloogilised saasteained on:

- Naha, juuste, loomakarva osakesed
- Tolmulestade ja muude putukate jäänused
- Nakkusetekitajad (bakterid, viirused)
- Hallitus, seened, õietolm

Suur osa neist on igas siseruumis olemas ning kõikidest korruga on praktiliselt võimatu lahti saada.

Naha, juuste, loomakarva osakesed

Peamiseks selle rühma saastajaks on kõõm, mis koosneb ülipisikestest nahahelvestest ja loomakarvade või sulgede osakekestest. Tegemist on allergeeniga, mis põhjustab teatud inimestel nohu või koguni astmahooge. Siseruumides on koduloomad peamised saasteallikad. Kuigi loomadelt ja inimestelt tulenevad bioloogilised osakesed pole tervise jaoks niivõrd kahjulikud, saavad nad olla bakterite ja seente toiduallikateks ning tänu sellele suudavad teised mikroorganismid areneda ja levida ning põhjustada inimestele palju suuremat kahju.

Seened, hallitus, õietolm

Ruumides levivad seened saab jaotada kolme rühma: pärmseened (üherakulised organismid), hallitusseened (mitmerakulised, koosnevad pikkadest ahelatest e hüüfidest ja paljunevad eostega) ning muud seened. Seened ja hallitus eelistavad sooja ja niisket kohta ning sellistes tingimustes nad levivad eoseid ning paljunevad väga kiiresti. Neid võib leida puitpindadelt, vaipadelt, tapeedil, paberil, toidul aga ka õhuniisutites ja konditsioneerides, kui neile pole tehtud õigeaegset hooldust. Hallitus on halva õhukvaliteedi näitaja ja tavaliselt on üsna raske seda kontrolli alla saada. Siseruumides kõige levinumad hallitusseente perekonnad on *Cladosporium*, *Penicillium*, *Alternaria* ja *Aspergillus*. [16]

Hallitusseened avaldavad peale allergiliste reaktsioonide ka nakkuslikku ja toksilist mõju inimese tervisele. Osad seened on võimelised tootma lenduvaid aineid (estrid, alkoholid, aldehüüdid jm), mille sissehingamine põhjustab inimestel peapööritust. Lisaks sellele toodavad paljud hallitusseened mükotoksiine, mille alla neelamine võib lõppeda halvemal juhul surmaga, väiksemates kontsentratsioonides ärritavad nad hingamisteid nii inimestel kui ka loomadel [16].

Õietolmuterad on ohtlikud nõrgema tervisega inimestele ning võivad põhjustada erineva tugevusega allergilisi reaktsioone. Õietolmu leidub siseruumides palju vähem kui välisõhus ning tänu kvaliteetsetele kliima- ja ventilatsiooniseadmetele on võimalik selle kontsentratsiooni tunduvalt vähendada.

Tolmulestad ja muude putukate jäänused

Tolmulestad elavad madratsites, patjades, mööblis ja muudes tekstiiltoodetes ning pole isenesest kahjulikud, kuid nende elutegevuse jääkained - fekaalid ja kitiini sisaldavad rakukestad, on väga tugevad allergeenid. Erilist tähelepanu peaks pöörama majapuugile *Dermatophagoides pteronyssinus*, kes on hingamisteede allergiate peamised põhjustajad.

Nakkusetekitajad

Viirustel on märkimisväärne mõju inimeste tervisele, kuid nad ei saa elada iseseisvalt väljaspool elusrakke ja -kudesid. Nad levivad peamiselt läbi isikliku kontakti ehk piisknakkusena, kuid nende levik on võimalik ka kütte-, ventilatsiooni- ja konditsioneerimissüsteemide kaudu.

Tegemist on parasiidiga, kelle puhul isegi lühiajaline köha ja aevastuse aerosoolide sissehingamine võib põhjustada infektsiooni ning sellel põhjusel on nakatumise oht suurem rahvarohketes ruumides. Kahjuks pole ehitiste projektide ja töö muutmise kaudu võimalik selle bioloogilise saastaja kogust vähendada.

Bakterite peamised tekkeallikad on inimesed ja loomad ise, samuti ka seisev tolmu ja õhuniisutajad. Koosmõjul seentega võibki tekkida nn haige hoone sündroom ning põhjustada inimestel halba enesetunnet.

On olemas ka selliseid baktereid, mis põhjustavad kopsuhaigused, sinna kuulub tuberkuloosi tekitaja bakter *Mycobacterium tuberculosis*, mille levikut soodustab halvasti hooldatud ventilatsioonisüsteem. Ka leegionäride haigus, mida põhjustab bakteriperekond *Legionella*, võib olla suuresti seotud riknenud ventilatsioonisüsteemiga, aga ka mullivannide ja duširuumidega. Tegemist on nakkushaigusega, mille põhiline haigusvorm on kopsupõletik ning selle suremusmäär on küllalt suur [17].

1.2.1 Levik ja toksilisus

Bioloogilised saasteained on olemas nii sise- kui ka välisõhus ning väljaspool hoonet asuvad mikroorganismid satuvad ruumi läbi akende, ventilatsioonisüsteemide, korstnate ja muude avade ja pragude kaudu. Kui välisõhus on nad rohkem hajunud ja seetõttu sissehingamisel satub neid vähem organismi, siis ruumis on nende kontsentratsioonid palju suuremad. Osad mikroorganismid jäävad õhku hõljuma kas iseseisvalt või veepiiskadega seondudes, teised sadenevad pindadele koos tolmu ja muude osakestega ning kolmandad suudavad elada seintel ja mööblil. On tõestatud, et umbes 60% kogu tolmubiootast on hallitusseente eosed, kuhu kuuluvad näiteks *Alternaria*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Mucor*, *Penicillium* ja *Rhizopus* ning ligikaudu 2% moodustavad bakterid [18].

2011 aastal A. Staszowska oli läbi viinud uuringu, mille käigus oli kogutud eluruumides ja muudes objektides kogunevat tolmu. Proovid olid võetud Poola linnas Lublinis hoonetes asumatelt vaipadelt, riulitelt ja muudelt pindadelt [19]. Selgus, et kõige rohkem esines tolmus grampositiivseid baktereid *Bacillus spp*, mis võib põhjustada osadel inimestel allergilist reaktsiooni, kuid on üsna haruldane juhtum. Teisel kohal asus grampositiivne bakterite rühm *Micrococcus sp*, mis pole otseselt enamus inimeste jaoks ohtlik, kuid võib tuua esile või soodustada mitmeid haiguseid inimestel, kellel on nõrk immuunsüsteem, näiteks HIV-positiivsetel inimestel. Samuti oli õhus leitud stafülokokke ning nende koguarv ületas lubatud piirväärtused.

Seente hulgas domineerivad perekonnad olid *Aspergillus* ja *Penicillium*, aga avastati ka selliseid seenerühmi, mis on ohtlikud riskirühmades olevate inimeste tervisele, näiteks *Streptococcus viridans*, *Candida spp* jm. Need tüübid on klassifitseeritud allergeensete ja toksiliste seente alla ning võivad põhjustada nakkushaiguseid. [19;20]

Tänapäeval kasvab inimese teadlikkus ning üha enam tuntakse muret õhu kvaliteedi kohta. Uuringud on näidanud, et varases lapsepõlves õhu saastajatega kokku puutunud inimestel nõrgeneb immuunsüsteem ning aeglustub selle areng ja taastumine. Lisaks sellele tekivad kroonilised haigused, sellised nagu astma, allergia ja atopia (eelsoodumus allergia kujunemiseks). Epidemioloogiliste andmete põhjal on leitud, et maapiirkondades elavatel ja kasvavatel lastel on palju väiksem astma ja allergia tõenäosus kui nende, kes elavad linnapiirkonnas. [19;21]

Läbi õhu levivad paljud patogeensed bakterid ning osad neist on hooajalised. Meningokokki levimise koldeid on avastatud perioodidel, kus olid suuremad põuad millele järgnesid pikemad vihmaperioodid ning elanike seas levisid invasiivsed haigused. Paljud uuringud on näidanud, et bioaerosoolid õhus võivad soodustada mitmete haiguste teket, millest kõige levinumad on astma, riniit (allergiline nohu), bronhiit, kopsuvähk, südame ja veresoonkonna haigused, seedetrakti infektsioonid, tuberkuloos, allergilised reaktsioonid, ägedad viirusnakkused, sinusiit ja konjunktiviit [22]. Lisaks bakteritele on üle 100 liigi seeni, mis võivad põhjustada allergiat ja tõsisemaid nakkushaiguseid mitte ainult inimestel, aga loomadel ja taimedel. Lisaks õhus leiduvatele patogeensetele mikroorganismidele on oluline pöörata tähelepanu ka nende elutegevuse bioloogiliselt aktiivsetele jääkproduktidele, näiteks endotoksiinidele (komponent bakteri rakuümbrises, millest on tingitud selle patogeensuse võime) või mütotoksiinidele (osade seente toodetud mürkained). Nad soodustavad samuti hingamisteede haiguseid ning osad võivad olla koguni kantserogeensed ja mutageensed ehk kutsuda esile pärilikke geneetilisi defekte või suurendada nende esinemissagedust. Osad mükotoksiinid põhjustavad ägedat mürgistust, mükoosi, hingamisteede, seedetrakti ja maksa haiguseid ning nõrgendavad immuunsüsteemi. Lisaks sellele võivad nad mõjuda halvasti ka kesknärvisüsteemile. Hallitusteente poolt produtseeritavad metaboliidid põhjustavad inimestel dermatiiti ja mürgitust, mille sümptomid on kõhulahtisus ja peavalu [7]. Kõikide nende mikroorganismide ja lisaks ka muude saasteainete levik hoonetes tekitabki haige hoone sündroomi ning majas olevad inimesed tunnevad peavalu, tekib nahalööve ja kuivus, silmade sügelus ning eelnimetatud hingamisteede haigused. Madal värske õhu tase, suur mikroorganismide kontsentratsioon, halb ventilatsioon, ehitise elemendid ja inimese füsioloogia - kõik need parameetrid mõjutavad elukvaliteeti ruumis.

2 Õhu desinfitseerimise tehnoloogiad

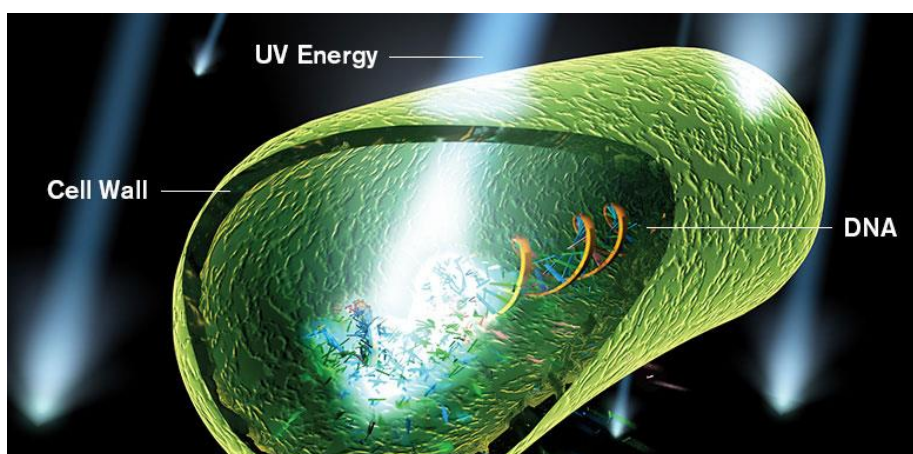
Õhus leiduvate bioloogiliste saasteainete sisaldus määrab õhu kvaliteedi ja osad neist on ohtlikud inimese tervisele ning seepärast on oluline nende eemaldamine ning ruumiõhu puhastamine. Selleks, et ennetada suure hulga mikroorganismide teket ning tagada sanitaar- ja epidemioloogiline heaolu, oleks mõistlik juba hoonete projekteerimise etapil mõelda läbi kõik ventilatsioonisüsteemid ning ehitada nad vastavalt tänapäevastele nõuetele ja rakendada uusimaid meetmeid nakkuste tõrjumiseks. Juhul, kui tegemist on vanema ehitisega või rohkelt rahvastatud kohaga, siis tuleb kasutada lisatehnoloogiaid. Mikroorganismide hävitamiseks kasutatakse filtreid, osoneerimist, bakteritsiidseid UV-lampe, aerosoole desinfitseerivate vahenditega, fotokatalüütilist oksüdatsiooni, õhu ioniseerimist ja muid meetmeid.

2.1 Ultraviolettkiirgus (UV-kiirgus)

Üks tõhusamaid ja enim kasutatavamaid õhu puhastamismeetodeid on ultraviolettkiirgus, mille eesmärk on vähendada mikroorganismide arvu eelkõige meditsiinilistes organisatsioonides ning sellega ennetada nakkushaiguste, sinna hulka ka koroonaviiruse, levikut. Lisaks meditsiinasutustele on UV-kiirgusega desinfitseerimine kasutusel ka reovee- ja joogivee puhastites. Koroonakriisi jooksul on desinfitseerivad lambid jõudnud ka tavainimesteni, näiteks kontoritesse ja perearstikeskustesse. Samuti on loota, et UVC-valgustussüsteeme saaks paigaldada suurematesse avalikesse ruumidesse nagu lennujaamad, staadionid või raudteejaamas, kus nad pakuks kaitset hooajaliste griepideemiate ja -pandeemiate eest.

UV-valgus jaguneb kolme rühma: UV-A, UV-B ning UV-C. Esimesed kaks on need, mis tulenevad päikesest ning on looduslikud, kusjuures UV-A kiirgus on võimeline tungima kaugemale, kui UVB-kiirgus, ja tänu sellele jõuab ka maapinnani. Viimane, ehk UV-C on peamiselt vaid tehiskiirgus kuna looduslik ei jõua tänu osoonikihile maani. Ultraviolet on oma iseloomult kõrgema sagedusega ja lühema lainepikkusega valgus kui on tavaline violetne valgus. Kuigi UV-valgus oli avastatud juba aastal 1801, siis tema steriliseeriv toime leiti alles aastal 1878 ja 1903. aastaks oli välja selgitatud lainepikkus, millel on kõige efektiivsem bakteritsiidne toime - umbes 250 nm. Bakteritsiidset toimet põhjustav UV-kiirguse lainepikkus jääb vahemikku 240-280 nm [23].

UV-kiirgus on elektromagnetlainete spektri osa lühema lainepikkusega kui nähtav valgus. Valgus neeldub mikroorganismide RNA ja DNA-sse ning avaldab selle molekulaarstruktuurile kahjustavat mõju, mille tõttu ei ole nad võimelised enam paljunema. UV-valgus neeldub mikroorganismi ja selle tõttu moodustuvad uued sidemed külgnevate nukleotiidide vahel. Seejärel tekib organismi DNA-s rohkelt tüümiini dimeere, mis on fotokeemilise kahjustuse peamine tagajärg. Tekkinud dimeerid ei lase mikroorganismidel edasi areneda ja paljuneda (joonis 2). [24]



Joonis 2 UV-valguse poolt tekitatav kahjustus [24]

Bakterite ja viiruse DNA-s tekkinud dimeeride moodustumine omab hävitavat toimet patogeensete mikroorganismide suhtes tänu millele ongi tõhus vahend pindade ja õhu steriliseerimiseks. Tavaliselt on vegetatiivses vormis olevad viirused ja bakterid kiirguse mõju suhtes tundlikumad kui näiteks hallitus- ja pärmseened ning bakterite eosed. Tabelis 1 on toodud välja mikroorganismide näited, mida saab UV valguse abil hävitada ja mis võivad olla väga nakkavad inimese suhtes.

Tabel 1 UV-kiirgusega hävivad mikroorganismid [26]

| Liik | Nimetus | Hävitamiseks vajalik aeg (s) |
|------------------------------|--|------------------------------|
| Bakter | Corynebacterium diphtheriae (Difteeria) | 0,25 |
| | Klostriidium | 0,33 |
| | Shigella | 0,15 |
| | Mycobacterium tuberculosis (Tuberkuloos) | 0,41 |
| | Salmonella spp | 0,51 |
| | Salmonella typhi | 0,53 |
| Viirus | Adenoviirus | 0,10 |
| | Polioviirus | 0,80 |
| | Rotaviirus | 0,52 |
| | B-hepatiidi viirus | 0,73 |
| | Tubaka mosaiikviirus | 0,16 |
| | Coxsackie viirus | 0,08 |
| Seened ja nende eosed | Coprophilous fungi (Seened) | 4,00 |
| | Rhizopus spp (Mukorükoos) | 0,23-4,67 |
| | Aspergillus spp | 0,73-8,80 |
| | Pehmed eosed | 0,33 |
| | Aspergillus niger | 6,67 |
| | Penitsillium | 3,33-087 |

Bakteritsiidse desinfitseerimise efektiivsus sõltub:

- õhus olevate mikroorganismide liikidest
- UV-kiirguse spektraalsest koostisest
- UV-kiirguse intensiivsusest
- ekspositsioonist
- töödeldava ruumi mahust
- kaugusest allikast ja UV-kiirte langemisnurgast
- ruumi siseõhu omadustest (temperatuur, niiskus, tolmu hulk, õhuvooluhulk)

Eristatakse kolme UV-kiirte kasutusviisi: otsene, kaudne ja suletud.

Otsest kiiritamist viiakse läbi inimeste puudumisel, seega sobiv aeg on näiteks enne töö algust ning sellisel juhul on kasutuses lambid, mis kinnitatud mingisugustele ruumi pindadele (seinad, põrand, lagi).

Kaudse kiiritamise puhul on tegemist nn peegeldunud kiirtega ehk kiirgusallikad on paigaldatud põrandast umbes 2 meetri kõrgusele reflektoriga ülespoole ning lambi kiired on suunatud ruumi ülemisse tsooni. Ruumi alumine osa on aga kaitstud otsestest kiirtest tänu lambi peeglile ning sellist süsteemi kasutades on ruumi kogu ülemine ala otseste kiirguse all ning alumine on kaitstud [27].

Suletud kiiritamist kasutatakse ventilatsioonisüsteemides ja autonoomsetes ringlusseadmetes ning seda meetodit on lubatud kasutada ka inimeste juuresolekul. Lambid on paigutatud õhupuhastusseadme korpuse sisse ning ruumi sisenev õhk saab algul otsest kiiritust, millega desinfitseerub ja alles siis liigub ruumi.

UV-kiirtega desinfitseerimiseks kasutatakse mitmeid seadmeid, kuid kõige traditsioonilisem valik on bakteritsiidsed lambid.

2.1.1 Bakteritsiidsed lambid ja neid sisaldavad seadmed

Baktereid hävitavad lambid on UV-kiirguse allikad, milleks on enamasti kasutusel madalrõhuline elavhõbedalamp. Nende toimimise aluseks on metallaurudes toimuv elektrilahendus, mille tõttu tekitatakse kiirgus lainepikkusega 205-315 nm. Viimasel ajal on kasutusele võetud ksenoonist impulsslambid.

Madalrõhulised elavhõbedalambid ei erine konstruktsiooniliselt ja elektriliste parameetrite poolest tavalistest luminofoortorudest, erinevus on vaid selles, et nende pirn on valmistatud spetsiaalsest kvarts- või uviolklaasist, mille UV-kiirguse läbilaskevõime on kõrge ja selle sisepinnal ei ole luminofoorkihti. Madalrõhu elavhõbedalambid on kõige tugevam bakteritsiidne toime lainepikkusel 254 nm ja just sinna langeb üle 80% tema kiirgusest. Nende pikk kasutusiga (5000 - 10 000 tundi) ja võime minna tööle hetkeseisuga peale süütamist on nende tugevateks külgedeks.

Teist tüüpi bakteritsiidlambid on kõrgrõhu elavhõbeda-kvartslambid. Nende erinevus seisneb teistsuguses disainis - tegemist on väiksema suurusega sulatatud kvartsklaasist fosforkattega pirniga. Tänu sellele, et lamp sisaldab elavhõbedat, kiirgab see ultravioletvalgust lainepikkustel 253,7 ja 185 nm, kuid kvartstoru laseb läbi vaid 253,7 nm kiirguse ja teise blokeerib, mille tõttu kasvab lambi võimsus. Sellist tüüpi lamp omab võimsust (100 - 1000 W), mis on kaks kuni kolm korda rohkem, kui tavalistel luminofoorlampidel ja mis võimaldab vähendada lampide kogust ruumis. Elavhõbeda-kvartslambid on küll head oma võimsuse poolest, kuid nende bakteritsiidne efektiivsus on madalam ja kasutusiga lühem (500 - 1000 h). Lisaks sellele hakkab nende bakteritsiidne toime tekkima alles 5-10 minuti jooksul pärast tööle panemist [27].

Mõlemal elavhõbedalambil on olemas ka ühine oluline puudus, milleks on lambi purunemise korral tekkiv ruumi ja keskkonna elavhõbedaurudega saastumise oht. Sellel põhjusel on oluline õige lampide utiliseerimine ja keskkonnaohutuse tagamine. Selleks, et vältida võimalikke keskkonna ja õhu reostumisi on kasutusele võetud eelnevalt nimetatud ksenoon impulsslambid. Neil on suur biotsiidne mõju ning tööpõhimõtteks on suure intensiivsusega laia spektriga pulseeriv UV-valguse kiirgamine. Nende UV-C kiirgus on vahemikus 200-280 nm ja nad on võimelised tekitama lahendust mitu korda ühe sekundi jooksul. [28] Selliste lampide eelisteks on suurem mikroorganisme hävitav toime väiksema tööaja jooksul ning õhu saastumise ohu puudus purunemise korral. Impulsslampide oluline miinus, mis piirab nende laialdast kasutamist, on nende võime töötada vaid kõrgpingetel ning lampide paigaldamiseks on tarvis kasutada keerukaid ja kalleid seadmeid.

Peale eelnimetatud lampide tüüpide on bakteritsiidseid lampe võimalik jaotada ka osooni genereerivateks ja osooni vabadeks. Esimestel on spektrijoone lainepikkus 185 nm ning hapniku molekulidega vastastikmõju tagajärjel moodustab õhus osoon. Osoon võib suuremates kontsentratsioonides avaldada kahjulikku mõju inimeste tervisele ning seetõttu on oluline pidevalt jälgida osooni sisaldust õhus, tagada korrektne ventilatsioonisüsteemide töö ning korraldada regulaarne ja põhjalik ruumi õhutamine. Selleks, et välistada osooniga mürgituse riske, on välja töötatud osoonivabad bakteritsiidsed lambid. Nende pirn on tehtud kvartsklaasist, mida 185 nm lainepikkus ei suuda läbida.

UV-lampe kasutatakse seadmetes, mis võivad koosneda peale lambi ka helkurist, muudest lisaelementidest ja kinnitusvahenditest. Kiiritaja eesmärk on jaotada lambi poolt tekitatud kiirgusvoog ümbritsevas ruumis laiali ning kiiritajaid on olemas suletud ja avatud süsteemiga.



Joonis 3 Otsese kiirgusega bakteritsiidne lamp [29]

Avatud bakteritsiidsetes kiiritajates

on kasutusel otsene lambi poolt kiiratud baktereid hävitav valgusvoog, mis katab teatud ala enda ümbruses (joonis 3). Tänu sellele, et kiirgus satub otse õhku või pindadele, on lahtiste kiiritajate bakteritsiidne toime väga kõrge ning hävivad ka kõige ohtlikumad mikroorganismid (sh seened, hallitused, viirused) nii õhus kui ka muudel pindadel. Sellised seadmed kinnitatakse lakke, seinale või ukseavadesse või siis võib olla ka mobiilne versioon, mida saab paigutada kindlasse kohta. Kuna tegemist on lahtise UV-kiirgusega, siis selliseid seadmeid ei tohi kasutada inimeste ja loomade juuresolekul, sest pikaajalise kokkupuute korral võib see põhjustada mitmeid haiguseid, näiteks fotokeratiit ehk kaarsilm, mille sümptomiteks on

silmade ärritus, valu, punetus, peavalud või ajutine nägemise kaotus [30]. Fotokeratiit võib olla ka tõsisemate haiguste põhjustajaks (katarakt, terüüria). Peale silmade kahjustuse võib UV-kiirgus olla ohtlik ka inimese nahale ning põhjustada nahavähki.

Suletud süsteemiga ehk puhur-tüüpi kiiritajate tööpõhimõte seisneb õhu retsirkulatsioonis. Valgusallikas asub kinnises süsteemis, mille tõttu UV-kiirgus jaotub ainult seadme sees ning õhu desinfitseerimine toimub tänu sellele, et puhuri sisse pumbatav õhk läbib UV-valgust kiirgava allika ning väljub läbi ventilatsioonitava (joonis 4).



Joonis 4 Puhur-tüüpi UV lambiga seade [31]

Kuna õhu puhastamine käib tänu õhu liikumisele selle sees, siis kõige mõttekam on paigutada antud kiiritaja seintele piki peamisi õhuvoolusid, näiteks kütteseadmete lähedusse. Juhul, kui tegemist on mobiilse puhur-tüüpi UV-kiiritajaga, siis see

tuleks panna ruumi keskpaika või seinte äärde ning kindlasti tuleb tagada piisav õhu liikumine. Selle seadme suureks eeliseks on see, et seda saab kasutada ka inimeste juuresolekul, kuid nõrgaks küljeks, võrreldes avatud kiiritajaga, on see, et puhastab vaid ruumiõhu ja ei toimi teistel pindadel.

Nende mõlema seadme nõrgaks küljeks on efektiivsuse langus kõrgenenud ruumiõhu niiskuse, tolmususe ja madalate temperatuuride korral. Lisaks sellele peab arvestama, et ei avatud ega suletud kiiritaja ei eemalda õhust lõhnasid ja orgaanilisi saasteaineid.

Desinfektsioonirobot

Viiruspandeemia andis tõuke mitmete efektiivsete tehnoloogiliste lahenduste kiireks levikuks, mis aitaksid hoida ruumides hügieeni, üks sellistest seadmetest on UV-C valguse abil haigusetekitajaid hävitav desinfektsioonirobot (joonis 5). 2021 aasta märtsis tuli selline seade Eestisse, Lääne-Tallinna Keskhaiglasse ning ühtlasi sai sellest kogu Baltikumi esimene robot. Ta leidis aset Covid-osakonnas ning aitas puhastada ruumid nakkusetekitajatest.

Lääne-Tallinna Keskhaigla juhatuse esimehe dr Arkadi Popovi sõnul kasutati robotit nii palatite kui ka koridoride täiendavaks desinfitseerimiseks tänu millele vähendati viiruse levikut haiglaruumides.

Desinfektsioonirobot sisaldab kaheksat UV-C lampi ning nende kiiratava valguse lainepikkus on 254 nm, mis on, nagu eelnevalt oli ka mainitud, kõige efektiivsem lainepikkus bakterite ja viiruste DNA kahjustamiseks. Tootja sõnul hävitab robot suure osa nakkushaigustest, kaasa arvatud ka koroonaviiruse. Robot on võimeline töötama nii iseseisvalt kui ka käsitsi juhtides, kuid sel juhul peab kasutajal olema vastav kaitseriietus [32].



Joonis 5 Desinfektsioonirobot [32]

Kaelaskantav õhupuhasti Respiray

Veel üks uus õhu puhastamiseks seade on Respiray, mis on Eesti tehnoloogiaettevõtte poolt loodud seade. Tegemist on kõrgtehnoloogilise UV-õhupuhastiga, mille tööpõhimõte seisneb eeldusest, et suurem osa sissehingatavast hapnikust pärineb mööda inimkeha alt üles liikuvast õhust.

Seade koosneb kaheetapilisest filtrist, mis puhastab õhu algul tolmust ja suurematest lenduvatest osakestest ning seejärel läbib õhk UV-mooduli, mis muudab 99% õhus leiduvatest viirustest ja bakteritest kahjutuks. Seadmes kasutatud UV-C valgus omab lainepikkust 265 nm ning ei tekita osooni. Lisaks sellele on tema korpus ka täielikult valguskindel ning ei teki ohtu, et UV-valgus pääseb seadmest välja. Need kaks omadust teevad Respiray õhupuhasti ohutuks inimese jaoks, mis ei põhjusta terviseprobleeme. Selline õhupuhasti töötleb 55 liitrit õhku minutis ning seda on umbes neli korda rohkem, kui inimene hingamiseks vajab.






Seadme aku töötab ühe laadimisega 8 tundi ning sisaldab kahte visiiri, mis pakuvad lisakaitset.

Respiray UV-moodulit on testitud Lodži Ülikooli ja Tartu Ülikooli laborites. Esimese katsetes deaktiveeris moodul 99,68% kolibakteritest ja 99,88% stafülakoki bakteritest. Tartus aga testiti UV-C mooduli efektiivsust alfaviiruse peal, mille sarnane on ka SARS-CoV-2 ehk membraaniga üheaheelaline RNA viirus. Testimise käigus saadi tulemus, et seade inaktiveeris 99,4% sellest läbi juhitud osakestest [33].

Õhupuhastaja suureks eeliseks tavamaski ees on see, et see ei kata ära isiku suud ja näoilmet, mis teeb suhtlemise mugavamaks. See on eriti oluline erivajadustega inimestega suhtlemisel. Tabelis 2 on toodud erinevate maskide ja antud õhupuhasti erinevused.

Vaatamata kõikidele eelnimetatud eelistele võib tuua välja ka mõned miinused, mis võivad tekitada ebamugavusi Respiray kandjatel. Sinna kuulub näiteks seadme kaal, milleks on ligi 1 kg ja mis võib tekitada ebamugavust pideval kandmisel. Lisaks sellele võib seade tekitada müra, mis võib inimest segada.

Tabel 2 Erinevate maskide võrdlus [34]

| | Näovisiir | Kangasmask | Ühekordne meditsiiniline mask | N95 mask | Respiray |
|--|---------------|---------------|-------------------------------|---------------|----------------|
|  Hind | ~ €20 aastas | ~€60 aastas | ~ €480 aastas | ~ €560 aastas | ~ €79 aastas * |
|  Kaitse aerosoolide vastu | Puudub | Passiivne | Passiivne | Passiivne | Ennetav |
|  Takistab hingamist? | Ei | Jah | Jah | Jah | Ei |
|  Nägu kaetud? | Ei | Jah | Jah | Jah | Ei |
|  Udused prillid | Ei | Jah | Jah | Jah | Ei |
|  Keskkonnasõbralikkus | Taaskasutatav | Taaskasutatav | Ühekordne | Ühekordne | Taaskasutatav |

*The Respiray air purifier can be used up to 10 000h and the yearly cost calculation is based on 8-hour daily usage over 3.5 years.

Far-UVC light ehk kaug-UVC valgus

Üks hiljuti avastatud meetoditest bakterite hävitamiseks on 222 nm lainepikkusega UVC-valguse kasutamine mida nimetatakse kaug-ultravioletvalguseks. Enamik tooteid kiirgavad UV-valgust lainepikkusel 254 nm, sest see on kõige efektiivsema bakteritsiidse toimega, kuid nendel lampidel on üks oluline puudus - neid ei tohi kasutada inimeste juuresolekul. Seoses sellega on üritatud leida sama tõhus mikroorganisme hävitav meetod, kuid mida oleks võimalik kasutada ka rahvarohketes kohtades ja rahvusvahelistes sõmpunktides, sest just seal on sageli globaalsete pandeemiate sünnipaigad.

Kaug-UVC lamp on valmistatud krüptonkloriidist (KrCl) ning valguse lainepikkus on 222 nm. Columbia ülikooli teadlase dr David Brenneri viimaste uuringute järgi on see võimeline hävitama muu hulgas ka koroonaviiruse. Teadlane usub, et sellest võiks saada tõhus vahend pandeemiate ära hoidmiseks ka rahvarohketes kohtades. Brenneri ja tema rühma töö tulemusi kirjeldav uurimus ilmus teadusajakirjas Scientific Reports [35].

2020 aasta augustis tehtud katsed näitasid, et UV-C valgus lainepikkusel 222 nm on inimese jaoks ohutu ning ei kahjusta silmi ja nahakudesid, sest see ei ole võimeline läbima naha välimist kihti ega pisaravedeliku kihti. Viirused ja bakterid on aga inimkeha rakkudest palju

väiksemad ning kaug-ultravioletvalgus suudab jõuda nende DNA-ni ja hävitada nad. See omadus võimaldab seadmetel olla katkestamatult tööl ning mikroorganismide hävitamine toimub pidevalt, mida ei saa teha tavaliste UVC-lampide kasutamisel.

Jaapani suurtootja Ushio inc. kasutas oma uues seadmes antud tehnoloogiat ning 2020 aasta septembris esitles oma UV-lampi Care222 [36]. Eesmärk on kasutada seda kontorete, eluruumide, avalike kohtade ja transpordi õhu desinfitseerimiseks. Tootja sõnul suudab Care222 6-2 minutiga neutraliseerida kuni 99% viirustest ja bakteritest 3 m² suuruses ruumis lambist 2,5 m kaugusel.



Joonis 6 Ushio inc. kaug-UV-lamp Care222 [36]

Seadme kaal on umbes 1,2 kg ning esialgne maksumus oli 3900\$ USD.

Kuigi viimased katsed on andnud positiivseid tulemusi ei saa hetkel veel seda tehnoloogiat sajaprotsendiliselt usaldada, sest katsetusi on tehtud veel liiga vähe ning uuringud pikaajalise toime kohta inimese tervisele puuduvad. Peale selle on kaug-UVC valguse nõrgaks küljeks ka pikem desinfitseerimiseks kuluv aeg [37].

2.2 Filtrid

Filtrite tööpõhimõtte seisneb selles, et saastunud õhk läbib filtermaterjali ning saasteaine sadestub selle pinnale. Filtri valik ja nende kogus sõltub sellest, kui puhas õhk peab lõpptulemusel olema. Näiteks meditsiiniuasutustes on nõuded õhukvaliteedile palju kõrgemad ning A-klassi puhtusega ruumides peab olema täielik steriilsus. Sinna alla kuuluvad operatsioonisaalid, elustamisruumid, intensiivravi jm ning sinna juhitud õhust peab olema vähemalt 99% mikroorganismidest hävitatud [27]. Selleks kasutatakse ventilatsioonisüsteeme pideva õhuvooluga, kus toimub samaaegselt ka õhu filtreerimine ja desinfitseerimine. Selle juures on oluline tagada õhufiltrite regulaarne vahetus.

Mehaaniline filtrimine on küll tõhus õhu puhastamise vahend, kuid omab ka nõrku külgi, milleks on:

- Märkimisväärne müratase
- Enamusel puudub võimalus bioloogiliste saasteainete inaktiveerimiseks ja hävitamiseks
- Filtrimisseade võib osutada õhu saasteallikaks, kui pole tagatud õigeaegne filtri vahetus
- Tavaliselt pole efektiivne väiksemate kui 0,3 µ suuruste osakeste ja mikroorganismide suhtes

- Filtritel on piiratud ressursid, mida pole võimalik uuendada
- Õhupuhastussüsteemi hind on üsna kõrge ühe kuupmeetri kohta (tuleneb vajalike ruumi rekonstrueerimisest ja seadmete paigaldusest)
- Suur energiatarbimine

Kuna saasteaineid on õhus erinevaid, siis on loodud ka erineva toimemehhanismiga filtreid ning eristatakse viite peamist tüüpi:

- Eelfilter
- HEPA filter
- Aktiivsöe filter
- Elektrostaatiline filter
- Fotokatalüütiline filter

2.2.1 Eelfilter

Eelfilter ehk primaarfilter on mõeldud eelkõige suuremate tolmuosakeste ja loomakarva püüdmiseks. Tavaliselt koosneb see peenest mitmekihilisest võrgust ning on kasutusel enamikes kliimaseadmetes. Selliseid filtreid tuleb kas regulaarselt puhastada ja pesta või asendada uuega. Põhiülesandeks teiste filtrite kasutusaja pikendamine.

2.2.2 HEPA filter

Nimetus tuleneb inglise keelsest lühendist ning tähendab *High Efficiency Particulate Air* ehk „suure tõhususega tahkete osakeste õhufilter“ ning tegemist on mehaanilise filtriga, mis on võimeline läbi sõeluma palju rohkem väikesi osakesi kui muud filtrid. Esialgelt olid nad loodud radioaktiivsete osakeste püüdmiseks USA tuumatööstuses ning nende eesmärk on eemaldada õhust kuni 0,3 µ suurused osakesed ning efektiivsus on 99%. Kuna enamik õhus sisalduvatest saasteainetest on suuremad kui 1 µ, siis HEPA filtritel põhinevad õhupuhastajad on väga efektiivne vahend nii laborites, toiduainetööstuses kui ka meditsiiniuasutustes, kus puhta õhu nõudmised on kõrgemad. Lisaks sellele, alates SARS-CoV-2 viiruse põhjustatud pandeemiast, said HEPA-filtrid veel rohkem tähelepanu ning neid hakati kasutama lennukite õhuringlussüsteemides tagamaks paremaid viiruse vastased turvameetmed. Peale eelnimetatud kohtade on taolised filtrid kasutusel ka tavapärastes seadmetes nagu tolmuimejad, kliimaseadmed, külmikutes, maskides ja ka kiiretes elektrilistes kätekuivatites, et tagada väikeste osakesete kinni püüdmine ja sellega käte puhtus peale kuivatust.

HEPA filtrite filtreerimismaterjal on tavaliselt volditud akordioni kujul, et maksimeerida filtri kogusuurust ning see koosneb tavaliselt klaaskiust. Kusjuures materjali kiud ja selle kihid on erineva paksusega (0,5 – 5,0 µm) ja paigaldatud kaootiliselt. Mida õhemad on kiud ja mida tihedamalt on nad omavahel kokku pakitud, seda suurem on nende kokkupuuteala püütavate osakestega. Kasutatakse ka kõrgema elektrijuhtivusega materjale, mis loob kiudude ja osakeste vahel elektrostaatilised tõmbejõud (Coulomb'i seadus) ja suurendab filtri efektiivsust [38].

HEPA-filtri töö erineb teistest samalaadsetest seadmetest. Nimelt tavaline mehaaniline filter püüab need osakesed, mis ei mahu läbi materjali pooride, toimides nagu sõel, ehk on efektiivne vaid nende saasteainete suhtes, mille suurus on filtripooridest väiksem. HEPA filtrite kiudude vahelised avad on aga 5-10 μm , mis küll aitab lasta õhku läbi, kuid mis on tunduvalt suuremad, kui filtri poolt püütavad osakesed. Piisav avade suurus on vajalik rõhukaotuse ennetamiseks, ehk väikeste avade puhul juhtuks see, et kuluks liiga palju aega õhu filtrist läbi laskmiseks. HEPA-filtrite efektiivsuse tagab filtermaterjali kogus, voltimisviis ja kiudude materjal, kuhu osakesed settivad kohe kui puudutavad seda. Protsess toimub tänu adhesioonile ehk tänu molekulaarjõududele toimuvale eri materjalide või eri tüüpi osakeste üksteise külge kinnijäämisele.

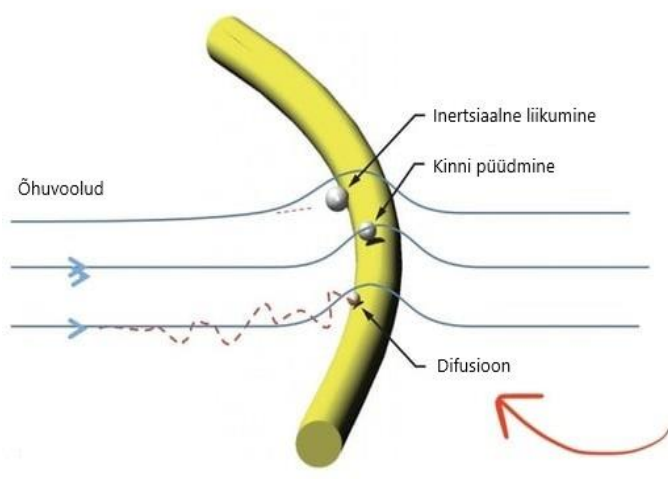
Samas toimib filtris ka difusiooni protsess, sest mikroskoopilised osakesed on pidevas korrapäras liikumises ehk nn Browni liikumises. Osakesed pöörkavad kokku gaasi või vedeliku molekulidega, mille tõttu muutub pidevalt nende kiirus ja suund. Sellisel moel liiguvad väiksemad osakesed üldisest õhuvoolust välja ning jäävad kiudude külge kinni. Sellisel moel suuremad osakesed jäävad filtermaterjali külge kinni tänu inertsusele, teised tänu difusioonile.

On olemas ka vahepealse suurusega osakesi, mille inertsus pole piisavalt suur, kuid ei toimi ka difusiooniprotsess. Selliste osakeste suurust nimetatakse Most Penetrating Particle Size (MPPS) ehk need on kõige suurema läbitungevõimega osakesed, mille hulka kuulub ka COVID-19 viirus [39]. MPPS osakesi aitab koguda filtripinnale see asjaolu, et nende lähenemisel kiule vähemalt oma raadiuse kaugusele suudab materjal ta enda külge tõmmata ja oma pinnale jätta. Kõikide filtrite puhul ongi kõige problemaatilisemad osakesed suurusega 0,12 kuni 0,25 μm , COVID-19 viiruse suurust hinnatakse 0,12 kuni 0,16 μm . Õnneks on viirused tavaliselt seotud teist tüüpi osakestega, näiteks vesilahustega (hingamisteede piisad), ning see teeb viiruse püüdmise veidi lihtsamaks, sest osakese suurus oluliselt kasvab [39].

Tänu sellisele materjalile ja ehitusele on filtrid väga vastupidavad juhuslike kahjustuste eest ning on võimelised efektiivselt püüdma ka mikroskoopilised viirusosakesed. Filter küll ei hävita mikroorganisme, kuid kogub nad enda pinnale ning ei lase tagasi ruumi. Sellel põhjusel on oluline korralik ja õigeaegne filtrihooldus.

Selleks, et HEPA-filtri tööiga pikendada, paigaldatakse selle ette vajalik kogus eelfiltreid, mis püüavad suuremad ja jämedamad osakesed kinni, et kaitsta HEPA-filtrit enneaegse ummistuse eest ning säilitada selle efektiivsus ja läbilaskevõime.

HEPA-filtri tööpõhimõtte on kokkuvõtvalt järgmine:



Joonis 7 HEPA-filtri tööpõhimõtte [38]

1. Filtrisse suundub õhuvool erisuuruste osakestega, alates 10 μm ning sellest väiksemad
2. Suuremad ja jämedamad osakesed takerduvad filtri pinnale tänu inertsjõule, väiksemad tänu difusioonile ja MPPS osakesed püüavad kiud enda külge kinni (joonis 7)
3. Filtri pinnale sadestuvad kõik osakesed, mis tulid õhuvooluga ning puutusid kiududega kokku
4. Osakesed on kiudude küljes tugevasti kinni tänu Van der Waalsi jõule

Väga sarnane HEPA-filtri ehitusele ja tööpõhimõttele on Ultra low particular air filter ehk ULPA-filter. Mõlemad koosnevad tihedalt omavahel seotud kiudude kihtidest ning eemaldavad üliväikesed osakesed neist läbi juhitud õhust. Erinevus seisneb selles, et viimane on võimeline püüda veel väiksemaid osakesi - 0,12 μm ja suuremaid efektiivsusega 99,999%. HEPA-filtrid suudavad eemaldada õhust kuni 0,3 μm suurused osakesed efektiivsusega 99,97%. ULPA-filter võib takistada peene mürgise tolmu, aerosoolide, viiruste, bakterite jm tungimist ruumidesse, kus õhukvaliteet peab olema võimalikult hea. Selle kõrgem kasutegur tuleneb filtermaterjali suuremast tihedusest, mille tõttu, kahjuks, langeb ka õhuvoolu kiirus (kuni 50%) ning seetõttu vajab oma tööks ka rohkem energiat. Peale selle on ULPA-filtril ka lühem eluaeg - kui HEPA-filtri eluiga on umbes 10 aastat, siis teisel on see 5-8 aastat [40].

Filtritootjad rõhuvad tihtipeale just sellele, et ULPA-filtril on suurem kasutegur ning on võimeline eemaldama veel väiksemaid osakesi õhust, mis tõstaks õhu kvaliteeti. Samas peab pidama silmas, et võrreldes HEPA-filtritega lasevad nad läbi 20-50% vähem õhku, mille tõttu ei toimu piisavat õhuvahetust ruumis ning see võib just vähendada õhu puhtust [40]. Seepärast on oluline teha kindlaks oma vajadused ning analüüsida minimaalset ruumi jaoks vajalikku täielikku õhuvahetuse kogust tunnis. ULPA-filter on kasutusel näiteks steriilsust vajavates ruumides, ventilatsioonikanalites või laminaartõmbekappides.

2.2.3 Aktiivsõefilter

Aktiivsõega filter on mõeldud eelkõige lõhnade ja gaasilisandite eemaldamiseks õhust ning õhus sisalduvate kemikaalide lagundamiseks. Põhikomponendiks, nagu ka nimetus ütleb, on aktiivsüsi, mis on tavaline süsi, mille aktiveerimise tagajärjel on loodud poorstruktuur. Toormeks kasutatakse tavaliselt kivisütt, kookospähklikoort, puitu turvast, pruunsüsi jm ning sellele pole kindlat struktuuri ega adsorptsioonipoore. Aktiivsõe tootmine algab toormaterjali ettevalmistamisest, selle karboniseerimisest, peenestamisest ja siis segatakse see sideainega

ja pressitakse kokku. Karboniseerimiseks võib olla kas kuivdestillatsioon 500-900 °C juures või dehüdreerimine (vee keemiline eraldamine) tsinkkloriidi või fosforhappega [41]. Seejärel toimub aktiveerimine veeauru ja süsihappegaasi keskkonnas temperatuuril 800-1000°C, mille järel toimub keemiline reaktsioon veeauru ja söe vahel. Juhul, kui söestamiseks kasutati dehüdreerimist, siis aktiveerimine toimub samuti eelnevalt kasutatud kemikaalide abiga temperatuuril 400-600°C juures ning siis pole enam veeaur vajalik. Protsessi käigus eemaldatakse suurem osa amorfsest aineist ning alles jääb vaid süsinikuplaadikestest koosnev karkass, mille vahel on adsorbeerivad poorid kindla struktuuriga. Selline filter on väga tõhus suurema molekulaarmassiga lenduvate ja poollenduvate orgaaniliste ühendite eemaldamises.

Filtri efektiivsus sõltub tema kogusest ja ehitusest – mida rohkem mikropoore sisaldab filtris olev süsi, seda rohkem gaase ta suudab eemaldada ja seda pikem on tema tööiga. Tänapäeval osatakse toota sellist aktiivsütt, mille sisepooride eripind on 500-2000 m²/g, mis tähendab, et väikese aktiivsöe koguse aktiivne sisepind on mitu korda suurem tema reaalsest suurusel.

Aktiivsöefilter adsorbeerib enda pinnale õhus lenduvaid ühendeid, sh tubakasuits, eemaldades nad sellisel moel õhust välja. Gaasi puhastamisel tuleb arvestada konkreetse filtri adsorbeerimisvõimega mingi aine suhtes. Selleks kasutatakse isoterme, mis on ainete neeldumist kirjeldav graafik. Filtri kasutamisel peab silmas pidama, et filtri jõudlus on piiratud ning seda tuleks vahetada umbes 6-kuuliste kasutusaegade järel ja selle puhastamine pole võimalik. Juhul, kui juba varem ilmneb, et filter ei eemalda ebameeldivaid lõhnu, siis tuleb see varem välja vahetada, vastasel juhul muutub filter ise õhusaastajaks. Õhupuhasti töö kvaliteet langeb ka siis, kui see on kasutusel niiskes ruumis, sest süsi imab niiskust sisse [42].

Aktiivsöefiltri tööpõhimõtte seisneb selles, et õhuvool suunatakse sorptsioonfiltrisse, kus mikropoorides jäävad saasteainete molekulid kinni. Lihtsad väikese molekulmassiga ained ja gaasid, näiteks hapnik ja lämmastik, läbivad filtri vabalt, samas kui suuremad molekulid jäävad pooridesse kinni. Aktiivsüsi võib filtris olla graanulitena, pulbrina või volditud tüüpi. Pulbritega filtri kasutamisel on suurem õhutakistus kui graanulite omal ning see vähendab õhupuhasti jõudlust. Selleks, et eemaldada õhust ka bioloogilised saasteained, paigaldatakse tihtipeale aktiivsöefiltrisse UV-lambid.

Tavaliselt on poorid sorbentides jaotatud kolme rühma suuruse järgi:

- Mikropoorid (alla 5 nm) – adsorbeerivad väga väikeseid molekule
- Mesopoorid (2 kuni 50 nm) – adsorbeerivad molekule, mis lähevad makropooridest läbi, kuid mikropooride jaoks on liiga suured
- Makropoorid (üle 50 nm) – adsorbeerivad suuri molekule, näiteks värvained [43]

Tänapäeva tehnoloogiad võimaldavad toota selliste pooridega ja nende jaotusega aktiivsütt, millist parasjagu konkreetse saasteaine eemaldamiseks vaja läheb.

2.2.4 Fotokatalüütiline filter

Fotokatalüütilise filtriga varustatud õhupuhasti töötab mitmes etapis ning peab kindlasti sisaldama UV-lampi. Tänu sellele, et selline õhupuhasti koosneb erinevatest filtritest, oksüdeerib ta nii lõhna tekitavad kui ka teised lenduvad ained ning saab hakkama ka väga paljude mikroorganismide ja allergeenidega, sinna hulka tolmulestad, seened jm.

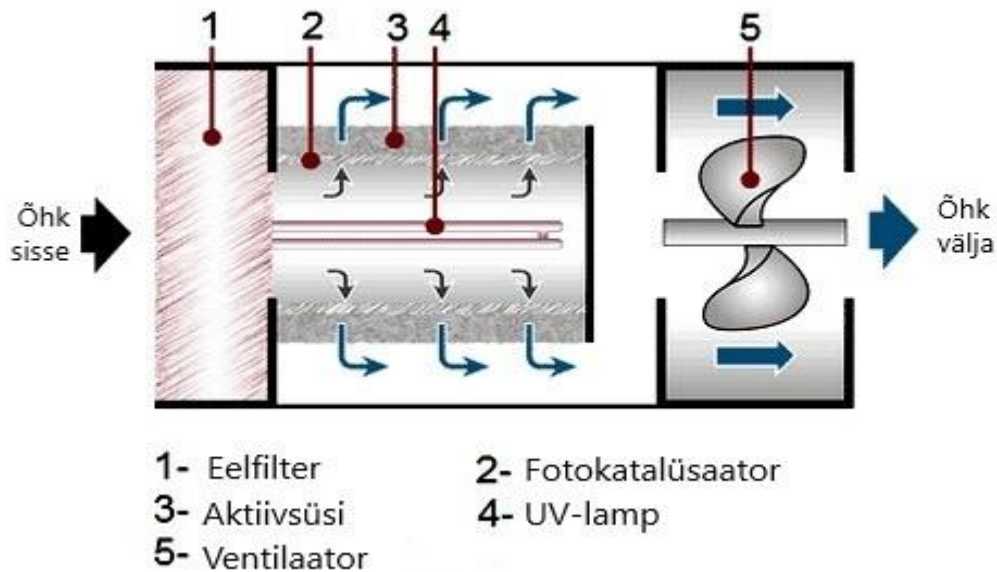
Fotokatalüütiline filter sisaldab endas peale UV-lambi ka katalüsaatorit ning lisaks võib olla ka näiteks aktiivsüsifilter võiioonfilter. Tüüpiline õhupuhasti koosnebki tavaliselt mitmest etapist, kus iga filter tegeleb erinevate saasteainetega. Just see teeb seadme tõhusaks vahendiks, mis suudab tulla toime väga valjude saasteainetega.

Fotokatalüsaator on tavaliselt valmistatud näiteks keraamikast või metallist (nt alumiinium) ning kaetud titaandioksiidi (TiO_2) või mingi muu pooljuhtmaterjali kihiga. Seadme sees kiiritatakse seda UV-valgusega ning see, omakorda, varustab titaandioksiidi energiaga. Protsessi tagajärjel vabanevad sealt elektronid, ja tekitavad positiivselt laetud augud, mis reageerivad õhus olevate veemolekulidega lagundades nad hüdroksüülradikaalideks. Nead, omakorda, lagundavad molekulaarsel tasandil suuremaid orgaaniliste saasteainete molekule lõhustades nende keemilised sidemed muutes nad lihtsamateks ühenditeks – süsihappegaasiks ja veeks. Kuna puhastamine toimub tänu oksüdeerimisprotsessile, siis selliseid seadmeid nimetatakse sageli ka fotokatalüütilise oksüdatsiooni õhupuhastiteks (Photocatalytic oxidation ehk PCO) [44].

Fotokatalüüs on võimeline tulema toime viiruste ja bakteritega, kaas arvatud ka kooroonaviirusega, lagundades nende kesta ja läbi selle takistades nende edasist paljunemist. Sellist tehnoloogiat nimetatakse ka plasma- või aktiivseks õhupuhastamiseks, sest, erinevalt teistest filtritest, saastainetega võideldakse molekulaarsel tasandil [45].

Fotokatalüütilisel filtril on olemas ka puudused. Nimelt on oht, et filtris tekkivad hüdroksüülradikaalid võivad muundada õhus sisalduvad lenduvad orgaanilised ühendid muudeks ohtlikeks aineteks – formaldehüüdiks või atsetaldehüüdiks. Samas pole kindlust, et need saasteained on inimese jaoks ohtlikumad kui need, millest on tahetud algselt õhku puhastada. Teiseks probleemiks kasutaja jaoks võib olla see, et katalüsaatorite eluiga on piiratud ning selle vahetamine võib osutuda vägagi kulukaks. Seda probleemi üritatakse aga lahendada ning luua pikema elueaga katalüsaatorid [44].

Õhupuhasti tööpõhimõte on näidatud joonisel 8. Alguses siseneb õhumass ventilaatori (5) abil õhupuhasti korpusesse eelnevalt läbides eelfiltri (1), mis asub kohe sisselaske ava taga ning hoiab kinni kõik suuremad osakesed (tolm, karvad) ning aitab mitte ummista järgnevaid. Seejärel liigub õhk kambrisse, kus algul läbib aktiivsöefiltri (3), milleks võib olla ka näiteks ionifilter ning nende eesmärk on eemaldada muud tahked osakesed õhust. Kambris asub nii ultraviolettlamp (4) kui ka katalüsaator (2) ning hakkab tööle fotokatalüütiline protsess, mille käigus lagunevad mürgised saasteained veeks ja süsihappegaasiks. Peale seda liigub puhas õhk seadmest välja. Protsess toimub nii kaua, kuni katalüsaator saab valgusenergiat.



Joonis 8 Fotokatalüütilise filtri tööpõhimõte [46]

Fotokatalüütiline filter on efektiivne vahend väga paljude saasteainete eemaldamiseks, kuhu hulka kuuluvad:

- Mürgised orgaanilised ained, mis tekivad sünteetiliste pesuvahendite kasutamisest
- Loomse ja taimse päritoluga allergeenid
- Kahjulikke mikroorganisme (baktereid, viiruseid) sisaldav tolmu (tabel 3)
- Tubakasuits ja sellest tulenev lõhn
- Ahju või kamina põletamisel tekkiv vingugaas
- Heitgaasid, mis sisenevad väliõhust ruumi
- Mööbliesemetest eralduvad fenooli ja formaldehüüdi aarud

Tabel 3 Fotokatalüütilise filtri efektiivsus mikroorganismide vastu [47]

| Liik | Nimetus | Efektiivsus (%) |
|---------------|---------------------------|-----------------|
| Bakter | Stafülokokk Aureus (MRSA) | 98,50% |
| | Streptokokk Spp | 96,40% |
| | Pseudomonas Sp | 99,00% |
| | Listeria | 99,70% |
| | Escherichia coli | 99,10% |
| | Bacillus spp | 98,10% |
| Viirus | Linnugripiviirus | 100% |
| | SARS viirused | 99,30% |
| | H1N1 | 99% |
| | Norwalki viirus | 99,90% |
| Seened | Strachybotrys chartarum | 99,90% |
| | Candida albicans | 99,90% |

Fotokatalüütilised filtrid on üks tõhusamaid õhupuhastusmeetoditest ka sellepärast, et tavaliselt on neil madal energiatarve, ei tekita palju müra ning ei vaja erilist hooldust. Puhastusseadme sisse ei kogune tolmu ega muid saasteaineid, sest seade lagundab mikroorganismid ja saasteained, mitte ei muuda neid sekundaarseteks jäätmeteks. Tänu sellele pole filtrit vaja sageli vahetada (peaks vaid puhastama tolmuimejaga iga 6 kuu tagant), mille tõttu on ta väga keskkonnasõbralik. Lisaks õhule puhastab antud seade ka ruumi pindasid. Samas, filter puhastab õhku liiga hästi, mis tähendab, et võib eemaldada õhust ka mitteohtlikud organismid, mis vähendab inimeste, eelkõige laste, immuunsüsteemi vastupanuvõimet haigustele. Sellel põhjusel ei soovitata lastetubades selliseid õhupuhasteid pikaks ajaks tööle panna.

Üks esimestest fotokatalüsaatori kasutajatest olid NASA kosmoseraketid, kuid nüüdseks on õhupuhasti kasutusel väga paljudes kohtades, näiteks spordisaalid, haiglad, toiduainete tööstus, hooldekodud, hotellid jm. Kasutamist hõlbustab see asjaolu, et seadet saab kasutada ka inimeste juuresolekul ning seetõttu võib see töötada ööpäevaringselt.

2.2.5 Ioonfilter (elektrostaatiline filter)

Ionisaator on negatiivsete ionide generaator, mis loob staatilise laengu õhus leiduvate saasteainete ümber. Selle peamine funktsioon on õhu puhastamine läbi elektrilise tolmuorjaja.

Tööpõhimõte on selline, et ventilaator tõmbab õhu seadmesse, mis liigub mööda negatiivse laenguga plaati või nõela. Selliseid plaate on seadmes kaks, kuid teine on positiivse laenguga ning see korjab hiljem tolmu enda külge. Esimesel plaadil moodustuvad elektronid, mis lastakse õhku, kus need kinnituvad õhumolekulide külge. Tekkivad negatiivsed hapnikuioonid ehk aeroioonid võivad ühineda bakterite, tolmu, suitsu ja muude positiivselt laetud ionidega. Ionisaator tekitab väliste jõudude mõjul erineva polaarsusega elektronide vahel negatiivse laenguga osakeste voo. Seejärel nad kas sadestuvad neid ümbritsevatele pindadele või õhupuhasti kogub nad enda sisse ning läbi selle õhk muutub puhtamaks. Ionisaatori töökäigus tekib väikeses koguses ka osooni ning see on võimeline lagundama bakteri rakukesta ning peatama mikroorganismide elutegevust. Samas suures koguses on osoon tervisele ohtlik [48].

Ionisaator laseb õhku negatiivsed ionid, samas õhus lendlevad bakterid, tolmuosakesed ja muud saasteained omavad positiivset laengut ning negatiivsed õhuioonid kas neutraliseerivad nad või annavad neile negatiivse laengu üle ning positiivse laenguga tolmuorjaja plaat kogub nad õhupuhastisse. Uuringud on näidanud, et 2 m³ suuruses ruumis oli 30 minuti pärast osakeste õhust eemaldamise efektiivsus 80% ning 1,5 tunni möödudes oli näitaja 100%. Õhu pidev segunemine suurendab ionisaatori efektiivsust kuni 90% võrra alla 0,1 µm ja üle 0,5 µm suuruste osakeste puhul, kuid väheneb 65-90% võrra 0,2-0,4 µm osakeste puhul [1].

Elektrostaatilisi plaate on kerge hooldada – peab vaid puhtaks tegema saastumise korral ning saab edasi kasutada. Samas reaalsus on selline, et küllalt suur osa sadenenud osakestest jääb ikka ruumis olevatele pindadele ning ei jõua ionisaatorisse tagasi, seega täieliku puhtuse loomiseks on vajalik ka pindade käsitsi desinfitseerimine. Kui aga märgpuhastus jääb tihti vahele, siis tekib suur tõenäosus, et kogutud ja langenud pindadele tolmu tõuseb tagasi õhku ning võib tekitada ohtlikke haigusi. Sellel põhjusel ei peeta ainuüksi ionisaatorit piisavalt efektiivseks seadmeks õhu desinfitseerimiseks ning seda on soovituslik kasutada koos mingisuguse muu filtratsioonüsteemiga, näiteks UV-kiirgusega. Puuduseks võib nimetada ka filtri madala efektiivsuse ning osooni tekitamise. Lisaks sellele tuleb suhteliselt tihti puhastada plaate, mis koguvad enda peale tolmu ja saasteaineid, vastasel juhul pole nende töö efektiivne.

Ionisaator on siiski kasulik seade inimese tervisele, sest see värskendab õhku. Looduses on kohti, kus õhus on suurem negatiivselt laetud ionide kontsentratsioon ning seal tunneb tavaliselt inimene ennast paremini ning kergem on hingata. Sellel tehnoloogial põhineb ka ionisaatori töö ning selle üks eesmärkidest on luua mugavam hingamiseks õhkkond, millest tuleneb ka parem enesetunne. Näiteks loomulik ionide kontsentratsioon värskes õhus on 1000-10 000 iooni/cm³ ning ruumis langeb see näitaja 100 kuni 40 ioonini/ cm³. Kõige

kergem on hingata mägedes, sest seal on tugevam ionisatsioon atmosfääri poolt ning UV-kiired pole jõudnud seda veel nõrgendada. Samuti ka mere ääres, kus väikesed veepiisad omavad negatiivset laengut ning annavad selle üle hapnikumolekulide õhus ja läbi selle toimub õhu küllastumine negatiivsete ionidega. Minimaalne soovituslik kogus tervisliku keskkonna jaoks on 1000-2000/cm³. Selle kontsentratsiooni puhul suureneb peaaegu aktiivsus, pinge maandub ning tugevnevad respiratoorse immuunsüsteemi funktsioonid. Efektiivsus tuleneb sellest, et ionidega küllastunud õhk stimuleerib punaseid vereliblesid ja nad hakkavad aktiivselt tööle, mis toob kaasa kopsudes gaasivahetuse suurenemise 10% võrra. [49]

Õhuionisaatorit on kõige mõttekam paigaldada sundventilatsiooniga ruumidesse, kus toimub pidev õhuvahetus, kuid õhul on kas positiivne elektriline laeng või puudub.

Plasma süsteemiga õhupuhasti ionisaatori tehnoloogiaga

Õhupuhastite ja filtrite arendamine ja kasutamine on viimasel ajal muutunud eriti aktuaalseks teemaks ning sellega seoses on „Journal of Physics“ avaldanud oma ajakirjas Michigani ülikooli teadlaste poolt välja töötatud plasma-õhupuhastussüsteemi [50].

Õhupuhasti sees on nõelplaadid – üks positiivse ja teine negatiivse laenguga. Kahe plaadi vahel tekitatakse kõrgpinge ning mõlemad plaadid saavad 20 000 voldise laengu, üks positiivse ja teine, vastavalt, negatiivse ning kahe plaadi vahele tekib hüdroksiid plasma. Elektrilaenguga osakestest koosnev külm plasma suudab inaktiveerida kuni 99% kõikidest viirustest ja steriliseerida õhku. Külm plasma suudab hävitada ka bakterid hävitades nende rakuseinad. Veel üheks eeliseks on see, et tänu toimuvale ionisatsioonile muutub õhk värskemaks, sest negatiivselt laetud ionid tõstavad õhu kvaliteeti. Lisaks sellele vähendab ioniseerimine ka hallituse ja bakterite edasise paljunemise tõenäosust [51].

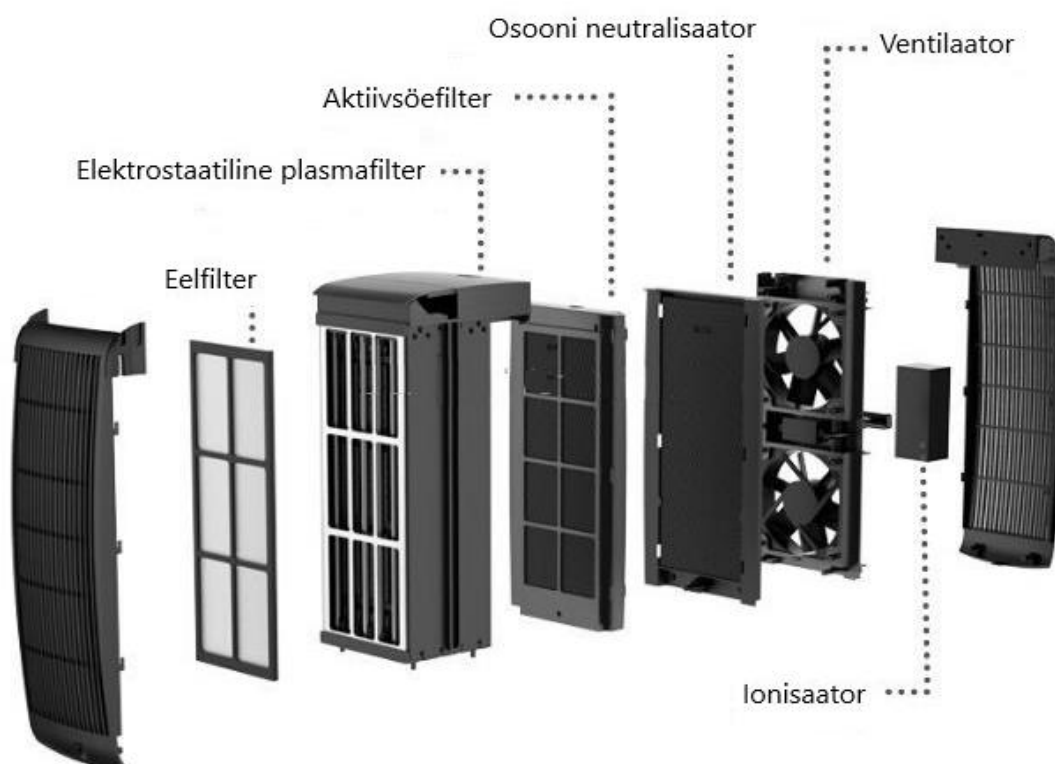
Plasma saadakse külmast plasmareaktorist ning kui patogeenid seda läbivad, reageerivad nad ebastabiilsete ühenditega (näiteks osoon) ja radikaalidega. Radikaalid mõjutavad nendega reageerinud mikroorganismide lipiidide, valkude ja nukleiinhapete ehitust läbi patogeenide hävitamise ning muudavad mikroorganismid ohutuks. Seade on võimeline ka filtreerima patogeensed mikroorganismid õhust välja, mis teeb selle töö veelgi efektiivsemaks.

Plasma süsteemiga õhupuhasti koosneb tavaliselt mitmest filtrist ning õhk läbib mitu etappi enne kui suunatakse see välja. Üks kõige tihedamini kasutatavatest lisafiltritest on UV-lamp, mis aitab hävitada mikroorganisme. Plasma võimaldab eemaldada õhust orgaanilised ained (viirused, bakterid, seened) ning suuremad osakesed ioniseeruvad ja kinnituvad filtrile. Süsteem puhastab õhu ka lõhnadest, näiteks tubakasuits ja selle lõhn.

Joonisel 9 on toodud üks võimalikest plasmafiltritest ning tööpõhimõtte on järgmine:

1. Esimesena asetseb eelfilter, mis kujutab endast ette võrku ning hoiab kinni suuremad osakesed. Eelfilter kaitseb ka järgnevaid filtreid ummistuse eest.

2. Peale seda on plasmafilter, mis omab elektrilaengut ja tõmbab enda külge kinni väikesed saasteaine osakesed. Selle töö käigus eralduv osoon aitab hävitada ebameeldivad lõhnad, tubakasuitsu, kemikaalid, viirused ja bakterid.
3. Edasi asub aktiivsöefilter. Tema ülesanne on molekulaarsel tasandil lagundada lenduvad gaasid osooni juuresolekul (fenool, formaldehüüd, ksüleen, tsüaniidid, ammoniaak, stüreen jm). Ta saab hakkama pea 99% lenduva gaasiga, mis ümbritsevast õhus leiab.
4. Järgmine etapp on osooni lagundamine, mis muudab plasmafiltrist eraldunud osooni hapnikuks. See rikastab õhku ning muudab osooni täiesti ohutuks.
5. Puhastatud õhk suunatakse ventilaatori abil edasi ionisaatorisse, mis rikastab õhku negatiivselt laetud ionidega [52].



Joonis 9 Plasmasüsteemigaioonfilter [52]

Selleks, et õhupuhasti töö oleks efektiivne, peab kindlasti eelfiltrit ja plasmafiltrit regulaarselt puhastama.

Tootjad väidavad, et selline filter suudab eemaldada kuni 95% kõikidest saasteainetest ruumis ning saab hakkama järgmiste ülesannetega:

- Aitab vabaneda tolmust
- Desodoreerib õhku
- Puhastab õhu allergeenidest
- Hoiab ruumiõhku värskena
- Mõjub negatiivselt erinevate putukate paljunemisele [52]

Plasmafilter ei vaja erilist hooldust ega perioodilist asendamist, kuid tema puuduseks on osooni tekitamine, mille kogus pole küll suur, kuid seda peab kindlasti meeles pidama.

Bipolaarne ionisatsioon

See tehnoloogia on põhimõtte poolest sarnane tavaliseleioonfiltrile, erinevus on vaid selles, et seade saab tekitada nii negatiivselt kui ka positiivselt laetud osakesi. Tegemist on suhteliselt uue tehnoloogiaga ning tootjad väidavad, et see süsteem aitab eemaldada õhust peale muude saasteainete ka COVID-19 põhjustava viiruse.

Bipolaarne ionisaator simuleerib looduslikke protsesse, ehk toodab nii positiivseid kui ka negatiivseid ioone, sest tegelikult looduses ei ole kunagi unipolaarset ionisatsiooni. Läbi selle ei suurene elektrostaatiline taust ja õhukvaliteet on koostise ja omaduste poolest sarnane looduslikule.

Vaatamata eelnimetatud eelistele, on bipolaarsel ionisatsioonil olemas ka miinused. Esimene on see, et ioone ei toodeta üheaegselt, vaid osadena, ehk algul tuleb negatiivselt laetud ioone ja seejärel, mingi aja möödudes, positiivseid. See tekitab omamoodi pilved, mis koosnevad ühte tüüpi ionidest ning ei segune omavahel piisavalt. Seepärast on oluline tagada hea õhuringlus.

Kuigi tehnoloogiat pole veel piisavalt palju uuritud, on juba tehtud kindlaks, et seade võib tekitada siseruumides osooni ja muid potentsiaalselt ohtlikke kõrvalsaadusi [53].

2.2.6 Viimased tehnoloogiad

Katehiin õhufilter

Katehiin on looduslik aine, mida leidub roheline tee lehtedes ning omab antibakteriaalset toimet ning seda on juba ammustest aegadest kasutatud traditsioonilises meditsiinis. Katehiin rakendatakse filtri pinnale ning see takistab bakterite ja viiruste paljunemist. Lisaks antiseptilisele toimele suudab katehiin eemaldada õhust ka ebameeldivad lõhnad ja allergeenid.

Kuna tegemist on üsna uue tehnoloogiaga ning vaid üksikud tootjad pakuvad sellist filtrit oma süsteemides, siis selle hind on üsna kallis. Samas maailm pürgib keskkonnasõbralike tehnoloogiate poole ning loodusliku aine kasutamine õhu puhastamises võib olla küllaltki lootustandev. [54]

SOP-filter

SOP ehk solid oxygen-purifying filtreid kasutatakse peamiselt näomaskides ja ventilatsioonisüsteemides ning nad aitavad piirata õhus levivate mikroorganismide levikut. Selle filtri üks erinevustest teistest on see, et ta on võimeline ennast desinfitseerima.

SOP-filter on rikastatud tahke hapnikuga, mis suudab inaktiveerida bakteriofaagid. Protsessi üheks kõrvalproduktiks on vesinikperoksiid (H_2O_2), mis on ebastabiilne ühend ja võib kergelt laguneda radikaalideks, mis blokeerivad või hävitavad bakterid ja viirused. [55; 1]

Polüakrüülnitriilfilter

Polüakrüülnitriil on oma omadustelt kõva materjal, mis on vastupidav enamustele kemikaalidele. Sellest materjalist filtri tööpõhimõte seisneb adhesioonis ning on võimeline eraldama õhust kuni PM_{2,5} osakesed.

Polüakrüülnitriilist membraanfilter kujutab endast ette läbipaistvat kilet, mille saab paigaldada näiteks aknale. See ei takista loomuliku valguse sisenemist ruumi, on kerge, omab suhteliselt väikest õhuvoolutakistust, kuid kõrged filtreerimistõhusust. PM_{2,5} osakeste puhul on võimalik saavutada kuni 95%-lise efektiivsuse. [56; 1]

2.2.7 Filtrite kasutamisega seotud puudused

Üks suur probleem mehaaniliste filtrite kasutamisel on kasutuskõlbmatute ja saastunud filtrite utiliseerimine. Kuna filtrid on puhastunud õhku kõiksugu võimalikest saasteainetest, siis nad ise klassifitseeruvad ohtliku jäätmega alla, teatud korral isegi nakkusohtlike jäätmega hulka. Kui antud jääde ei ole nõuetekohaselt kõrvaldatud, siis võib see kahjustada keskkonda ja levitada ohtlikud jäätmega laiali.

Filtri pinnale kogunevad orgaanilised ja anorgaanilised osakesed, nagu bakterid, põlemisaadused, tolm jm. Samuti adsorbeerib see ka lenduvaid ja vähelenduvaid orgaanilisi ühendeid. Kõik need saasteained võivad suunduda tagasi õhku ning halvendada õhu kvaliteeti ja seepärast on oluline õigeaegne filtri vahetus. Lisaks sellele võivad filtri pinnal olevad osakesed omavahel reageerida, mis on samuti üks ohuteguritest ja mis teeb kasutatud filtri ohtlikuks jäätmeks. Oluline on muidugi arvestada sellega, kus antud õhupuhasti töötab ja mis saasteaineid kogus.

Enne jäätmega üleandmist tuleks tagada nende nõuetekohane kogumine ja säilitamine. Kõige mugavam on koguda metallist tünnesse või spetsiaalsetesse konteineritesse. Vale ladustamine võib tuua kaasa keskkonna saastumise ning inimeste tervise ja looduse kahjustamise. Kui kogumistaara on täis, tuleb see viia ohtlike jäätmega käitluskeskusesse, kus ettevõtte utiliseerib nad vastavalt keskkonnanõuetele. Kõige enam kasutatud utiliseerimisviis Eestis taoliste jäätmega puhul on purustamine ja seejärel jäätmekütuse valmistamine. Kui tegemist on näiteks meditsiinasutuses või biolaboris tekkinud õhupuhastite filtritega, siis nad võib klassifitseerida nakkusohtlike jäätmega alla ning nende utiliseerimine toimub põletusahjus. Sellisel moel on kõik mikroorganismid hävitatud ning ei satu tagasi ümbritsevasse keskkonda.

2.3 Osoon

Tegemist on anorgaanilise molekuliga, mis koosneb kolmest hapniku aatomist. Osoon tekib troposfääris fotokeemilistel reaktsioonidel ning sellel on oluline osa Maa atmosfääris. Nimelt kaitseb see Maad UV-kiirguse eest neelates kogu loodusliku UV-C kiirguse ning ka osa UV-B kiirgusest. Oma olemuselt on osoon ebastabiilne ning reageerides teiste ainetega kaotab ta hapniku aatomeid ja laguneb stabiilsesse olekusse. Vabad hapniku aatomid või radikaalid on väga reaktsioonivõimelised ja see omadus teeb ta väga võimsaks oksüdeerijaks.

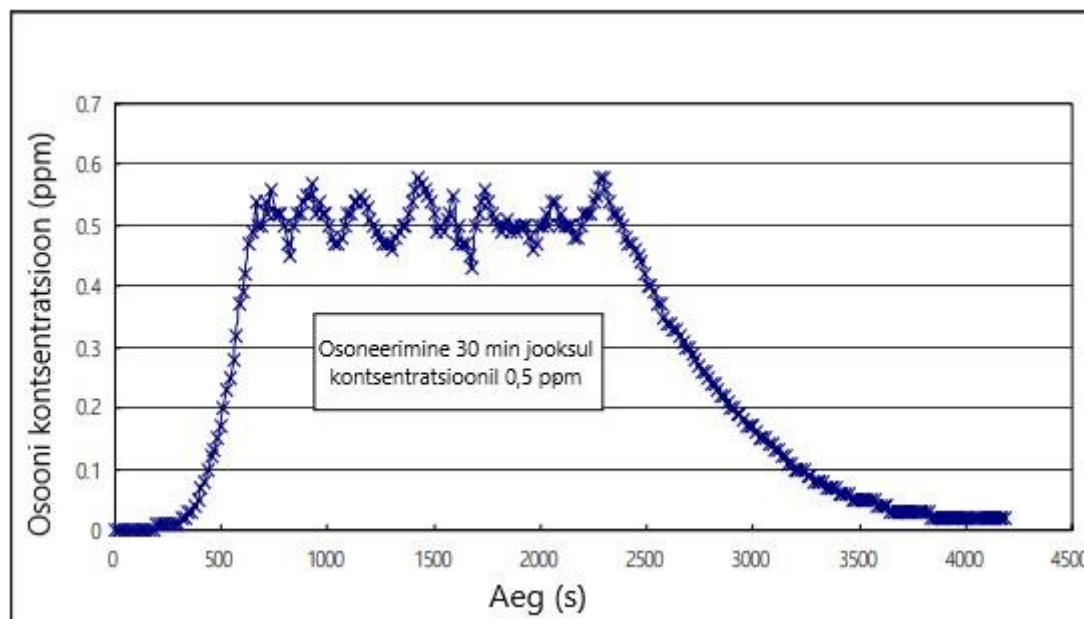
Õhu osoneerimine on keskkonnasäästlik ruumi õhu puhastusmeetod, kus on kasutusel gaasiline osoon. Osoon reageerib suure hulga orgaaniliste ühenditega ja see seletab tema bakteritsiidset toimet. Ta reageerib aktiivselt kõigi raku struktuuridega põhjustades rakumembraani kahjustumist või hävimist. Peale viiruste ja bakterite suudab osoon eemaldada ka hallitused, ebameeldivad lõhnad ning putukad [57].

Osoon hävitab kõik tuntud patogeensed mikroorganismid tänu sellele, et osoonimolekulid ühinevad saasteainega ning hävitavad selle. Protsessi käigus laguneb ka osoon ise muutudes tavaliseks hapnikuks ning mitte tekitades sekundaarseid jäätmeid, mis teeb sellise õhupuhastusmeetodi keskkonnasõbralikuks. Peale osoneerimist jääb ruumi värske lõhn ning pinnad ei vaja lisakoristust. See on tingitud sellest, et tegemist on gaasiga, mis, erinevalt UV-kiirgusest ja filtritest, on väga hea läbitungevõimega ning tänu sellele desinfitseerib nii õhu kui ka kõik ruumis olevad pinnad ja esemed. Ta on ka palju tugevam oksüdeerija kui muud levinud desinfektsioonivahendid, sellised nagu kloor või hüpoklorit, ning viimasel ajal, seoses SARS-CoV-2 levikuga, on osoon olnud tõhus vahend ruumide õhu steriliseerimises.

Osoneerimise protsess peab kindlasti toimuma inimestest ja loomadest vabas ruumis ning aknad, ukSED peavad olema suletud. Tänu sellele, et osoon on ebastabiilne ning laguneb kiiresti hapnikuks, pole seda võimalik transportida ning peab tootma kohas, kus on plaanitud kasutada. Sõltuvalt ruumi suuruselt valitakse sobiv osoonigeneraator ja seadistakse vajalik välja lastava osooni kogus. Enamus seadmeid suudab säilitada kõrget osooni kontsentratsiooni (tavaliselt vahemikus 0,5-5 ppm) ruumis nõutava aja jooksul. Lisaks osoonigeneraatorile on protsessis tihtipeale kasutusel ka ventilaator, mis aitab osooni ruumis kiiremini levitada. Tavaliselt kestab osoneerimine 30 minuti jooksul, sellest ajast piisab, et ruumis olev õhk ja kõik esemed desinfitseeritud saaks. Pärast osoonigeneraatori väljalülitamist hakkab osoon hapnikuks lagunema osoonitase langema läbi selle lagunemise hapnikuks. See võtab tavaliselt 60 minutit aega ning alles peale seda saavad inimesed ruumi siseneda [58].

Joonisel 10 on näha, et osooni kontsentratsioon kasvab esimestel minutitel väga aeglaselt. See on arvatavasti tingitud sellest, et algul kulub seda rohkem saasteainete oksüdeerimisele ning siis, kui suurem osa nendest on oksüdeerunud, hakkab kontsentratsioon kasvama kiiremini ning jõuab seadistatud suuruseni. Seejärel hoiab generaator poole tunni jooksul

osooni sisaldust õhus soovitud tasemel ning kui see välja lülitatakse hakkab kontsentratsioon aeglaselt järk-järgult langema.



Joonis 10 Osoneerimine 0,5 ppm juures 30 min jooksul [58]

Samas uuringus vaadeldi ka osooni abil desinfitseerimise efektiivsust erinevatel osooni kontsentratsioonidel. Tulemused on näidatud tabelis 4. On näha, et osoon saab desinfitseerimisega hästi hakkama ning kõige parem tulemus oli kontsentratsiooni 2,5 ppm puhul kus algne kogus 612 CFU/m³ (colony-forming unit ehk pesa moodustav ühik, PMÜ) langes 93,10% võrra ehk kuni 42 CFU/m³. Tabelist on näha, et edaspidine kontsentratsiooni suurendamine ei andnud tulemust seega ohutuse tagamiseks on mõttekam vältida liiga suuri kontsentratsioone. Optimaalseks osutus 0,5-2,5 ppm, mis on piisav ruumi desinfitseerimise jaoks [58].

Tabel 4 Bakterite koguse vähenemine osoneerimise tagajärjel [58]

| Osooni konts. | 0,5 ppm | 2,5 ppm | 5 ppm |
|----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| <i>Enne osoneerimist</i> | 592 CFU/m ³ | 612 CFU/m ³ | 552 CFU/m ³ |
| <i>Pärast osoneerimist</i> | 169 CFU/m ³ | 42 CFU/m ³ | 57 CFU/m ³ |
| <i>Languse %</i> | 71,50% | 93,10% | 89,60% |

Koroonapandeemia ajal on murettekitavaks küsimuseks olnud suure koguse jäätmete tekkimine isikukaitsevahendite näol. 2020 aastal uuriti Gran Canaria ülikooli haiglas osooni abil maskide ja muude isikukaitsevahendite desinfitseerimist [59]. Katsetati erinevaid kontsentratsioone erinevatel kokkupuuteaegadel ning vaadati, kas suhteline õhuniiskus mõjutab osooni mõju SARS-CoV-2-le.

Osoon suutis edukalt hävitada isikukaitsevahenditel oleva viiruse, mis annab võimaluse nende taaskasutuseks ja vähendab COVID levikut haiglates. Kuna uuringuid pole tehtud veel

piisavalt, siis antud meetodit pole võimalik hakata massiliselt kasutama, kuid tulemused olid küllalt lootustandvad.

Vaatamata eelnimetatud eelistele, kuulub osoon ikkagi esimesse ohuklassi ja kasutamisel nõuab eriti suurt tähelepanu. Osoonil on mürgine gaas ja seetõttu ei tohi lekkida ruumides, kus on inimesi, sest peale osooni iseenda ohtlikkuse võivad selle mõju all tekkida ka muud ohtlikud ained. Lisaks sellele, tänu suurele keemilisele aktiivsusele, on osoonil ka tugev söövitav toime struktuurmaterjalide vastu.

Osooneerimise puudused:

- Kahjulike keemiliste mõjude oht ruumis viibijatele
- Kõrgendatud ohutusnõuded osooni kasutamisel
- Lekkimise oht riknenud või ebaefektiivsete ventilatsioonisüsteemide puhul
- Söövitav toime metallpindadele
- Osooneerimine peab olema etteplaneeritud

Nagu enne oli juba mainitud, on osoon inimese jaoks mürgine. Töötervishoiu ja tööohutuseasenduse poolt on sätestatud töökeskkonna keemiliste ohutegurite piirnormid, kus osoonil on see väärtus võrdne 0,1 ppm (keemilise aine keskmine sisaldus sissehingatavas õhus tööpäeva või töönädala jooksul) ning lühiajaliseks piirnormiks on sätestatud kogus 0,3 ppm (keemilise aine maksimaalne lubatud keskmine sisaldus sissehingatavas õhus 15 minuti jooksul) [60]. Väikeste koguste sissehingamisel võib tekkida valu rinnus, köha, õhupuudus ja kurguärritus. Suuremates kogustes kahjustab see kopsu ning võib tekitada kroonilisi haiguseid, näiteks astmat. Lisaks eelnimetatud terviseprobleemidele võib liigne osoon vähendada immuunsust, võib põhjustada viljatuse teket meestel ning provotseerida kantserogeenseid ja mutogeenseid protsesse. Inimese jaoks ohutu osooni kontsentratsioon õhus on 0 kuni 0,059 ppm [61].

3 Optimaalse õhupuhasti valik

Maailmas toimuv koroonapandeemia pani inimesed veel rohkem mõtlema ruumide sisese õhu puhtuse peale ning selle desinfitseerimise meetoditele. Kindlasti peab pöörama tähelepanu ventilatsioonisüsteemidele ning regulaarsele ruumi tuulutamisele, kuid abiks võivad olla ka õhupuhastid. Nad võivad olla kas mobiilsed, seintele paigaldatavad või filter võib olla integreeritud olemasoleva ventilatsioonisüsteemi sisse.

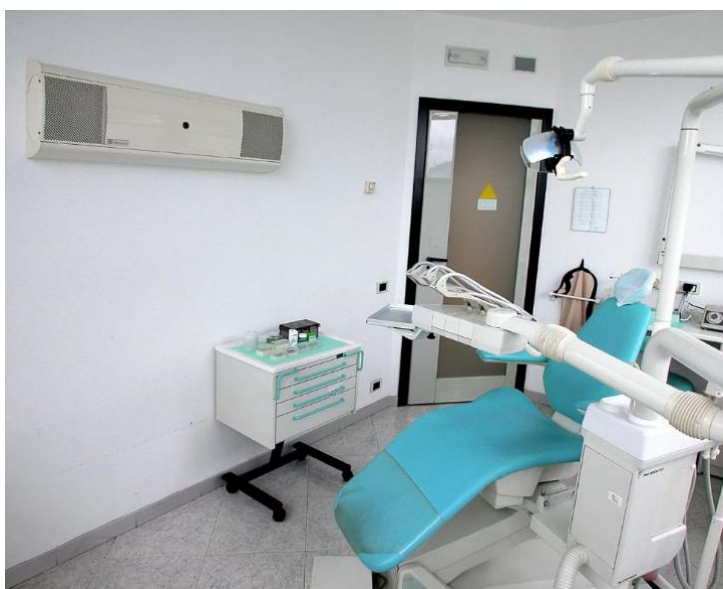
Desinfitseerimise eesmärgil tuleb valida õhupuhasti, mis sobib viiruste, bakterite ja muude mikroorganismide eemaldamiseks. Tabelis 5 on toodud välja kõige efektiivsemad meetodid ning nende põhilised omadused.

Tabel 5 Õhu desinfitseerimise meetodite võrdlus

| Filteri tüüp | Omadused | Kasutusala | Mille vastu efektiivne | Lisainformatsioon |
|---------------------------------|---|--|---|--|
| HEPA filter | Mehaaniline filter, mille kiudmaterjal eemaldab kuni 99% teda läbivatest osakestest | Kasutada saab nii meditsiiniuasutustes kui ka muudes avalikes ruumides inimeste juuresolekul | Kõik osakesed, mille suurus on kuni 0,3 µ | Vajab kas regulaarset filteri vahetust, mis võib olla kulukas, või eelfiltrit |
| Fotokatalüütiline filter | Kasutusel on metalloksiidi pooljuht, mis omab kõrget fotokatalüütilist aktiivsust | Lubatud kasutada ka inimeste juuresolekul | Eemaldab kõik mikroorganismid ja lõhnad | Ei tekita sekundaarseid jäätmeid, sest lagundab saasteained veeks ja CO ₂ -ks |
| UV-kiirgus | Hävitab mikroorganismid tänu tekkivale lainepikkusele 205-315 nm | Olenevalt seadmest võib tekitada osooni, seega pole lubatud inimeste juuresolekul | Ei eemalda lõhnu ega seeni | Avatud tüüpi kiiritaja ohtlik inimeste tervisele |
| Osoon | Tugev oksüdeerija, mis lagundab kõik patogeensed mikroorganismid | Puhastab nii õhu kui ka pinnad, kuid inimestel on keelatud samal ajal ruumis viibida | Eemaldab kõik saasteained | Mürgine gaas ning vajab kõrgemaid ohutusnõudeid kasutamise ajal |
| Ioniseerimine | Töötab tänu plaatide poolt tekitatavale elektrilaengule | Lubatud kasutada ka inimeste juuresolekul | Pole efektiivne lõhnade vastu | Sadestab tolmu pindadele, mis tähendab märgpuhastuse vajadust |

Tabelist on näha, et igal meetodil on oma eelised ja puudused ning valik sõltub võimalustest ja püstitatud eesmärkidest. Optimaalne seade oleks selline, mis ühendab endas mitu erinevat meetodit ning tänu sellele võitleb eri tüüpi saasteainetega.

Juhul, kui tegu on meditsiinasutusega, siis oleks kindlasti oleks mõistlik kasutada mehaanilisi filtreid ventilatsioonisüsteemis ning ruumides paigutada suletud süsteemiga UV-kiiritajad. Nad on võimelised töötama ööpäevaringselt ning saab kasutada ka inimeste juuresolekul. Lisaks sellele on nad väga levinud ning hinnad ei kerki liiga kõrgele. UV-kiirgust desinfitseerimisvahendina kasutades peab aga arvestama sellega, et avatud tüüpi kiiritajad puhastavad vaid teatud raadiuses olevat õhku ning parema tulemuse saamiseks tuleb kasutada õhu liikumine või soetada puhur-tüüpi seade.



Joonis 11 Puhur-tüüpi UV lambiga seade [31]

Joonisel 11 on juba eelnevalt mainitud UV-lambiga õhu retsirkulaator ning hinnad algavad alates 599€ [31]. Hind sõltub õhu puhastamise võimsusest. Antud seade omab ühte 40W pirni ning õhuvool on 70 m³/h. Kiirituspinnaks on märgitud 18 m² (kiiritusmaht 45 m³), seega ühe väiksema kabineti õhu desinfitseerimiseks oleks sellest seadmest piisav. Kallimad mudelid omasid suuremat pirnide arvu tänu millele kasvas ka nende kiirituspind. Uuritud ettevõtte kõige kallim taoline

eksemplar maksab 1160€ ning omab kahte 95W, kiirituspind on 40 m² ning õhuvool 150 m³/h. Peale suletud kiiritajate on müügis ka avatud süsteemiga UV-kiiritajad, mida ei ole lubatud kasutada inimeste juuresolekul. Tegemist pole kõige odavama pakkumisega, kuid müüja esindab Itaalia UV seadmete tootjat Light Progress ning omab Rahvusvahelist Ultravioletühingu parima garantiid ning mitmeid sertifikaate ning omab kõige laiemat tootevalikut, seepärast tundub usaldusväärse valikuna. Taolisi seadmeid, kuid ilma sertifikaatideta, on müügil ka mujal ning kõige odavam mudel maksab 260€ [62]. See sisaldab endas 2*15W pirni, ning tootja sõnul on seadme õhuvool 190 m³/h ning peaks sobima kuni 30 m² ruumi.

Vaatlesin ka variante, mida saaks kasutada näiteks kodus või kabinetis ning juhul, kui otsitakse odavamat mobiilset seadet, siis peab leppima avatud UV-lambiga, mida tohib tööle panna siis, kui ruumis ei viibi inimesi. Hinnaklass on väga erinev, alates 20€ ja kuni lõpmatuseni. Siin tuleb aga arvestada sellega, et odav ja väike lamp ei ole võimeline

ruumiõhku piisavalt puhastama, vaid hävitab ainult tema enda ümbruses olevad mikroorganismid ning suurt kasu sellest ilmselt ei ole.

Fotokatalüütiline filter, mis koosneb mitmest õhu puhastamise meetodist korraga, oleks muidugi väga tõhus vahend mikroorganismide hävitamises ning muude saasteainete eemaldamises. Kuna tegemist on natuke uuema süsteemiga kui UV-kiirgus, siis fotokatalüsaatorid pole veel meditsiinasutustes laialdaselt levinud. Ilmselt on mõjutavaks faktoriks ka nende hinnad. Ühe odavama mudeli hind varieerub 207-295€ piires (Clean Air optima CA-508, Holland; joonis 12). Tootja sõnul sobib 80 m² suurusesse ruumi, ning omab oma süsteemis eel-, aktiivsöe-, HEPA ja fotokatalüütilist filtrit ning UV-lampi [63]. Selline seade sobib nii avalikesse kohtadesse kui ka erakodudesse.

Muidugi leidub ka kallimaid ja suuremaid seadmeid, üks nendest on SNE RAS-60 fotokatalüütiline õhupuhastaja (joonis 13), mille hind on ca 978€ [64]. Seade sobib seinale kinnitamiseks ning saab kasutada igat tüüpi ruumides. Seade omab vaid eelfiltrit, UV-lampi ning fotokatalüütilist plaati ning lubatakse kasutada samuti kuni 80 m² suurustes ruumides. Peale kõrge seadme hinna on antud seadmel ka üsna kallis vahetuselement – UV/fotokatalüütiline rakk. Selle eluiga on umbes 1 aasta ning uue ostmise läheb maksma 339-499€ [64]. Sellise seadme kasutamine oleks küllalt kulukas suure ettevõtte või haigla õhu puhastamiseks kuna igasse ruumi peaks paigutama eraldi õhupuhasti ning suurtes hoonetes võib neid ruume olla ikka päris palju. Seetõttu oleks mõistlik valida kas odavam, kuid efektiivne mudel või siis UV-kiirgaja ja kombineerida neid mõne mehaanilise filtriga.



Joonis 12 Õhupuhastaja Clean Air CA-508 [63]



Joonis 13 SNE RAS-60 fotokatalüütiline õhupuhasti [64]

Kuna osoneerimine on samuti väga tõhus vahend õhu desinfitseerimiseks, siis vaatlesin ka neid seadmeid. Esiteks uurisin pigem tööstuslikke osooni generaatoreid ning nende hinnad varieeruvad 319-889€ vahel ning peamine erinevus seisneb osooni tootmise koguses. Kõige odavam mudel toodab vaid 200 mg/h ning sobib pigem autosalongi puhastamiseks.

Suuremate masinate tootlikkus on juba märgatavalt suurem – 1200-1600 mg/h ning sellest piisaks kuni 1000 m³ ruumi õhu desinfitseerimiseks (joonis 14) [64]. Selline osoonigeneraator ilmselt ei sobiks isiklikuks kasutamiseks ning kodude jaoks on müügis kompaksemad seadmed, mis, tihtipeale, genereerivad peale osooni ka ioone. Taolisi seadmeid on väga erinevas hinnaklassis ning paljude odavamate vaadeldud toodete puhul tekib paraku kahtlus nende efektiivsuses. Tootjad lubavad neid kasutada ka ruumis viibimise ajal, mis tähendab, et osooni kogus on niivõrd väike, et vaevalt suudab see õhku piisavalt puhastada ning inaktiveerida kõik viirused.



Joonis 14 Osooni generaator ProAir CBT-6 [75]

Osoon suudab küll hävitada suure osa ruumis olevaid saasteaineid nii õhust kui ka pindadelt ning ei tekita sekundaarseid jäätmeid, kuid gaasi mürgisuse tõttu peab selle kasutamist oskama ette planeerida ning andma aega osooni kontsentratsiooni langemiseks. Sellel põhjusel ei ole mõistlik seda kasutada igapäevase vahendina ning vajaduse korral saab kas rentida osooni generaator või kasutada osoneerimisteenust. Tallinnas pakub sellist võimalust päris mitu ettevõtet ning 35 m² suuruse ruumi desinfitseerimine maksab 50€ piires [65]. Samuti on populaarne autosalongide osooniga puhastamine, hinnad algavad 20€-st. Generaatori rent maksab alates 15€/24h. [66]

Efektiivne õhupuhastusmeetod on ka HEPA filter, mis hoiab kinni kuni 0,3 µ suurused tolmuosakesed ning teatud õhus lendlevad mikroorganismid. Samas osad viirused, bakterid ja LOÜ´d on sellest väiksemad ning ainuüksi HEPA filtrist ei piisa kui eesmärk on luua täiesti steriilne õhkkond või puhastada nakkushaiguseid sisaldavaid haiglaruumi õhk, tavaelus aga on sellisest filtrist väga palju kasu. Selle abil saab inimestel vähendada astma ja allergia sümptomeid ning langetada üldist tolmu kogust. Õnneks on HEPA filtrid nüüdseks juba väga levinud ja neid kasutatakse tolmuimejates, ventilatsioonisüsteemides, õhupuhastites jm. Efektiivsuse tagamiseks tuleb filtrit vahetada vähemalt nii tihti kui tootja soovitab.

Väga heaks lahenduseks oleks HEPA filtriga varustatud õhupuhasti, mis on sisaldab endas ka eelfiltrit, mõnda adsorbeerivat filtrit ning UV-lampi. Selline mitmest meetodist kombineeritud seade võitleb erinevate saasteainetega ning teeb ruumi õhu võimalikult puhtaks.

3.1 Õhupuhasti valik vastavalt probleemile

Eelnevates peatükkides sai nimetatud mitmeid õhupuhastussüsteeme ning selgus, et peale õhu desinfitseerimise saavad seadmed hakkama ka muude saasteainetega ning võiks kasulik olla nii avalikus kohas kui ka eluruumis. Igaüks neist on omamoodi efektiivne ning valik sõltub vajadustest, seega tavakasutaja peab algul otsustama, mis probleemid peab seade lahendama ja millised saasteained tekitavad kõige rohkem muret.

Probleem: nakkustekitajad õhus

1. Üks efektiivsemaid valikuid on UV-kiirgus. Selle abil saab hävitada õhus leiduvad mikroorganismid ning seadmete valik on üpris suur
2. Fotokatalüüs saab samuti probleemiga hakkama ning eeliseks on see, et desinfitseerimise käigus lagunevad ka lenduvad orgaanilised ained
3. Osoon on hea läbitungevõimega ja tugevate oksüdeerivate omadustega gaas. Selle abil saab steriliseerida nii õhku kui ka pindasid. Oluline on meeles pidada, et osoon on mürgine ning ohtlik tervisele

Probleem: suur tolmukogus

1. Parim valik oleks õhupuhasti HEPA filtriga. Seade eemaldab kõik tolmuosakesed ja allergeenid ning lisaks ka bakterid ja muud mikroorganismid. Hooldamine ei peaks ka raskusi tekitama – tuleb vaid regulaarselt tolmuimejaga puhastada ning teatud aja vältel teostada filtri vahetus
2. Plasma süsteemiga elektrostaatiline filter saab samuti probleemiga hakkama, kuid ei ole kõige tõhusam vahend allergikute jaoks, sest ei pruugi eemaldada kõiki mikroorganisme õhust. Filtrit on lihtne hooldada, piisab regulaarsest veega loputamisest.
3. Ioonfilter oleks ka tõhusaks variandiks tolmu eemaldamiseks õhust. Peamiseks miinuseks on see, et ionisaator soodustab tolmu sadestumist pindadele, mis tähendab, et ruumis peab teostama märgpuhastust. Vastasel juhul tõuseb sadestunud tolm tagasi õhku.

Probleem: allergilised reaktsioonid

1. Siin on samuti parimaks valikuks HEPA filter, mille efektiivsus on 99%.
2. Fotokatalüütiline filter on küll kallim seade, kuid tänu UV-kiirgusele desinfitseerib õhku ning lagundab õhus olevad saasteained ja mikroorganismid. Koostöös muu filtriga, näiteks HEPA filter, puhastaks seade õhu peaaegu kõikidest saasteainetest ja mikroorganismides.
3. Kolmas tõhus õhupuhasti antud olukorras oleks osonaator. Tema, nagu eelminegi seade, lagundab kõik mikroorganismid nii õhust kui ka pindadelt tänu oma oksüdeerivale toimele. Peamine puudus on see, et osoonigeneraatori töö ajal ja peale selle välja lülitamist ei tohi inimesed ruumis viibida.

Probleem: ebameeldivad lõhnad (näiteks tubakalõhn)

1. Lõhnadega saab kõige paremini hakkama fotokatalüütiline filter, sest on võimeline lagundama keemilisi ühendeid.
2. Osooni kasutamine oleks samuti hea lahendus lõhnade eemaldamiseks.
3. Lõhnade eemaldamises oleks efektiivne ka aktiivsöefilter. Tal on tugev adsorbeeriv toime, mis aitab ka muude lenduvate orgaaniliste ühendite vastu. Puuduseks, võrreldes teistega, võib nimetada üsna madala õhu läbilaskevõime.

Kokkuvõte

Siseõhk sisaldab palju erinevaid saastained, mille hulgas on ka mikroorganismid. Suur osa neist levib läbi isikliku kontakti ehk piisknakkusena ja nende kiire levik võib olla väga ohtlik inimeste tervise jaoks. Osad neist võivad tuua esile kergemad sümptomid, nagu näiteks nina ja kurgu ärritus, teised aga võivad põhjustada ülemaailmse epideemia.

Kõige rohkem baktereid ja muid mikroorganisme leidub tihedalt rahvastatud kohtades, näiteks bussi- ja raudteejaamad, haiglad, koolid jm, kuid see ei tähenda, et nad puuduvad kontoriruumi õhus või kodus. Selleks, et vähendada bioloogiliste saasteainete levikut, tuleb regulaarselt õhutada ruume ning tagada regulaarne hooldus oma ventilatsioonisüsteemile. Nendest meetmest paraku ei piisa, et hävitada õhus olevad mikroorganismid ja seetõttu kasutatakse lisameetmeid.

Oma töös vaatlesin erinevaid õhu saastajaid ning nende eemaldamise meetodeid. Põhirõhk oli õhu desinfitseerimise tehnoloogiatel ja nende töö põhimõtetel. Esimesena uurisin lähemalt UV-kiirgust ja selle antibakteriaalset efekti, mille käigus sai võrrelda erinevaid kiiritajaid ja nende kasutusalasid. Avatud UV desinfitseerimiseseadmete kasutamisel tuleb arvestada sellega, et neid on keelatud kasutada inimeste juuresolekul, kuna tegemist on lahtise UV-kiirgusega, mis võib põhjustada tervisehäireid. Alternatiiviks on suletud süsteemiga seadmed, mis töötavad tänu õhu retsirkuleerimisele selle sees ning on inimeste jaoks ohutud, kuid omavad ka puudust võrreldes avatud seadmetega – nad ei desinfitseeri pindasid.

Peale UV-kiiritajate on kasutusel ka mehaanilised filtrid. Eelfiltrid, aktiivsöe filtrid, elektrostaatilisid filtrid ja ka HEPA filtrid ei kõlba desinfitseerimiseks, sest ei suuda hävitada kõiki filtrisse sattuvaid mikroorganisme. Küll aga on nad väga efektiivsed kombinatsioonis teiste meetoditega. Nii on näiteks fotokatalüütilise filtriga varustatud õhupuhastis peale UV-lambi ka näiteks HEPA filter ning koostöös suudavad nad lahendada mitu probleemi. Fotokatalüüs on väga tõhus meetod desinfitseerimiseks, mis lagundab ka orgaanilised õhu saastained süsihappegaasiks ja veeks.

Kolmas efektiivne steriliseeriva toimega tehnoloogia on osoonimine. Osooni puhul on tegemist gaasiga, mis omab head läbitungevõimet, siis suudab see hävitada kõik tuntud patogeensed mikroorganismid nii õhust kui ka pindadelt. Sarnaselt fotokatalüüsiga, ei tekita osoneerimine sekundaarseid jäätmeid, mis teeb meetodi üsna keskkonnasõbralikuks. Osooni kasutades peab aga arvestama sellega, et tegemist on mürgise gaasiga ning kasutusel tuleb järgida ohutusnõudeid. Inimestel on lubatud osooniga töödeldud ruumi siseneda vaid siis, kui gaasi kontsentratsioon on langenud.

Tehnoloogiate uurimise tagajärjel selgus, et desinfitseerivateks vahenditeks sobivad kõige paremini UV-kiirgus, fotokatalüüs ning osoon. Ülejäänud filtrid on efektiivsed vahendid muude saasteainete eemaldamiseks ning õhu puhtana hoidmiseks.

Summary

Indoor air contains a wide variety of pollutants, including microorganisms. Many of them spread through personal contact, or as a droplet infection. The rapid spreading of such microorganisms can be harmful for a human being. Some of them may cause milder symptoms, such as throat and nose irritation, while other may cause a global pandemic.

The most common places for the bacteria and other microorganisms are crowded areas, such as bus and train stations, hospitals, schools and etc, but this does not mean that they are absent from the office space or at home. To reduce spread of biological contaminants, an indoor environment should be ventilated regularly, and regular maintenance of their ventilation system must be ensured. Unfortunately, these measures cannot guarantee the full deliverance from harmful microorganisms, therefore additional measures are required.

The main topic of present study is about air pollutants and ways of their removal methods. It is mainly focused on air disinfection technologies and their working principles. An overview of ultraviolet radiation and its antibacterial properties is carried out. During this research I compared different irradiators and their application. It should be taken into account, that the application of direct ultraviolet radiation close to people is not allowed because it may cause different health issues. An alternative is equipment with a closed system, which works due to the air recirculation inside it. In comparison with open system, it is safe for people, however, cannot disinfect any surfaces.

Along with UV irradiators, mechanical filters are also in use. Pre-filters, activated carbon filters, ionic filters and also HEPA filters are not suitable for disinfection purposes because they cannot destroy all microorganisms getting through a filter system. However, they are very effective in combination with other filtration methods. For example, an air purifier equipped with a photocatalytic filter can have a HEPA filter in addition to a UV. This combination is efficient for multi purposes. Photocatalysis is the effective disinfection tool which additionally degrade organic air pollutants into carbon dioxide and water.

The ozone is the third effective sterilant. As a gas with good permeability, it can destroy all known pathogenic microorganisms both from surfaces and from the air. Like photocatalysis, this method does not produce any secondary wastes, which makes the method quite environmentally friendly. However, anyone using ozone must be aware that this is toxic gas and all necessary safety measures must be followed. People can enter an ozone-treated room only after the gas concentration has been reduced.

During this research of the technologies, it was found that UV radiation, photocatalysis and ozone are the most suitable disinfectants. Mechanical filters and adsorbents are effective for removing other contamination and keeping the air clean.

Kasutatud allikad

1. Agarwal, N., Meena, C.S., Raj, B.P jt. Indoor air quality improvement in COVID-19 pandemic: Review. – Sustainable Cities and Society, 2021, 07 (70) [e-ajakiri] (16.3.2021) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670721002274>
2. Indoor air pollution: new EU research reveals higher risks than previously thought. [WWW] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_03_1278 (16.03.2021)
3. Indoor Air Facts No. 4. Sick Building Syndrome [online] https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-08/documents/sick_building_factsheet.pdf (18.03.2021)
4. Morabet, R.E. Effects of Outdoor Air Pollution on Human Health – Earth Systems and Environmental Sciences, 2018, 07 [e-ajakiri] <https://www.sciencedirect.com/topics/immunology-and-microbiology/particulate-matter> (18.03.2021)
5. Какие основные загрязнители воздуха внутри помещений [WWW] <https://vencon.ua/articles/kakovy-istochniki-zagryazneniya-vozduha-v-pomeshchenii> (18.03.2021)
6. Allergy and Allergic Diseases, Kay A.B., Bousquet J., Holt P.G, Kaplan A.P, 2008, 07 (1) lk. 1282 (18.03.2021)
7. 12. WHO. WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. 2010 [online] https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf (26.03.2021)
8. А.С.Голик, А.Ф.Син, Влияние углекислого газа на дыхание в изолирующих средствах индивидуальной защиты. – Горная Промышленность, №3 2006 [e-ajakiri] <https://mining-media.ru/ru/article/prombez/1101-vliyanie-uglekislogo-gaza-na-dykhaniye-v-izoliruyushchikh-sredstvakh-individualnoj-zashchity> (26.03.2021)
9. Tervisekaitsenõuded koolieelse lasteasutuse maa-alale, hoonetele, ruumidele, sisustusele, sisekliimale ja korrashoiule, Vabariigi Valitsuse määrus nr 131, RT I 11.10.2011 (26.03.2021)
10. T. Greiner, Carbon Monoxide Poisoning: Health Effects (AEN-166), Iowa State University, 1996 <https://www.abe.iastate.edu/extension-and-outreach/carbon-monoxide-poisoning-health-effects-aen-166/> (26.03.2021)
11. Health effects of SO₂, NO_x and coal dust, [WWW] <https://www.envirojustice.org.au/our-work/community/air-pollution/health-effects-of-so2-and-nox/> (26.03.2021)
12. Franchi M, Carrer P, Kotzias D, et al. Towards healthy air in dwellings in Europe. The THADE Report. 2006 https://ec.europa.eu/health/ph_projects/2001/pollution/fp_pollution_2001_frep_02.pdf (26.03.2021)

13. Biological Pollutants' Impact on Indoor Air Quality, United States Environmental Protection Agency [online] <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/biological-pollutants-impact-indoor-air-quality> (26.03.2021)
14. Haleem Khan A.A., Mohan S., Fungal pollution of indoor environments and its management – Saudi Journal of Biological Sciences, 2012, 10 (19) [e-ajakiri] Karuppayil <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319562X1200040X> (26.03.2021)
15. Maroni M, Seifert B, Lindvall T and (eds). Indoor Air Quality. A comprehensive reference book. Elsevier; 1995. [online] (26.03.2021)
16. M. Franchi, P. Carrer, D. Kotzias, Towards healthy air in dwellings in Europe. The THADE Report. 2006. https://ec.europa.eu/health/ph_projects/2001/pollution/fp_pollution_2001_frep_02.pdf (27.03.2021)
17. Terviseamet. Nakkushaigused A-Ü, [WWW] <https://www.terviseamet.ee/et/nakkushaigused-a-u/legionelloos> (27.03.2021)
18. Molhave L., Schneider T., Kjaergaard S.K., Larsen L., Norn S., Jorgensen O.: House dust in seven Danish offices. Atmos. Environ. 34, 4767–4779, 2000 (27.03.2021)
19. S. Siebielec, M. Woźniak, A. Gałazka, G. Siebielec. Microorganisms as indoor and outdoor air biological pollution. [online] https://www.exeley.com/exeley/journals/advancements_of_microbiology/59/2/pdf/10.21307_PM-2020.59.2.009.pdf (27.03.2021)
20. Staszowska A.: Mikroorganizmy w kurzu z pomieszczeń na przykładzie miasta Lublina. Proceedings of ECOpole, 5, 325–328, 2011 (27.03.2021)
21. Ernst P., Cormier Y., Relative scarcity of asthma and atopy among rural adolescents raised on a farm. Am. J. Respir. Crit. Care Med. 161, 1563–1566, 2000. (27.03.2021)
22. Kaarakainen P., Rintala H., Vepsäläinen A. i Hyvärinen A. Microbial content of house dust samples determined with qPCR. Sci. Total Environ. 407, 4673–4680 (2009) [online] (18.03.2021)
23. What Is Ultraviolet Light?, [WWW] <https://www.livescience.com/50326-what-is-ultraviolet-light.html> (30.03.2021)
24. WHAT IS UV LIGHT?, [WWW] <https://www.unigean.com/page-33022.html> (30.03.2021)
25. H. Orru, Välisõhu kvaliteedi mõju inimeste tervisele Tallinna linnas. Peentest osakestest tuleneva mõju hindamine. 2007 [online] https://www.envir.ee/sites/default/files/hia_tallinn_ohk_arth.pdf (30.03.2021)
26. Single-ended H shape UV germicidal lamps, [WWW] <https://www.ecvv.com/product/4495941.html> (30.03.2021)
27. Сравниваем технологии обеззараживания воздуха в медицинских организациях - «Санэпидконтроль. Охрана труда», 2016, №2 [e-ajakiri] https://www.profiz.ru/sec/2_2016/tehnologii_obezzarazh/ (30.03.2021)

28. Flash Lamps, [WWW] https://www.rp-photonics.com/flash_lamps.html (30.03.2021)
29. UV DIRECT E75H-HNX-NT, [WWW] <https://uvlamp.ee/ru/uv-direct-e75h-hnx-nt.html> (30.03.2021)
30. What is photokeratitis?, [WWW] <https://my.clevelandclinic.org/health/diseases/15763-photokeratitis> (30.03.2021)
31. UV FAN M2/95HP-BD, [WWW] <https://uvlamp.ee/ru/uv-fan-m2-95hp-bd.html> (30.03.2021)
32. Alas Brita-Maria, Koroonaosakonnas hävitab baktereid desinfektsioonirobot, Postimees, 05.03.2021 [online] <https://tervis.postimees.ee/7194273/koroonaosakonnas-havitab-baktereid-desinfektsioonirobot> (30.03.2021)
33. Eesti tehnoloogiafirma toob turule kaelaskantava imevidina, Postimees, 22.02.2021 [online] <https://tehnika.postimees.ee/7186192/eesti-tehnoloogiafirma-toob-turule-kaelaskantava-imevidina> (04.04.2021)
34. A Face Mask Alternative, [WWW] <https://respiray.com/> (04.04.2021)
35. D. Welch, M. Buonanno, V. Grilj, I. Shuryak jt, Far-UVC light: A new tool to control the spread of airborne-mediated microbial diseases - Scientific Reports, 2018, 08 [e-ajakiri] <https://www.nature.com/articles/s41598-018-21058-w> (04.04.2021)
36. Japanese firm Ushio launches world's first Care 222 UV lamp that safely kills coronavirus, [WWW] <https://uv-c.com.au/japanese-firm-ushio-launches-worlds-first-care-222-uv-lamp-that-safely-kills-coronavirus/> (04.04.2021)
37. L. Espino, What's the difference between UV-C and Far-UVC? - Regency lightning, 2020. 09 [e-ajakiri] <https://insights.regencylighting.com/uvc-vs-faruvc> (04.04.2021)
38. P. Robertson, What Are HEPA Filters and How Do They Work? - Smart air, 2021.03 <https://smartairfilters.com/en/blog/what-is-hepa-filter-how-hepa-air-filter-work/> (08.04.2021)
39. Jos H Verbeek, The Effectiveness of Specific Risk Mitigation Techniques Used in the Production and Handling of Manufactured Nanomaterials: A Systematic Review - Journal of UOEH, 2017.09 [e-ajakiri] https://www.researchgate.net/figure/Most-penetrating-particle-size-MPPS-of-studied-respirators-Box-shows-the-range-of_fig2_319693965 (08.04.2021)
40. ULPA VS. HEPA filter, [WWW] <https://airinnovations.com/ulpa-vs-hepa-filters/> (08.04.2021)
41. Угольные фильтры как эффективные устройства для очистки воздуха на производстве, [WWW] <https://gas-cleaning.ru/article/air-purification-coal-filters> (10.04.2021)
42. Aktiivsüsi, kellele ja milleks? - Keskkonnatehnika. 2019.09 [e-ajakiri] <https://keskkonnatehnika.ee/aktiivsusi-kellele-ja-milleks/> (10.04.2021)
43. Activated carbon pores by their function, [WWW] <https://www.desotec.com/en/carbonology/carbonology-cases/activated-carbon->

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211926416302612>
(19.04.2021)
57. Osoneerimine, Greenpath [WWW]
<https://greenpath.ee/et/puhastusteenused/osoneerimine/> (02.05.2021)
58. Kenneth K. K. LAM, Ozone Disinfection of SARS-Contaminated Areas, [online]
https://static1.squarespace.com/static/536a7dcae4b0fe2bd2fb91f4/t/5f58f84b43b53a3808fb0f13/1599666252048/Ozone_disinfection_of_SARS_Contaminated_Areas.pdf
(09.05.2021)
59. Bernardino Clavo jt, Effects of Ozone Treatment on Personal Protective Equipment Contaminated with SARS-CoV-2 – Antioxidants, 2020.09 [e-ajakiri]
<https://www.mdpi.com/2076-3921/9/12/1222/pdf> (09.05.2021)
60. Töökeskkonna keemiliste ohutegurite piirnormid, Riigiteataja, määruse nr 293
(16.05.2021)
61. What is Ozone?, [WWW], http://airinfonow.org/html/ed_ozone.html (16.05.2021)
62. Retsirkulaator, 2x15W, 30m² ruumidesse, Uvlambid, [WWW]
<https://www.uvlambid.ee/toode/retsirkulaator-2x15w-30m2-ruumidesse/>
(16.05.2021)
63. Õhupuhastaja Clean Air Optima CA-508, [WWW] https://www.k-rauta.ee/p/ohupuhastaja-clean-air-optima-ca-508/75q9?utm_source=hind.ee&utm_medium=referral (16.05.2021)
64. Proair.ee [WWW] <https://www.proair.ee/e-pood/> (17.05.2021)
65. Osoneerimine, Freoonipunkt, [WWW] <https://www.freoonipunkt.ee/osoneerimine/>
(17.05.2021)
66. Osoonigeneraator, Puhasta Ise, [WWW] <https://puhastaise.ee/toode/osooni-generaator-osonaator/> (17.05.2021)