



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Ehituse ja arhitektuuri instituut

**PORTATIIVSETE VENTILAATORITE KASUTAMINE
INIMESTE KONVEKTIIVSETE ÕHUVOOLUDE
JÄLJENDAMISEKS ÕHUJAOTUSSÜSTEEMIDE
UURIMISEL**

**UTILIZING PORTABLE FANS TO MIMIC HUMAN
CONVECTIVE AIR FLOWS IN AIR DISTRIBUTION
SYSTEM ASSESSMENTS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Renate Jaanus

Üliõpilaskood 192753EAKI

Juhendaja: Karl-Villem Võsa, ekspert

Tallinn 2024

(Tiitellehe pöördel)

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.

“22” mai 2024.

Autor: Renate Jaanus

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“22” mai 2024.

Juhendaja: Karl-Villem Võsa

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Renate Jaanus

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Portatiivsete ventilaatorite kasutamine inimese konvektiivsete õhuvoolude jäljendamiseks õhujaotussüsteemide uurimisel“,

mille juhendaja on Karl-Villem Võsa,

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.

22.05.2024

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.

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Renate Jaanus, 192753EAKI

Õppekava, peeriala: EAKI02/19 - Hoonete sisekliima ja veetehnika

Juhendaja(d): Ekspert, Karl-Villem Võsa, +372 58500018

Lõputöö teema:

Portatiivsete ventilaatorite kasutamine inimeste konvektiivsete õhuvoolude jäljendamiseks õhujaotussüsteemide uurimisel

Utilizing Portable Fans to Mimic Human Convective Air Flows in Air Distribution System Assessment

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Teostada analüüs juba kasutusel olevatest termilistest mannekeenidest ja nende variatsioonidest kirjandusallikate põhjal, ja leida varasemalt teostatud uuringute baasil sobilik meetod portatiivsete ventilaatorite mõõtmiseks.
2. Portatiivsete ventilaatorite ja EVSN 14240:2004 järgi ehitatud termiliste mannekeenide tekitatud konvektiivse õhujoo uurimine.
3. Analüüsida õhuvahetuse efektiivsust termiliste mannekeenide, portatiivsete ventilaatorite ja inimese kohalolekuga ruumis ning hinnata seeläbi portatiivsete ventilaatorite kasutamist õhuvahetuse efektiivsuse hindamisel.
4. Hinnata võimalust asendada termiline mannekeen ventilaatoriga õhujaotussüsteemide efektiivseks hindamiseks.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Töö temaatika kaardistamine juhendajaga	01.2024
2.	Mõõtmiste plaani koostamine	02.2024
3.	Kirjanduse ülevaate, teoreetiliste aluste ja metoodika koostamine	03.2024
4.	Esmased mõõtmised ja mõõtmistulemused	03.2024
5.	Mõõtmiste läbiviimine	04.2024

6.	Mõõtetulemuste töötlemine	04.2024
7.	Lisamõõtmised	04.2024
8.	Esmased järeldused, kokkuvõte	04.2024
9.	Eelkaitsmine	04.2024
10.	Lõputöö täiendamine	05.2024
11.	Lõputöö kaitsmine	06.2024

SISUKORD

EESSÕNA	8
Lühendite ja tähiste loetelu	9
1 SISSEJUHATUS.....	11
2 Kirjanduse ülevaade	13
3 Teoreetilised alused	17
3.1 Õhujaotussüsteemid	17
3.1.1 Segunev ventilatsioon	17
3.1.2 Väljatõrjuv õhuvahetus	18
3.1.3 Läbiv õhuvahetus	19
3.2 Õhuvahetuse efektiivsus.....	19
3.2.1 Õhu eluiga.....	20
3.2.2 Saasteainete eemaldamise efektiivsus (CRE)	21
3.2.3 Lokaalne õhukvaliteedi indeks.....	21
3.2.4 Õhuvahetuse efektiivsus	22
3.2.5 Lokaalne õhuvahetuse indeks	22
3.2.6 Õhuvahetuse efektiivsuse ja saasteainete eemaldamise efektiivsuse võrdlus	23
3.2.7 Märkegaasid	24
3.2.8 Õhu keskmise eluea mõõtmise meetodid.....	25
3.2.9 CFD kasutamine õhuvahetuse efektiivsuse hindamisel.....	25
3.3 Konvektiivne juga	26
3.3.1 Inimese termoregulatsioon ja metabolism	27
3.3.2 Inimese poolt tekitatav konvektiivne juga	28
3.4 Õhu liikumishulk.....	30
3.5 Alternatiivsed lahendused inimese konvektiivse joa imiteerimiseks	31
3.5.1 Termiliste mannekeenide areng.....	31
3.5.2 Termiliste mannekeenide kasutamine õhuvahetuse efektiivsuse hindamisel	32
3.5.3 Termilise mannekeeni geomeetria	32
4 Töö metoodika	34
4.1 Katsete läbiviimine.....	34
4.1.1 Katseruumi kirjeldus.....	34
4.1.2 Ventilatsiooniseade.....	37
4.1.3 Katseinstrumendid	37
4.1.4 Mõõteseadmed.....	39
4.2 Kiirusväljade mõõtmine	40
4.2.1 Katseinstrumendid ja mõõtmispunktid	41

4.3	Termilise mannekeeni pinnatemperatuur ning sellest väljuva õhutemperatuur.	43
4.4	Õhuvahetuse efektiivsuse mõõtmine	44
4.4.1	Metoodika	45
4.4.2	Katseseeria kirjeldus.....	46
5	Tulemused ja analüüs.....	49
5.1	Õhu liikumise kiirusväljad	49
5.2	Termilise mannekeeni pinnatemperatuur ning sellest väljuvaõhu temperatuur.	52
5.3	Joa liikumishulk	56
5.4	Õhuvahetuse efektiivsus	58
5.4.1	Mõõtmismeetodite valideerimine 180 W termilise mannekeeni näitel	59
5.4.2	Õhuvahetuse efektiivsus ja lokaalne õhuvahetuse efektiivsus.....	61
5.4.3	Saasteainete eemaldamise efektiivsus	64
5.5	Limitatsioonid.....	68
6	Järeldused	69
	Kokkuvõte	71
	Summary	73
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	75
	LISAD	79
	LISA 1: Kiirus- ja temperatuuriväljade visualiseerimise skript	79
	LISA 2: Õhuvahetuse efektiivsuse ja saasteainete eemaldamise efektiivsuse visualiseerimise skript.....	81

EESSÕNA

Siseõhu kvaliteet mõjutab otseselt inimese tervist, produktiivsust ja mugavust. Erinevad saasteained, sealhulgas viiruseosakesed, akumuleeruvad kehvasti ventileeritud alades ning võivad viia terviseprobleemideni. Siseõhu kvaliteedi hindamine võimaldab teha järeldusi ning vajadusel anda soovitusi ventilatsioonisüsteemi kaudu õhuvahetuse efektiivsuse parandamiseks.

Täna juhendajat Karl-Villem Võsa magistritöö valmimisel sisulise ja vormilise poole nõustamise ning abi eest katsete läbiviimise juures. Täna katses osalenud kaastudengeid ja sõpru: Elise Ruuder, Helene Liivik, Karoliina Kais, Kättriin Onemar, Linda Mai Vahtra, Mario Roland Linde, Marleen Võsa, Thea Nigol, Triinu Sala.

Magistritöö teema autor on Tallinna Tehnikaülikooli ekspert Karl-Villem Võsa.

Lühendite ja tähiste loetelu

CFD – arvutuslik vedeliku dünaamika

CO₂ – süsinikdioksiid ehk süsihappegaas

CRE, ε^c – saasteainete eemaldamise efektiivsus

PIV – impulsslaseriga voolu visualiseerimise süsteem

REHVA – Euroopa kütte, ventilatsiooni ja jahutuse erialaühenduste katuseorganisatsioon (ingl k Federation of European Heating, Ventilation and Air-Conditioning Associations)

β – soojuspaisumistegur, 1/K

$\langle c \rangle$ – keskmine märkegaasi kontsentratsioon ruumis, ppm

c_e – märkegaasi kontsentratsioon väljatõmbeavas, ppm

c_n – viimane mõõdetud CO₂ väärtus, ppm

c_p – märkegaasi kontsentratsioon ruumipunktis, ppm

d_p^2 – osakese diameeter, m

ε – emissivsustegur

ε^a – õhuvahetuse efektiivsus, %

ε_p^a – lokaalne õhuvahetuse indeks, %

ε_p^c – lokaalne õhukvaliteedi indeks

g – raskuskiirendus m/s²

L – süsteemile iseloomulik pikkus, m

M – liikumishulk

μ – dünaamiline viskoossus, kg/(m·s)

n – õhuvahetuse kordarv, 1/h

ρ – õhu tihedus kg/m³

ρ_p – osakese tihedus, kg/m³

q_v – ventilatsiooni õhuvooluhulk, m³/h

S_t – Stokesi number

ΔT – temperatuurivahe, K

$\langle \bar{\tau} \rangle$ – ruumiõhu keskmine eluiga, h

$\bar{\tau}_p$ – lokaalne õhu keskmine eluiga, h

$\bar{\tau}_r$ – õhu vahetuse aeg kogu ruumi õhule, h

τ_n – nominaalne ajakonstant, h

V – ruumi kubatuur, m^3

v – osakese kiirus, m/s

v_j – joa kiirus, m/s

Q – vooluhulk, $m^3/$

1 SISSEJUHATUS

Inimesed viibivad suurema osa ajast siseruumides ning on pidevas energiavahetuses end ümbritseva keskkonnaga [1]. Üheks inimese tervist, mugavust ja produktiivsust mõjutavaks teguriks on saasteainete, sealhulgas viiruseosakeste sisaldus siseõhus [2]. Puhta siseõhu tagamiseks on vajalik toimiv ventilatsioonilahendus. Ventilatsiooni eesmärgiks on viibimistsooni tuua värske õhk ning eemaldada saasteaineid [3], [4], [5].

Tänapäevased sisekliima tagamise lahendused on orienteeritud energiasäästule, mistõttu vabasoojusallikatel, sealhulgas inimestel, on üha suurema mõju. Inimeste konvektiivne juga mõjutab teisi ruumis olevad õhujugasid [6]. Konvektiivsed joad on eriti olulised väljatõrjuva õhuvahetusega lahenduste juures – konvektiivse joad abil tõuseb värske õhk inimese viibimistsooni [7]. Samal ajal võib õhujugade mõju ignoreerimine viia kõrgete saasteainete kontsentratsioonini inimeste hingamistsoonis [8].

Käesoleva magistr töö eesmärk on analüüsida, kas portatiivsed ventilaatorid suudavad adekvaatselt asendada inimesi õhuvahetuse efektiivsuse hindamisel. Tänapäevaks on kasutusel mitmeid inimese konvektiivset juga jäljendavaid seadmeid erineva detailiseerituse astmega mannekeenide näol. Kuigi portatiivsed ventilaatorid ei suuda täielikult jäljendada inimese konvektiivset juga, nagu detailiseeritud termilised mannekeenid, võib nende kasutamine pakkuda praktilist ja paindlikku alternatiivi juba olemasolevatele seadmetele. Portatiivsete ventilaatorite kasutamine oleks kiire, taskukohane ja paindlik lähenemine võrreldes CFD ja termiliste mannekeenide kasutamisega välikatsetel ja -uurimisel õhuvahetuse hindamiseks.

Varasemalt tehtud eksperimentaalsetest uurimistöödest ei selgu ühest meetodikat termiliste mannekeenide konvektiivse joad mõõtmiseks. Vaadeldud uurimustes ei ole ühtset loogikat termiliste mannekeenide kiirusväljade mõõtepunktide valikus ega mõõtmiste ajalises kestvuses.

Ventilaatorite, inimese ja standardi EVSN 14240:2004 järgi ehitatud termiliste mannekeenide kiirusväljade mõõtmiseks kasutatakse käesolevas magistr tööos anemomeetreid [9]. Õhuvahetuse efektiivsuse hindamiseks kasutatakse märkegaasina CO₂ nii konstantse doseerimise kui ka kontsentratsioonilanguse meetodil. Õhuvahetuse efektiivsuse hindamisel on tehtud katsed erinevas konfiguratsioonis termiliste mannekeenidega, portatiivsete ventilaatoriga ning inimestega.

Magistr töö jaguneb viieks peamiseks peatükiks, millest esimeses esitatakse teemaga seotud kirjanduse lühiülevaade. Teises osas antakse teoreetiline ülevaade õhuvahetuse

efektiivsuse hindamisest, konvektiivsest joast, inimese poolt tekitatavast konvektiivsest joast ning kirjeldatakse termilisi mannekeene. Kolmandas osas kirjeldatakse mõõtmiste läbiviimise ja analüüsi metoodikat. Neljandas osas tuuakse välja töö tulemused ning esitatakse tulemustel põhinev analüüs. Viiendas osas esitatakse magistritöö järeldused, kokkuvõtte ja limitatsioonid, mille osana antakse soovitusi edasiste uurimisküsimuste ja -teemade püstitamiseks.

2 Kirjanduse ülevaade

Arenenud riikides veedavad inimesed keskmiselt 90% siseruumides, talvisel ajal kuni 98%, mistõttu on oluline mugava ja tervisliku sisekliima tagamine [1]. Sisekliima olulisteks parameetriteks on temperatuur, akustika, valgustus ja õhu kvaliteet. Inimene tunnetab soojusliku sisekliimaga seotud parameetreid nagu siseõhu temperatuur, operatiivne temperatuur, siseõhu niiskussisaldus ja õhu liikumine [10]. Siseõhu kvaliteet sõltub saasteainete määrast ning on otseselt seotud inimese tervisega ja produktiivsusega [11]. Üheks siseõhu kvaliteedi tagamise vahendiks on ventilatsioon, mille eesmärgiks on eemaldada saasteallikad ja varustada ruume värske õhuga, et oleks tagatud nõuetekohane siseõhu kvaliteet ja niiskussisaldus [4]. Ventilatsiooni puhul tuleb arvestada, et sissepuhkeõhk ei tekitaks viibimistsoonis häirivat õhuliikumist ehk tõmbust ega ületaks kiirust 0,2 m/s. Viibimistsooniks on piiritletud ruumi sellised osad, mida eeldatakse kasutatavat ja neile rakendatakse nõuded sisekliimale [11].

Ventilatsiooni efektiivsus on kergesti hinnatav õhu kvaliteedi indikaator nii hoone projekteerimise faasis kui ka eksploatatsioonis. Ventilatsiooni efektiivsus hindab peamiselt värske õhu jagunemist ruumis ning on sõltuv õhujaoajate paiknemisest, õhuvooluhulkadest ning õhu jaotumist mõjutavatest ruumiprotsessidest. Ventilatsiooni efektiivsuse hindamisel tuleb lähtuda ventilatsioonisüsteemi eesmärgist, milleks võib olla liigsoojuse eemaldamine, saasteainete eemaldamine ja värske õhu juurdepääs viibimistsoonile. Soovitud tulemuse saavutamiseks on erinevaid õhuvahetuse viise, nagu näiteks segunev, väljatõrjuv, läbiv, kihistuv ja nõudluspõhine. 1980ndatel oli ruumiõhu hindamise aluseks „õhu vanus“, mille abil sai kirjeldada, kui kiiresti toimub ruumi õhuvahetus. 1990ndatel võeti kasutusele ventilatsiooni efektiivsuse hindamine läbi saasteainete eemaldamise võimekuse. Hiljem on lisandunud ventilatsiooni efektiivsuse hindamiseks märkegaasi kasutamine ja saasteainete kontsentratsiooni mõõtmine [7], [12], [13].

Ventilatsiooni sissepuhke õhuvoolusid mõjutab nii inimeste kohalolek kui ka esemete ja mööbli paigutus ruumis [5], [14]. Enamus hoonetes esinevatest õhuvooludest saab liigitada segunevateks ja väljatõrjuvateks. Seguneva õhuvahetusega ruumides antakse õhk ruumi võrdlemisi suure kiirusega, mis tagab ruumis õhu segunemise. Ruumides, kus puudub ventilatsioon ja on temperatuuri kihistumine, mängib inimese konvektiivne juga suurt rolli [15]. Tänu konvektiivsele joale tõuseb soe õhk üles ja saab toimuda õhu segunemine [14]. Õhujaoatust ruumis ja inimeste ning esemete mõjutust ventilatsiooni õhuvooludele on võimalik visualiseerida märkegaasidega [10]. Märkegaase, sealhulgas CO₂ kasutatakse ennekõike inimestest eralduvate saasteainete imiteerimiseks. Sõltuvalt märkegaasist ei saa selle käitumist võtta alati üks-ühele inimestelt eralduvate

raskemate gaaside ja piisakestega, sest nende levik ruumis erineb märkegaasi omast [5].

Mugavas ja stabiilses sisekeskkonnas, mille õhutemperatuur on vahemikus 20-26 °C, on inimese naha ja riiete pinnatemperatuur kõrgem kui ümbritseva ruumiõhu temperatuur. Inimkeha ümber olev õhk soojeneb ning õhu tihedus väheneb, õhk tõuseb ning keha kaotab soojust loomuliku konvektsiooni teel [16]. Inimese konvektiivne juga sõltub seda ümbritseva keskkonna tingimustest (õhu liikumise kiirusest, soojuskiirgusest), inimese asendist, liikumisest ja kontaktist teiste pindadega ning riietusest. Inimest ümbritseva temperatuuri tõustes konvektiivse kaitsekihi kiirus langeb, kuna konvektiivne juga on põhjustatud keha ja ruumiõhu vahelisest temperatuurierinevusest. Mida suurem on temperatuurierinevus, seda suurem on konvektiivse joa tippkiirus. Eelmainitud tegurite mõjul ei ole konvektiivne juga üle inimese keha jaotunud ühtlaselt ning on ajas muutuv. Inimese konvektiivne juga on laminaarne ja õhuke inimese alakeha juures, kuid muutub inimese pea tasandil kiiremaks, laiemaks ja turbulentseks. Kiiremais punktis, inimese pea kohal, võib inimese konvektiivse joa kiirus olla vahemikus 0,25-0,30 m/s. Arvutustes võetakse aluseks $v = 0,25$ m/s, mis on keskmine kiirus inimese kohal mistahes suunast vaadatuna. Seisva inimese konvektiivne juga on sümmeetriline, kuid istuva inimese oma kaldub rohkem ette poole tulenevalt reitest kerkivast konvektiivsest joast [10], [17], [18].

Läbi konvektiivse joa saavad põranda tasapinnal olevad saasteained sattuda inimese hingamistsooni. Inimese konvektiivne kaitsekiht on mõjutatav ventilatsioonist – selle kiirusest, suunast ja turbulentsusest. Tõmbused katkestavad inimese konvektiivse kaitsekihi ja suurendavad konvektiivset soojuse ülekannet, mille käigus nahk jahtub ning tekib ebamugavustunne [19]. Inimest ümbritsev konvektiivne juga ehk kaitsekiht aitab tagada soojuslikku mugavust ja seab ääretingimused ventilatsiooni sissepuhke õhujaoitusele [10], [15], [16], [17], [20].

Inimest ümbritsevat konvektiivset juga on võimalik imiteerida kasutades termilisi mannekeene. Termiliste mannekeenide eesmärk on tekitada inimkehaga võimalikult sarnane soojusvool. Termilised mannekeenid leiavad kasutust mõistmaks, kuidas riiete materjalid mõjutavad inimese termoregulatsiooni, ja kuidas kavandada sisekliimat tagavaid süsteeme nii hoonetesse kui ka sõidukitesse [21]. Termiliste mannekeenide abil analüüsitakse, kuidas mõjutavad transpordivahendite salongid ja ehitised inimeste tervist, soojuslikku mugavust ja produktiivsust [22].

Termiliste mannekeenide arendamist alustati 1940ndatel, mil loodi üheosaline vasest termiline mannekeen [21]. Kuigi inimkeha ei ole täielikult silindrikujuline, kasutatakse tihtipeale inimese soojusväljastuse jäljendamiseks silindrikujulisi termilisi mannekeene

[10]. Silindriliste mannekeenide eeliseks on lihtsus – neid on lihtne ja odav ehitada ning kasutada. Silindri kujuliste termiliste mannekeenide soojusväljastust saab muuta inimesega piisavalt täpseks, et hinnata inimese mõju ruumi õhuvahetusele. Tänapäeval varieerub termiliste mannekeenide komplekssus alates silinder tüüpi mannekeenidest kuni detailiseeritud hingavate ja higistavate mannekeenideni. Inimest täielikult jäljendavatel mannekeenidel on ligikaudu 30 segmenti, mis jäljendavad soojusvahetust ümbritseva keskkonnaga [21].

Lisaks mannekeenidele on tänapäeval kasutusel CFD ehk arvutusliku vedeliku dünaamika abil modelleerimine CFD simulatsioonidega on võimalik modelleerida ja visualiseerida õhuvoolusid, temperatuuri ja saasteainete jaotumist kogu vaadeldava tsooni ulatuses [23], [24].

Seni avaldatud uurimistöodes on inimese konvektiivse soojusvoo imiteerimiseks kasutatud peamiselt detailiseeritud termilisi mannekeene ja/või arvutusliku vedeliku dünaamika abil modelleerimist [23], [25], [26], [27]. Mõõtmisvahenditena on kasutatud nii anemomeetreid kui ka PIV-i (*Particle Image Velocimetry*) ehk impulsslaseriga voolu visualiseerimise süsteemi [28], [29]. Borges et al. eksperimenteeris erineva detailsuse astmes ja kujudega termiliste mannekeenidega. Silinder ja kast tüüpi termiliste mannekeenide puhul tekitati soojusvoog nii elektripirnide kui ka väikesemõõduliste ventilaatorite abil [30]. Kosonen et al. on välja toonud, et standardis EVSN 14240:2004 silinder tüüpi termiline mannekeen ei ole õhujaotuse hindamisel adekvaatne, sest nende ülamosas olevad augud mõjutavad õhu liikumist inimesega võrreldes ebaloomulikul moel [25].

Bouzinaoui et al. teostasid konvektiivse joo mõõtmisi silindrilise termilise mannekeenidega. Mõõtmisi teostati anemomeetritega kõrgusel 1,3 m – 3,5 m sammuga 0,2 m [29]. Zukowska et al. mõõtsid anemomeetritega inimese sarnase termilise mannekeeni konvektiivset juga 0,7 m kõrgusel mannekeeni peast ning horisontaaltasandil 0,1 m sammuga [31]. Cheng ja Lin uurisid inimese mõju ventilatsiooni õhujugadele. Mõõtmiseks kasutati lihtsustatud, risttahuka kujulist termilist mannekeeni mõõtudega 0,4 m x 0,3 m x 0,76 m, mis asetati toolile ning mille kõrgeim punkt oli 1,2 m kõrgusel. Mõõtmised teostati nii katsekeha ees kui ka taga kõrgusel 0,8 m, 0,9 m, 1,0 m, 1,1 m, 1,15 m, 1,25 m, 1,3 m, 1,35 m ja 1,4 m. Võrduseks teostati mõõtmised päris inimesega ning tulemused mannekeeni ja inimese vahel olid võrdlemisi sarnased. Mõõtmise pikkus oli minimaalselt 3 minutit [32]. Licina et al. kasutasid mõõtmiseks nii PIV-i kui ka anemomeetreid. Mõõtmisi teostati neljas kohas ümber istuva, inimest meenutava termilise mannekeeni, kõrgustel 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m ja 1,9 m põrandast. Mõõtmise pikkuseks oli 5 minutit [16]. Anemomeetritega teostatud mõõtmised on iga katse jaoks kohandatud vastavalt olemasoleva katsekeha

eripärale ning mõõtevahendite kättesaadavusele. Mõõteajaks oli vähemalt kolm minutit ning mõõteseadmete liigutamise ja uue mõõtmise vahet on hoitud 5 minutit, et vältida õhu liikumisest tekkivaid kõrvalekaldeid mõõtetulemustes.

3 Teoreetilised alused

3.1 Õhujaootussüsteemid

Ventilatsioonisüsteemi põhieesmärgiks on ruumi varustamine värske õhuga ning saasteallikate eemaldamine. Ventilatsiooni abil on võimalik mõjutada lisaks õhu kvaliteedile ruumi temperatuuri, õhu niiskussisaldust ja energiaefektiivsust [7], [11], [12].

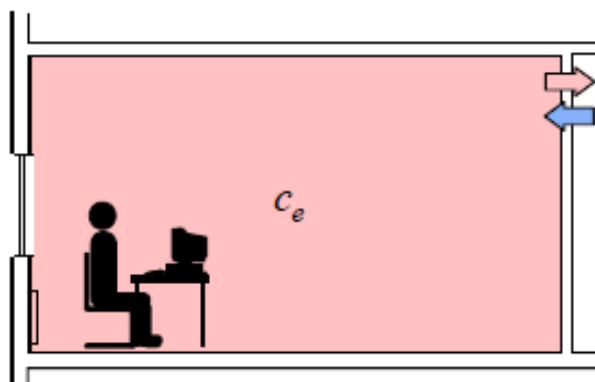
Õhu liikumist ruumis mõjutavad sissepuhke õhuvooluhulk ja kiirus, vabasoojusallikad ning ruumis toimuvad tegevused. Soojad kehad tõstavad enda ümber oleva õhu temperatuuri ning sellest tekivad konvektiivsed õhuvoolud. Erineva hõivatuse tasemega ruumides on õhu liikumine erinev. Inimeste poolt hõivatud ruumis üldjuhul õhk seguneb ning saasteainete kontsentratsioon väljatõmbeõhus on lähedane saasteainete keskmisele kontsentratsioonile ruumis [11].

Inimeste poolt või muul moel stabiilselt hõivatud ruumis püsib saasteainete kontsentratsioon üldiselt konstantsel tasemel. Saasteallikate kontsentratsioon tõuseb ja langeb vastavalt inimeste lisandumisele või vähenemisele ruumis. Teatud aja möödudes saavutatakse tasakaaluolukord ventilatsiooniga eemaldatud saasteainete ja saasteainete tekkimise vahel ruumis [11].

Käesoleva peatükiks kajastatud õhuvahetuse efektiivsusega seotud valemid on viidatud REHVA juhendmaterjalist „Ventilation Effectiveness“ [7].

3.1.1 Segunev ventilatsioon

Seguneva ventilatsiooni printsiibiks on segada olemasolevat ruumiõhku värske sissepuhke õhuga, et vähendada saasteainete kontsentratsiooni. Nii sissepuhke- kui ka väljatõmbeelemendid asuvad üldjuhul laes, viibimistsoonist kõrgemal [33]. Nii sissepuhke õhujuga kui ka vabasoojusallikad on õhu segajateks. Ideaalse segunemise korral on üle terve viibimistsooni temperatuuri ja saasteainete kontsentratsioon ühtlane [7]. Tihtipeale ignoreeritakse ruumis olevaid konvektiivsete õhujugade mõju, kuigi sageli on just need põhilised õhu segajad [12]. Segunev õhuvahetus tagab soovitud temperatuuri viibimistsooni ulatuses, kuid saasteainete kontsentratsiooni piirmäär ei pruugi olla tagatud. Segunev õhuvahetus on kõige enimlevinud õhuvahetuse viis tänu oma disaini lihtsusele [33].

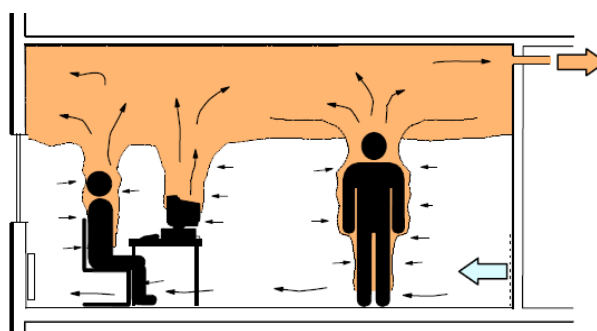


Joonis 1. Segunev õhuvahetus [7]

3.1.2 Väljatõrjuv õhuvahetus

Väljatõrjuva ventilatsiooni printsiibiks on saastunud õhu eraldamine värskest õhust. Värske jahe õhk antakse ruumi selle alaosast suhteliselt madalal kiirusel. Väljatõmbeelement asub reeglina ruumi ülaosas. Õhk liigub üles tänu soojade kehade poolt tekitatud konvektiivsetele õhuvooludele [33]. Temperatuurierinevustest põhjustatud õhu tiheduste erinevus tekitab vertikaalse gradiendi õhu kiirusest, temperatuurist ja saasteainete kontsentratsioonist. Ruumi ülaosas on saastunud õhk ning allosas, viibimistsoonis puhas õhk [34]. Uuringud on näidanud, et väljatõrjuv õhuvahetus võib viibimistsoonis käituda kui läbiv õhuvahetus tänu vertikaalsele temperatuurigradiendile [12], [33].

Väljatõrjuv õhujaotus järgib energiaefektiivsuse printsiipi, kuna kasutab õhu ruumis levimisel konvektiivseid jugasid. Värske jahe õhk antakse ruumi alaosasse, seega aitab see kokku hoida jahutuskuludelt. Siiski tuleb arvestada võimaliku tõmbuse tekkimisega põranda lähedal [34].

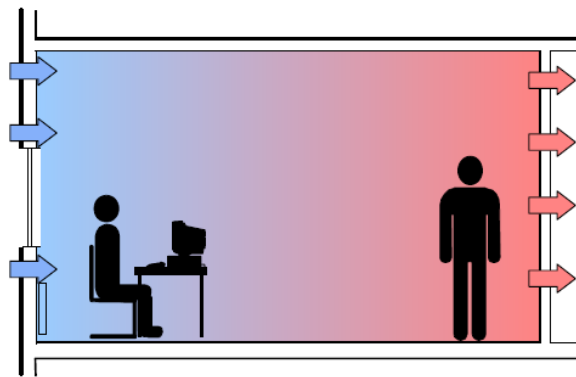


Joonis 2. Väljatõrjuv õhuvahetus [34]

3.1.3 Läbiv õhuvahetus

Läbiva õhuvahetuse puhul on sissepuhkeelemendid paigaldatud terve lae või seina ulatuses ning väljatõmbeelement on paigaldatud vastastarindisse. Õhku antakse ruumi kiirusega 0,2-0,4 m/s [12], [33].

Läbiv õhuvahetus on efektiivne õhuvahetuse viis, kui eesmärgiks on saasteainete eemaldamine. Läbiv õhuvahetus on energiakulukas, kuna ruumi õhuvahetus toimub 200-600 korda tunnis. Läbivat õhuvahetust kasutatakse peamiselt puhaste ruumide ja haigla operatsioonisaalide ventilatsiooniks [12], [33].



Joonis 3. Läbiv õhuvahetus [7]

3.2 Õhuvahetuse efektiivsus

Ventilatsiooni toimimine on üheks põhiliseks siseõhu kvaliteedi mõjutajaks [35]. Siseõhu kvaliteet on eelduseks tervislikule sisekeskkonnale, inimeste tööviljakusele ja mugavustundele [36]. Õhuvahetuse efektiivsus on oluline indikaator õhujaotussüsteemide kvaliteedi hindamisel. Kui õhuvahetuse kordarv on kvantitatiivne näitaja, siis õhuvahetuse efektiivsus on kvalitatiivne ventilatsioonisüsteemi töötamist väljendav suurus [13].

Kui õhk on täielikult segunenud, on saasteainete kontsentratsioon igas ruumipunktis ja väljatõmbeavas võrdsete parameetritega. Reaalsuses on ruumiõhk harva täielikult segunenud [7]. Sissepuhkeõhk hajub üle ruumi, kuid jõuab ruumi eri punktidesse erinevat teed pidi ja erineva ajaga. Saasteained võivad levida ebaühtlaselt - näiteks mõne saasteallika läheduses võib saasteainete kontsentratsioon olla kõrge. Kui ventilatsiooniõhu liikumine ei ole ühtlane, võib tekkida kihistumine ning värske õhk ei jõua viibimistsooni [11]. Värske õhu jaotumisel ruumis mängivad olulist rolli vabasoojusallikatest tekkivad konvektiivsed joad, mis võivad ventilatsiooni õhuvoolusid

muuta. Ruumi õhuvahetuse efektiivsuse tõstmiseks tuleb ruumis vähendada seisva õhuga tsoone, tuua värske õhk otse viibimistsooni ja/või eemalda saasteained enne, kui need jõuavad üle terve ruumi levida [13].

Õhuvahetuse efektiivsust väljendatakse üldjuhul protsentides ning selle maksimaalne väärtus on 100%. Lokaalset õhuvahetuse indeksit väljendatakse samuti üldjuhul protsentides, kuid see võib ületada 100% [7].

Tabel 1. Õhuvahetuse efektiivsus vastavalt õhujaotusviisile [7]

Õhujaotusviis	Õhuvahetuse efektiivsus, ε^a
Ideaalne läbiv õhuvahetus	100%
Väljatõrjuv õhuvahetus	$50\% \leq \varepsilon^a \leq 100\%$
Täielikult segunev õhuvahetus	50%
Lühisvool	$\leq 50\%$

3.2.1 Õhu eluiga

Õhu eluiga on tööriist õhuvahetuse efektiivsuse välja arvutamiseks [7].

Keskmine õhu eluiga on statistiline suurus, mis põhineb ajal, mis kulub õhul vaadeldavasse punkti jõudmiseks. Õhu eluiga hakatakse lugema hetkest, mil õhk ruumi jõuab. Vaadeldavasse punkti jõudmiseks läbib õhk erineva aja ja trajektooriga vahemaid. Seega näitab lokaalne õhu keskmine eluiga ($\bar{\tau}_p$) õhu kvaliteeti vaadeldavas punktis. Väljatõmbeavas on lokaalne õhu eluiga alati võrdne ruumi nominaalse ajakonstandiga τ_n [7].

Nominaalne ajakonstant näitab vähimat aega millega jõuab kogu ruumi õhk vahetuda ning on võrdne ajaga, mille jooksul ruumi kubatuur täitub värske õhuga [7].

$$\tau_n = \frac{V}{q_v} \quad (3.1)$$

kus τ_n – nominaalne ajakonstant;

V – ruumi kubatuur;

q_v – ventilatsiooni õhuvoolumulk.

Õhuvahetuse kordarv, mida kasutatakse sageli ventilatsiooni kvantifitseerimiseks, on nominaalse ajakonstandi pöördväärtus [7].

Ruumi keskmine õhu eluiga $\langle \bar{\tau} \rangle$ on võrdne lokaalsete keskmiste õhu eluigadega. Läbiva õhuvahetuse puhul on ruumi siseneva õhu keskmine eluiga null ning ruumist väljuva õhu lokaalne keskmine eluiga on võrdne nominaalse ajakonstandiga. Seega on läbiva õhuvahetuse puhul õhu keskmine eluiga $\langle \bar{\tau}_{\text{läbiv}} \rangle = \frac{\tau_n}{2}$. Täieliku segunemise korral on lokaalsed õhu eluead võrdsed kogu ruumi õhu eluea ning ühtlasi võrdne nominaalse ajakonstandiga, seega $\langle \bar{\tau}_{\text{segunev}} \rangle = \tau_n$. Tõrjuva õhuvahetuse õhu keskmine eluea on väärtus seguneva ja läbiva keskmiste eluigade vahel, seega $\frac{\tau_n}{2} < \langle \bar{\tau}_{\text{väljatõrjuv}} \rangle < \tau_n$. Lühisvoolu puhul on õhu keskmine eluiga suurem nominaalsest ajakonstandist ehk $\langle \bar{\tau}_{\text{lühisvool}} \rangle > \tau_n$ [7].

3.2.2 Saasteainete eemaldamise efektiivsus (CRE)

Saasteainete eemaldamise efektiivsus ε^c näitab, kui kiiresti suudetakse saasteaine ruumist eemaldada. Seda väljendatakse ruumi keskmise märkegaasi kontsentratsiooni ja väljatõmbe avas oleva märkegaasi kontsentratsiooni suhtena:

$$CRE = \varepsilon^c = \frac{c_e}{\langle c \rangle} \quad (3.2)$$

kus ε^c – saasteainete eemaldamise efektiivsus (CRE);

c_e – saasteaine kontsentratsioon väljatõmbeavas, ppm;

$\langle c \rangle$ – saasteaine keskmine kontsentratsioon ruumis, ppm.

Saasteainete eemaldamise efektiivsus sõltub lisaks õhujugadele veel saasteallika intensiivsusest ja ventilatsiooni õhuvooluhulgast, kuid on sõltumatu väljatõmbeava asukohast [7].

3.2.3 Lokaalne õhukvaliteedi indeks

Lokaalne õhukvaliteedi indeks ε_p^c on väljatõmbeavas oleva saasteaine kontsentratsiooni ja ruumi keskmise saasteaine kontsentratsiooni suhe tasakaaluolekus [7].

$$\varepsilon_p^c = \frac{C_e}{C_p} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (3.3)$$

kus ε_p^c – lokaalne õhukvaliteedi indeks;

C_e – saasteaine kontsentratsioon väljatõmbeavas, ppm;

C_p – saasteaine kontsentratsioon ruumipunktis, ppm.

3.2.4 Õhuvahetuse efektiivsus

Õhuvahetuse efektiivsuse ε^a hindamise puhul vaadeldakse, kui kiiresti toimub ruumis õhuvahetus võrrelduna teoreetiliselt lühima võimaliku õhuvahetuse ajaga sama õhuvooluhulga juures. Viimane on õhu vahetuse aeg läbiva õhuvahetuse korral. Nominaalne ajakonstant, mis väljendab lühimat võimalikku õhu vahetuse aega τ_n on sõltuvuses ruumi kubatuurist ja ventilatsiooni õhuvooluhulgast [7].

Õhuvahetuse efektiivsust saab väljendada vähima võimaliku keskmise õhu eluea ja kahekordse ruumi keskmise õhu eluea suhtena [7].

$$\varepsilon^a = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_r} \cdot 100 = \frac{\tau_n}{2\langle\bar{\tau}\rangle} \cdot 100 [\%] \quad (3.4)$$

kus τ_n – nominaalne ajakonstant, h;

τ_n – nominaalne ajakonstant, h;

$\bar{\tau}_r$ – õhu vahetuse aeg kogu ruumi õhule, h;

$\langle\bar{\tau}\rangle$ – ruumi keskmine õhu eluiga, h.

Tegelik õhu vahetuse aeg $\bar{\tau}_r$ on otseselt seotud ruumi keskmise õhu elueaga $\langle\bar{\tau}\rangle$. Tegelik õhu vahetuse aeg kogu ruumi õhule $\bar{\tau}_r$ on kahekordne ruumi keskmine õhu eluiga $\langle\bar{\tau}\rangle$ [7].

3.2.5 Lokaalne õhuvahetuse indeks

Lokaalne õhuvahetuse indeks ε_p^a iseloomustab õhuvahetuse efektiivsust vaadeldavas punktis. Lokaalne õhuvahetuse indeks näitab suhet nominaalse ajakonstandi ja lokaalse õhu keskmise eluea vahel. Lokaalse õhuvahetuse indeksi väärtus võib olla kõrge tingituna mõõtmispunkti asukohast ruumis. Lokaalset õhuvahetuse indeksit on võimalik arvutada järgnevalt:

$$\varepsilon_p^a = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_p} \cdot 100 [\%] \quad (3.5)$$

kus ε_p^a – lokaalne õhuvahetuse indeks, %;

τ_n – nominaalne ajakonstant, h;

$\bar{\tau}_p$ – lokaalne õhu eluiga vaadeldavas punktis, h.

Täielikult seguneva õhujaotuse puhul on lokaalne keskmine õhu eluiga võrdne ruumi keskmise õhu eluea ning nominaalse ajakonstandiga [7].

3.2.6 Õhuvahetuse efektiivsuse ja saasteainete eemaldamise efektiivsuse võrdlus

Nii õhuvahetuse efektiivsus kui ka saasteainete eemaldamise efektiivsus sõltuvad ruumis olevatest õhujugadest. Erinevad õhujaotussüsteemid tekitavad ruumis neile iseloomulike õhujugasid [36].

Õhuvahetuse efektiivsus ja saasteainete eemaldamise efektiivsus täidavad erinevaid eesmärke ning neid ei ole võimalik üheselt võrrelda. Kui mõlemat indikaatorit ühele ja samale ruumile samaaegselt vaadelda, võivad need anda vastandlikke tulemusi [37].

Õhuvahetuse efektiivsus indikeerib õhu jaotuse kvaliteeti ehk võrdleb ruumi õhu vahetust võrreldes läbiva õhuvahetusega. Saasteainete eemaldamise efektiivsus ei põhine mitte ainult õhujaotusel, vaid oleneb ka saasteallika asukohast, suurusest ja intensiivsusest. Ruumides, kus saasteallika asukoht on teada, annab ruumiõhu kvaliteedist ülevaate saasteallika eemaldamise efektiivsus. Juhul, kui saasteallika asukohad ei ole teada, on õhuvahetuse efektiivsus informatiivsem hindamismehhanism, sest see ei arvesta saasteallika asukohtadega [37].

Tabel 2. Õhuvahetuse efektiivsuse ja saasteainete eemaldamise efektiivsuse piirmäärad [37]

Õhuvahetuse efektiivsus	Ülemine piirmäär	$\varepsilon^a = 1$	Ideaalne läbiv õhuvahetus
	Ideaalne segunemine	$\varepsilon^a = 0,5$	Ideaalne segunemine
	Alumine piirmäär	$\varepsilon^a \rightarrow 0$	Lühisvool
Saasteainete eemaldamise efektiivsus	Ülemine piirmäär	$\varepsilon^c \rightarrow \infty$	Saasteallikas asub väljatõmbeavas. Õhujaotusel puudub mõju.
	Ideaalne segunemine	$\varepsilon^c = 1$	Ideaalne segunemine. Saasteallika asukojal puudub mõju.
	Alumine piirmäär	$\varepsilon^c \rightarrow 0$	Saasteallikas asub stagneerunud tsoonis.

3.2.7 Märkegaasid

Õhuvahetuse efektiivsuse enamlevinud hindamise viisiks on märkegaasi meetodid [7], [38]. Mõningatel juhtudel mõõdetakse saasteaineid, mis pärinevad otse inimestelt või tehnoloogiast. Enamlevinud märkegaasideks on CO₂, N₂O ja SF₆. Õhu eluiga saab välja arvutada kasutades meetodeid nagu näiteks kontsentratsiooni languse meetod ja konstantse doseerimise meetod [7].

Märkegaaside kasutamisel on võimalik reaalseste saasteainete käitumist korrigeerida Stokesi numbriga. Stokesi number on dimensioonitu parameeter, mis näitab, kuidas märkegaasid või saasteained keskkonnas käituvad. Stokesi number kirjeldab, kui kiiresti reageerivad osakesed õhu liikumisele ning selle abil on võimalik ennustada, kuidas osakesed erinevates tingimustes käituvad [39]. Osakesed, millel on väike Stokesi number jälgivad joa liikumist ja vastupidi [40].

$$St = \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot v}{18 \cdot \mu \cdot L} \quad (3.6)$$

kus S_t – Stokesi number

ρ_p – osakese tihedus, kg/m³;

d_p^2 – osakese diameeter, m;

v – osakese kiirus, m/s;

μ – dünaamiline viskoossus, kg/(m·s)

L – süsteemile iseloomulik pikkus, m.

3.2.7.1 CO₂ märkegaasina

Ruumide õhuvahetuse efektiivsuse hindamisel kasutatakse tihti CO₂ tänu oma kergele kättesaadavusele. CO₂-le on omased mitmed selle kasutamist soodustavad omadused: mittetoksilisus, mittesüttivus, mõõteseadmete kättesaadavus, tõhus õhuga segunemine. Selle tihedus on sarnane õhu omaga, mis tagab optimaalse segunemise. Samas eristub CO₂ selgelt teistest õhu koostisosadest. Võrreldes süsihappegaasi teiste märkegaasidega omab CO₂ väiksemat globaalse soojenemise potentsiaali [41].

Taustal olev CO₂ kontsentratsioon ei vähenda selle kasutamise usaldusväarsust, kuid eeldab selle taustkontsentratsiooni teadmist või mõõtmist. CO₂ kõikumisi on võimalik täpselt mõõta ning õhuvahetuse efektiivsuse hindamisel arvesse võtta [41].

3.2.8 Õhu keskmise eluea mõõtmise meetodid

Ruumi õhuvahetuse ja õhuvahetuse efektiivsuse hindamiseks on mitmeid erinevaid meetodeid nagu näiteks kontsentratsiooni languse meetod, konstantse doseerimise meetod ning konstantse kontsentratsiooni meetod [7]. Erinevad meetodid on kirjeldatud standardid EVSN ISO 12569:2017 [42].

Kontsentratsiooni languse meetod

Kontsentratsiooni langusel põhinevad meetodid on väljatõmbe kontsentratsioonil põhinev kontsentratsiooni languse meetod, kahe punkti languse meetod, mitme punkti languse meetod, pulseerimise meetod [42]. Antud magistritöös kasutatakse väljatõmbe kontsentratsioonil põhinevat kontsentratsiooni languse meetodit.

Ruumi õhuvahetuse mõõtmiseks doseeritakse ruumi teatud kogus märkegaasi. Ajahetkel $t=0$ algab ventilatsiooni toimel märkegaasi kontsentratsiooni langus. Märkegaasi kontsentratsiooni mõõdetakse kas väljatõmbeavas ja/või ruumipunktis [7].

Märkegaasi eemaldamise võimekuse määramiseks paigaldatakse saasteallikas ruumipunkti. Tasakaaluolukorra saavutamisel mõõdetakse märkegaasi kontsentratsioonid nii väljatõmbeavas kui ka vaadeldavates ruumipunktides. Märkegaasi doseerimine lõpetatakse ning mõõdetakse märkegaasi kontsentratsiooni langust [7].

Konstantse doseerimise meetod

Konstantse doseerimise meetodid on muu hulgas keskmise kontsentratsiooni meetod ja konstantse doseerimise meetod. Konstantse doseerimise puhul saavutatakse ruumis stabiilne olukord.

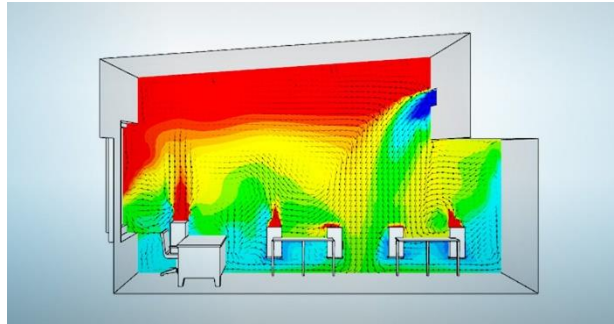
Märkegaasi manustatakse ruumipunkti või sissepuhkekanalisse konstantsel intensiivsusel kuni ruumi tasakaaluolekuni. Doseerimine algab ajahetkel $t=0$. Konstantne doseerimine tagab ühtlase kontsentratsiooni tõusu kogu ruumi ulatuses kuni tasakaalu olek on saavutatud. Märkegaasi kontsentratsiooni mõõdetakse vastavate anduritega väljatõmbeavas ja/või vaadeldavas ruumipunktis [7].

3.2.9 CFD kasutamine õhuvahetuse efektiivsuse hindamisel

Tänapäeval kasutatakse ventilatsiooni ja õhuvoolude kolmemõõtmeliseks visualiseerimiseks ja arvutamiseks CFD-d ehk arvutuslikku vedeliku dünaamikat [7], [38]. CFD simulatsiooni visualiseering on näha Joonisel 4.

Õhuvahetuse efektiivsuse uurimisel kerkib esile CFD olulisus. CFD abil on võimalik simuleerida keerukaid õhuvoolu mustreid ja saasteainete levikuid. Arvutuslik lähenemine hõlbustab õhuvoolude ja saasteainete jaotuse visualiseerimist [7].

CFD mitmekülgsus seisneb selle võimes modelleerida keerukaid stsenaariume, mille abil saab hinnata mitmete erinevate ventilatsioonilahenduste toimuvust enne füüsilist välja ehitamist. See mitte ainult ei muuda projekteerimisprotsessi sujuvamaks, vaid ka suurendab energiatõhusate lahenduste väljatöötamise potentsiaali [7].



Joonis 4. CFD simulatsioon ruumist [43]

3.3 Konvektiivne juga

Mistahes soojusülekanne toimub juhul, kui kahe keha või keha ja keskkonna vahel on temperatuurierinevus. Konvektiivne soojusülekanne toimub juhul, kui keha ja seda ümbritseva keskkonna, õhu vahel on temperatuurierinevus. Vabakonvektiivne juga keha pinna ja keskkonna vahel tekib tänu tiheduse erinevustele, mis on omakorda põhjustatud temperatuurierinevusest. Vabakonveksiooni puhul paneb õhu liikuma üleslükkejõud. Konvektiivne juga ei ole oma olemuselt laminaarne - tänu aerodünaamilistele häiringutele võib laminaarne juga muutuda turbulentseks [16], [44], [45].

$$f_b = \rho \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T \quad (3.7)$$

kus f_b – üleslükkejõud, Pa;

ρ – õhu tihedus kg/m³;

g – raskuskiirendus m/s²;

β – soojuspaisumistegur, 1/K;

ΔT – temperatuurivahe, K.

Valem 3.7 kirjeldab protsessi iseloomu, kui õhk soojeneb ja selle tihedus väheneb liigub see üleslükkejõul ülespoole ning jahenedes toimub vastupidine protsess [45].

Vabakonveksiooni poolt tekitatud õhu liikumist saab nimetada konvektiivseks joaks. Konvektiivne juga eraldub soojalt kehalt. Keha soojendab end ümbritsevat õhku, mis tänu üleslükkejõule tõuseb. Kehast eemalduses juga hajub, kuna toimub jahtumine ning üleslüke kaob [44].

Vabakonveksiooni poolt põhjustatud kiirused on madalad võrreldes sundkonveksiooniga. Seega on vabakonveksiooni puhul ka soojusülekangetegurid väiksemad. Sellest tulenevalt jääb vabakonveksioon tihtipeale suurema tähelepanuta [17], [44].

Vabakonveksiooni on oluline arvesse võtta ruumi temperatuuri- ja õhujaotuse seisukohast, kuna selle toimetel võivad inimeste hingamisteedeni jõuda erinevad saasteained, bakterid ja viirused. Suurem osa sissehingatavast õhust jõuab hingamistsooni tänu konvektiivsele kaitsekihile. Konvektiivne kaitsekiht suudab transportida nii inimkehast eralduvaid kui ka sise- ja välisõhus olevaid saasteaineid. [17], [20], [44].

3.3.1 Inimese termoregulatsioon ja metabolism

Termoregulatsioon on oluline füsioloogiline protsess, mille kaudu inimkeha hoiab oma sisetemperatuuri kitsas optimaalses vahemikus hoolimata välistest keskkonnamuutustest. Kui keha kesknärvisüsteem ja nahk tunnetavad kõrvalekallet ettenähtud temperatuurist, käivitab see reaktsiooni, kus ülekuumenemise korral toimub higistamine ning liiga külma korral värisemine. Seda reaktsiooni saab muuta käitumuslike otsustega nagu riietuse või asukoha muutusega. Kontoris töötava inimese keskmine naha pinna temperatuur on 33 °C [10].

Riietusel on mõju kliimategurite tunnetamisel. Soojusisolatsiooni suurust ehk soojustakistust mõõdetakse riietuse ühikutes, clo. 0,5 clo vastab õhukesele riietusele. 1,5 clo vastab soojale toariietusele – soe aluspesu, džemper ja ülikond [11].

Tabel 3. Riietuse pinnatemperatuur erinevate clo-de puhul inimese 70 W soojuseralduse korral, kui ruumitemperatuur oli 22 °C [46].

Clo	Pinnatemperatuur, °C
0,37	31,8
0,60	30,6
0,93	29,6
1,30	28,5
1,53	28,0

Sisekliima kontekstis defineeritakse ainevahetust kui keha energia kulutamist, mille tulemusena eraldub soojust. Metabolismi ühikuks on met. 1 met on võrdne rahulikus olekus oleva inimese ainevahetusega [11]. Metabolismi suurus on otseses sõltuvuses inimese tegevuse aktiivsusest. Istuva, laua taga töötava inimese metabolismi suurus on 1,1 met [46]. 1 met = 58,2 W soojusvool inimese keha pinna m²-lt. Täiskasvanud inimene keha pindala on 1,6 – 1,8 m². Inimesed eraldavad soojust konvektsiooni, kiirguse ja aurustumise teel [11].

Tabel 4. Täiskasvanud inimese soojuseraldus (keha pindala ligikaudu 1,7 m²) [11].

Metabolism	Konvektsioon	Kiirgus	Aurumine
1 met	35 W	35 W	40 g/h ~30 W
2 met	60 W	60 W	120 g/h ~90 W
3 met	100 W	60 W	200 g/h ~150 W

Üheks metabolismi viisiks on hingamine. Inimese keskmiseks väljahingatava õhu temperatuuriks on 34,5 °C [47]. Väljahingatava õhu temperatuuri hoidmine stabiilsena on oluline, sest see aitab reguleerida kehatemperatuuri. Kui inimene hingab külmemas keskkonnas, suureneb soojuskadu hingamisel, mis võib põhjustada kehatemperatuuri langust [10].

3.3.2 Inimese poolt tekitatav konvektiivne juga

Ligikaudu 35% inimese keha poolt toodetavast metaboolsest soojusest eraldub konvektiivselt [48]. Mugavas ja püsivas keskkonnas, kus inimese naha ja riiete

temperatuur ületab ümbritseva keskkonna temperatuuri, moodustub keha ümbritsev vabakonvektsiooni juga. Konvektiivne juga on põhjustatud inimese keha ja ümbritseva keskkonna temperatuuri erinevustest. Inimest ümbritsevat konvektiivset juga nimetatakse ka konvektiivseks kaitsekihiks [6], [16], [17].

Inimese keha ümber tekkiv konvektiivne kaitsekiht kujuneb konvektiivseks joaks pea kohal, kus juga saavutab oma tippkiiruse. Konvektiivne kaitsekiht on laminaarne ja õhuke alakeha juures ning muutub pea kõrgusel kiiremaks, turbulentsemaks ja laiemaks. Alakeha juures on konvektiivse kaitsekihi paksuseks vähem kui 5 mm ning pea kõrgusel suurusjärgus 150 mm. Kiiruse ja temperatuurijaotus on inimese puhul sarnane nagu teoreetilise vertikaalse sooja kehaga - keha lähedal on kiirus nullilähedane, 1–3 cm juures saavutab maksimumkiiruse ning hääbub taas [16]. Inimese konvektiivne juga võib ulatuda maksimaalselt 0,25-0,30 m/s. Mida vähem on inimese ja ümbritseva keskkonna vaheline temperatuuride erinevus, seda väiksem on inimese konvektiivse joa kiirus [6], [17], [49].

Konvektiivse kaitsekihi temperatuuri- ja kiirusjaotus sõltuvad inimese asendist ning iga kehaosa (jalad, käed, torso jne) poolt tekitatavast konvektiivsest joast. Püstise asendi puhul on konvektiivne kaitsekiht kiirem (0,30 m/s) ja paksem (0,15-0,20 m), kuid lamava asendi puhul on kaitsekihi kiirus ja paksus vastavalt 0,05 m/s ja 0,01 m [16], [17], [50].

Riided vähendavad konvektiivse kaitsekihi paksust ja kiirust, kuna riiete pinna temperatuur on madalam, kui naha temperatuur, kuid see on siiski kõrgem kui ümbritseva keskkonna temperatuur. Keha katvad riided tagavad ebaühtlase soojustakistuse, mis tekitab ka konvektiivses kaitsekihis ebaühtlusi. Lohvakad riided muudavad keha kuju ning see muudab konvektiivne kaitsekiht turbulentseks [6], [17]. Licina et. al järeldasid oma uurimistöös, et riietuse mõju on mõistlik arvesse võtta üksnes juhul, kui vaatluse all on saasteainete sattumine hingamistsooni [16].

Konvektiivse kaitsekihi katkestused võivad tekkida temperatuurimuutustest või füüsilistest objektidest takistustest. Konvektiivne kaitsekiht katkeb lokaalselt, kui riiete või naha temperatuur on langenud võrdseks või madalamale võrreldes ümbritseva keskkonnaga. Laua taga istuva inimese jalgade juurest kerkiv konvektiivne juga ei saa tänu lauale jõuda maksimumkiiruse 0,17 m/s, vaid jääb 0,11 m/s juurde. Inimese juga on tundlik ümbritseva keskkonna õhu temperatuuri ja kiiruse suhtes. Ruumis olevad õhuvoolud mõjutavad inimese konvektiivse kaitsekihi jaotumist. Suured õhu liikumise kiirused ruumis võivad inimese konvektiivse kaitsekihi katkestada [6], [16], [17].

Konvektiivne kaitsekiht areneb pea kohal tõusvaks konvektiivseks joaks. Antud juga mõjutab ruumis olevaid õhuvoolusid, kannab edasi soojust ja saasteaineid. Konvektiivse joa vooluhulk 0,7 m kõrgusel peast varieerub 192-322 m³/h ning selle liikumishulk on 0,0087 m⁴/s² [31]. Seisva inimese puhul on inimese pea kohale tekkiv konvektiivne juga sümmeetriline, kuid istuva inimese puhul on see ettepoole ulatuv tänu reitest ja alakehast tulenevale konvektiivsele joale [6], [16], [17].

Lohvakad riided vähendavad pea kohale areneva konvektiivse joa kiirust, kuid suurendavad joa vooluhulka 24% võrreldes liibuva riietusega. Liibuv riietus pea kohale arenevat konvektiivset juga ei mõjuta. Juuksed aitavad kaasa konvektiivse joa segunemisele, mis suurendab joa vooluhulka 15% võrra võrreldes kiilaspäisusega [17], [30].

3.4 Õhu liikumishulk

Joa liikumishulk on õhu kiiruse ja õhuvooluhulga korrutis. Liikumishulk annab ülevaate avast väljuva joa karakteristikast. Liikumishulk põhineb Newtoni teisel seadusel. Kadudeta, ideaalses süsteemis on sundkonvektsioonist põhjustatud jugadel liikumishulk teoreetiliselt igas joa ristlõikes konstantne. Antud printsiip on oluline mõistmaks, kuidas joad arenevad, kui need avast eemalduvad [51]. Liikumishulga arvutamise põhimõtted on välja toodud Joonisel 5 ja valemis 3.8.

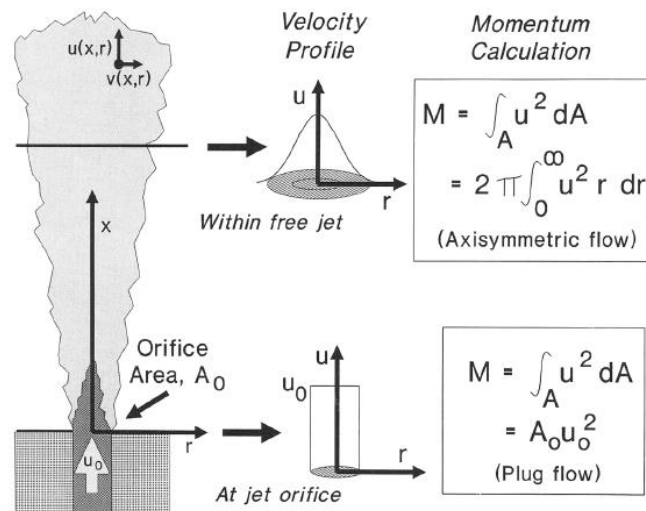
Liikumishulk on leitav valemist:

$$M = Q \cdot v_j \quad (3.8)$$

kus M – liikumishulk;

Q – vooluhulk, m³/s;

v_j – joa kiirus, m/s.



Joonis 5. Õhujoa liikumishulga arvutuse põhimõtted [51]

3.5 Alternatiivsed lahendused inimese konvektiivse joa imiteerimiseks

Õhuvahetuse hindamiseks ja inimese poolt hõivatud elu- ja tööruumide ning sõiduvahendite salongide ventilatsiooni parendamiseks, on loodud inimese konvektiivset juga jäljendavad termilised mannekeenid. Konvektiivsed joad muudavad ruumis olevaid õhujugasid ning omavad seetõttu õhuvahetuse efektiivsuse seisukohast olulist rolli [13]. Termiliste mannekeenide kasutamine õhujaotussüsteemide hindamisel aitab luua kontrollitud ning reaalsuslähedase olukorra. See on vahend uurimaks, kuidas inimese konvektiivne juga mõjutab õhu- ja temperatuurijaotust ruumis. Tänapäevased termilised mannekeenid on osa interdistsiplinaarsest süsteemist, kus on põimunud füsioloogia, inseneria ja keskkonnateadused [22], [30].

3.5.1 Termiliste mannekeenide areng

Esimene termiline mannekeen loodi USA armee poolt 1940ndatel. Esialgsed mudelid olid lihtsad, vasest, ühest osast koosnevad kütteleendid, mis jäljendasid inimese soojusväljastust. Neid kasutati peamiselt sõdurite riietuse arendamiseks, mis oli mõeldud II maailmasõja ekstreemseteks tingimusteks [21].

1960ndateks ja 1970ndateks koosnesid termilised mannekeenid mitmest segmendist. Mitmeosaliste termiliste mannekeenide kasutamisega sai teha detailsemaid uuringuid, kuidas toimub soojusvahetus inimese keha ja teda ümbritseva keskkonna vahel. Nende kasutuselevõttuga hakati rohkem tähelepanu pöörama sisekliimale ja soojuslikule

mugavusele. Selle tagajärjel sai toimuda innovatsioon sisekliima tagamise süsteemides [21].

Arvutite laialdane kasutuselevõtt 20. sajandi lõpus avaldas termiliste mannekeenide arengule märkimisväärset mõju. Arvuti poolt kontrollitud süsteemide abil on võimalik üksikasjalikult kontrollida termilise mannekeeni kehaosade soojusväljastusi. Samasse aega jääb hingava mannekeeni kasutuselevõtt. See on viinud täieliku inimkeha termoregulatsiooni jäljendamiseni [21].

Tänapäevased termilised mannekeenid on varustatud mitmete eraldi kontrollitavate kehaosade ehk segmentidega. Lisaks hingavatele termilistele mannekeenidele on loodud higistavad ning liikuvad mannekeenid, et oleks võimalik imiteerida erinevaid poose ja tegevusi. Need mannekeenid suudavad täpselt jäljendada inimese pinnatemperatuuri ja soojusväljastust, mis annab aluse hindamiseks inimese soojuslikku mugavust, riietuse sobilikkust ning soojusvahetust ümbritseva keskkonnaga [22], [30].

Termiliste mannekeenide kasutamine on laienenud rõivadisaini ja sisekliima optimeerimise valdkondadest kaugemale. Tänapäeval kasutatakse termilisi mannekeene auto- ja lennukitööstuses, kus mannekeenide abil hinnatakse sõiduki kütte- ja jahutussüsteemide efektiivsust. Termiliste mannekeenide integreerimine CFD mudelitega annab detailse ülevaate vaadeldava ruumi õhu- ja temperatuurijaotusest [22], [30].

3.5.2 Termiliste mannekeenide kasutamine õhuvahetuse efektiivsuse hindamisel

Termilisi mannekeene ei kasutata mitte ainult õhuvahetuse efektiivsuse hindamiseks, vaid ka energiaefektiivsuse ja inimese tervise aspekte hindamiseks [7].

Termilised mannekeenid aitavad mõista, kuidas mõjutavad erinevad õhujaotuse lahendused inimeste soojuslikku mugavust. Inimese soojuslikku väljastust simuleerides ja ruumis õhu- ja temperatuurijaotust analüüsides, on võimalik teha ettepanekuid kütte-, jahutus- ja/või ventilatsioonisüsteemide optimeerimiseks. Hingavate termiliste mannekeenide kasutamine annab võimaluse uurida, kuidas ventilatsioonisüsteem mõjutab saasteainete, sealhulgas viiruseosakete sattumist inimese hingamisteedesse [7], [22], [30].

3.5.3 Termilise mannekeeni geometria

Termiliste mannekeenide geometria mõjutab otseselt inimese soojusväljastuse simuleerimist. Uuringutes on kasutatud erineva keerukusega geometriaga

mannekeene, alustades lihtsatest silindritest kuni detailiseeritud, inimese sarnaste, mannekeenideni [22], [30].

Termilise mannekeeni geomeetria mõjutab inimese termilise joo omadusi ja tekke simuleerimist. Uuringutest selgub, et lihtsad geomeetrilised kujundid nagu silindrid või risttahukad ei suuda täpselt imiteerida inimkeha ja seda ümbritseva keskkonna vahel toimuvat ning see võib viia ebatäpse konvektiivse joo jäljendamiseni [22], [30]. Detailiseeritud mannekeenid, mis jäljendavad inimese anatoomiat, annavad täpsema tulemuse soojusliku mugavuse, õhu kvaliteedi ja saasteainete jaotuse osas [7].

Detailiseeritud mannekeenid mõjutavad enda ümber olevaid õhuvoolusid, mis on olulised õhujaotussüsteemide efektiivsuse hindamisel. Mannekeenid, millel on liigendatud jäsemed ja kehaosad, võimaldavad uurida, kuidas erinevad poosid ja tegevused mõjutavad õhujaotust ning saasteainetega kokkupuudet. Lihtsustatud mannekeenide kasutamisel võivad potentsiaalselt kriitilised tegurid jääda tähelepanuta ning seeläbi saab mõjutatud sisekliima kvaliteet ja inimeste mugavus [7].

Lihtsustatud termilise mannekeeni kasutamisel ilmnevad lahknevused EVSN 14240:2004 [9] ja mitmete avaldatud uurimistööde vahel. EVSN 14240:2004 puhul, mille järgi termilised mannekeenid ehitatud on, nimetakse seda „jahutuskoormuse simulaatoriks“ ning ei esine viidet, et tegu võiks olla inimese konvektiivset juga imiteeriva mannekeeniga. Sama standardi alusel ehitatud ning jahutustalade all katsetatud termiline mannekeen ei tekitanud vertikaalselt üles tõusvat konvektiivset juga, vaid hajus läbi külgedel paiknevate avade horisontaalsuunas. Sellisel juhul toimib lihtsustatud termiline mannekeen kui takistus õhujugade levikul [25]. Samal ajal viitab REHVA juhendmaterjal visuaalselt sarnasele katseseadmele kui inimest jäljendavale simulaatorile [7].

4 Töö metoodika

Töö metoodika peatükis antakse ülevaade katseruumist, mõõtmispunktide valikust, katseseadmetest ning katseseeriade olemusest.

Mõõtmiste eesmärk on tuvastada, kas portatiivse ventilaatori abil on võimalik jäljendada inimese konvektiivset juga ruumi õhuvahetuse hindamiseks. Uurimistöö mõõtmiste esimeses osas mõõdeti esmalt nii portatiivsete ventilaatorite kui ka termilise mannekeeni poolt tekitatava konvektiivse joa kiirusväljad. Töö teises osas uuriti õhuvahetuse efektiivsust CO₂ märkegaasiga nii konstantse kui ka kontsentratsiooni languse meetodil neljal (tühi ruum, portatiivse ventilaatoriga, termilise mannekeeniga, inimesega) erineval juhul.

4.1 Katsete läbiviimine

4.1.1 Katseruumi kirjeldus

Nii kiirusväljade kui ka ruumi õhuvahetuse hindamise katsed viidi läbi TalTechi Ehituse Mäemajas, Ehitusfüüsika ja sisekliima laboris. Ruumil puuduvad välisõhuga kontaktis olevad tarandid. Ruumi mõõtmed on 5,31 m x 8,65 m. Ruumi kõrgus on 4,03 m ning ripplae kõrgus on 3,30 m. Ruumi pindala on 45,5 m² ning kubatuur 183,4 m³. Õhuvahetuse efektiivsuse hindamiseks oli ruumi paigutatud 12 lauda, mis imiteerisid klassiruumi paigutust.

Ruumis on mehaaniline sissepuhke-väljatõmbe ventilatsioon. Ruumi kütmine toimus õhkküttega. Ruumi õhuvahetuse efektiivsuse mõõtmistel olid õhujaotajatena kasutusel dүүstorud kummaski ruumi seinas. Väljatõmbeavad paiknesid dүүstorude kohal. Ventilatsiooni õhuvooluhulk oli +200/-200 l/s. Sissepuhke õhu temperatuur oli +19,5 ± 0,5 °C. Imitatsioonivahendite õhu liikumise kiiruste mõõtmisel oli ventilatsioonisüsteem peatatud. Ruumi õhutemperatuur oli ligikaudu +21 °C.

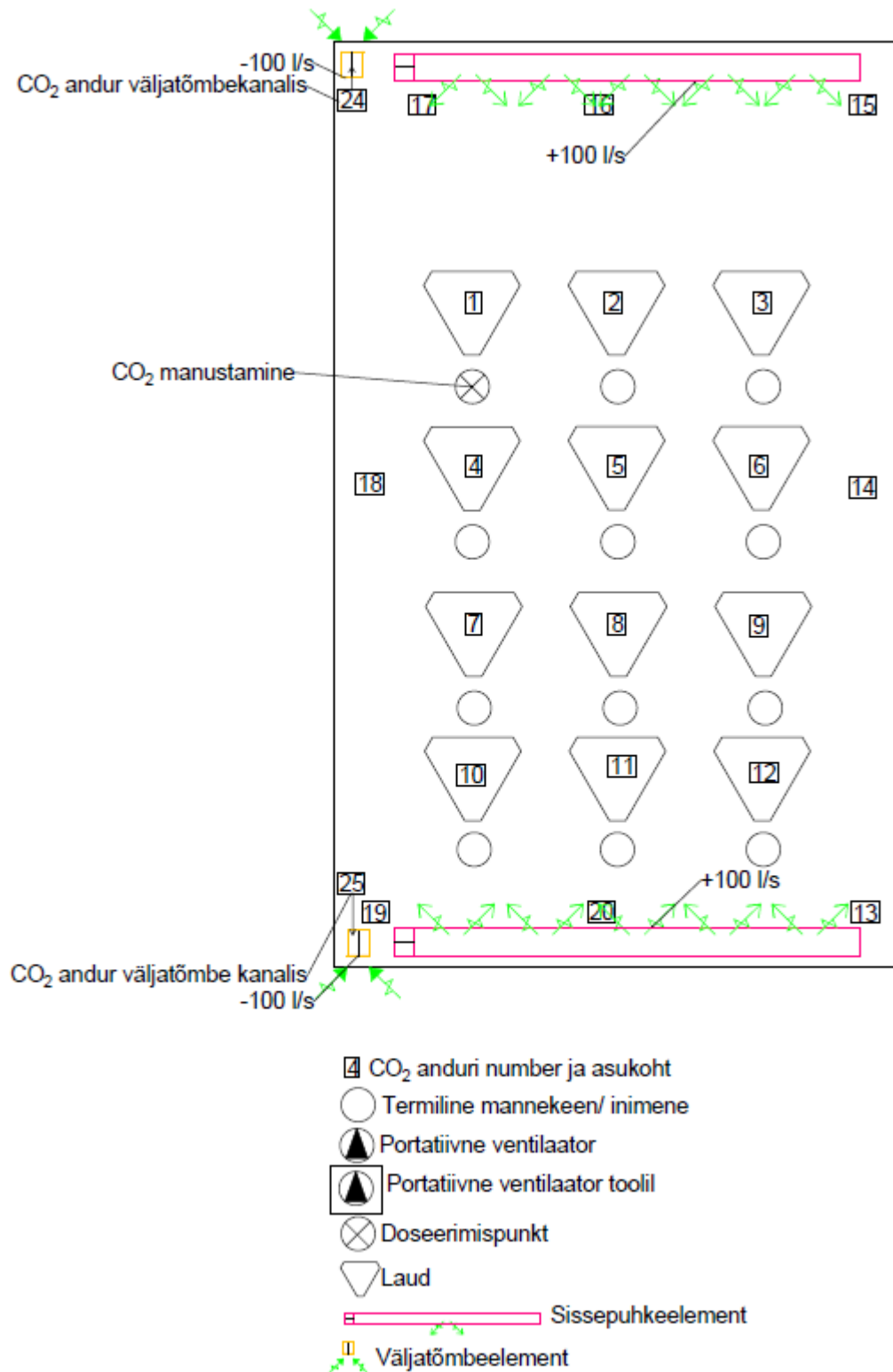
Õhujaotajatena kasutati 200 mm läbimõõduga ning neis oli 120° sektoris kuus rida dүүse. Avatud on neist kolm keskmist rida. Dүүstorude teibitust on näha Jooniselt 6. Teipimisel on lähtunud sellest, et õhk liibuks mööda seina põrandale ja sealt edasi ruumi keskele, kus õhujoad kohtuvad ning liiguvad konvektiivsete soojusvoolude abil ruumi ülaosasse. Tavapäraselt suletakse dүүside avasid seestpoolt. Antud juhul on dүүsid suletud väljast, kuna visuaalne pool ei ole katses oluline ning see lihtsustas avade sulgemise protsessi. Dүүside teipimisel on lähtunud sellest, et dүүstorus kaudu ei liiguks

õhk liiga laiali ja oleks tagatud vajaminev rõhk. Düüsid on otstest suletud selleks, et rõhk ja kiirused oleksid ühtlased.



Joonis 6. 120° sektoriga düüstoru, millel on 6 düüsi rida.

Kiirusväljade mõõtmised viidi läbi olukorras, kus katsekeha oli paigutatud tühja ruumi keskosasse. Mõõtmiste ajaks oli mehaaniline ventilatsioon peatatud, et vältida ventilatsiooniõhust põhjustatud häiringuid.

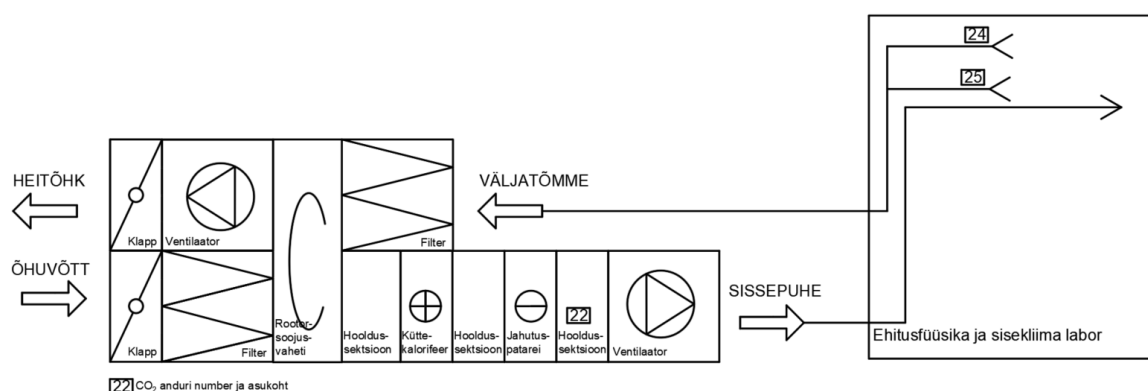


Joonis 7. Labori plaan, tingmärgid vastavalt stsenaariumile.

Laes olev jahutustala ning ripplakke paigaldatud õhujaoaja ei olnud antud magistritöö raames läbiviidud katseseeriates kasutusel.

4.1.2 Ventilatsiooniseade

Ruumi õhuvahetus on tagatud läbi laborit teenindava rootorsoojusvahetiga sissepuhke- väljatõmbe ventilatsiooniseadme. Rootorsoojusvahetiga ventilatsiooniagregaatides toimub vähene sissepuhke ja väljatõmbe õhuvoolude segunemine tänu sissepuhke- ja väljatõmbeseksioonide rõhuerinevustele ja ebatihedustele ühenduskohtades. Eelmainitu tagajärjel tõuseb CO₂ kontsentratsioon sissepuhkes välisõhuga võrreldes. Segunemise mõju arvestamiseks võeti algparameetriks CO₂ sisaldus sissepuhkekanalis enne katsetustega alustamist.



Joonis 8. Ventilatsiooniseadme põhimõtteline skeem ning sissepuhkes ja väljatõmbeavades olevate andurite asukohad.

4.1.3 Katseinstrumendid

Portatiivne ventilaator

Vabasoojusallika poolt tekitatava konvektiivse joa imiteerimise võimalikkuse uurimiseks kasutati portatiivseid ventilaatoreid. Katsetes kasutatud portatiivne ventilaator on nähtav Joonisel 9. Ventilaatori tehnilised andmed on välja toodud Tabelis 5.

Tabel 5. Portatiivse ventilaatori tehnilised näitajad

Mudel	Sisend	Väljund	Katsete ajal kasutatud kiirusaste
M92	5 V/1,0 A	4,5 W (max)	1/5



Joonis 9. Portatiivne ventilaator

Termiline mannekeen

Magistritöö raames uuritud teaduskirjandusest ei ole kajastatud EVSN 14240:2004 järgi ehitatud termiliste mannekeenide konvektiivse joa poolt tekitatud õhu liikumiskiiruseid. Termilise mannekeeni soojusallikaks olid hõõglambid. Termilise mannekeeni poolt tekitatava konvektiivse joa kiirusvälja mõõtmise viidi läbi juhul, kui mannekeeni soojusväljastus oli 80 W. Õhuvahetuse efektiivsuse katseseerias tehti katsed läbi nii 180 W kui ka 80 W soojusväljastusega mannekeenidega. 80 W mannekeenide puhul mõõdeti konvektiivseid kiirusvälju nii avatud kui ka suletud avadega mannekeenide puhul. Lisaks mõõdeti ära nii 180 W kui ka 80 W soojusväljastusega termilise mannekeeni avadest väljuva õhu temperatuur ning katsekehade pinnatemperatuurid. Ennekõike keskenduti katsetele, kus mannekeenide soojusväljastus oli 80 W, sest see on sarnane inimese ilmsele soojusväljastusele. Kasutatud termiline mannekeen on nähtav Joonisel 10.



Joonis 10. EVSN 14240:2004 järgi ehitatud termiline mannekeen

CO₂ allikas

Märkegaasina kasutati CO₂, mida manustati ruumi balloonest. Doseerimine toimus läbi reduktori. Ventili otsa paigaldati teip, et vähendada väljuva gaasi kiirust. Gaas suunati termilise mannekeeni sisse, kust see levis ruumi läbi mannekeenis olevate avade. CO₂ manustamiseks vajalikud seadmed on nähtavad Joonisel 11.



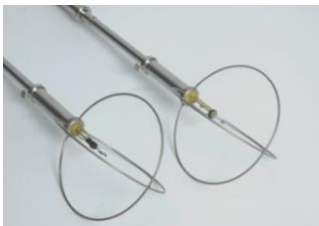



Joonis 11. Fotel vasakult paremale: termiline mannekeen, reductor, CO₂ balloon

4.1.4 Mõõteseadmed

Katsete käigus mõõdeti õhu liikumise kiirust, temperatuuri ning CO₂ kontsentratsiooni. Katsete läbiviimisel kasutatud mõõteseadmed on välja toodud Tabelis 6.

Tabel 6. Mõõteseadmed

Mõõteseade	Mõõtepiirkond	Mõõtetäpsus	Pilt
Õhukvaliteedi monitor-andur Onset HOBO MX1102 (CO ₂ kontsentratsioon, õhu niiskuse, õhu temperatuur)	0...5000 ppm CO ₂ ; 1...90% RH; 0...+50 °C	±50 ppm CO ₂ ; ±2% RH; ±0,21 °C	
Kaal (mass) KERN FKB	2...65 000 g	±2 g	
Anemomeeter ComfortSense 54T35 ning Dantec soojusliku mugavuse mõõteseade (õhu liikumise kiirus, õhu temperatuur)	-20...70 °C; 0,05...10 m/s	±0,5 °C; ±0,02 m/s	
Termokaamera FLIR E65 (pindade temperatuur)	-20...100 °C	±2 °C	

4.2 Kiirusväljade mõõtmine

Kiirusväljade mõõtmise eesmärgiks oli tuvastada portatiivse ventilaatori kiirusväli ning võrrelda seda kirjandusest leitava inimese ja realselt mõõdetud termilise mannekeeni konvektiivse joa kiirusväljaga. Termiliste mannekeenide kiirusvälju mõõdeti kolmel

erineval juhul, et saavutada parem arusaam, kuidas mannekeenis olevad avad ruumi õhuvahetuse efektiivsust mõjutada võivad.

Tulemuste visualiseerimiseks kasutati programmeerimiskeeles Python tarkvarateeke scipy ja matplotlib. Kiirusvälja interpoleeritakse üle 2-dimensioonilise 50x50 võrgustiku kasutades lineaarset interpoleerimist. Interpoleerimiseks kasutatakse scipy teeki ning griddata funktsiooni. Lineaarseks interpoleerimiseks konstrueeritakse sirged defineeritud andmepunktide vahele. Puuduolevad andmepunktid arvutatakse konstrueeritavatele sirgetele. Tulemuste visualiseerimiseks kasutatud kood on välja toodud töö lisades. Kasutatud skript on välja toodud Lisas 1.

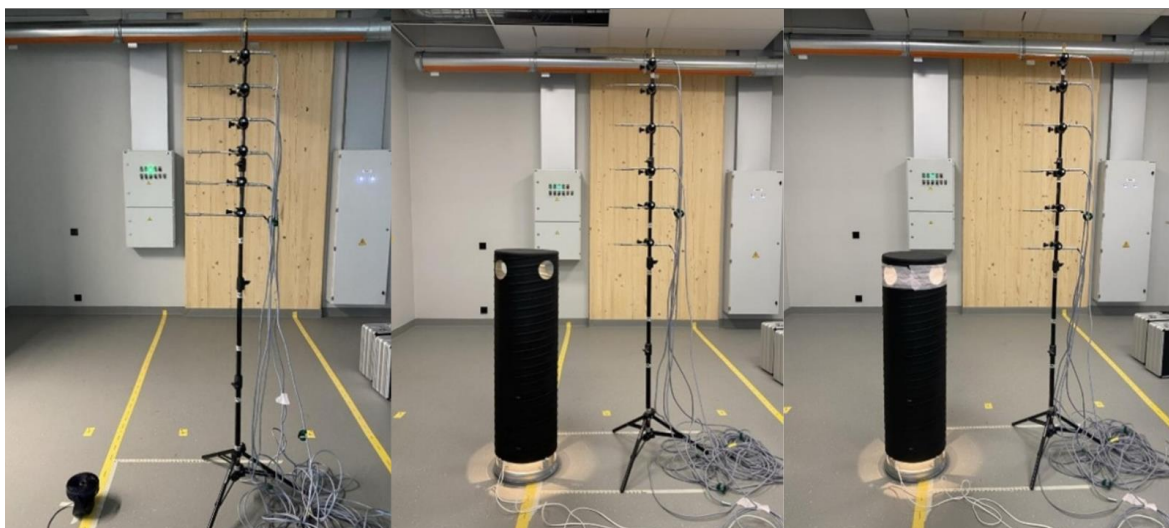
Interpoleeritud ja defineeritud väärtused kuvatakse graafikule, mis on tähistatud vastava värviskaalaga. Termiliste mannekeenide puhul tähistab tumeroheline värv madalamat kiirust ning punane suuremat kiirust. Ventilaatori puhul tähistavad sinised toonid madalamat kiirust ning kollane värv suuremat kiirust.

4.2.1 Katseinstrumendid ja mõõtmispunktid

Konvektiivse joa poolt põhjustatud õhu liikumise kiiruse mõõtmisi teostati tühjas ruumis ning olukorras, kus mehaaniline ventilatsioon on peatatud. Mõõtmisi teostati anemomeetritega ning Dantec ComfortSense soojusliku mugavuse mõõteseadmega. Mõõtmisi illustreerib Joonis 12. Tabelis 7 on välja toodud konvektiivse joa poolt põhjustatud õhu liikumise kiiruse mõõtmiste kirjeldused.

Tabel 7. Konvektiivse joa poolt põhjustatud õhu liikumise kiiruse mõõtmiste kirjeldus

Mõõtmise nr	Katseseade	Kirjeldus
1	Portatiivne ventilaator, 1. tase	Ventilatsioon peatatud. Mõõtmise intervall 0,05 sekundit. Ühe mõõtepunkti mõõtmise pikkus 3 minutit. Mõõtmissamm horisontaalsuunas 0,02 m, kokku 0,5 m. Mõõtmiskõrgused vertikaaltasandil 0,15m, 0,25m, 0,5m, 0,75m, 1,0m, 1,25m, 1,375m, 1,5m, 1,675m, 1,75m, ja 2,0m.
2	Termiline mannekeen 80 W, avad lahti ja paralleelselt anemomeetriga	Ventilatsioon peatatud. Mõõtmise intervall 0,05 sekundit. Ühe mõõtepunkti mõõtmise pikkus 1 minutit. Mõõtmissamm horisontaalsuunas 0,02 m, kokku 0,5 m. Mõõtmiskõrgused vertikaaltasandil 1,15m, 1,35m, 1,55m, 1,75m 1,95m ja 2,05m.
3	Termiline mannekeen 80 W, avad lahti ja risti anemomeetriga	
4	Termiline mannekeen 80 W, avad suletud	



Joonis 12. Kiirusväljade mõõtmised erinevate katseseadmetega. Vasakult paremale: portatiivne ventilaator, 80W soojusväljastusega termiline mannekeen avatud avadega, 80 W soojusväljastusega termiline mannekeen suletud avadega.

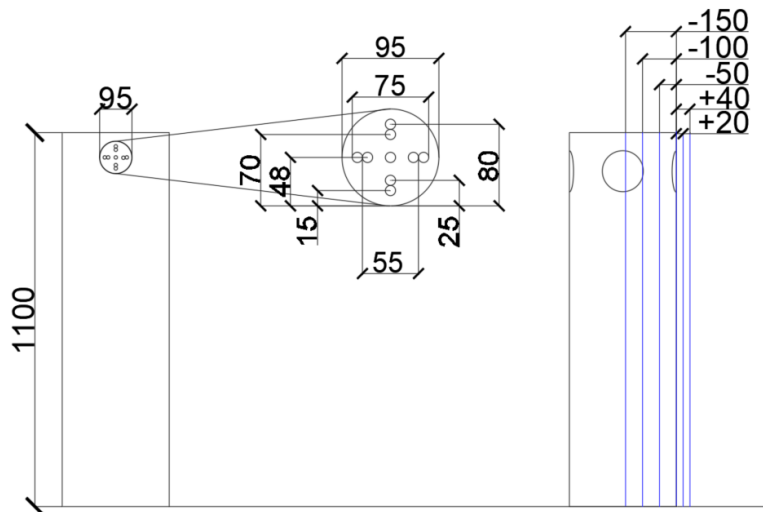
4.3 Termilise mannekeeni pinnatemperatuur ning sellest väljuva õhutemperatuur

Uurimaks, kuidas erineb termilise mannekeeni avadest väljuv õhk inimese väljahingatava õhu temperatuurist, viidi läbi temperatuurimõõtmised nii 80 W kui ka 180 W soojusväljastusega termiliste mannekeenide puhul. Temperatuuri mõõtmise teostati tühjas ruumis ning olukorras, kus ventilatsioon on peatatud. Mõõtmise teostati anemomeetritega koos Dantec ComfortSense soojusliku mugavuse mõõteseadmega. Termilise mannekeeni mõõteskeemi ja illustreerivat fotot on näha Joonistel 13 ja 14. Tabelis 8 on kirjeldatud termilise mannekeeni avast väljuva õhu temperatuuri mõõtmise.

Termilise mannekeeni avadest väljuva õhu temperatuuriväljade interpoleerimiseks kasutati analoogset koodi, mida kiirusväljade mõõtmiste puhulgi. Interpoleeritud ja defineeritud väärtused kuvatakse graafikule, mis on tähistatud vastava värviskaalaga. Sinine värv tähistab madalamat kiirust ning punane suuremat kiirust. Temperatuuriväljade interpoleerimiseks kasutatud skript on välja toodud Lisas 1.

Tabel 8. Termilisest mannekeenist väljuva õhu temperatuuri mõõtmiste kirjeldus

Mõõtmise nr	Katseseade	Kirjeldus
1	Termiline mannekeen 80 W soojusväljastusega	Ventilatsioon peatatud. Mõõtmise intervall 0,05 sekundit. Ühe mõõtepunkti mõõtmise pikkus 1 minut. Mõõtmisamm horisontaalsuunas termilise mannekeeni sees on 0,05 m ning termilisest mannekeenist väljaspool 0,02m, kokku 0,19 m. Mõõtmispunktid on välja toodud Joonisel 13.
2	Termiline mannekeen 180 W soojusväljastusega	



Joonis 13. Termilise mannekeeni avast väljuva õhu temperatuuri mõõtmis skeem. Vasakul on mõõtmispunktid ava tasapinnas, paremal on sinise kriipsjoonega märgitud mõõtmistasapinnad võrrelduna ava tasapinnaga. „-“ tähistab sügavust mannekeeni sisse ning „+“ kaugust mannekeenist.



Joonis 14. Termilise mannekeeni avast väljuva õhu temperatuuri mõõtmine.

Termilise mannekeeni pinnatemperatuuri mõõdeti termokaamera abil. Temperatuuri mõõtmised teostati eestvaates, kui termilise mannekeeni ava oli paralleelne termokaameraga, kui termiline mannekeen oli 45° kaamera suhtes pööratud ning pealtvaates.

4.4 Õhuvahetuse efektiivsuse mõõtmine

Õhuvahetuse efektiivsuse hindamiseks viidi läbi CO₂ märkegaasiga läbi järgmiste stsenaariumite hindamiseks

- Tühi ruum;
- 12 termilist mannekeeni 180 W avatud avadega;
- 12 termilist mannekeeni 80 W avatud avadega;
- 12 termilist mannekeeni 80 W suletud avadega;
- 11 portatiivset ventilaatorit;
- 6 portatiivset ventilaatorit;
- 11 inimest.

Kuue ventilaatori kasutamiseks püstitati hüpotees, et tänu oma suurele algkiirusele ja märkimisväärselt laiemale joale võrreldes termiliste mannekeenidega, annab see sama tulemuse, mis 12 termilist mannekeeni.

Suletud avadega termiliste mannekeenide kasutamiseks püstitati hüpotees, et suletud avadega mannekeen käitub inimesega sarnasemalt.

4.4.1 Metoodika

Enne mõõtmistega alustamist kalibreeriti CO₂ mõõteseadmed ning asetati need vastavalt oma kohtadele (vt Joonis 7). CO₂ mõõteseadmed asusid 1,1 m kõrgusel põrandapinnast ehk istuva inimese hingamistsoonis. Märkegaasina kasutati CO₂. Katsekehad paigutati vastavalt stsenaariumile omale kohale. Katse alguses avati CO₂ ballooni külge paigaldatud reductor ning esimesed 40 minutit toimus konstantne CO₂ doseerimine ruumi. 40ndal minutil sulgeti reductor ja CO₂ ballooni ventiil ning 20 minutit toimus kontsentratsiooni langus.

CO₂ kasutamisel märkegaasina on lugemistest vaja maha lahutada baaskontsentratsioon. Enne kaitse algust mõõdeti CO₂ kontsentratsiooni sissepuhkekanalis. CO₂ baaskontsentratsiooniks võeti mõõdetud poole tunni keskmine väärtus 420 ppm. Ventilatsiooniagregaati asetatud CO₂ anduri asukoht on näidatud Joonisel 8.

Tulemuste visualiseerimiseks kasutati programmeerimiskeeles Python tarkvarateeke scipy ja matplotlib. Analüüsiks kasutati lineaarset interpoleerimist üle terve ruumi kasutades scipy teegist funktsiooni griddata. Interpoleerimises luuakse ühtne võrgustik, antud juhul 100 x 100, mis katab x-teljel ühikud 0-5310 ja y-teljel ühikud 0-8650, mis on ühtlasi ruumi mõõtmel. Välja arvatud õhuvahetuse efektiivsuse parameetritel on teada x- ja y-koordinaat ning neid on kasutatud referentsina. Lineaarse interpoleerimine hõlmab endas puuduvate väärtuse välja arvutamist kolmnurkade meetodil, kus puuduvolevad punktid arvutatakse välja luues kolmnurgad lähimatest teadaolevatest andmetest. Puuduvad andmed arvutatakse välja loodud kolmnurkade lineaarsetest kaugustest. See meetod eeldab, et teadaolevate andmepunktide vahet saab kujutleda sirgetena, mistõttu toimub ka interpoleerimine sujuvalt mööda loodud võrgustikku. Interpoleeritud andmepunktid visualiseeritakse graafikul, mille taustale on asetatud ruumi plaan. Visualiseerimiseks kasutatud skript on välja toodud Lisas 2.

Konstantse doseerimise meetod

Saasteainete eemaldamise efektiivsust indikeerivate parameetrite leidmisel kasutati konstantse doseerimise meetodit. Konstantse kontsentratsiooni meetodiga leiti

lokaalsed õhu kvaliteedi indeksid ja saasteainete eemaldamise efektiivsus. Nende arvutamisel lähtuti REHVA juhendmaterjalist „Ventilation Effectiveness“. Konstantse doseerimine ajaliseks kestuse määramisel tuleks lähtuda kolmest ajakonstandist. Kolme ajakonstandi jooksul suudab teoreetiliselt süsteem muutustele reageerida ja saavutada stabiilne olukord.

Ruumi saasteainete eemaldamise efektiivsus on arvatud valemiga 3.2 ning lokaalsed õhukvaliteedi indeksid on arvatud valemiga 3.3.

Kontsentratsiooni languse meetod

Õhuvahetust indikeerivate parameetrite leidmisel kasutati kontsentratsiooni languse meetodit. Kontsentratsiooni languse meetodiga leiti õhuvahetus efektiivsus ja lokaalne õhuvahetuse efektiivsus. Lokaalsete õhu keskmiste eluigade ja ruumi üldise õhueva arutamisel lähtuti REHVA juhendmaterjalist tabelarvutusena [7]. Kontsentratsiooni langus kestis 20 minutit.

Tulemuste analüüsimiseks pandi CO₂ langus logaritmilisel skaalal sõltuvusse katseperioodi pikkusega. Ruumi õhuvahetuse kordarv leiti trendijoonel lisamisel kontsentratsiooni languse võrrandi e-astendaja järgi.

Edasi leiti kõvera all olev pindala ning kaalutud keskmine pindala. Nende pindalade suhtest on leitav vaadeldava ruumipunkti õhu keskmine eluiga.

$$\bar{\tau}_p = \int_0^{\infty} \left(\frac{c_p(t)}{c_2(0)} \right) \cdot dt \quad (4.1)$$

Ruumi keskmine eluiga on leitud valemist:

$$\langle \bar{\tau} \rangle = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot c_e \cdot dt}{\int_0^{\infty} c_e \cdot dt} = \frac{1}{\tau_n} \int_0^{\infty} t \cdot \left(\frac{c_e(t)}{c_e(0)} \right) \cdot dt \quad (4.2)$$

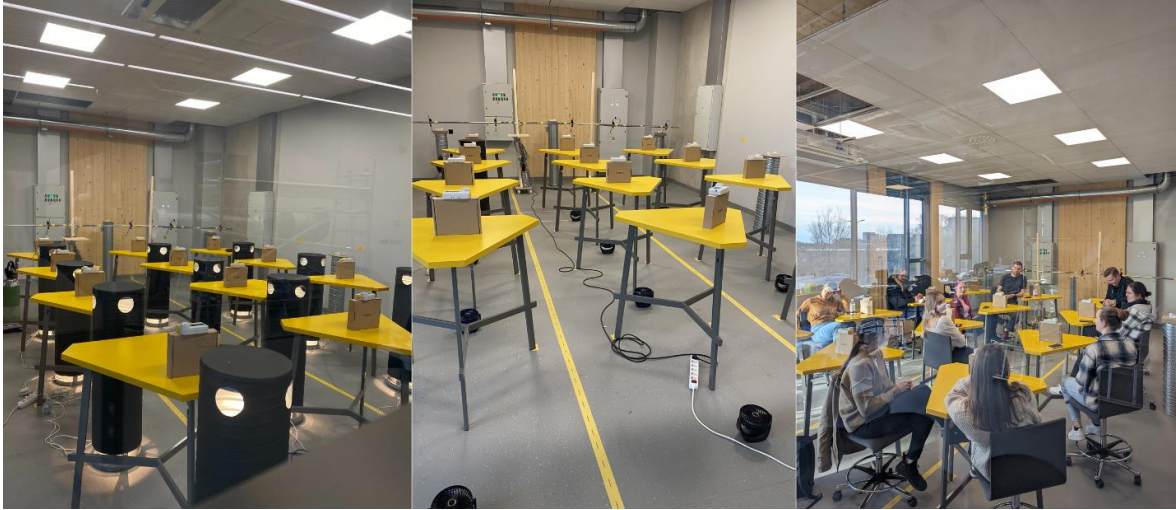
Ruumi nominaalne ajakonstant on leitud valemist 3.1, ruumi õhuvahetuse efektiivsus on arvatud valemiga 3.4 ning lokaalne õhuvahetuse efektiivsus on arvatud valemiga 3.5.

4.4.2 Katseseeria kirjeldus

Tabelis 9 on toodud CO₂ mõõtmiste kirjeldused koos katsekehadega. Katsete läbiviimise juures oli ventilatsiooni õhuvooluhulk läbivalt sama, +/- 200 l/s. Konstantne doseerimine kestis 40 minutit, edasi toimus 20 minutit kontsentratsiooni langus. Erinevaid stsenaariumeid illustreerivad Joonised 15 ja 16.

Tabel 9. CO₂ mõõtmiste kirjeldus.

Mõõtmise nr	Katseseade	Kirjeldus
1	-	CO ₂ doseerimine toimus mitte vooluvõrku ühendatud termilisse mannekeeni.
2	Termiline mannekeen 180 W, avad lahti, 12 tükki	CO ₂ doseerimine toimus termilisse 180 W soojusväljastusega mannekeeni. Katset korraldati samal tingimusel kolm korda.
3	Termiline mannekeen 80 W, avad lahti, 12 tükki	CO ₂ doseerimine toimus 80 W soojusväljastusega termilisse mannekeeni.
4	Termiline mannekeen 80 W, avad suletud, 12 tükki	
5	Portatiivne ventilaator, põrandal, 11 tükki	CO ₂ doseerimine toimus mitte vooluvõrku ühendatud termilisse mannekeeni.
6	Portatiivne ventilaator, põrandal, 6 tükki	Ventilaator töötas tasemel 1.
7	Portatiivne ventilaator, toolil, 11 tükki	
8	Portatiivne ventilaator, toolil, 6 tükki	
9	Portatiivne ventilaator, laudadeta, põrandal, 11 tükki	
10	Portatiivne ventilaator, laudadeta, põrandal, 6 tükki	
11	Inimene, 11 indiviidi	CO ₂ doseerimine toimus mitte vooluvõrku ühendatud termilisse mannekeeni.



Joonis 15. CO₂ mõõtmine vasakult paremale: 180 W soojusväljastusega termiliste mannekeenidega, 11 portatiivse ventilaatoriga, 11 inimesega.



Joonis 16. CO₂ mõõtmine vasakult paremale: 11 portatiivse ventilaatoriga toolil, 11 portatiivse ventilaatoriga, 11 portatiivse ventilaatoriga põranda.

5 Tulemused ja analüüs

Käesolev peatükk on jaotatud kolmeks. Esimeses alapeatükis analüüsitakse termiliste mannekeenide avast väljuva õhu temperatuuri, nende pinnatemperatuuri ja liikumishulka. Teises alapeatükis analüüsitakse termiliste mannekeenide ja portatiivsete ventilaatorite poolt tekitatavaid kiirusväljasid. Kolmandas alapeatükis hinnatakse õhuvahetuse efektiivsust erinevate kateestsenaariumite puhul. Samuti analüüsitakse portatiivsete ventilaatorite sobivust asendamaks termilisi mannekeene.

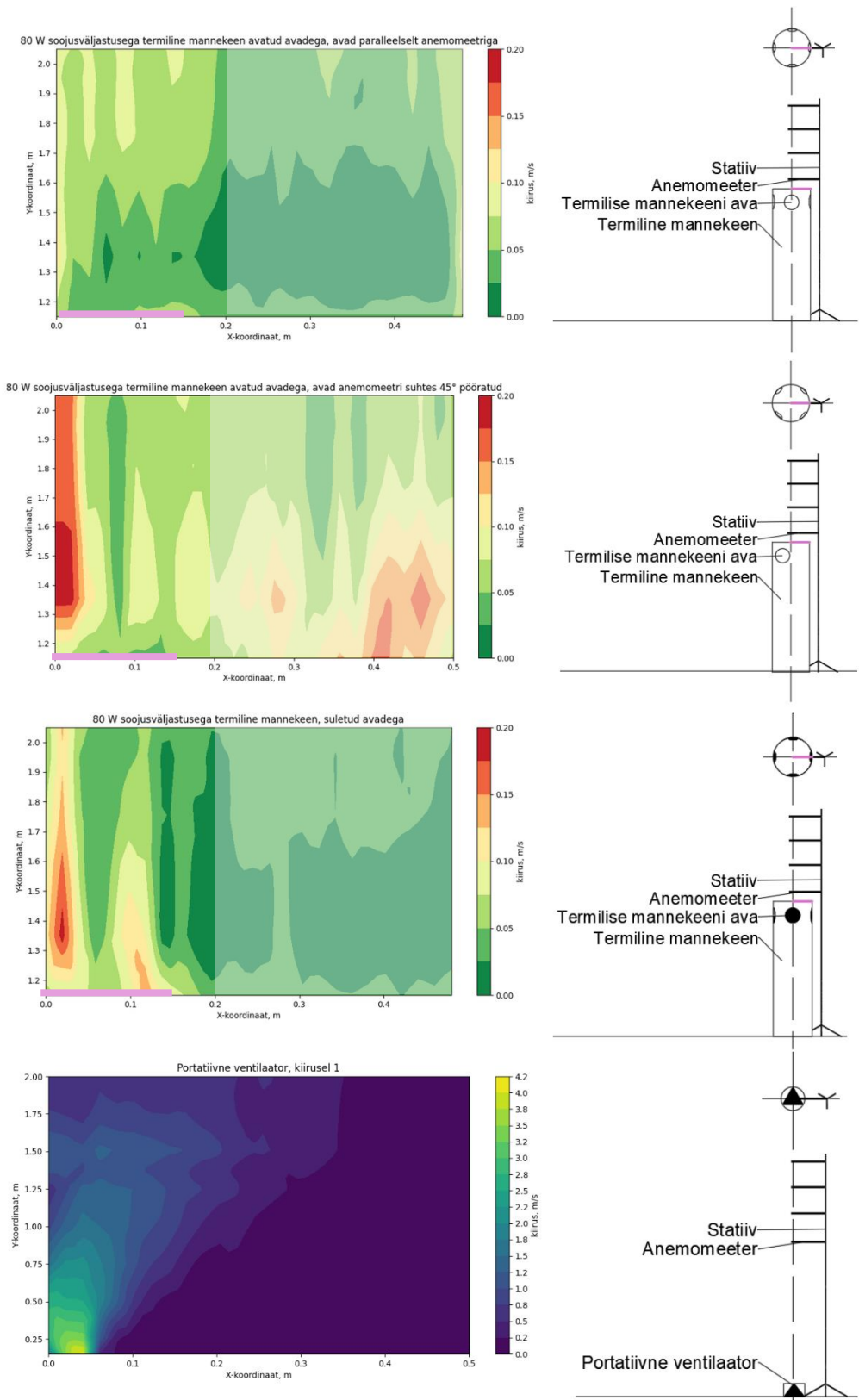
5.1 Õhu liikumise kiirusväljad

Termiliste mannekeenide ja portatiivse ventilaatori poolt tekitatud õhu liikumise on visualiseeritud Joonisel 17. Graafikud on 2D formaadis, kus x-teljel on kaugus mõõdetava katsekeha tsentrist ning y-teljel on kõrgus põrandapinnast. Õhu liikumise kiirus on visualiseeritud värviskaalal. Termiliste mannekeenide kiirusväljade puhul tähistab punane värv suuremaid õhu liikumise kiirused ning roheline värv madalamaid õhu liikumise kiiruseid. Ventilaatori kiirusväli on kujutatud teistes värvitoonides, et eristada õhu liikumise kiiruste olulist erinevust termiliste mannekeenide omast. Ventilaatori puhul tähistab kollane värv kõrgemaid õhu liikumise kiiruseid ning lillad toonid madalamaid õhu liikumise kiiruseid.

Õhu liikumise kiiruste mõõtmiseks oli ventilatsioon peatatud, et vältida ventilatsiooniõhust põhjustatud häiringuid.

Kiirusväljade mõõtmised viidi läbi järgmistel stsenaariumitel:

- 80 W soojusväljastusega termiline mannekeen avatud avadega, avad paralleelselt anemomeetriga;
- 80 W soojusväljastusega termiline mannekeen avatud avadega, avad anemomeetri suhtes 45° pööratud;
- 80 W soojusväljastusega termiline mannekeen suletud avadega;
- Portatiivne ventilaator, kiirusel 1.



Joonis 17. Erinevate stsenaariumite termiliste mannekeenide ja portatiivse ventilatori kiirusväljad koos mõõtmiskeemiga. Termiliste mannekeenide kiirusväljad on märgitud kirkaste värvidega ning hägustatud ala on joa mõjusfäärist väljaspool. Lilla joon tähistab termilise mannekeeni raadiust.

Joonis 17 ilmestab, et erinevate stsenaariumite puhul on 80 W soojusväljastusega termilise mannekeeni konvektiivse joa poolt tekitatud kiirusväljad mannekeeni kohal sarnased. Termiliste mannekeenide puhul on ruumiõhu loomulikust liikumisest eristatav termilist juga 5 cm raadiuses mannekeeni tsentrist. Kiirused jäävad mannekeeni kohal suurusjärku 0,12-0,19 m/s. Kirjanduses kajastatud kiirused inimese pea kohal on vahemikus 0,25-0,30 m/s [17], [50]. Seega ei ole EVSN 14240:2004 järgi ehitatud 80 W soojusväljastusega termiliste mannekeenide konvektiivse joa poolt põhjustatud õhu liikumise kiirus võrdväärne inimese konvektiivse joa poolt põhjustatud õhu liikumise kiirusega.

Avatud avadega mannekeeni, mille avad on paralleelsed anemomeetriga puhul on näha, et juga hajub läbi mannekeeni ava ning tekitab inimesega võrreldes ebaloomulik horisontaalne õhuvool. Mannekeeni kohale tekkiva konvektiivse joa kiirus on ca 0,12 m/s, mis on võrreldes kirjandusest leitava väärtusega kaks korda väiksem.

Avatud avadega mannekeen, mille avad on 45° anemomeetri suhtes pööratud, on sarnane suletud avadega mannekeeniga. Avatud avadega mannekeeni, mille avad on 45° anemomeetri suhtes pööratud tsentrist horisontaalkaugusel $x = 0,4 - 0,5$ kaugusel tekkinud häiringud on tingitud õhu juhuslikust liikumisest antud piirkonnas.

Inimesele kõige sarnasema konvektiivse joa tekitab suletud avadega mannekeen, sest nii koondub konvektiivne juga pea kohale ja saavutab antud katseseeriast ligilähedasima konvektiivse joa kiiruse võrreldes inimesega, saavutades tippkiiruse 0,19 m/s.

Portatiivse ventilaatori joa algkiirus 0,15 m kõrgusel on umbes 4 m/s, kuid see hajub 1,50 m kõrgusel laiali. Joa laius on ligikaudu 0,28 m. Antud tingimustel ei ole ventilaatori poolt tekitatav juga võrreldav inimese poolt tekitatava joaga ei kiiruse ega ka joa kuju poolest.

Mannekeenide mõõtmisest selgub, et EVSN 14240:2004 järgi ehitatud mannekeenid jäljendavad ennekõike seisvat inimest, sest konvektiivne juga kerkib vaid mannekeeni kohale. Avad annavad ainest, et mannekeenid võiksid imiteerida istuvat inimest, kuid see oleks adekvaatne vaid juhul, kui mannekeenil oleks vaid üks ava.

Mõõdetud kiirusväljad on adekvaatsed üksnes sarnase ümbritseva õhutemperatuuri, ligikaudu 22 °C juures. Kui ümbritseva keskkonna temperatuur on kõrgem, omab konvektiivne soojusülekanne väiksemat mõju ning madalama ümbritseva keskkonna temperatuuri puhul suuremat mõju.

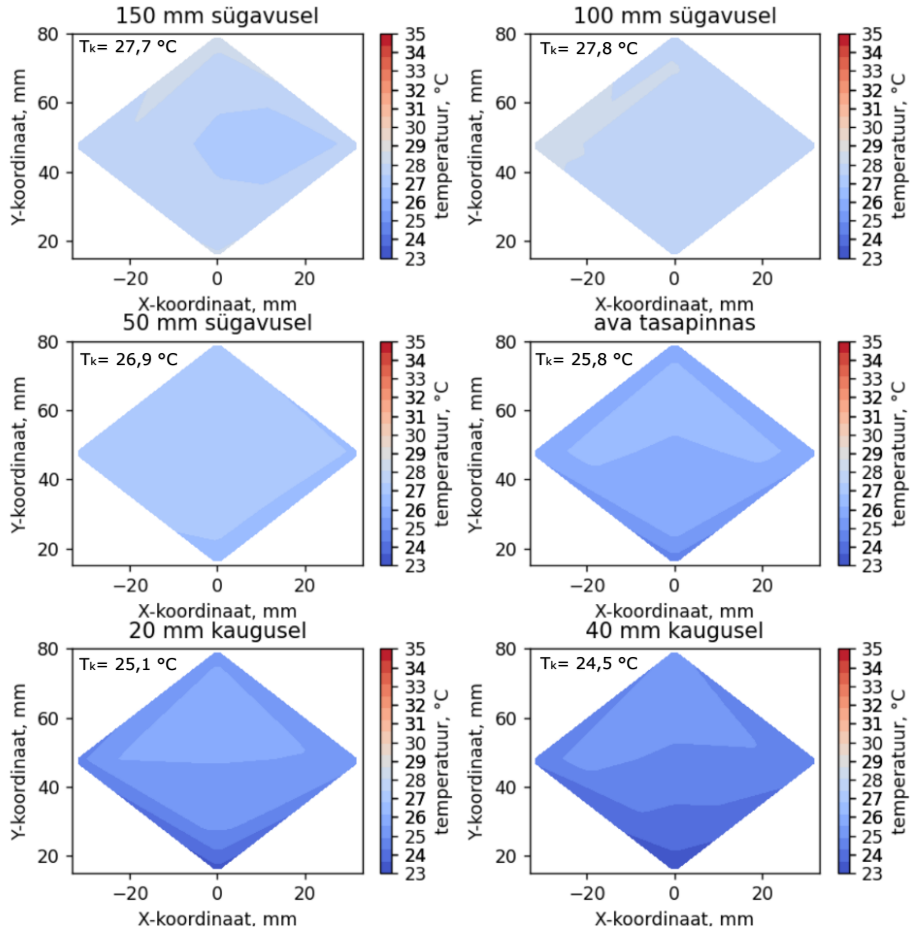
5.2 Termilise mannekeeni pinnatemperatuur ning sellest väljuva õhu temperatuur

Võrdlemaks EVSN 14240:2004 järgi ehitatud termilise mannekeeni sarnasust inimesele, teostati termilisest mannekeenist väljuva õhu temperatuurimõõtmised nii 80 W kui ka 180 W soojusväljastusega termilise mannekeeni puhul.

Termiliste mannekeenide avadest väljuv õhutemperatuur on visualiseeritud allpool Joonisel 18 ja 19. Graafikud on 2D formaadis, kus x-teljel on kaugus mõõdetava katsekeha tsentrist horisontaalsuunas ning y-teljel on kõrgus ava kõrguses. Temperatuur on visualiseeritud värvidena. Termilise mannekeeni avast väljuva õhu temperatuuri puhul tähistab punane värv kõrgemaid temperatuure ning sinine värv madalamaid temperatuure.

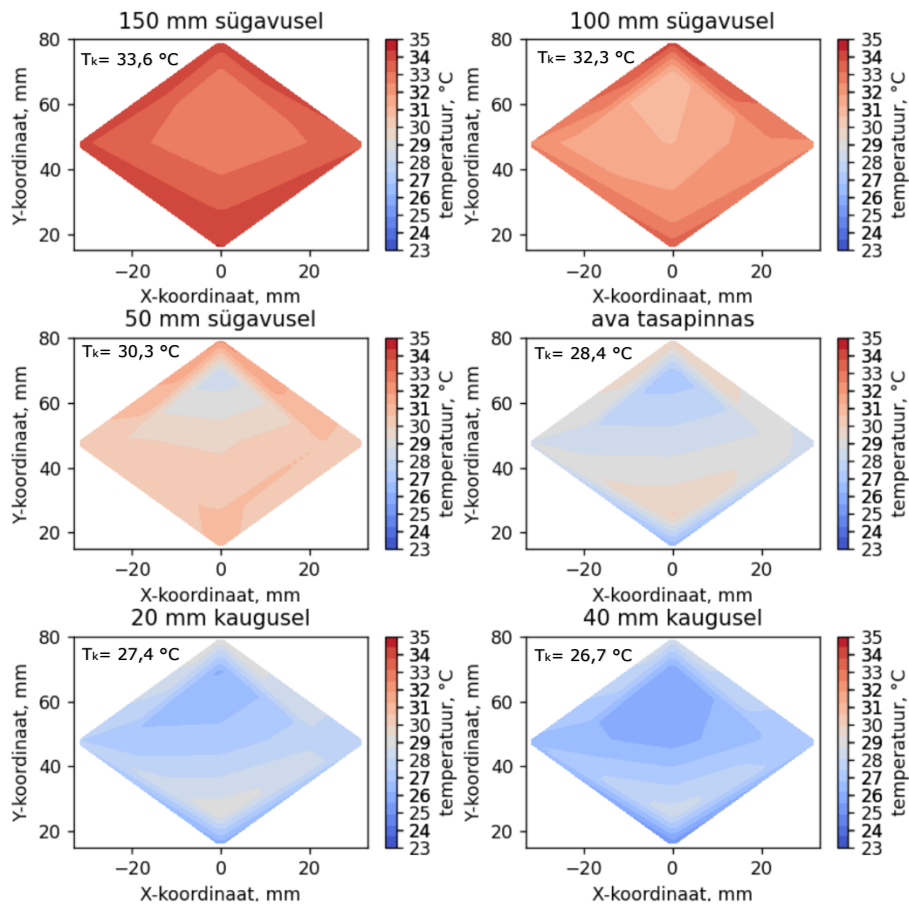
Temperatuuri mõõtmiseks oli ventilatsioon peatatud, et vältida ventilatsiooniõhust põhjustatud häiringuid. Mõõtmise ajal oli ruumi õhutemperatuur 22,1 °C.

80 W termilise manneeni temperatuuriväli erinevatel sügavustel ja kaugustel manneeni avast



Joonis 18. 80 W soojusväljastusega termilise manneeni temperatuuriväli 150, 100, 50 mm sügavusel, ava tasapinnas ja 20, 40 mm kaugusel. T_k tähistab ristlõike keskmist temperatuuri.

180 W termilise mannekeeni temperatuuriväli erinevatel sügavustel ja kaugustel mannekeeni avast



Joonis 19. 80 W soojusväljastusega termilise mannekeeni temperatuuriväli 150, 100, 50 mm sügavusel, ava tasapinnas ja 20, 40 mm kaugusel.

Termilisest mannekeenist väljuva õhu temperatuuri mõõtmisest selgub, et 80 W soojusväljastusega termilise mannekeeni puhul on nii termilise mannekeeni sees, selle ava kohal kui ka väljaspool ava madalam temperatuur kui 180 W soojusväljastusega termilise mannekeeni puhul. 80 W soojusväljastusega termilise mannekeeni kõrgeimad temperatuurid jäävad termilise mannekeeni tsentrisse ning on ligikaudu 28-29 °C. 180 W soojusväljastusega termilise mannekeeni puhul jäävad kõrgeimad temperatuurid termilise mannekeeni 150 mm sügavusele mannekeeni sisse ning on seal 34 - 35 °C. Ava kohal on temperatuur keskeltläbi 30 °C ning avast väljudes langeb alla 30 °C.

Inimese keskmiseks väljahingatava õhu temperatuuriks on 34,5 °C [47]. Nii 80 W soojusväljastusega kui ka 180 W soojusväljastusega termilistest mannekeenidest väljuva õhu keskmine temperatuur on alla 34,5 °C. Seega ei ole antud soojusväljastusega termilised mannekeenid võrreldavad inimesega väljahingatava õhu temperatuuri kontekstis.

Termokaameraga mõõdeti ära nii 80 W kui ka 180 W soojusväljastusega termilise mannekeenid. Temperatuuri mõõtmised teostati eestvaates, kui termilise mannekeeni ava oli paralleelne termokaameraga, kui termiline mannekeen oli 45° kaamera suhtes pööratud ning pealtvaates. Piltide kuvamiseks on kasutatud pinna emissiivsustegurit $\epsilon = 0,95$ ning ümbritsevate pindade pegelduv temperatuur on võetud võrdseks ruumi temperatuuriga ehk 22,1 °C-ga. Termokaameraga tehtud fotod on nähtaval Joonistel 20 ja 21.

80 W soojusväljastusega termilise mannekeeni pinnatemperatuur keskosas, kus asuvad lambipirnid, on ligikaudu 29 °C, ülaosas 26 °C ja pealmises osas 25 °C. 180 W soojusväljastusega termilise mannekeeni pinnatemperatuur keskosas on ligikaudu 34 °C, ülaosas 30 °C ning pealmises osas 29 °C. Antud temperatuurid on relevantssed vaid juhul, kui tegu on tavapärase ruumitemperatuuriga ehk ligikaudu 22 °C.

EVSN 14240:2004 järgi ehitatud termilise mannekeeni pindala on 1 m² ning seega on 180 W soojusväljastusega termilise mannekeeni soojusväljastus 180 W/m². Inimese ilmne soojusväljastus on ligikaudu 80 W ning naha pindala on ligikaudu 1,6 – 1,8 m², seega on inimese soojusväljastus ligikaudu 50 W/m² [11]. 180 W soojusväljastusega termiline mannekeen suudab jäljendada inimese keskmist naha pinnatemperatuuri, milleks on ligikaudu 33 °C [10]. Inimeste puhul on oluline silmas pidada, et riietuse pinnatemperatuur on naha pinnatemperatuurist madalam. 70 W soojuseraldusega inimese riietuse pinnatemperatuurid erinevate clo väärtuste puhul on näha tTabelis 3. 80 W soojusväljastusega termilise mannekeeni pinnatemperatuurid on inimese riietuse pinnatemperatuurist mõnevõrra madalamad ning 180 W soojusväljastusega termilise mannekeeni puhul liiga kõrged.



Joonis 20. 80 W soojusväljastusega termilise mannekeeni pinnatemperatuur. Paremt vasakule: termilise mannekeeni ava paralleelne termokaameraga, termiline mannekeen termokaamera suhtes 45° pööratud ning pealtvaade.



Joonis 21. 180 W soojusväljastusega termilise mannekeeni pinnatemperatuur. Paremt vasakule: termilise mannekeeni ava paralleelne termokaamergaga, termiline mannekeen termokaamera suhtes 45° pööratud ning pealtvaade.

5.3 Joa liikumishulk

Portatiivse ventilaatori ja 80 W soojusväljastusega termilise mannekeeni liikumishulgad on välja toodud Tabelites 10 ja 11.

Tabel 10. Portatiivse ventilaatori õhuvoolu- ja liikumishulgad erinevatel mõõtmiskõrgustel. Portatiivse ventilaatori kõrgus 0,100 m.

Portatiivne ventilaator, kiirus 1

Mõõtmiskõrgus pörandast, m	Õhuvooluhulk, l/s	Liikumishulk, 10 ⁻³ m ⁴ /s ²
0,150	40,2	132
0,250	44,7	131
0,500	44,4	103
0,750	36,3	67
1,000	27,0	37
1,250	22,0	26
1,375	21,4	23
1,500	24,5	30
1,750	21,4	23
1,875	13,4	9
2,000	12,7	8

Tabel 11. 80 W soojusväljastusega termilise mannekeeni õhuvoolu- ja liikumishulgad erinevatel mõõtmiskõrgustel. Termilise mannekeeni kõrgus 1,10 m.

Termiline mannekeen, avad suletud		Termiline mannekeen, avad avatud		
Mõõtmiskõrgus põrandast, m	Õhuvooluhulk, l/s	Liikumishulk, $10^{-3} \text{ m}^4/\text{s}^2$	Õhuvooluhulk, l/s	Liikumishulk, $10^{-3} \text{ m}^4/\text{s}^2$
1,15	9,5	0,81	6,4	0,33
1,35	8,5	1,00	8,7	0,75
1,75	6,4	0,46	9,4	0,78
1,95	5,5	0,34	9,0	0,70
2,05	4,2	0,18	6,7	0,44

Arvutustes on eeldatud, et mõõdetud kiirused on kõik vertikaalse suunaga ülesse. Portatiivse ventilaatori liikumishulga arvutuses on aluseks võetud pindala, mis jääb ventilaatori kohale kuni 2,0 m kõrgusele. Kõrguse tõustes liikumishulk väheneb. Termilise mannekeeni puhul on aluseks võetud 0,2 m ulatuses pindala.

Termiliste mannekeenide puhul ilmestab avade avatuse mõju õhuvooluhulk. Kinnise mannekeeni puhul on mannekeeni kohal olev õhuvooluhulk suurim ning joa eemaldumisel mannekeenist väheneb. Avatud avadega mannekeeni puhul haarab avast väljuv juga kaasa ruumiõhku ning seeläbi õhuvooluhulk suureneb teatud kõrgusele ning edasi toimub joa hajumine.

Portatiivse ventilaatori liikumishulk on erinevatel kõrgustel kümneid kordi suurem, kui termiliste mannekeenide oma. 0,65 m kõrgusel katsekehast on portatiivse ventilaatori ja suletud avadega termilise mannekeeni liikumishulkade erinevus 145 kordne. Portatiivsete ventilaatorite suurem liikumishulk on põhjustatud eelkõige suurest kiirusest. Zukowska et al. on arvutanud istuva inimese pea kohal 0,7 m kõrgusel konvektiivse joa liikumishulgaks $8,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4/\text{s}^2$ [31]. Kirjandusest leitav inimese kohtav suurus on portatiivse ventilaatori ja termilise mannekeeni puhul välja arvatud suuruste vahepeal. Arvestades, et 180 W termilise mannekeeni pinnatemperatuur on sarnane inimese naha pinnatemperatuurile ning keskkonna ja pinnatemperatuuri vahe suurenemisest on ka konvektiivse joa kiirus suurem. Sellele toetudes võib eeldada, et 180 W soojusväljastusega termilise mannekeeni kohale tekkiva konvektiivse joa liikumishulk on sarnane inimese pea kohale tekkiva konvektiivse joa liikumishulgaga.

5.4 Õhuvahetuse efektiivsus

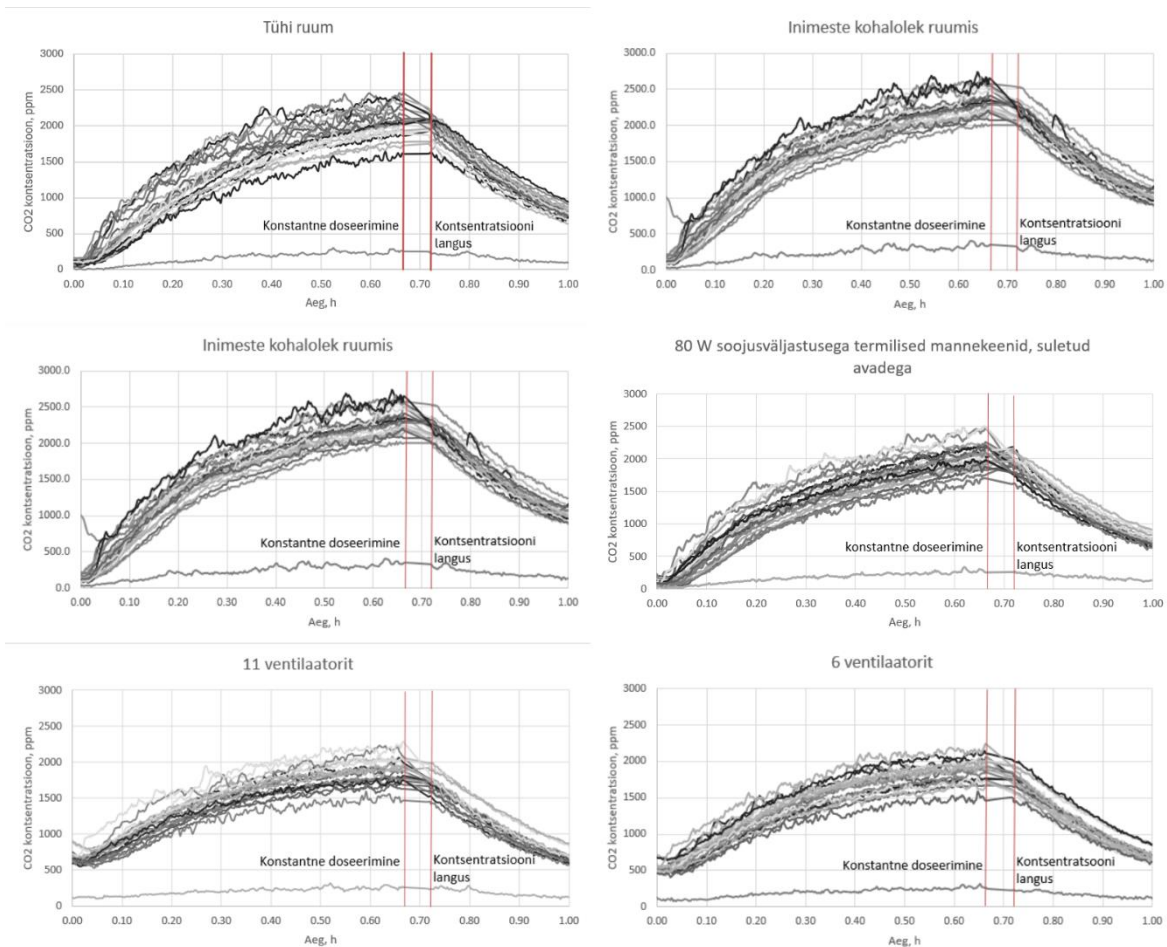
Käesolevas alapeatükis analüüsitakse õhuvahetuse efektiivsust 11 erineva stsenaariumi puhul. Läbiviidud stsenaariumid olid järgmised:

- Tühi ruum;
- 180 W soojusväljastusega avatud avadega termiline mannekeen;
- 80 W soojusväljastusega avatud avadega termiline mannekeen;
- 80 W soojusväljastusega suletud avadega termiline mannekeen;
- 11 portatiivset ventilaatorit põrandal, kiirusel 1;
- 6 portatiivset ventilaatorit põrandal, kiirusel 1;
- 11 inimest;
- 11 portatiivset ventilaatorit toolil, tase 1;
- 6 portatiivset ventilaatorit toolil, tase 1;
- 11 portatiivset ventilaatorit põrandal ilma laudadeta, kiirusel 1;
- 6 portatiivset ventilaatorit põrandal ilma laudadeta, kiirusel 1.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on hinnata, kas portatiivseid ventilaatoreid on võimalik kasutada ruumi hõivatuse imiteerimiseks õhujaotussüsteemide uurimiseks. Selle hindamise vahendiks on muuhulgas õhuvahetuse efektiivsuse ja saasteainete eemaldamise efektiivsuse analüüs erinevate stsenaariumite vahel. Kõikide katsete puhul olid ruumitingimused samad, muudeti vaid katsekehasid. CO₂ väärtusi mõõdeti hingamistsooni kõrgusel.

180 W soojusväljastusega termiliste mannekeenide stsenaariumit korrati kolmel korral samadel tingimustel, et valideerida mõõtemetoodika usaldusväärsust.

Mõõtetulemuste põhjal arvutati välja järgmised õhuvahetuse efektiivsust kirjeldavad parameetrid: lokaalne õhuvahetuse indeks, õhuvahetuse efektiivsus, saasteainete eemaldamise efektiivsus, lokaalne õhu kvaliteedi indeks. Mõõtmistel kasutati nii konstantse doseerimise kui ka kontsentratsiooni languse meetodit.



Joonis 22. CO₂ mõõtmistulemuste koondgraafik konstantse doseerimise ja kontsentratsiooni languse meetodil.

Joonis 22 illustreerib, et esimese 40 minuti jooksul toimub konstantne doseerimine ning 40ndaks minutiks saavutatakse ruumis piisavalt stabiilne olukord. 40. minutil doseerimine peatati ning algas kontsentratsiooni langus. Kontsentratsiooni languse meetodil arvestati väärtusi alates 43. minutist. Kontsentratsiooni languse meetodil on esimese kolme minuti andmed eemaldatud, et eristada selgelt kahe perioodi üleminekut ning arvestada andurite reageerimise viiteajast tekkivaid kõikumisi lugemites.

5.4.1 Mõõtmismeetodite valideerimine 180 W termilise mannekeeni näitel

Mõõtmismeetodi valideerimiseks korraldati katsed nii konstantsel doseerimisel kui ka kontsentratsiooni languse meetodil 180 W soojusväljastusega termiliste mannekeenidega samadel tingimustel kolm korda. Tabelis 12 on välja toodud õhuvahetuse efektiivsusega seotud parameetrite väärtused kolmel korduskatsel.

Mõõtmiste usaldusväärsus on esitatud pideva suuruse keskväärtuse usaldusvahemiku abil. Usaldatavuseks on 95%. Usaldatavus 95% on saavutatav, kui $t = 1,96$. Pideva suure keskväärtus on leitav allolevast valemist:

$$x \pm t \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (5.1)$$

kus

s – standardhälve;

n – vaadeldavate objektide arv kogumis.

Standardhälve on leitav valemist:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.2)$$

kus

s – standardhälve;

n – vaadeldavate objektide arv kogumis;

x_i – vaadeldav arv;

\bar{x} – vaadeldavate arvude keskväärtus.

Tabel 12. 180 W soojusväljastusega termilise mannekeeni korduskatsete õhuvahetuse efektiivsusega seotud parameetrite tulemused.

		1	2	3	4	5	6	7	8	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	24	25
Korduskatse 1	Lokaalne õhuvahetuse indeks	87.68	82.95	80.30	95.96	89.80	89.47	82.48	88.06	86.61	89.85	88.32	91.40	90.65	79.76	80.61	88.79	87.90	88.16	89.32	-	-
	Õhuvahetuse efektiivsus	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	44.75	45.02
	efektiivsus	0.966																				
Korduskatse 2	Lokaalne õhukvaliteedi indeks	1.088	1.002	0.928	0.882	1.077	1.026	0.729	0.889	0.915	0.892	0.937	0.985	0.911	0.942	1.049	1.116	1.132	1.032	1.001	-	-
	Lokaalne õhuvahetuse indeks	87.73	82.59	80.27	93.84	89.18	89.04	82.86	89.11	87.17	91.29	92.94	90.28	79.86	84.22	87.87	89.88	87.66	89.32	88.58	-	-
	Õhuvahetuse efektiivsus	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45.35	45.71
	Saasteainete eemaldamise efektiivsus	0.939																				
Korduskatse 3	Lokaalne õhukvaliteedi indeks	1.095	0.987	0.931	0.909	1.069	1.036	0.667	0.918	0.851	0.855	0.946	1.003	0.888	0.939	1.050	1.109	1.098	1.030	0.988	-	-
	Lokaalne õhuvahetuse indeks	87.02	82.45	80.58	94.45	88.22	89.66	83.33	89.33	86.66	90.23	92.03	90.53	80.00	83.58	88.11	89.26	87.86	88.95	89.10	-	-
	Õhuvahetuse efektiivsus	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	43.68	45.25
	Saasteainete eemaldamise efektiivsus	0.942																				
	Lokaalne õhukvaliteedi indeks	1.090	0.979	0.933	0.891	1.033	1.017	0.696	0.884	0.801	0.854	0.908	0.980	0.890	0.918	1.042	1.111	1.110	1.017	0.951	-	-

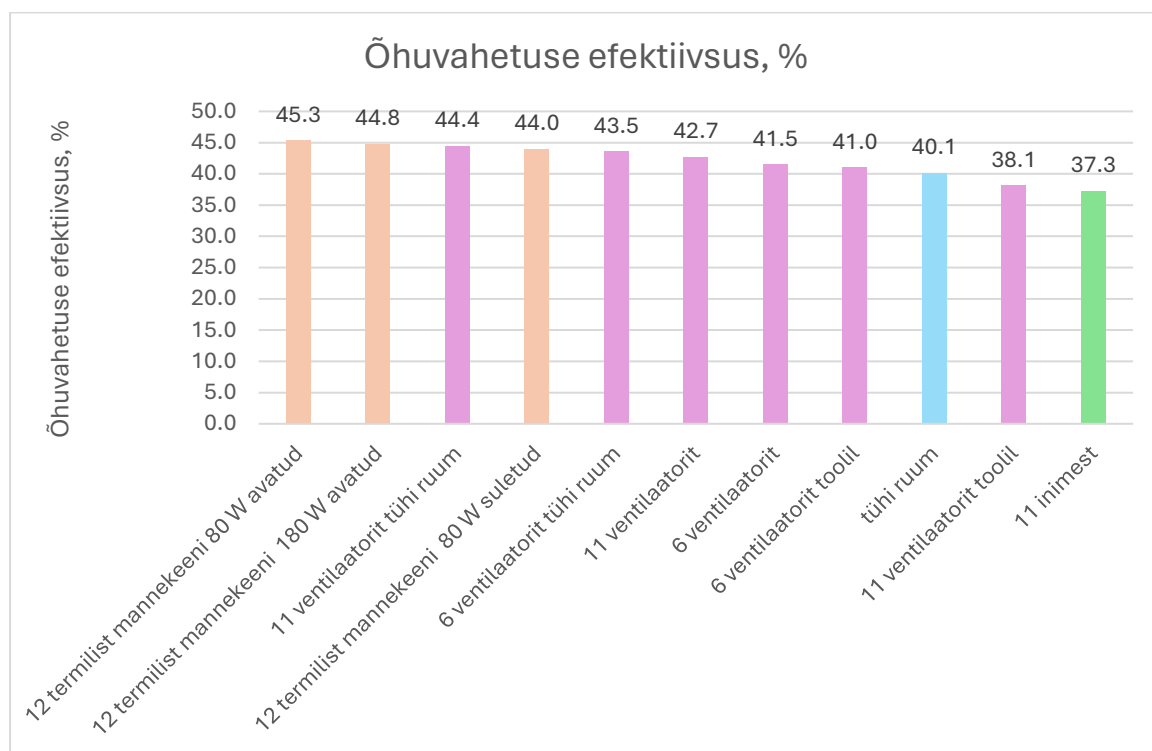
Õhuvahetuse efektiivsuse keskväärtus on 44,96% ± 0,73% ehk keskväärtus jääb vahemikku (44,23%;45,69%).

Saasteainete eemaldamise efektiivsuse keskväärtus on 0,949 ± 0,014 ehk keskväärtus jääb vahemikku (0,935;0,963).

5.4.2 Õhuvahetuse efektiivsus ja lokaalne õhuvahetuse efektiivsus

Lokaalne õhuvahetuse indeks näitab, kui hea on värske õhu juurdepääs vaadeldavale ruumipunktile. Õhuvahetuse efektiivsuse arvutamisel on kasutatud nominaalset ajakonstanti.

Märkegaasina kasutatud CO₂ tõttu ei ole võimalik õhuvahetuse efektiivsuse seisukohalt erinevaid stsenaariumeid inimeste kohalolekuga ruumis stsenaariumiga võrrelda. Kui inimesed viibivad kontsentratsiooni languse meetodi ajal ruumis ning märkegaasiks on CO₂, ei ole võimalik hiljem märkegaasi ning inimeste poolt eraldatud CO₂ väärtuseid eristada. Selline lähenemine ei anna õhuvahetuse efektiivsuse ja lokaalse õhuvahetuse hindamiseks adekvaatseid tulemusi. Pideva CO₂ erituse tõttu inimestelt pärast täiendavat CO₂ balloonist doseerimist, tuleb arvutuslik õhuvahetuse efektiivsus kõige väiksema väärtusega.



Joonis 23. Õhuvahetuse efektiivsus erinevate stsenaariumite vahel, 180 W termilise mannekeeni puhul keskmistatud väärtus.

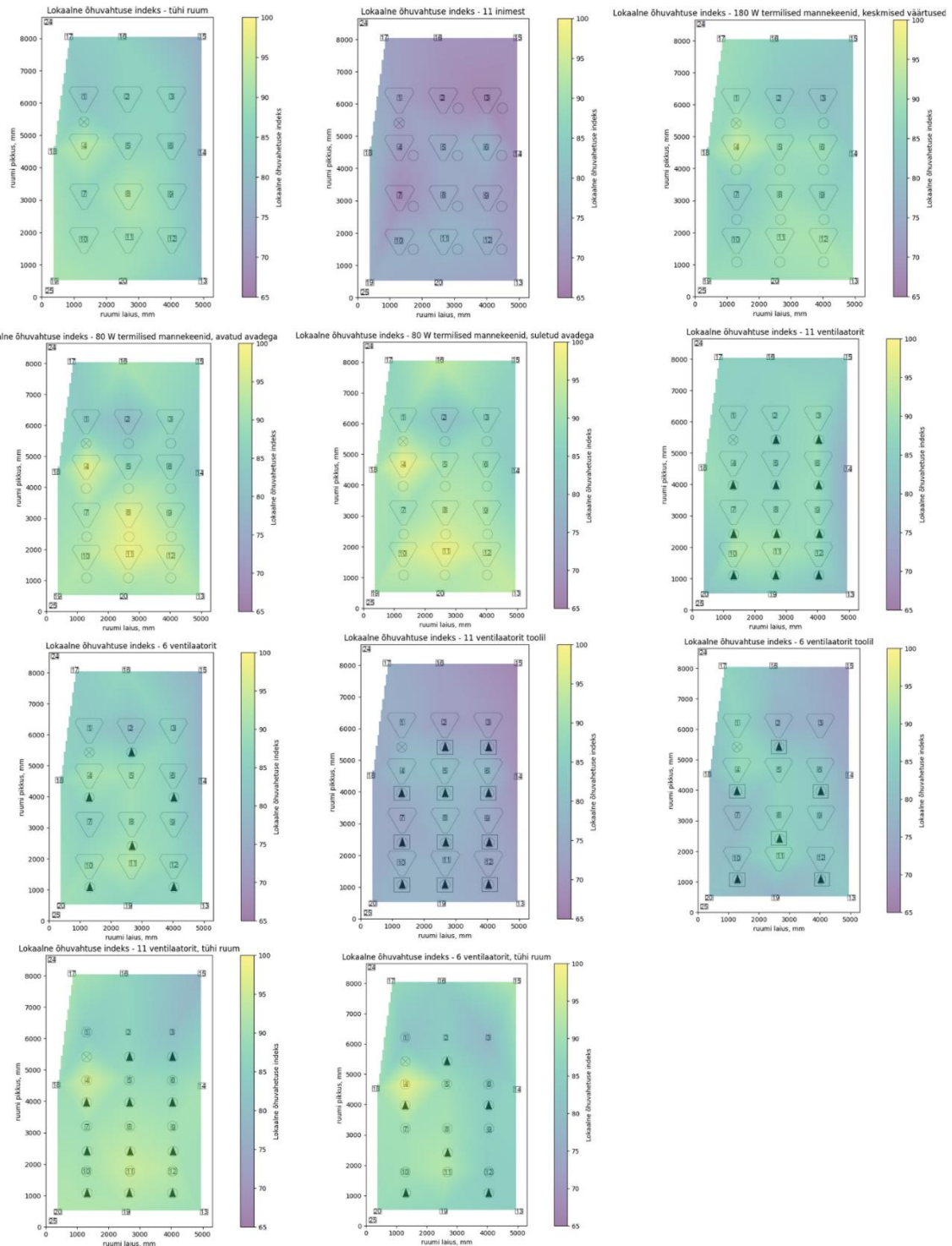
Jooniselt 23 selgub, et parima õhuvahetuse efektiivsuse annab termiliste mannekeenide kasutamine. Termiliste mannekeenide soojusväljastus (80 W või 180 W) ning avade avatus või suletus ei oma siinkohal märkimisväärset mõju. Erinevate variantide vahel on erinevus 1,3 protsendipunkti.

Ventilaatorite puhul on õhuvahetuse efektiivsuse erinevus erinevate stsenaariumite vahel 6,3 protsendipunkti. Ventilaatorite puhul on kõrgeim õhuvahetuse efektiivsuse näitaja juhul, kui 11 ventilaatorit paiknesid tühjas ruumis. Stsenaariumid, kus ventilaatorid asusid laudadega ruumis, olid nii 11 kui ka 6 ventilaatori puhul sarnased tulemused. Sama kehtib toolile asetatud ventilaatorite puhul.

Stsenaariumid, kus ventilaatorid on asetatud toolidele, ei avalda antud katse kontekstis mingit mõju ning on võrreldavad tühja ruumi olukorraga.

Hüpotees, et kuus ventilaatorit käituvad termilistele mannekeenidele ja sealhulgas inimeste sarnaselt, ei pea paika. 11 portatiivse ventilaatoriga stsenaariumid on sarnasemad termiliste mannekeenidega stsenaariumitele. Õhuvahetuse efektiivsuse kontekstis on 11 ventilaatoriga stsenaariumid adekvaatsemad.

Hüpotees, et suletud avadega termiline mannekeen käitub inimesega sarnasemalt, ei pea paika. Nii avatud kui ka suletud avadega termiliste mannekeenide puhul õhuvahetuse efektiivsus praktiliselt kattub. Lisaks tekitab õhujaotuse viis ise olukorra, kus õhuvahetuse efektiivsus on sõltumata imitatsioonivahendist sarnane.



Joonis 24. Lokaalse õhuvahetuse indeksid erinevate stsenaariumite puhul.

Lokaalsed õhuvahetuse indeksid stsenaariumite vahel näitavad, kuidas erinevad katsekehad samade ruumingimuste juures õhuvahetuse indeksit mõjutavad. Andmed on kogutud 20st erinevat ruumpunktist.

Kõrgeimad lokaalsed õhuvahetuse indeksid on stsenaariumil, kus oli 80 W soojusväljastusega suletud avadega termiline mannekeen, millele järgnevad 80 W soojusväljastusega avatud avadega termiline mannekeen, 11 portatiivset ventilaatorit ja 6 portatiivset ventilaatorit. Kõige kehvemad lokaalsed õhuvahetuse indeksid olid stsenaariumitel, kus 11 ja 6 portatiivset ventilaatorit olid toolile asetatud.

Jooniselt 24 selgub, et üldiselt on parem lokaalne õhuvahetuse indeks mõõtmispunktide 1-3 ja 10-12 juures. Kõrge lokaalne õhuvahetuse indeks eelmainitud punktides on tõenäoliselt tingitud sellest, et õhujaoitajad asuvad ruumi otsaseintes (vt Joonis 7). Värske õhk liibub mööda seina alla ning tõuseb ventilaatorite või termiliste mannekeenide puhul konvektiivse joa abil üles hingamistsooni.

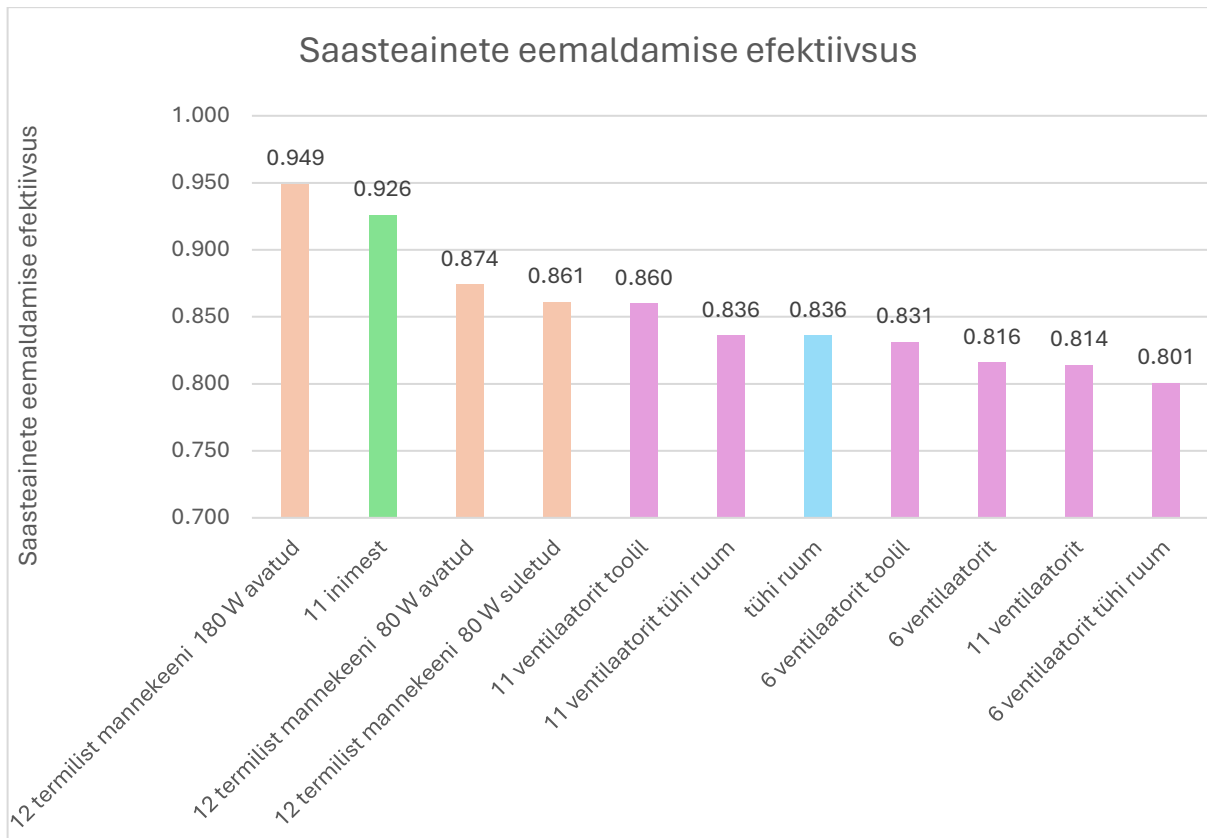
5.4.3 Saasteainete eemaldamise efektiivsus

Saasteainete eemaldamise efektiivsus näitab, kui tõhusalt suudab ventilatsioonisüsteem ruumist saasteained välja viia.

Jooniselt 25 selgub, et 180 W soojusväljastusega termilise mannekeeni ning inimeste stsenaariumite puhul on saasteainete ainete eemaldamise efektiivsus võrdlemisi sarnane.

Hüpotees, et kuus ventilaatorit käituvad termilistele mannekeenidele ja sealhulgas inimeste sarnaselt, ei pea paika. 6 ventilaatoriga stsenaariumid ei oma saasteainete eemaldamise efektiivsuse juures mõju ning on võrreldavad tühja ruumi olukorraga. Saasteallika eemaldamise efektiivsuse seisukohast omab mõju vaid 11 ventilaatorit toolis stsenaarium, mis erineb inimestega stsenaariumist 0,066 võrra.

Hüpotees, et suletud avadega termiline mannekeen käitub inimesega sarnasemalt inimesega, ei pea paika. Nii avatud kui ka suletud avadega termiliste mannekeenide puhul õhuvahetuse efektiivsus praktiliselt kattub.

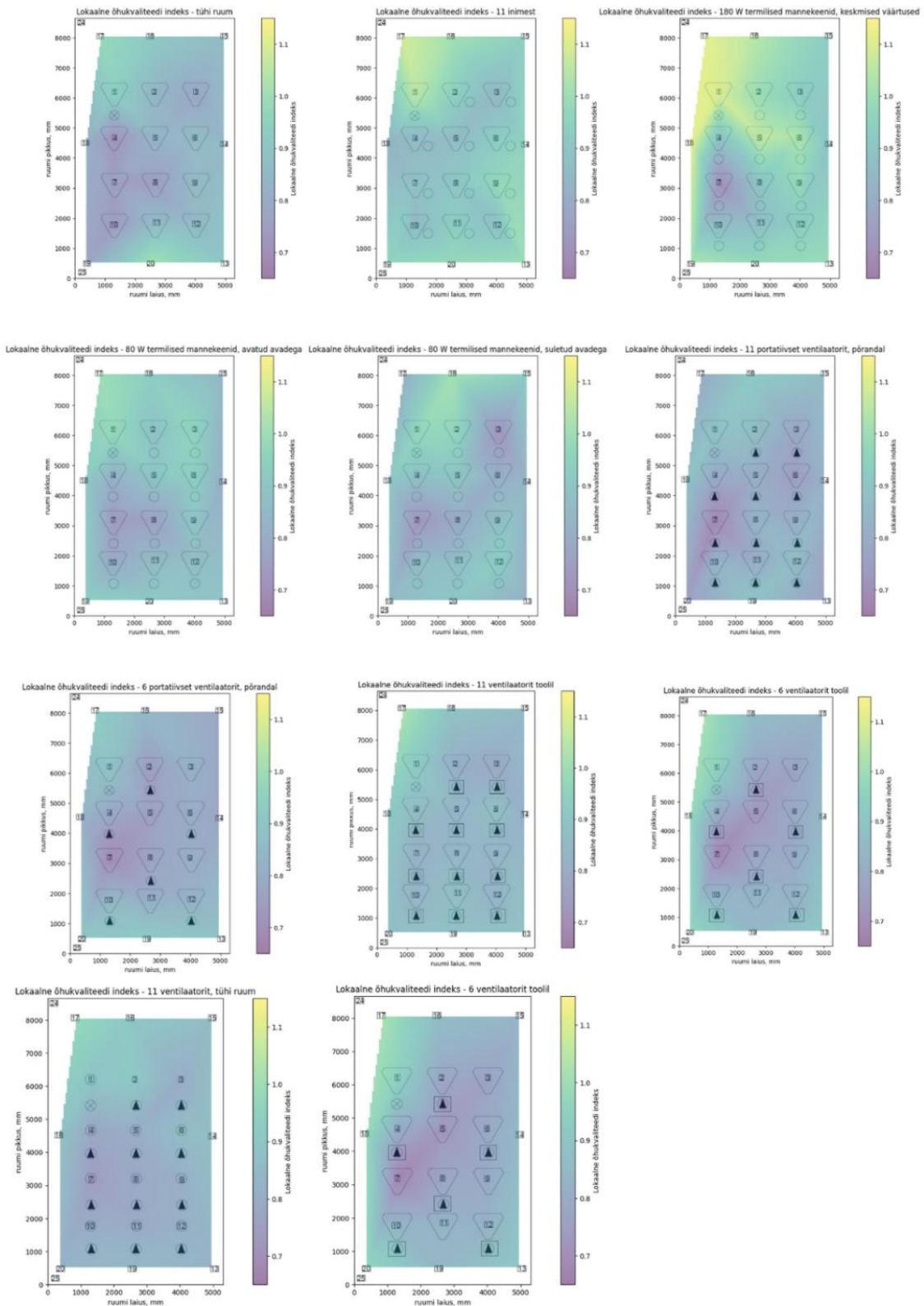


Joonis 25. Saasteainete eemaldamise efektiivsus erinevate stsenaariumite vahel, 180 W termilise mannekeeni puhul keskmistatud väärtus.

Inimeste ja termiliste mannekeenide puhul töötab laboris olev ventilatsioon osaliselt väljatõrjuva õhujaoitussüsteemina. Ilmselt ei teki piisavat temperatuurikihistumist, et õhujaoitussüsteem hakkaks väljatõrjuva õhujaoitussüsteemina tööle. Ventilaatorid segavad õhku ning nii toimib ventilatsioonisüsteem seguneva õhujaoitusena. Portatiivse ventilaatori liikumishulk on ligikaudu 100 korda suurem kui termilise mannekeeni liikumishulk ning seetõttu tekitavad ventilaatorid ruumis seguneva õhujaoitusega olukorra. Termiliste mannekeenide ja inimestega võimalik väljatõrjuv õhujaoitus on saasteainete eemaldamise efektiivsuse seisukohalt efektiivsem kui segunev õhujaoitus. Lisaks väldib väljatõrjuv õhujaoitus saasteainete tsirkuleerimist ruumis, viies saasteained konvektiivse joa abil otse üles [37]. Termiliste mannekeenide puhul on saasteainete eemaldamise efektiivsuse väärtus ligikaudu 1, mis viitab segunevale õhuvahetusele. Kõrvalekallet teoreetiliste väärtuste (vt Tabel 2) ja reaalsete tulemuste vahel saab seletada sellega, et konstantset doseerimist viidi läbi 40 minutit, mis oli ligikaudu 2,67 ajakonstanti ning selle aja jooksul ei jõudnud süsteem täielikult muutustele reageerida ega saavutada täielikult stabiilset olukorda. Täielikult mittestabiilse olukorra puhul on tulemused madalamate väärtuste poole skaleeritud.

Ventilaatoritega stsenaariumites on saasteainete eemaldamise efektiivsus mõnevõrra madalam, kuna selle juga ei ole ainult otse üles, vaid levib ka ligikaudu 0,3 m raadiuses. Ventilaatorid segavad rohkem ruumiõhku ning seeläbi ei ole saasteainete eemaldamine niivõrd efektiivne kui inimeste või termiliste mannekeenidega. Seetõttu on ventilaatoritega stsenaariumid võrreldavad tühja ruumi olukorraga.

Lokaalne õhuvahetuse indeks näitab seda, kui hästi suudab ventilatsioonisüsteem vaadeldavast punktist saasteaineid eemaldada võrrelduna väljatõmbeavaga.



Joonis 26. Lokaalne õhukvaliteedi indeksid erinevate stsenaariumite puhul.

Lokaalsete õhukvaliteedi indeksi levikukaardid sarnanevad saasteainete eemaldamise efektiivsusele. Jooniselt 26 on selgelt kõrgemate lokaalsete õhukvaliteedi indeksite poolest eristuvad stsenaariumid, kus on inimeste kohalolek ruumis ja kasutatud termilisi mannekeene. Portatiivsete ventilaatoritega stsenaariumite puhul on levikukaartidelt näha, et saasteainete eemaldamise efektiivsus on madalam võrreldes inimeste ja termiliste mannekeenidega võrreldes.

5.5 Limitatsioonid

Käesolevas peatükis on esitatud meetodika ja katsete läbiviimisega seotud limitatsioonid. Alljärgnevalt esitatud limitatsioonidega tuleks arvestada töö tulemuste tõlgendamisel.

- Katseseeriad on läbi viidud vaid ühe õhujaotussüsteemi (sissepuhke- ja väljatõmbeelementide paigutus, sissepuhke temperatuur, õhuvooluhulk) konfiguratsiooni korral. Õhujaotusviis võib tulemusi muuta.
- Konstantse kontsentratsiooni meetodi puhul kestis doseerimine 40 minutit, mille vältel ei saavutatud täielikku tasakaaluolukorda, küll aga jõuti sellele piisavalt lähedale (vt Joonis 22). Antud mõõtmise puhul oli 40 minuti puhul tegu kolme ajakontandi asemel 2,67 ajakonstantiga.
- Kontsentratsiooni languse meetodikas võib esineda antud õhujaotuse puhul kõrvalekalle seoses ruumiõhu mitte segamisega enne mainitud meetodi algust.
- Liikumishulkade arvutamisel on eeldatud, et mõõdetud kiirused on kõik vertikaalse suunaga ülesse.

6 Järeldused

Portatiivsete ventilaatorite kasutamise võimalikkuse hindamiseks õhujaotussüsteemide hindamisel mõõdeti ära portatiivsete ventilaatorite poolt tekitatud kiirusväli ning arutati välja liikumishulk. Võrdluse saamiseks mõõdeti lisaks erinevas konfiguratsioonis EVSN 14240:2004 järgi ehitatud termilise mannekeeni konvektiivse joa poolt põhjustatud õhu liikumise kiirus, pinnatemperatuurid ning liikumishulgad. Mõõdetud andmeid võrreldi kirjanduses toodavate väärtustega ning leiti, et 80 W soojusväljastusega termilised mannekeenid jäljendavad inimese ilmset soojuseraldust. 80 W soojusväljastusega termilise mannekeeni kohale tekkiva konvektiivsest jaost põhjustatud õhu liikumise kiirus, 0,12-0,18 m/s, ei ole võrreldav inimese pea kohale tekkiva konvektiivsest jaost põhjustatud õhu liikumise kiirusega 0,20-0,30 m/s [6], [17], [49]. 80 W soojusväljastusega termilise mannekeeni pinnatemperatuur on ligikaudu 3 °C madalam, kui 0,60 – 0,93 clo väärtusega riietuse pinnatemperatuur. 180 W soojusväljastusega termilise mannekeeni pinnatemperatuur on keskeltläbi 31,7 °C, mis on 1 °C madalam inimese naha pinna temperatuurist, kuid kõrgem, kui riietuse pinnatemperatuur. 70 W soojuseraldusega inimese puhul on riietuse pinnatemperatuur keskeltläbi vahemikus 28 – 31,8 °C sõltuvalt clo väärtusest. Mõõdetud väärtused kehtivad tavapärase ruumitemperatuuri ehk ligikadu 22 °C juures.

Nii 80 W kui ka 180 W soojusväljastusega termilise mannekeeni puhul mõõdeti ära selle avast väljuva õhu temperatuur. Väljuvat temperatuuri võrreldi inimese väljahingatava õhu temperatuuriga. Mõlemal juhul jääb väljuva õhu temperatuur alla 34,5 °C, mis on inimese poolt välja hingatava õhu temperatuur [47]. Mõõdetud väärtused kehtivad tavapärase ruumitemperatuuri ehk ligikadu 22 °C juures.

Suurem temperatuurierinevus keha pinna ja ümbritseva keskkonna vahel suurendab konvektiivset soojusülekannet ning ühtlasi ka konvektiivse joa kujunemist. Sellest tulenevalt on saasteainete eemaldamise efektiivsus 180 W soojusväljastusega termiliste mannekeenidega sarnasem inimeste kohalolekuga ruumis kui 80 W soojusväljastusega termiliste mannekeenide puhul.

Portatiivsete ventilaatorite kasutamine õhuvahetuse efektiivsuse ja saasteainete eemaldamise efektiivsuse juures annavad vastandlikke tulemusi. Õhuvahetuse efektiivsuse hindamisel annavad ventilaatorid parima tulemuse võrreldes termiliste mannekeenidega juhul, kui ventilaatorid on asetatud tühja ruumi põrandale. Halvimad õhuvahetuse efektiivsuse näitajad on juhul, kui portatiivsed ventilaatorid on asetatud toolidele. Vastupidiselt õhuvahetuse efektiivsusele annab saasteainete eemaldamise efektiivsuse juures ventilaatorite kasutamine ligikaudu 9% kehvema tulemuse võrreldes

inimestega stsenaariumiga. Saasteainete eemaldamise efektiivsuse puhul annab portatiivsete ventilaatorite puhul kõrgeima tulemuse stsenaarium, kus 11 portatiivset ventilaatorit olid asetatud toolidele. Saasteainete eemaldamise efektiivsuse puhul segavad portatiivsed ventilaatorid ruumi õhku nii, et saasteainete kontsentratsioon on ruumi ulatuses sarnane. Termiliste mannekeenide ja inimeste puhul toimib ruumis olev õhujaoitus, mis oli lahendatud düüstorudel põhinevate õhujaoitajatega, osaliselt väljatõrjuva õhujaoitusena. Temperatuurikihistumine ei ole arvatavasti piisav saavutamaks täielikku väljatõrjuvat õhuvahetust. Selgub, et saasteainete eemaldamise efektiivsus on kõrgem juhtudel, kui ruumi on hõivatud kehade poolt, mis tekitavad vabakonvektiivse joa. Saasteained viiakse konvektiivse joa abil ruumi ülaosasse, kus asusid väljatõmbeavad. Analoogselt saasteainete eemaldamise efektiivsusele joonistub lokaalsetest õhukvaliteedi indeksi levikukaartidelt välja seos, et lokaalne õhukvaliteedi indeks on kõrgem juhtudel, kus konvektiivne juga on põhjustatud vabakonvektsioonist.

Kokkuvõtvalt saab väita, et kasutatud portatiivsed ventilaatorid ei olnud sobilikud asendamaks termilisi mannekeene õhujaoitussüsteemide uurimisel, täpsemalt saasteainete eemaldamise efektiivsuse hindamisel. Antud väidet toetavad liikumishulga arvutused, millest selgub, et portatiivse ventilaatori liikumishulk on erinevatel kõrgustel 20 – 160 korda suurem kui 80 W soojusväljastusega termiliste mannekeenide puhul.

Inimesega stsenaariumiga sarnaseimad tulemused saasteainete eemaldamise efektiivsuse uurimisel saadi 180 W termiliste mannekeenidega. EVSN 14240:2004 järgi ehitatud termilised mannekeenid on lihtsustatud geomeetriaga ning ei jäljenda seetõttu inimest täielikult. Nad erinevad inimesest juba oma geomeetria ja pindala poolest. Nende pinnatemperatuur ei ole võrdväärne inimese riietuse pinnatemperatuuriga. Samuti ei ole avast väljuva õhu temperatuur sarnane inimese väljahingatava õhu temperatuuriga. 180 W soojuseraldusega termiliste mannekeenide kasutamisel õhujaoitussüsteemide hindamisel tuleb silmas pidada, et nende soojusväljastus on inimesest ligikaudu kolm korda suurem, kuid sellegipoolest esindab üks termiline mannekeen ühte inimest. Nende kasutamisel tuleb arvestada suurema vabasoojuskoormusega kui inimeste puhul.

Kokkuvõte

Käesoleva magistritöö põhieesmärk oli hinnata portatiivsete ventilaatorite kasutamise võimalikkust õhujaotussüsteemide uurimisel. Portatiivsed ventilaatorid oleksid lihtsasti transporditavad ja kuluefektiivsed vahendid õhujaotussüsteemide uurimisel. Lisaks uuriti portatiivsete ventilaatorite potentsiaali asendamaks EVSN 14240:2004 termilisi mannekeene õhujaotussüsteemide efektiivsuse hindamisel. Uurimuse käigus mõõdeti esimeses osas ära erinevas konfiguratsioonis termiliste mannekeenide ja portatiivse ventilaatori kiirusväljad. Teise osana teostati CO₂ mõõtmised õhuvahetuse efektiivsuse ja saasteainete eemaldamise efektiivsuse arvutamiseks kontsentratsiooni languse ja konstantse kontsentratsiooni meetodil.

Õhuvahetuse efektiivsuse ja saasteainete eemaldamise efektiivsuse hindamiseks kasutati vastavalt kontsentratsiooni languse ja konstantse kontsentratsiooni meetodeid. Märkegaasina kasutati CO₂. CO₂ kontsentratsiooni ruumis mõõdeti CO₂ anduritega 20 erinevates ruumipunktis ning kahes väljatõmbeavas. Mõõtepunktidest saadud andmete põhjal koostati interpoleerimise abil levikukaardid. Erinevate stsenaariumite portatiivsete ventilaatorite, termiliste mannekeenide ja inimeste vahel võrdlemiseks kasutati saasteaine eemaldamise efektiivsust.

Magistritöö raames mõõdeti ära nii portatiivsete ventilaatorite kui ka 80 W soojusväljastusega termiliste mannekeenide konvektiivsest joast põhjustatud õhu liikumise kiirused. Õhu liikumise kiiruste põhjal arvutati välja portatiivse ventilaatori kui ka erinevas konfiguratsioonis termiliste mannekeenide liikumishulgad. Sobiva kiirusväljade mõõtemetoodika leidmiseks teostati kirjanduse ülevaade ja analüüs. Olemasolevast teaduskirjandusest ei selgu ühtset termiliste mannekeenide konvektiivsest joast põhjustatud õhu liikumise kiiruste mõõtemetoodikat. Seega teostati mõõtmised vastavalt olemasolevale laboritehnika võimekusele. Mõõtmisvahendina kasutati anemomeetreid. Portatiivsete ventilaatorite ühe mõõtmispunkti ajaline pikkus oli kolm minutit ning termiliste mannekeenide puhul üks minut.

Analüüsist selgub, et 80 W soojusväljastusega termiliste mannekeenide kohale tekkiv konvektiivsest joast põhjustatud õhu liikumise tippkiirus on 0,12-0,18 m/s, kuid kirjandusest leitav inimese konvektiivne joa poolt põhjustatud õhu liikumise kiirus ulatub 0,20-0,30 m/s-ni. Portatiivse ventilaatori algkiirus on ligikaudu 4 m/s ning joa laius 0,3 m. Mõõdetud kiirusväljade alusel arvutati nii portatiivsele ventilaatorile kui ka 80 W termilistele mannekeenidele välja liikumishulgad. Portatiivse ventilaatori liikumishulk 1 m kõrgusel põrandapinnast on $37,00 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4/\text{s}^2$, suletud avadega termilisel mannekeenil $0,81 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4/\text{s}^2$ ja avatud avadega termilisel mannekeenil

$0,33 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4/\text{s}^2$. Portatiivse ventilaatori liikumishulgad on termiliste mannekeenide omast kümneid kordi suuremad. Portatiivse ventilaatori poolt tekitatav juga erineb kardinaalselt termiliste mannekeenide ja kirjanduse põhjal inimeste konvektiivsest joast oma kuju, kiiruse ja liikumishulga poolest.

Antud magistritöös ei ole võimalik võrrelda õhuvahetuse efektiivsust inimeste ja kõikide teiste stsenaariumite vahel. Kontsentratsiooni languse meetodi puhul jätkub CO₂ kontsentratsiooni manustamine ruumi tänu inimeste hingamisele. Küll aga selgub katsetest, et õhuvahetus on efektiivsem termiliste mannekeenidega stsenaariumite puhul. Kõige kõrgem õhuvahetuse efektiivsus on 180 W soojusväljastusega termiliste mannekeenide puhul.

Saasteainete eemaldamise efektiivsuse seisukohalt on termilised mannekeenid võrreldavad inimeste kohalolekuga ruumis. Portatiivsete ventilaatorite kasutamine ruumi saasteainete eemaldamise efektiivsuse hindamiseks on võrreldav tühja ruumi olukorraga. Portatiivse ventilaatori liikumishulk on 80 W termilise mannekeeni omast märkimisväärselt suurem ning omab seega ruumiõhu segunemisele suuremat mõju. Termiliste mannekeenide, nagu ka inimeste puhul viiakse saasteained vabakonveksioonist põhjustatud joa abil ruumi ülaossa, kus asusid väljatõmbeelemendid.

Kokkuvõtvalt saab kogutud andmete ja teostatud analüüsi põhjal väita, et kasutatud portatiivsed ventilaatorid ei ole adekvaatsed asendamaks inimeste ega termiliste mannekeenide olemasolu õhujaoitussüsteemide efektiivsuse hindamisel. Termiliste mannekeenide puhul andsid saasteainete eemaldamise efektiivsuse hindamisel inimestega sarnaseima tulemuse 180 W soojusväljastusega termilised mannekeenid. Küll aga on EVSN 14240:2004 järgi ehitatud termiliste mannekeenide näol tegu lihtsustatud variandiga ning seetõttu ei ole need inimestega võrreldavad näiteks oma pindala ja pinnatemperatuuri poolest.

Järgnevalt on antud mõned soovitusel töö edasi arendamiseks:

- Konvektiivse joa kiiruse väljadel viia läbi korduskatseid. See aitab selgitada või ümber lükata kõikumisi mõõtetulemustes.
- Kaardistada 180 W soojusväljastusega EVSN 14240:2004 järgi ehitatud termilise mannekeeni kiirusvälja.
- Uurida portatiivsete ventilaatorite mõju saasteainete eemaldamisele olukorras, kus õhujaoitussüsteemina kasutatakse segunevat õhuvahetust.

Summary

The primary objective of this master's thesis was to evaluate the feasibility of utilizing portable fans in air distribution system assessments. Portable fans could be simple, transportable, and cost-effective tools for investigating air distribution systems. Additionally, the potential of portable fans to replace thermal manikins built according to the EVSN 14240:2004 standard in assessing the ventilation effectiveness was examined. In the first part of the study, the velocity fields of thermal manikins and portable fans in various configurations were measured. The second part involved CO₂ measurements to calculate air change effectiveness and contaminant removal efficiency using the concentration decay and constant concentration methods.

The assessment of air exchange effectiveness and contaminant removal efficiency employed the concentration decay and constant concentration methods, respectively. CO₂ was used as a tracer gas. CO₂ concentrations in the room were measured with CO₂ data loggers at 20 different room points and two exhaust vents. From the collected data, dispersion maps were interpolated. The focus was primarily on the contaminant removal efficiency when comparing scenarios with portable fans, thermal manikins and humans.

The study measured the velocity field of both portable fans and thermal manikins with an 80 W heat output. Based on the velocity fields, the momentum of the portable fan and the thermal manikins in various configurations were calculated. A literature analysis was conducted to find a suitable measurement methodology for velocity fields. The existing scientific literature does not reveal a uniform measurement methodology for the convective flow velocity fields of thermal manikins. Therefore, measurements in this master's thesis were conducted according to the capabilities of the available laboratory equipment. Anemometers were used as measuring instruments. The duration of a single measurement point for portable fans was three minutes, and for thermal manikins, it was one minute.

The analysis shows that the peak velocity of the convective air flow above 80 W heat output thermal manikins is 0,12 - 0,18 m/s, whereas the literature suggests that the convective flow produced by humans reaches 0,20 - 0,30 m/s. The initial speed of the portable fan is approximately 4,00 m/s, and the width of the jet is 0,3 m. Based on the measured velocity fields, the momentums for both the portable fan and the 80 W thermal manikins were calculated. The momentum of the portable fan at 1 m above the floor is $37,00 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4/\text{s}^2$, for the thermal mannequin with closed openings it is $0,81 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4/\text{s}^2$, and for the thermal mannequin with open openings, it is $0,33 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4/\text{s}^2$. The momentums of portable ventilators differ from thermal manikins approximately 100

times. The jet produced by the portable fan differs significantly from the convective flow of thermal manikins and humans as described in the literature, in terms of shape, speed, and momentum.

It is not possible to compare air exchange effectiveness between humans and all other scenarios in this master's thesis. In the concentration decay method, the CO₂ concentration continues to be administered into the room due to human breathing. However, the experiments reveal that air exchange is most effective in scenarios involving thermal manikins. The highest air exchange effectiveness is found with thermal manikins that have a 180 W heat output.

From the standpoint of contaminant removal efficiency, thermal manikins are comparable to the presence of humans in the room. Using portable fans to assess the effectiveness of contaminant removal in a room is similar to an empty room scenario. The momentum of the portable fan is approximately 100 times greater than that of the 80 W thermal manikin and thus has a greater impact on air mixing in the room. In the case of thermal manikins, as well as humans, pollutants are carried to the upper part of the room by the convective flow caused by free convection, where the exhaust vents are also located.

In conclusion, based on the collected data and conducted analysis, it can be stated that the portable fans used in this study are not adequate substitutes for humans or thermal manikins in evaluating the efficiency of air distribution systems. For thermal manikins, those with a heat output of 180 W provided results most similar to humans when assessing contaminant removal efficiency. However, the thermal manikins constructed according to EVSN 14240:2004 are a simplified version and, therefore, not comparable to humans in terms of surface area and surface temperature.

Here are some recommendations for further development of the study:

- Conduct repeat experiments on the velocity fields of the convective jet. This will help clarify or refute fluctuations in the measurement results.
- Map the velocity field of the thermal manikin built according to EVSN 14240:2004 standard with a 180 W heat output.
- Investigate the impact of portable fans on contaminant removal in scenarios where mixed air distribution systems are used.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] P. Hölpe, „Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort“, *Energy Build.*, kd 34, nr 6, lk 661–665, juuli 2002, doi: 10.1016/S0378-7788(02)00017-8.
- [2] „Human convection flow in spaces with and without ventilation: personal exposure to floor-released particles and cough-released droplets - Licina - 2015 - Indoor Air - Wiley Online Library“. Vaadatud: 21. veebruar 2024. [Online]. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ina.12177>
- [3] C. Y. Chao, M. P. Wan, ja A. K. Law, „Ventilation performance measurement using constant concentration dosing strategy“, *Build. Environ.*, kd 39, nr 11, lk 1277–1288, nov 2004, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.03.012.
- [4] „The effects of indoor air quality on performance and productivity“, *Indoor Air*, kd 14, nr s7, lk 92–101, 2004, doi: 10.1111/j.1600-0668.2004.00278.x.
- [5] M. Bivolarova, J. Ondráček, A. Melikov, ja V. Ždímal, „A comparison between tracer gas and aerosol particles distribution indoors: The impact of ventilation rate, interaction of airflows, and presence of objects“, *Indoor Air*, kd 27, nr 6, lk 1201–1212, 2017, doi: 10.1111/ina.12388.
- [6] D. Zukowska, A. Melikov, ja Z. Popiolek, „Impact of personal factors and furniture arrangement on the thermal plume above a sitting occupant“, *Build. Environ.*, kd 49, lk 104–116, märts 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.09.015.
- [7] E. Mundt, H. M. Mathisen, P. V. Nielsen, ja A. Moser, „Ventilation Effectiveness“. Forssan Kirjapaino Oy, Forssa, Finland, 2004.
- [8] M. Salmanzadeh, Gh. Zahedi, G. Ahmadi, D. R. Marr, ja M. Glauser, „Computational modeling of effects of thermal plume adjacent to the body on the indoor airflow and particle transport“, *J. Aerosol Sci.*, kd 53, lk 29–39, nov 2012, doi: 10.1016/j.jaerosci.2012.05.005.
- [9] Hoonete ventilatsioon – Jahutuslaed – Katsetamine ja hindamine. Eesti standard EVSN 14240:2004. Tallinn: Eesti Standardiamet, 2004
- [10] K. Parson, *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance*, 3rd edition. United States of America: CRC Press, 2014.
- [11] E. Abel, H. Voll, ja T. Tark, *Hoonete energiatarve ja sisekliima*, 2. tr. Tallinn: OÜ Presshouse, 2014.
- [12] G. Cao *et al.*, „A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings“, *Build. Environ.*, kd 73, lk 171–186, märts 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.12.009.
- [13] D. Rim ja A. Novoselac, „Ventilation effectiveness as an indicator of occupant exposure to particles from indoor sources“, *Build. Environ.*, kd 45, nr 5, lk 1214–1224, mai 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.11.004.
- [14] D. Rim ja A. Novoselac, „Transport of particulate and gaseous pollutants in the vicinity of a human body“, *Build. Environ.*, kd 44, nr 9, lk 1840–1849, sept 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2008.12.009.

- [15] Z. Cheng, C. Guangyu, A. Aganovic, ja L. Baizhan, „Experimental study of the interaction between thermal plumes and human breathing in an undisturbed indoor environment“, *Energy Build.*, kd 207, lk 109587, jaan 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109587.
- [16] D. Licina, J. Pantelic, A. Melikov, C. Sekhar, ja K. W. Tham, „Experimental investigation of the human convective boundary layer in a quiescent indoor environment“, *Build. Environ.*, kd 75, lk 79–91, mai 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.01.016.
- [17] A. K. Melikov, „Human body micronvironment: The benefits of controlling airflow interaction“, *Build. Environ.*, kd 91, lk 70–77, sept 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.04.010.
- [18] R. P. Clark ja M. L. De Calcina-Goff, „Some aspects of the airborne transmission of infection“, *J. R. Soc. Interface*, kd 6, nr suppl_6, dets 2009, doi: 10.1098/rsif.2009.0236.focus.
- [19] L. G. Berglund, „SUBJECTIVE HUMAN RESPONSE TO LOW-LEVEL AIR CURRENTS AND ASYMMETRIC RADIATION“.
- [20] B. A. Craven ja G. S. Settles, „A Computational and Experimental Investigation of the Human Thermal Plume“, *J. Fluids Eng.*, kd 128, nr 6, lk 1251–1258, märts 2006, doi: 10.1115/1.2353274.
- [21] I. Holmér, „Thermal manikin history and applications“, *Eur. J. Appl. Physiol.*, kd 92, nr 6, lk 614–618, sept 2004, doi: 10.1007/s00421-004-1135-0.
- [22] A. Melikov, „Breathing thermal manikins for indoor environment assessment: important characteristics and requirements“, *Eur. J. Appl. Physiol.*, kd 92, nr 6, lk 710–713, sept 2004, doi: 10.1007/s00421-004-1142-1.
- [23] Y. Liu, Y. Zhao, Z. Liu, ja J. Luo, „Numerical investigation of the unsteady flow characteristics of human body thermal plume“, *Build. Simul.*, kd 9, nr 6, lk 677–687, dets 2016, doi: 10.1007/s12273-016-0296-1.
- [24] N. Gao ja J. Niu, „CFD Study of the Thermal Environment around a Human Body: A Review“, *Indoor Built Environ. - INDOOR BUILT Env.*, kd 14, lk 5–16, veebr 2005, doi: 10.1177/1420326X05050132.
- [25] R. Kosonen, P. Saarinen, H. Koskela, ja A. Hole, „Impact of heat load location and strength on air flow pattern with a passive chilled beam system“, *Energy Build.*, kd 42, nr 1, lk 34–42, jaan 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.07.008.
- [26] S. Murakami, J. Zeng, ja T. Hayashi, „CFD analysis of wind environment around a human body“, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, kd 83, nr 1–3, lk 393–408, nov 1999, doi: 10.1016/S0167-6105(99)00088-4.
- [27] E. Bjørn ja P. V. Nielsen, „Merging Thermal Plumes in the Indoor Environment“, Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg, Report, 1995.
- [28] Y. Arinami, S.-I. Akabayashi, K. Mizutani, ja J. Sakaguchi, „Airflow Distribution Measurements around the Human Body Using a Thermal Manikin by Particle Image Velocimetry“, *J. Flow Control Meas. Amp Vis.*, kd 05, nr 03, lk 65–72, 2017, doi: 10.4236/jfcmv.2017.53005.
- [29] A. Bouzinaoui, R. Devienne, ja J. R. Fontaine, „An experimental study of the thermal plume developed above a finite cylindrical heat source to validate the point source model“, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, kd 31, nr 7, lk 649–659, juuli 2007, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2006.06.010.

- [30] D. Zukowska, A. Melikov, ja Z. Popiolek, „Impact of geometry of a sedentary occupant simulator on the generated thermal plume: Experimental investigation”, *HVACR Res.*, kd 18, nr 4, lk 795–811, aug 2012, doi: 10.1080/10789669.2012.672925.
- [31] D. Zukowska, Z. Popiolek, ja A. Melikov, „Determination of the integral characteristics of an asymmetrical thermal plume from air speed/velocity and temperature measurements”, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, kd 34, nr 8, lk 1205–1216, nov 2010, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2010.04.009.
- [32] Y. Cheng ja Z. Lin, „Experimental investigation into the interaction between the human body and room airflow and its effect on thermal comfort under stratum ventilation”, *Indoor Air*, kd 26, nr 2, lk 274–285, 2016, doi: 10.1111/ina.12208.
- [33] B. Yang *et al.*, „A review of advanced air distribution methods - theory, practice, limitations and solutions”, *Energy Build.*, kd 202, lk 109359, nov 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109359.
- [34] H. Skistad, E. Mundt, P. V. Nielsen, K. Hagström, ja J. Railio, „Displacement Ventilation in Non-industrial Premises”. Rehva, 2003.
- [35] A. Mikola, T.-A. Kõiv, J. Rehand, ja H. Voll, „The Usage of CO2 Tracer Gas Methods for Ventilation Performance Evaluation in Apartment Buildings”, *Proceedings of 10th International Conference „Environmental Engineering”*, Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania: VGTU Technika, aug 2017. doi: 10.3846/enviro.2017.267.
- [36] X. Tian, S. Zhang, H. B. Awbi, C. Liao, Y. Cheng, ja Z. Lin, „Multi-indicator evaluation on ventilation effectiveness of three ventilation methods: An experimental study”, *Build. Environ.*, kd 180, lk 107015, aug 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107015.
- [37] A. Novoselac ja J. Srebric, „Comparison of Air Exchange Efficiency and Contaminant Removal Effectiveness as IAQ Indices”.
- [38] K.-C. Chung ja S.-P. Hsu, „Effect of ventilation pattern on room air and contaminant distribution”, *Build. Environ.*, kd 36, nr 9, lk 989–998, nov 2001, doi: 10.1016/S0360-1323(00)00051-2.
- [39] G. P. Muldowney ja J. J. L. Higdon, „A spectral boundary element approach to three-dimensional Stokes flow”, *J. Fluid Mech.*, kd 298, lk 167–192, sept 1995, doi: 10.1017/S0022112095003260.
- [40] H. Xu ja E. Bodenschatz, „Motion of inertial particles with size larger than Kolmogorov scale in turbulent flows”, *Phys. Nonlinear Phenom.*, kd 237, nr 14, lk 2095–2100, aug 2008, doi: 10.1016/j.physd.2008.04.022.
- [41] S. Cui, M. Cohen, P. Stabat, ja D. Marchio, „CO2 tracer gas concentration decay method for measuring air change rate”, *Build. Environ.*, kd 84, lk 162–169, jaan 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.11.007.
- [42] „Thermal performance of buildings and materials - Determination of specific airflow rate in buildings - Tracer gas dilution method (ISO 12569:2017)”.
- [43] „Using CFD to Simulate Ventilation Equipment | Blog | SimScale”. Vaadatud: 16. mai 2024. [Online]. Available at: <https://www.simscale.com/blog/cfd-simulate-ventilationequipment/>
- [44] T. L. Bergman, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, 2011.

- [45] F. P. Incropera ja D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 5th tr. United States of America: John Wiley & Sons, 2002.
- [46] Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ANSI/ASHRAE Standard 55-2023.
- [47] J. M. Cowan, J. M. Burris, J. R. Hughes, ja M. P. Cunningham, „The Relationship of Normal Body Temperature, Endxpired Breath Temperature, and BAC/BrAC Ratio in 98 Physically Fit Human Test Subjects“, *J. Anal. Toxicol.*, kd 34, nr 5, lk 238–242, juuni 2010, doi: 10.1093/jat/34.5.238.
- [48] O. Özcan, K. E. Meyer, ja A. K. Melikov, „A visual description of the convective flow field around the head of a human“, *J. Vis.*, kd 8, nr 1, lk 23–31, märts 2005, doi: 10.1007/BF03181599.
- [49] C. Voelker, S. Maempel, ja O. Kornadt, „Measuring the human body’s microclimate using a thermal manikin“, *Indoor Air*, kd 24, nr 6, lk 567–579, 2014, doi: 10.1111/ina.12112.
- [50] N. Luo, W. G. Weng, ja M. Fu, „Theoretical analysis of the effects of human movement on the combined free-forced convection“, *Int. J. Heat Mass Transf.*, kd 91, lk 37–44, dets 2015, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.093.
- [51] „Quantification of jet flow by momentum analysis. An in vitro color Doppler flow study.“ Vaadatud: 7. mai 2024. [Online]. Available at: <https://www.ahajournals.org/doi/epdf/10.1161/01.CIR.81.1.247>

LISAD

LISA 1: Kiirus- ja temperatuuriväljade visualiseerimise skript

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.interpolate import griddata
# Sisesta faili asukoht
file_path = r'faili_asukoht'
# Exceli töövihiku lehtede nimed
sheet_names = ['a', 'b', 'c', 'd', 'e', 'f']
# Pealkiri igale subplotile
titles = {
    'a': 'Pealkiri1',
    'b': 'Pealkiri2',
    'c': 'Pealkiri3',
    'd': 'Pealkiri4',
    'e': 'Pealkiri5',
    'f': 'Pealkiri6'
}
fig, axs = plt.subplots(3, 2, figsize=(15, 10))
axs = axs.flatten()
for i, sheet_name in enumerate(sheet_names):
    data = pd.read_excel(file_path, sheet_name=sheet_name)
    x = data['tulba-pealkiri1']
    y = data['tulba-pealkiri2']
    velocity = data['tulba-pealkiri3']
    xi = np.linspace(x.min(), x.max(), 50)
    yi = np.linspace(y.min(), y.max(), 50)
    xi, yi = np.meshgrid(xi, yi)
    # interpoleerimine
    zi = griddata((x, y), velocity, (xi, yi), method='linear')
```

```

# defineeritud min ja max väärtused
fixed_velocity_min = 23
fixed_velocity_max = 35
levels = np.linspace(fixed_velocity_min, fixed_velocity_max, 20)
# Plot
contourf_plot = axs[i].contourf(xi, yi, zi, levels=levels,
cmap='coolwarm')
cbar = fig.colorbar(contourf_plot, ax=axs[i], label='temperatuur, °C')
cbar.set_ticks([np.round(lvl) for lvl in levels])
cbar.set_ticklabels([f"{int(np.round(lvl))}" for lvl in levels])
axs[i].set_title(titles[sheet_name])
axs[i].set_xlabel('X-koordinaat, mm')
axs[i].set_ylabel('Y-koordinaat, mm')
plt.tight_layout()
plt.savefig('joonise-nimi.png')
plt.show()

```


LISA 2: Õhuvahetuse efektiivsuse ja saasteainete eemaldamise efektiivsuse visualiseerimise skript

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.interpolate import griddata
# Andmete asukoht
df = pd.read_excel(r'Faili_asukoht', sheet_name='lehe_nimi')
# Interpoleerimise ala suuruse defineerimine
grid_x, grid_y = np.mgrid[0:5310:100j, 0:8650:100j]
# Lineaarne interpolateerimine
grid_z = griddata(df[['x', 'y']].values, df['nimi'].values, (grid_x,
grid_y), method='linear')
# Fikseeritud miinimum ja maksimum väärtuste defieneerimine
vmin_value = 65
vmax_value = 100
# Taustapilt
background_image_path =(r'Taustapildi-asukoht.png')
background_image = plt.imread((r'Taustapildi-asukoht.png'))
# Plot
plt.figure(figsize=(10, 8))
plt.imshow(background_image, extent=(0, 5310, 0, 8650), aspect='auto')
plt.imshow(grid_z.T, extent=(0, 5310, 0, 8650), origin='lower',
cmap='viridis', alpha=0.5, vmin=vmin_value, vmax=vmax_value)
plt.colorbar(label='Lokaalne õhuvahetuse indeks')
plt.title('Joonise_pealkiri')
plt.xlabel('ruumi laius, mm')
plt.ylabel('ruumi pikkus, mm')
plt.grid(False)
plt.show()
```