



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**KIIRGUSPANEELI, VENTILAATORIGA
RADIATORI, PUHURKONVEKTORI JA
PÕRANDJAHUTUSE VÕIMSUSVÄLJASTUS JA
MÕJU SOOJUSLIKULE MUGAVUSELE**

**RADIANT PANEL, FAN ASSISTED RADIATOR, FAN-COIL
AND FLOOR COOLING SYSTEM POWER OUTPUT AND
IMPACT ON THERMAL COMFORT**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane Egert Eist

Üliõpilaskood 153920 EAKI

Juhendaja Jarek Kurnitski, Professor

Kaasjuhendaja Karl-Villem Võsa

Tallinn 2021

(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.

20. Detsember 2021

Autor: Egert Eist

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

20. Detsember 2021

Juhendaja: Jarek Kurnitski

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

"....."201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Egert Eist (sünnikuupäev: 28.10.1995)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Kiirguspaneeli, ventilaatoriga radiaatori, puhurkonvektori ja põrandjahutuse võimsusväljastus ja mõju soojuslikule mugavusele“, mille juhendaja on Jarek Kurnitski.

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.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

_____ (allkiri)

20.12.2021(kuupäev)

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Egert Eist, 153920 EAKI
Õppekava, peeriala: EAKI02/15 - Hoonete sisekliima ja veetehnika
Juhendaja: Professor, Jarek Kurnitski, 58664370
Kaasjuhendaja: Karl-Villem Võsa, nooremteadur

Lõputöö teema:

(eesti keeles) - Kiirguspaneeli, ventilaatoriga radiaatori, puhurkonvektori ja põrandjahutuse võimsusväljastus ja mõju soojuslikule mugavusele
(inglise keeles) - Radiant panel, fan assisted radiator, fan-coil and floor cooling power output and impact on thermal comfort

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Kiirguspaneeli, ventilaatoriga radiaatori, puhurkonvektori ja põrandjahutuse võimsusväljastuse analüüsimine ja võrdlemine katseruumi näitel.
2. Kiirguspaneeli, ventilaatoriga radiaatori, puhurkonvektori ja põrandjahutuse ruumi temperatuuride jaotuse hindamine ja selle mõju sisekliima klassile
3. Kiirguspaneeli, ventilaatoriga radiaatori, puhurkonvektori ja põrandjahutuse mõju ruumi õhu liikumisele ja sisekliima klassile
4. Kiirguspaneeli, ventilaatoriga radiaatori, puhurkonvektori ja põrandjahutuse operatiivse temperatuuri saavutamine võrreldes ruumi õhutemperatuuriga.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lõputöö täpsustatud lähteülesande, lõputöö struktuuri, sh kirjanduse ülevaate ja metodika lühikirjelduse ülevaatus	11.10.2021
2.	Inseneri- ja magistriõppe lõputööde seminar ja lõputööde ülevaatus 75%:	22-26.11.2021
3.	Kaitsmistaotluste esitamise lõpptähtaeg ÕIS'is.	13.12.2021
4.	Lõputööde esitamine	20.12.2021
5.	Lõputööde kaitsmised	10-14.01.22

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 20. detsember 2021a

Üliõpilane: Egert Eist /allkirjastatud digitaalselt/ 20. detsember 2021a
Juhendaja: Jarek Kurnitski /allkirjastatud digitaalselt/ 20. detsember 2021a
Kaasjuhendaja: Karl-Villem Võsa /allkirjastatud digitaalselt/ 20. detsember 2021a
Programmijuht: Martin Thalfeldt /allkirjastatud digitaalselt/ 20. detsember 2021a

SISUKORD

EESSÕNA	8
Lühendite ja tähiste loetelu.....	9
SISSEJUHATUS	10
KIRJANDUSE ÜLEVAADE.....	12
1. TEOREETILISED ALUSED	14
1.1 Sisekliima	14
1.1.1 Siseõhu temperatuur	15
1.1.2 Operatiivne temperatuur	15
1.1.3 Siseõhu niiskus	16
1.1.4 Õhu liikumise kiirus	16
1.2 Jahutus	16
1.2.1 Liigsoojus	17
1.2.2 Soojuslevi	17
1.2.3 Jahutusvõimsus.....	18
1.2.4 Põrandjahutus	18
1.2.5 Kiirguspaneel jahutus	19
1.2.6 Puhurkonvektor jahutus.....	20
1.2.7 Ventilaatoriga radiaatorjahutus.....	20
2 METOODIKA.....	22
2.1 Katseobjekti kirjeldus	22
2.1.1 Testhoone	22
2.1.2 Jahutussüsteem ja segamissõlm.....	22
2.1.3 Ventilatsioon.....	23
2.2 Protsess	23
2.3 Mõõtepunktid.....	24
2.4 Võrdlus	25
2.5 Mõõte- ja katseseadmed	26
2.5.1 Soojusmannekeen	26
2.5.2 Elektriradiaator	27
2.5.3 Soojusliku mugavuse mõõteseade	27
2.5.4 Muud seadmed.....	28

3 TULEMUSED	29
3.1 Põrandjahutus	29
3.1.1 Põrandjahutuse võimsus	29
3.1.2 Ruumi temperatuurijaotus ja operatiivne temperatuur	30
3.1.3 Õhu liikumise kiirused.....	31
3.1.4 Põrandjahutuse gradient	32
3.2 Kiirguspaneeljahutus	32
3.2.1 Võimsusväljastus	33
3.2.2 Ruumi temperatuurijaotus ja operatiivne temperatuur	33
3.2.3 Õhu liikumise kiirused.....	34
3.2.4 Kiirguspaneeljahutuse suitsukatse	35
3.2.5 Gradient	36
3.3 Ventilaatoriga radiaatorjahutus.....	36
3.3.1 Võimsusväljastus	37
3.3.2 Ruumi temperatuurijaotus ja operatiivne temperatuur	38
3.3.3 Õhu liikumise kiirus	39
3.3.4 Suitsukatse	40
3.3.5 Õhujuga	41
3.3.6 Gradient	42
3.3.7 Radiaatori temperatuurijaotus.....	42
3.4 Puhurkonvektor	43
3.4.1 Võimsusväljastus	43
3.4.2 Ruumi temperatuurijaotus ja operatiivne temperatuur	43
3.4.3 Õhu liikumise kiirus	44
3.4.4 Suituskatse	45
3.4.5 Õhujuga	45
3.4.6 Gradient	46
3.5 Jahutusüsteemide võrdlus	47
3.5.1 Soojusliku mugavuse võrdlus.....	47
3.5.2 Jahutusvõimsuse väljastuse võrdlus	49
3.6 Kondenseerumise kontroll.....	49
KOKKUVÕTE	50
SUMMARY	52
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	54

LISAD	59
GRAAFILINE LISA	62

EESSÕNA

Käesolev magistritöö on koostatud Tallinna Tehnikaülikooli inseneriteaduskonna sisekliima ja veetehnika eriala lõputööna. Magistritöö teema „Kiirguspaneeli, ventilaatoriga radiaatori, puhurkonvektori ja põrandjahutuse võimsusväljastus ja mõju soojuslikule mugavusele“ pakuti välja juhendaja Jarek Kurnitski ja kaasjuhendaja Karl-Villem Võsa poolt. Magistritöö katsetused teostati Tallinna Tehnikaülikooli testhoones. Katsed teostati koostöös Karl-Villem Võsaga.

Autor soovib tänada kõiki, kes magistritöö käigus jõu ja nõuga abiks olid. Täiendavalt avaldab autor tänuavalduse juhendajatele, kes lõputöö koostamisel aitasid juhendada ja jagasid konstruktiivset kriitikat. Samuti tänab autor Lisett Laurimäed.

Suure tõuke andsid autorile tema vanemad Tarmo Eist ja Tiina Oll, kes olid tema haridustekonna toeks algusest lõpuni.

Lühendite ja tähiste loetelu

α_k on konvektiivne soojusülekangetegur nahapinna ja õhu vahel

α_r on kiirguslik soojusülekande tegur ümbritsevate pindade ja nahapinna vahel

t_{δ} on õhutemperatuur

\bar{t}_r on keskmine kiirgustemperatuur ümbritsevatele pindadele

ϕ on jahutusvõimsus

G on vee vooluhulk

c on vee masserisoojus

ρ on vee tihedus

Δt on pealevoolu ja tagastuva vee temperatuuride vahe

t_{op} on operatiivne temperatuur

v_{õhk} on õhu liikumise kiirus

t_{õhk} on õhu temperatuur

sek – sekundaar

prim - primaar

SISSEJUHATUS

Üleminek vähese süsinikuheitega majandusele ja ühiskonnale on kujunemas ülemaailmseks trendiks, mille üks mõõdik on kasvuhoonegaaside heite vähenemine. Eesti pikaajaline siht on vähendada kasvuhoonegaaside heidet 2050. aastaks ligi 80 protsenti võrreldes 1990. aasta heitetasemega.

Olemasoleva hoonefondi renoveerimisel ning uute hoonete planeerimisel ja ehitamisel lähtutakse süsteemi kui terviku majanduslikust ja energeetilisest tõhususest, et saavutada kogu kasutuses oleva hoonefondi maksimaalne energiatõhusus. Hoonefondi renoveerimisel suurendatakse kinnisvaraomanike teadlikkust ja selgitatakse välja võimalikud turutõrked[1].

Selleks, et ehitada energiatõhusat hoonet on vaja tagada süsteemide vaheline kommunikatsioon, kus kõik üksused peavad töötama vastavalt teise süsteemi poolt tehtud liigutustele. Olgugi, et iga süsteem suudab ennast läbi automaatika juhtida, on oluline luua kesksüsteem, mis juhiks kõiki seadmeid peenhäälestuseni vastavalt erinevate osade poolt tekitatud muudatustele[2].

Taani teadlane P. Ole Fanger on öelnud, et äärmiselt lihtne on ehitada madala energiatarbega hooneid, samuti on kerge ehitada hea sisekliimaga hooneid. Teadlase arvates nõuab aga kahe komponendi kokku viimine üheks tervikuks süsteemiks suurt väljakutset, samuti tuleb piirkonniti (riigiti) arvestada eripäradega[3].

Sisekliimale pöörame nii suurt tähelepanu sellepärast, et meie kliimavööndis viibivad inimesed ligikaudu 90% oma eluajast ruumides[4]. Halba sisekliima kvaliteeti seostatakse haige hoone sündroomiga ja sellest põhjustatud haiguste ja ebamugavustunde kasvuga, mille põhinäitajad hingamisteede haigused, haiguspuhkused ja tootlikkuse vähenemine. Uuringud näitavad, et haige hoone sündroom võib kokkuvõtlikult olla kulukam, kui hea ja toimiv sisekliimat tagav süsteem[5]. Üldkasutatavate hoonete mõju inimestele ja lisaks keskkonnale on märkimisväärne. Ainuüksi USA üldkasutatavate hoonete energiatarve oli 2009. aastal 18% kogu energiatarbust. Suurimaks tarbijaks hoones võib lugeda kütet, jahutust ja valgustust, mis hõlmavad oma alla üle poole hoone energiatarbust[6].

Inimese soojuslik tunnetus on peamiselt seotud tema enda keha termilisest balansist. See balans on mõjutatud füüsilisest aktiivsusest ja riidetusest ning samuti füüsikalistest

parameetritest: õhu temperatuurist, keskmisest kiirgustemperatuurist, õhu kiirusest ja õhu niiskusest. Kui need parameetrid on hinnatud, on võimalik kalkuleerida inimese heaolu[7].

Oluline osa energiatõhusa ja hea sisekliimaga hoone ehitamiseks on jahutuskoormuse õige ja täpne hindamine. Selliselt on võimalik ennustada jahutussüsteemide tööd ja läbi selle valida õige jahutussüsteem, mis toimib konkreetsetes olukorras kõige paremini[8]. Mitmeid parameetrid nagu näiteks hoone karakteristikud ja sisekliimaklass aitavad jahutusvõimsust hinnata. Küll aga nende keeruline ja mittelineaarne koos toimine raskendavad oluliselt jahutusvõimsuse ennustamist hoone projekteerimise etapis[9].

KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Selleks, et mõista hoonete termodünaamilist käitumist ja sellega seotud muutusi ruumide sisekliimas on käesolevas magistritöös kasutatud kahte antud teemaga seotud põhjalikku kirjandusallikat[4][10]. T.-A. Kõivu ja A. Randi poolt koostatud raamat „Hoonete küte“ keskendub valdavalt hoone kütte lahendustele. Kuna kütte ja jahutuse põhimõtted on suuresti omavahel seotud, siis kehtivad antud raamatus kasutatud termodünaamika valemid ka jahutuse puhul. H. Volli, E. Abeli ja T. Targa poolt koostatud raamatus „Hoonete energiatarve ja sisekliima“ käsitletakse põhjalikult hoone sisekliimat puudutavaid tegureid ning sellega seotuid arvutusi. Raamat sisaldab endas nii energiatõhususe vaatepunkti kui ka sisekliimalisi lahendusi, mille kombineerimisel on võimalik projekteerida tervikuna toimiv süsteem.

Põrandjahutuse olemuse on selgelt sõnastanud B. Olesen, kes on kirjutanud raamatu „Radiant floor cooling systems“[11]. Allikas on välja toodud põrandjahutuse head ja halvad küljed, mida on käsitletud ka käesolevas magistritöös.

Kiirgusjahutuse puhul on tehtud mitmeid uuringuid, mis kirjeldavad kiirguslike ja konvektiivsete süsteemide erinevusi ning kuidas mõjub kiirguslik soojusülekanne inimesele ja ruumi kütmisele/jahutamisele[12] [13] [14] [15]. Teadusartiklis „Comparison of thermal comfort between radiant and convective systems using field test data from Chinese Thermal Comfort Database“ on välja toodud, et õhu liikumise kiirus ja põranda temperatuur on kiirgussüsteemide puhul parem, kui konvektiivsetel süsteemidel. Samas on aga leitud, et kiirgussüsteemide temperatuuri asümmeetria on märgatavalt suurem. Küll aga lõplikult käitub iga toode natukene erinevalt, seega on näinud tootjad vaeva tootearenduses ja koostanud enda toodete jaoks optimaalsete süsteemide väljaehitamiseks projekteerimisjuhiseid[17] [16].

Jahutuskoormuse arvutamine on võtmetähtsusega aste ükskõik millise jahutussüsteemi projekteerimisel. Küll aga võrreldes konvektiivseid süsteem kiirgussüsteemidega, siis kiirgussüsteemide võimsusväljastus võib oluliselt olla mõjutatud otsese päikesekiirguse mõjust[16]. Antud magistritöö vaatleb võimsusväljastusi otsese päikesekiirguse mõju elimineerides.

Soojusliku mugavuse hindamiseks ja klassifitseerimiseks kasutatakse EVS-EN 16798-1:2019/NA:2019, kus on määratud lubatud õhu liikumise kiirused, temperatuurid ja temperatuuride erinevused viibimistsoonides.

Selleks, et hinnata millistel aastaaegadel võib olla kõige ohtlikum jahutussüsteemide koormusele ja kondensaadi tekkele on magistritöös läbi töötatud Eesti kliimaandmeid [18] [19] ja samuti kliimaandmetega tehtud analüüse[20] [21].

1. TEOREETILISED ALUSED

1.1 Sisekliima

1960ndate aastate algusest saadik on läbi viidud rohkelt uuringuid, et saada teada mismoodi inimesed sisekliimat tajuvad ning kuidas erinevad sisekliima parameetrid neid mõjutavad. Nii elamuid kui ka tootmis- ja avalik-ühiskondlikke hooneid peab projekteerima selliselt, et sisekliima rahuldaks seal viibivaid inimesi ning võimaldaks sooritada planeeritud tegevusi[10].

Inimeste heaolu (tegevuse eeldused) ja produktiivsus sõltuvad järgmistest sisekliima komponentidest[22]:

- Soojuslik ehk termiline sisekliima
- Valgus
- Müra
- Ionisatsioon
- Elektromagnetväljad

Antud uurimus keskendub peamiselt soojuslikele sisekliima mõjuteguritele, milleks on[10]:

- Siseõhu temperatuur
- Operatiivne temperatuur ja pindade temperatuur
- Siseõhu niiskus
- Siseõhu liikumise kiirus

Lähtudes soojuslikest mõjuteguritest on käesolevas magistritöös mõõdetud kõiki tegureid, et analüüsida jahutussüsteemide mõju sisekliimale.

Sisekliima jaotatakse nelja klassi mille kriteeriumid lähtutakse standardist EVS-EN 16798-1:2019/NA:2019 :

I – Parim

II – Hea

III – Rahuldav, esineb sisekliima parandamise vajadus olulisel rekonstrueerimisel

IV – Puudulik, sobimatu pidevalt kasutatavaks töö-, õppe või eluruumiks

	Tuuletõmbus		Vertikaalne õhu-temperatuuri erinevus (peapahkluu)		Põrandapinna temperatuuri vahemik		
	DR (tõmbusindeks)	Maksimaalne õhu kiirus töö- ja õpikeskkonnas		PD [%] (rahulolematust)	Temperatuuri erinevus ^a [K]	PD [%] (rahulolematust)	Põrandapinna temperatuuri vahemik [°C]
		Talv [m/s]	Suvi [m/s]				
Kategooria I	15	0,14	0,16 ^b /0,19 ^c	3	2	10	19 kuni 29
Kategooria II	20	0,16	0,19 ^b /0,25 ^c	5	3	10	19 kuni 29
Kategooria III	30			10	4	15	17 kuni 31

^a Erinevus 1,1 m ja 0,1 m kõrgusel põrandast.
^b Õhu liikumise suurim lubatud kiirus jahutusperioodil, ilma jahutuseta olukorras.
^c Õhu liikumise suurim lubatud kiirus jahutusperioodil, jahutamise olukorras.
Lisanõudena on eluruumi õhu liikumise suurim lubatud kiirus elu- ja magamistoas kütteperioodil 0,1 m/s kat 0,2 m/s kategoorias I ja 0,3 m/s kategoorias II.

Tabel 1- Soojusliku mugavuse projekteerimise tingimused [23]

1.1.1 Siseõhu temperatuur

Õhu temperatuur on inimkeha ümbritseva õhu temperatuur[24]. Õhutemperatuuri mõõdetakse termomeetriga, mida ei mõjuta ümbritsevate pindade soojuskiirgus[10].

1.1.2 Operatiivne temperatuur

Operatiivne temperatuur leitakse ruumiõhu temperatuuri ja ümbritsevate pindade keskmise kiirgustemperatuuri alusel, mis on seetõttu paremaks mugavuse kirjeldamise kriteeriumiks kui õhutemperatuur üksi[10].

Operatiivset temperatuuri on võimalik arvutada vastavalt valemile (1).

$$t_{op} = \frac{\alpha_k \cdot t_{\delta} + \alpha_r \cdot \bar{t}_r}{\alpha_k + \alpha_r} \quad \text{Valem (1)}$$

Kus:

α_k on konvektiivne soojusülekande tegur nahapinna ja õhu vahel

α_r on kiirguslik soojusülekande tegur ümbritsevate pindade ja nahapinna vahel

t_{δ} on õhutemperatuur

\bar{t}_r on keskmine kiirgustemperatuur ümbritsevatele pindadele

1.1.3 Siseõhu niiskus

Õhu absoluutne niiskus iseloomustab mistahes suurus, mis on seotud õhus sisalduva veeauru tegeliku kogusega, erinevalt sellistest suurustest, nagu suhteline niiskus või küllastustase, mis annavad veeauru koguse suhtena õhus selle temperatuuril ja rõhul sisalduvasse maksimaalsesse kogusesse[24]. Küll aga on inimese mugavusele määravam suhteline õhuniiskus. Madal suhteline niiskus soodustab õhu tolmutumist ja suureneb staatiline elekter. Kõrge suhtelise niiskus soodustab mikroobide kasvu ja levikut. Kõrge suhtelise niiskuse korral suureneb ehitusmaterjalidest õhku erituvate saasteainete hulk[4].

1.1.4 Õhu liikumise kiirus

Õhu liikumise kiirus on suurus, mis määratletakse magnituudiga. Soojuslike keskkondade korral arvestatakse õhu kiirusega, st õhuvoolu kiirusvektori ja magnituudiga, kõne all olevas mõõtepunktis[24]. Tõmbustunde tekkimist mõjutab õhu liikumiskiirus ja õhu temperatuur koos[4].

1.2 Jahutus

Lähtuvalt artiklist „Cooling the buildings – past, present and future“ moodustab hoonete jahutamine märkimisväärse osa ülemaailmsest energiatarbimisest. Globaalsed ja kohalikud kliimamuutused koos prognoositava rahvastiku kasvuga suurendavad aina enam hoonete jahutusenergia nõudlust. Kui 2010. aastal moodustas elamusektori ülemaailmne jahutustarbimine 4,4% kogu hoonete kütte- ja jahutusvajadustest, siis prognoositav vajadus aastaks 2050 on kuni 35% ning 2100. aastal juba 61% [25].

Hoonete jahutust ehk liigsoojuse eemaldamist saab teostada kahel viisil[10].

- Kaudselt ehk õhuga, kus liigsoojus eemaldatakse ventilatsiooniga või tuulutusega
- Otseselt ehk jahutatud vee süsteemiga, kus liigsoojus eemaldatakse külmi pindu kasutades.

Kõige levinumaks jahutusviisiks on kompressoriga külmajaam, mis põhineb Carnot'i pöördringprotsessil. Kondensaatori jahutus võib toimuda vahetult õhuga ventilaatorite abil või vedelikkandija abil[26].

Alternatiiviks kompressoriga külmajaamale on absorptsioonijahutusseade, mis töötab vaid soojusega ning mille temperatuur peab olema +100C lähedal[10].

1.2.1 Liigsoojus

Jahutuse eesmärk on eemaldada ruumist liigsoojus. Liigsoojus on põhjustatud kolmest põhilisest allikast: soojuse siirdumine läbi ruumi tarindite(mille sisse kuulub päikese otsene kui ka kaudne kiirgus), soojuslisa läbi ventilatsiooni ja soojusteke inimestelt või ruumis olevatelt seadmetelt[27].

Tarinditest tekkiv liigsoojus on suuremalt jaolt läbi läbipaistvate kehade ehk akende[28]. Inimeste puhul on ruumi eralduv soojushulk inimese metabolismist. Kõrgema metabolismiastme juures on soojuseraldus suurem. Istuva inimese metabolismiaste ehk met on 1, kus täiskasvanud inimene eraldab ruumi 35W konvektiivselt ja 35W kiirguslikku soojust. Lisaks eraldab inimene ka varjatud soojust ehk ligikaudu 40g/h veeauru, mille tegelik väärtus sõltub metabolismi tasemest ning keskkonna õhutamperatuurist[10].

1.2.2 Soojuslevi

Vastavalt termodünaamika I seadusele on keha poolt ära antud soojushulk (siseenergia muutus) võrdne teise keha poolt vastu võetud soojushulgaga. Soojuslevi liikuma panevaks jõuks on temperatuuride erinevus. Termodünaamika II seadus ütlebki, et soojuse vool toimub soojemalt kehalt külmemale. Soojuslevi intensiivsuse määrab kindlaks temperatuuri ruumiline ja ajaline jaotus[4].

Soojuslevi baasprotsessideks on:

- Soojusjuhtivus
- Konvektsioon
- Soojuskiirgus

Soojusjuhtivuseks nimetatakse soojuse levikut kehade mikroosakeste vahetu kontakti teel[4]. Konvektsiooninähtus seisneb selles, et vedeliku või gaasi kuumutamisel see paisub, selle tulemusena molekulide vahelised kaugused suurenevad ja see vedelik või gaas muutub kergemaks. Selle tulemusena hakkavad õhumassid ruumis liikuma. Soojuskiirgus on oma

olemuselt sarnane valgusele, kuid see on silmale nähtamatu elektromagnetlaineline - infrapunakiirgus. Küll aga tajub inimene soojuskiirgust oma nahapinnaga[29].

1.2.3 Jahutusvõimsus

Soojusenergia voolu nimetatakse soojusvõimsuseks. Soojusvõimsuse ühik on džauli sekundis (J/s) ehk vatt(W) [10].

Antud magistritöös arvutatakse süsteemide võimsused läbi primaarpoole kui ka sekundaarpoole pealevoolu ja tagasivoolu temperatuuride.

Kasutatakse valemit:

$$\phi = G * c * \rho * \Delta t \quad \text{Valem (2)}$$

Kus:

ϕ on jahutusvõimsus [W]

G on vee vooluhulk [m³/s]

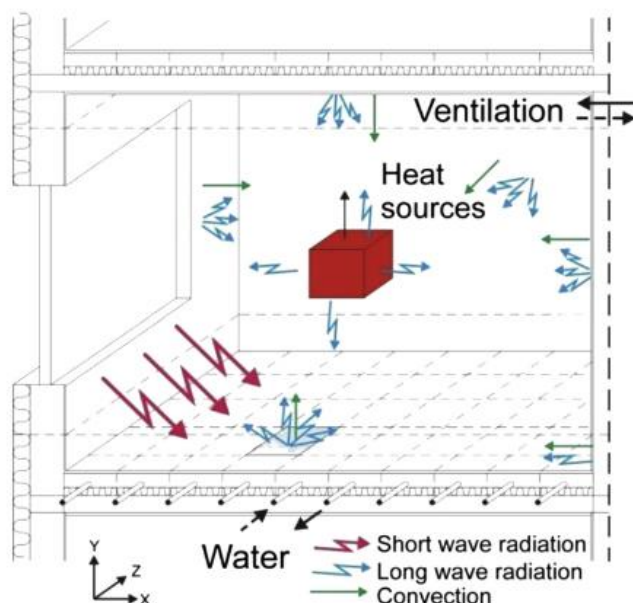
c on vee masserisoojus [J/kg · °C]

ρ on vee tihedus [kg/m³]

Δt on pealevoolu ja tagastuva vee temperatuuride vahe [°C]

1.2.4 Põrandjahutus

Kiirgava põranda jahutussüsteemid ei kuulu kõige populaarsemate kliimaseadmete hulka. Tegemist on üsna uue süsteemiga, mille dünaamilist jõudlust ei ole veel suudetud täielikult analüüsida. Üldlevinud arvamus on, et kiirgavad põrandasüsteemide jahutusvõimsus on üsna madal ning neid tuleks kasutada traditsiooniliste kliimaseadmete kõrval tugi- ja täiendavate süsteemidena. Teatud tingimustes on võimalik aga nende võimsust oluliselt suurendada. Lähtuvalt artiklist „Simulations of floor cooling system capacity (2013)“ on põrandajahutussüsteemi kõige olulisem saavutatav võimsus kiirgussoojusvoog, mis langeb otse põrandapinnale. Kui see voog on kõrge, siis põranda temperatuur sarnaneb õhuga ja konvektsioonivoog üsna minimaalne[15].

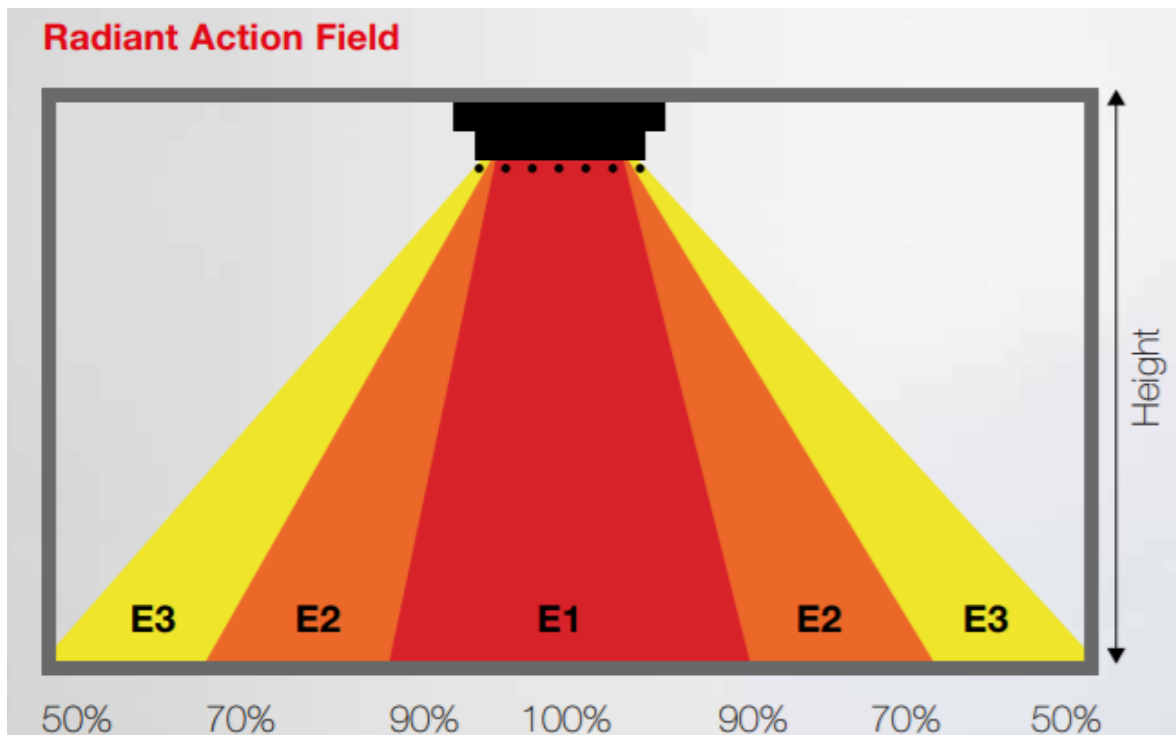


Pilt 1 - Ruumi kiirguslike allikate joonis[15]

1.2.5 Kiirguspaneel jahutus

Kiirguspaneel koosneb üldjuhul kiirgavast pinnast ja soojust kandvast elemendist. Soojuskandjaks on tavaliselt vedelik nt. vesi. Kiirguspaneeli kasutatakse nii kütmiseks, kui ka jahutamiseks. Jahutamise puhul kiirguspaneeli koguvõimsus tuleneb 60% kiirguslikult ära antud soojusest ja 40% konvektiivselt. Kuna kiirguslikult ära antud soojuse osakaal on suurem kui konvektiivselt, siis on võimalik kiirguspaneelidega jahutades toa temperatuuri kõrgemana hoida, et inimene ikkagi ennast mugavalt tunneks. Kiirguslikult mõjutab inimese üle kantud jahutus oluliselt tunnetavat temperatuuri ehk operatiivset temperatuuri. Juhul kui toa temperatuuri on võimalik hoida kõrgemal, siis peab selle tulemusel ka vähem jahutama. See annab aga märkimisväärse säästu energiakasutuse seisukohast. Ligikaudu 1 kraad temperatuurierinevust säästab energiakuludest 5% [16].

Küll aga vajab kiirguspaneelide kasutus ühtlast jaotust ruumis, et tagada kogu ruumi ulatuses ühesugune operatiivne temperatuur[16]. Kiirguspaneelide kiirgustsoone kujutab pilt 2.



Pilt 2 - Kiirguspaneeli kiirgustsoonid [16]

1.2.6 Puhurkonvektor jahutus

Puhurkonvektor ventileerib ruumi enda õhku ja samaaegselt jahutab seda. Puhurkonvektori puhul on kogu soojusväljastus puhtalt konvektiivne ja kiirguslik element puudub. Puhurkonvektori kasutuseelised on tema paindlikkus toodete hulgas ja erinevate funktsionaalsuste kasutamine ning suur võimsusväljastus. Puhurkonvektorit on võimalik kasutada nii lae-, seina- kui põrandapealseid. Suurimaks eelisteks on tema efektiivsus ja võimalus kasutada kondenseeruvates süsteemides. Küll aga on oht tekitada ruumi olulist müra kui ka tõmbusetunnet. Samuti võib puhurkonvektori õhujuga sattuda konflikti ventilatsiooniga õhujoaga, mille tulemusena põhjustatakse inimesele peale puhumise tunnet ja ebamugavust[30] [31].

1.2.7 Ventilaatoriga radiaatorjahutus

Ventilaatoriga radiaatorid ehk inglise keelse terminina „fan assisted radiator“ on üsnagi vähe kasutatud nii jahutus- kui küttesüsteemides. Selle toote puhul puhutakse mehaaniliselt õhku läbi radiaatori ribistuse ja seeläbi saavutatakse suurem soojusvahetus ning võimsus. Ventilaatoriga radiaatori puhul on enamik võimsusväljastust läbi konvektiivse soojusvahetuse, mille puhul ei ole teoreetiliselt enam tegemist radiaatori vaid konvektoriga[32].

Jahutuse vaatepunktist on mehaaniline radiaatori ventileerimine kriitilise tähtsusega, et saada radiaatorist vajalik jahutusvõimsus kätte. See tuleneb sellest, et jahutamiseks saab kasutada üsna kõrge temperatuurilist soojuskandja temperatuuri, et radiaatori pinnale ei tekiks kondensaati. Selle tulemusena ei teki ka füüsikaliselt piisavalt suurt konvektiivsust, et radiaator suudaks efektiivselt jahutada. Kui radiaator töötab loomuliku konvektiivsusega võib tekkida põranda ehk jalgade suunas madala temperatuuriline tõmbustunne.

Antud katses kasutatakse Saksamaal toodetud prototüüpi, mis on tehtud Grubberi 22-600-1200 plekkradiaatorile. Radiaatorit ennast ei ole modifitseeritud vaid on lisatud ülemise resti alla 10 ventilaatorit ning juhtplokk radiaatori alla.

2 METOODIKA

2.1 Katseobjekti kirjeldus

2.1.1 Testhoone

Katse teostati Tallinnas aadressil Mäepealse 3 olevas katselaboris, kus kasutusele võeti 31 m² ruum, kuhu paigaldati 4 erinevat jahutussüsteemi. Jahutussüsteemideks valiti ventileeritud radiaatorjahutus, põrandjahutus ja lakke paigaldatud kiirguspaneeljahutus ning *fan-coil* jahutus. Testhoonel on alt tuuldud vundament ning puitkarkassil soojustatud välissein. Testitava ruumi laetagine on köetud. Hoone siseseinad on metallkarkassil kipsseinad. Ruumil 9 on neli akent suurusega 1,5x2,0m. Aknad asuvad põhja, ida ja lõuna küljel, millest 2 asub idafassaadil. Takistamaks päikese mõju ruumi 9 energiabilansile on hoonel väline päikeseruloo, mis takistab otsese valguskiirguse sisenemist ruumi.

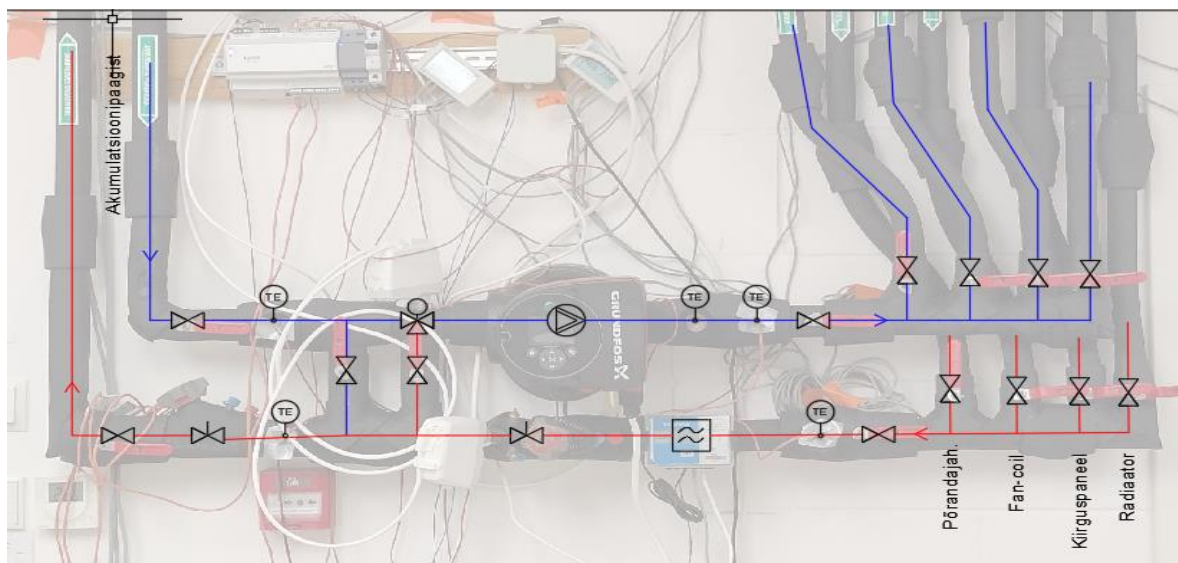


Pilt 3 - Taltech liginullenergia testhoone [33]

2.1.2 Jahutussüsteem ja segamissõlm

Testhoone kasutab jahutatud vee tootmiseks kahte süsteemi. Üks allikas on õhk- vesi soojuspump, mille siseosaks on Nibe Split ACVM 10-270 ja välisosaks AMS 10[34] ja teine vabajahutuskontuur Soojusvaheti ning vedelikjahutiga. Mõlemad toodavad jahutatud vett akumulatsioonipaaki, mida kasutatakse antud uurimuses soojusallikana. Hoonesse on ehitatud segamissõlm, mis võimaldab segada vajatud temperatuuriga vee sekundaarsüsteemis ja mõõta nii primaarpoole kui ka sekundaarpoole temperatuure pealevoolul ning tagasivoolul. Sõlmes on tagatud ka vooluhulga mõõtja, millega mõõdetakse

sekundaarpoole vooluhulka. Sõlm võimaldab arvutada kasutatud jahutusvõimsuse läbi mõõdetud andmete.



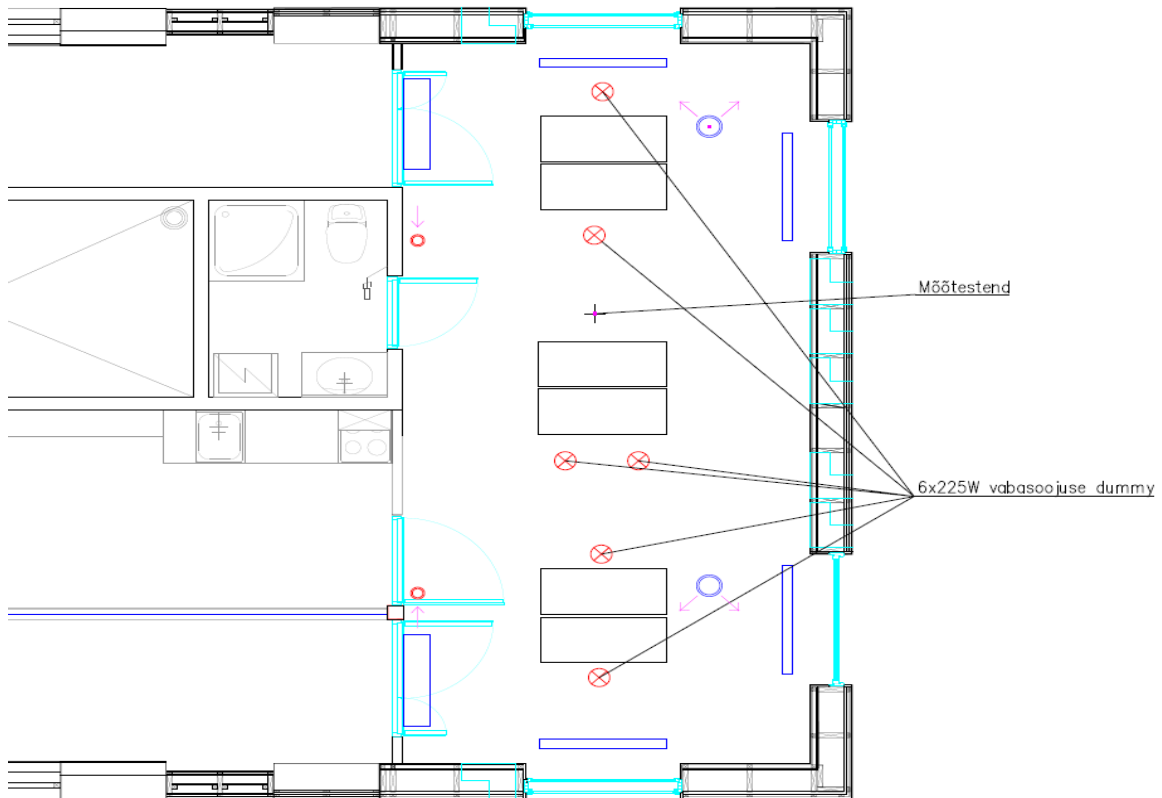
Pilt 4 - Jahutussüsteemi segamissõlm (autori joonis)

2.1.3 Ventilatsioon

Testhoone on varustatud soojustagastava ventilatsiooniga. Õhku ventileerib Zehnder ComfoAir 550 agregaat. Agregaaadi maksimaalne õhuvahetus on 550 m³/h. Antud uurimuse puhul seadistati ventilatsioon tagamaks konstantset õhuvahetust. Õhukoguseks määrati ruumis 45 l/s ehk 1,5 l/m² tulenevalt hea õhukvaliteedi tagamise soovitusel [10]. Katsete jooksul olnud sissepuhke ja väljatõmbe temperatuurid on nähtavad joonisel 32. Sissepuhke temperatuurid varieerusid 19 ja 21°C vahel.

2.2 Protsess

Testhoones on tekitatud imiteeritud olukord, kus hoonet kasutatakse kontorina. Vabasoojust imiteerivad toru soojusmannekeenid. Ruumi paigaldati võimalikult võrdselt 6 lauda ja soojusmannekeeni, et kujutada reaaloikorda. Ruumi ülekuumenemine tagati lisaks elektriradiaatoritega. Süsteemide külmakandja temperatuuriks määrati 15 °C. Temperatuuriandurid seadistati koguma andmeid iga 10 sekundi kohta. Uurimuse esimese osana uuris autor nelja erineva jahutussüsteemi võimsusväljastust. Teise osana mõõdeti süsteemidele poolt ruumi tekitatava õhuliikumise mõju sisekliimale ning visualiseeriti suitsukatsetega nähtavalt õhuliikumist. Mõõteandmete põhjal kujutatakse käesoleva magistritöö tulemustes õhujuga ruumis.

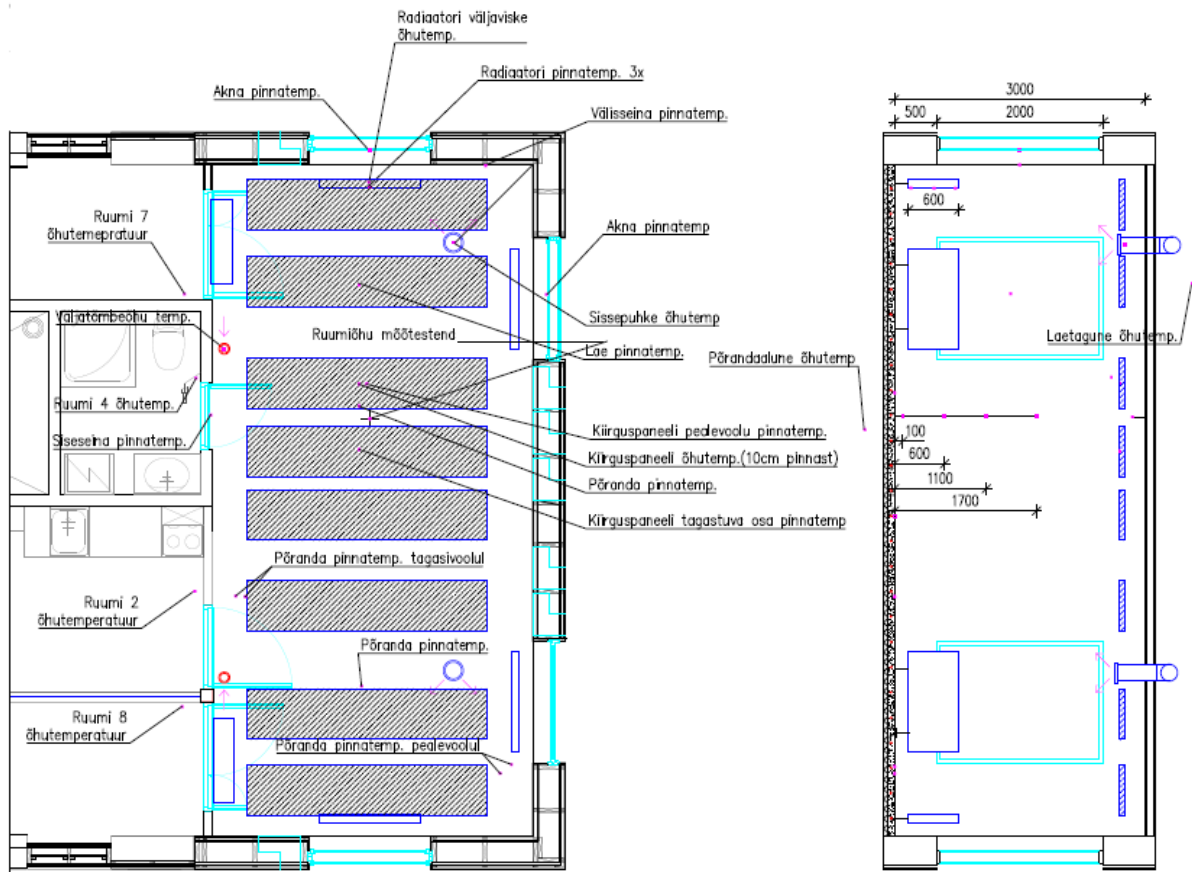


Joonis 1 Ruumi paigutus (autori joonis)

2.3 Mõõtepunktid

Hoonesse paigaldati 28 temperatuuri mõõtepunkti ja segamissõlmele 5 temperatuuri mõõtepunkti ja 1 vooluhulga mõõtepunkt. Segamissõlme mõõtepunktid tagavad võimaluse arvutada erinevate süsteemide jahutusvõimsuse läbi valemi 2 abil. Ruumi tarindite ja ruumi ümbritsevate keskkondade piiritingimuste temperatuure mõõdeti kogu testimise vältel. Radiaatorjahutuse puhul oli paigaldatud radiaatorile 4 mõõtepunkti. Kolm mõõtepunkti asetses radiaatori keskossa 5cm, 30 ja 55cm peale, mille eesmärk oli kaardistada temperatuuri jaotus radiaatori pinnal. Üks mõõtepunkt oli radiaatori kohal (võrest 2 cm kõrgusel), mille eesmärk oli mõõta radiaatorist välja puhutava õhu temperatuuri. Kiirguspaneelidele paigaldati 4 mõõtepunkti. Kaks mõõtepunkti paigaldati mõlema paneeli keskele pinnale, mille ülesanne oli mõõta paneelide pinnatemperatuuride erinevust. Kolmas mõõtepunkt paigaldati esimese paneeli keskkohast 10cm allapoole jahutatud õhutemperatuuri iseloomustamiseks. Neljas mõõtepunkt asetses esimese paneeli ja lae vahel. Laest asetses mõõtepunkt 10cm allpool. Põrandjahutusele paigaldati 6 mõõtepunkti. Kaks mõõtepunkti asetsesid ruumi mõlema poole kolmandiku peal, mis iseloomustasid põranda pinna üldist temperatuuri. Kaks mõõtepunkti asetsesid põrandakontuuri pealevoolutoru

kohal ja vahel ning teised kaks tagasivoolukontuuri kohal ja vahel. Nende ülesanne oli mõõta jahutusvedeliku soojenemist ja seeläbi põranda pinnatemperatuuride muutust. Kaks mõõtepunkti paigaldati plafoonide taha, millest üks sissepuhkele ja teine väljatõmbele.



Joonis 2 - Andurite paiknemise plaan paremal ja lõige vasakul (autori joonis)

2.4 Võrdlus

Jahutusvõimsust võrreldakse ruumis koguvõimsusväljastusena. Selleks kalkuleeritakse sekundaarpoole pealevoolu ja tagasivoolu järgi jahutusvõimsus, mis süsteemi läheb. Samuti on tööks valitud kuupäevaks 28.07.2011, millal on vastavalt eesti kliimaandmete põhjal olnud üks kõige soojematest ja niiskematest päevadest. Antud päeval mõõdetud kell 9:00 õhutemperatuuriks 27,5°C ja suhteliseks niiskuseks 68%.

Kõikide süsteemide puhul mõõdetakse operatiivset temperatuuri lisaks viiest erinevast kõrgusest õhutemperatuure vastavalt 0,1;0,6;1,1;1,7 ja 2,9m kõrguselt. Õhutemperatuure võrreldaks EVS- EN 16798-1:2019 standardi nõuete järgi ja klassifitseeritakse süsteemid.

Õhuliikumise kiirused klassifitseeritakse samuti sama standardi järgselt ning võrreldakse omavahel lähtudes keskmisest kiirusest kui ka kiiruste varieeruvusest.

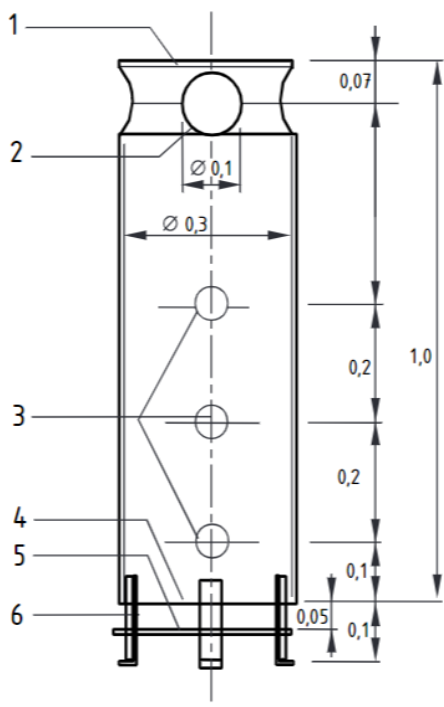
Suitsukatsetega vaadeldakse õhu liikumist ruumis ja kirjeldatakse negatiivsed ja positiivsed nähtused. Suitsukatsete ja õhuliikumise kiiruse mõõteandmetega joonestatakse välja tõenäoline õhujuga, mis süsteem põhjustab.

Viimasena tuuakse välja autori arvates kõige sobivam jahutussüsteem antud ruumi. Arvamus põhineb mõõdetud ja saadud tulemuste põhjal.

2.5 Mõõte- ja katseseadmed

2.5.1 Soojusmannekeen

Inimese vabasoojuse eraldust imiteerivad spetsiaalse konstruktsiooniga soojusmannekeenid. Katses kasutatud soojusmannekeenid on ehitatud vastavalt EN 14240 standardile. Soojusmannekeen on valmistatud lehtterasest. Lehtteraseks on kasutatud 300mm diameetriga ventilatsioonitoru. Torus asetseb kolm 60W hõõglampi. Pealt on kaetud korgiga ja alt jäetud konvektiivsele õhuvoolu liikumisruumi. Soojusmannekeeni mõõdud vastavad EN 14240 joonisele.



Joonis 3 - Dummy konstruktsioon vastavalt EN 14240 standardi joonisele



Pilt 5 - Katsel kasutatud soojusmannekeen (autori pilt)

2.5.2 Elektriradiaator

Katse teostamisel ei olnud võimalik kasutada päris päikesevalgust, et tekitada ülekuumenemine ruumis, sest valguskiirgus ei ole konstantne ja seda ei ole võimalik katse jaoks mõõta. Selleks kasutati ruumi ülekuumendamiseks elektriradiaatorit. Kasutatud konvektorradiaator oli Eurom E-Convect 1000 võimsusega 1000W.



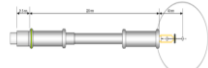
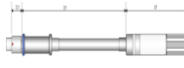
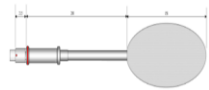
Pilt 6 – Konvektorradiaator Eurom E-Convect 1000 [35]

2.5.3 Soojusliku mugavuse mõõteseade



Soojusliku mugavuse mõõteseade ComfortSense koosneb neljast õhukiiruse ja temperatuuri mõõtjast, mis asuvad 0.1, 0.6, 1.1 ja 1.7m kõrgusel. Seadmel on 1 operatiivse temperatuuri mõõtja, mis asub 1.1m kõrgusel ja üks suhtelise õhuniiskuse mõõtja, mis asub 0.6m kõrgusel. Peale sensorite kuulus seadme juurde ka keskkonsool 50N90. [41] Antud seadmega on mõõdetud ka radiaatori ja fan-coili õhuliikumine kuni 1 meetri kaugusel seadmest, et kujutada graafiliselt õhujuga.

Pilt 7 - Soojusliku mugavuse mõõteseade ComfortSense (autori pilt)

Mõõteseadme mudel	Anemomeeter (ComfortSense 54T33)	Mõõteseadme mudel	Anemomeeter (ComfortSense 54T38)	Mõõteseadme mudel	Temperatuuri hügromeeter (ComfortSense 54T37)
Mõõteseadme nimi	Õhu temperatuuri ja õhu liikumiskiiruse andur	Mõõteseadme nimi	Operatiivse temperatuuri andur	Mõõteseadme nimi	Suhtelise õhuniiskuse andur
Kasutuse eesmärk	Õhutemperatuuride ja õhu liikumise kiiruse mõõtmiseks	Kasutuse eesmärk	Operatiivse temperatuuri mõõtmiseks	Kasutuse eesmärk	Õhu niiskuse mõõtmiseks
Mõõtepiirkond	-20...+70°C 0,05...10 m/s	Mõõtepiirkond	0...+45 °C	Mõõtepiirkond	0...100%
Mõõtetäpsus	0...+45°C (±0,5°C) 0...1 m/s (±0,02 m/s)	Mõõtetäpsus	0...+45°C (±0,2°C)	Mõõtetäpsus	+10...+30°C (±1,5%)
Pilt		Pilt		Pilt	

Tabel 2 - Soojusliku mugavuse seadme andurid [41]

2.5.4 Muud seadmed

Mõõteseadme mudel	Onset TMC20-HD[36]	FLIR E95 42°[37]	Onset HOBO UX120-006M [38]
Mõõteseadme nimi	Temperatuuri andur	Termokaamera	Andmete koguja
Kasutuse eesmärk	Õhu ja pindade temperatuuri mõõtmiseks	Pindade temperatuuride mõõtmiseks ja visualiseerimiseks	Andmete lugemine ja salvestamine
Mõõtepiirkond	-40...100 °C	0...360°	-20°...70°C
Mõõtetäpsus	±0,15 °C	±2°	-
Pilt			
Mõõteseadme mudel	Testo 440 dP [39]	testo 405i [40]	
Mõõteseadme nimi	Õhukiiruse ja rõhuvahe lugeja	Õhukiiruse mõõtja	
Kasutuse eesmärk	Ventilatsiooniõhu seadistamine	Ventilatsiooniõhu seadistamine	
Mõõtepiirkond	-150 to +150 hPa	0 to 30 m/s	
Mõõtetäpsus	±0.05 hPa	±0.1 m/s	
Pilt			

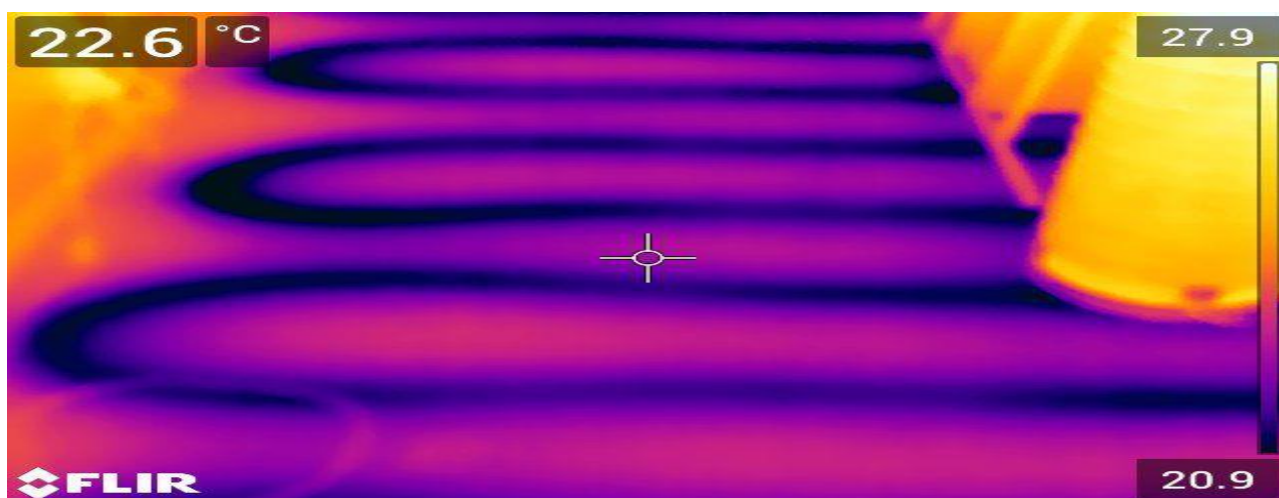
Tabel 3 - Katses kasutatud mõõteseadmed [36] [37] [38] [39] [40]

3 TULEMUSED

3.1 Põrandjahutus

Põrandat jahutatakse läbi kahe jahutuskontuuri (lisa 1), mis on ühendatud ühisesse kollektorisse. Kontuurid jaotavad ruumi kaheks võrdseks osaks. Süsteemi efektiivne jahutuspindala on 31 m². Põrand on puhas betoonpind. Katses määrati sekundaari pealevoolu temperatuuriks 15 kraadi. Sellega saavutati põrandapinna keskmiseks temperatuuriks 19°C. Jooniselt 8 on näha, et põranda keskmine temperatuur pealevoolutoru juures on 18,2°C ja tagasivoolul 19,6°C. Katse näitas, et põrandapinna temperatuur erines kontuuri peal ja kontuuride keskel 1,1 kraadi pealevoolul, kus temperatuur oli madalam ja tagasivoolul 0,6 kraadi.

Vastavalt EVS-EN 16798-1:2019 saavutab põrandjahutus madala põrandapinna temperatuuri tõttu sisekliima III klassi. Selleks, et tõsta sisekliima klassi peaks pealevoolu temperatuur tõusma ligikaudu 2 kraadi.

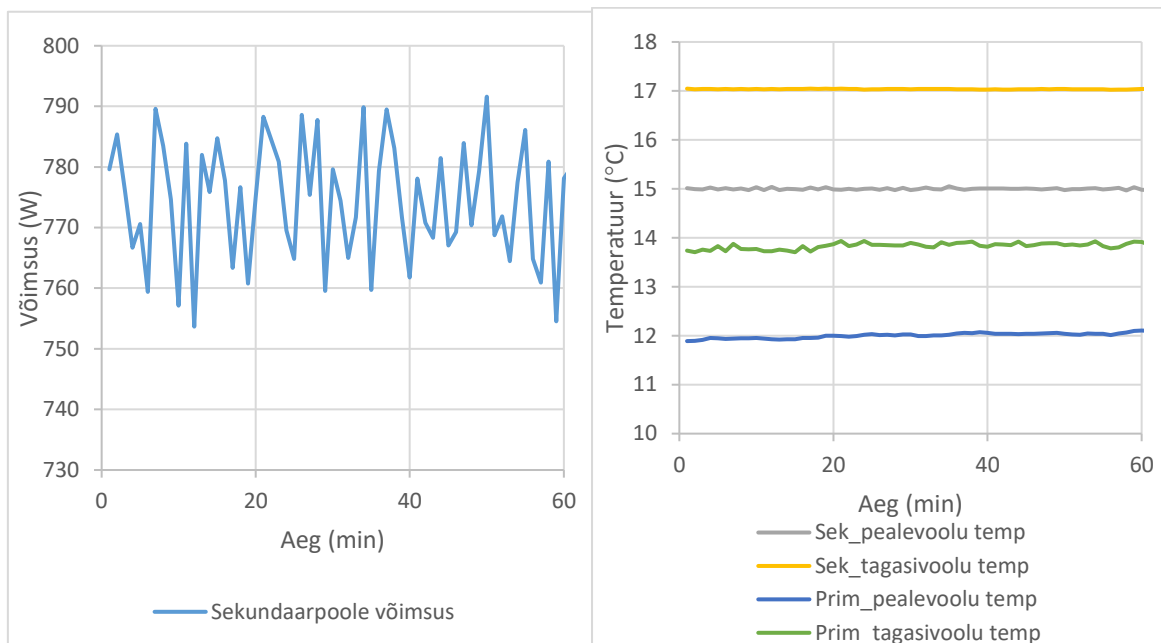


Pilt 8 - Termograafiline pilt põrandaalusest torustikust (autori pilt)

3.1.1 Põrandjahutuse võimsus

Põrandjahutuse puhul saavutati keskmiseks võimsusväljastuseks 775 W. Katse käigus oli voolukogus keskmiselt 327 l/h ja keskmine pealevoolu temperatuur vastavalt joonisele 6 15°C. Peale- ja tagasivoolu temperatuurid erinesid 2 °C võrra.

Põrandjahutuse erivõimsuseks tuleb katse tulemuste põhjal 25 W/m² kohta. Madal võimsusväljastus on põrandjahutuse puhul eeldatav, sest konvektiivset õhuvahetust praktiliselt ei teki ja kogu soojusülekanne peab toimuma kiirguslikult.



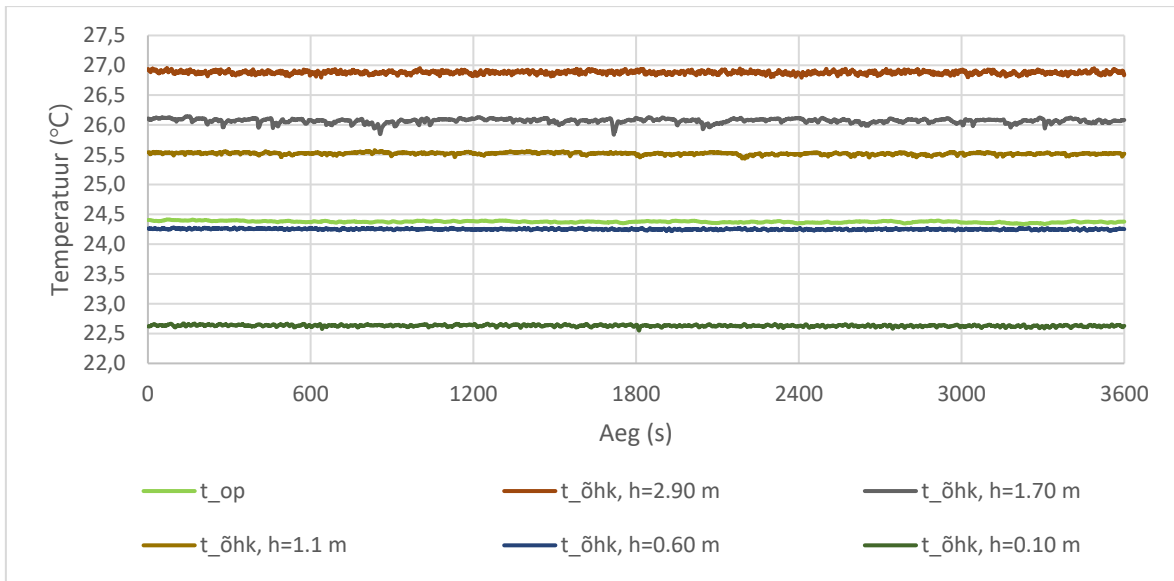
Joonis 4 - Põrandjahutuse võimsusväljastus
(autori joonis)

Joonis 5 - Sekundaar ja primaarpoole temperatuurid
(autori joonis)

3.1.2 Ruumi temperatuurijaotus ja operatiivne temperatuur

Joonis 6 näitab, et põrandjahutuse puhul on tekkinud tugev õhu kihistumine. Õhutemperatuuride vahe ulatub 4,2°C, seda enam viibimistsoonis olevate temperatuuride vahe on 2,9°C. Vastavalt EVS- EN 16798-1:2019 standardile saavutab põrandjahutus sisekliima II klassi.

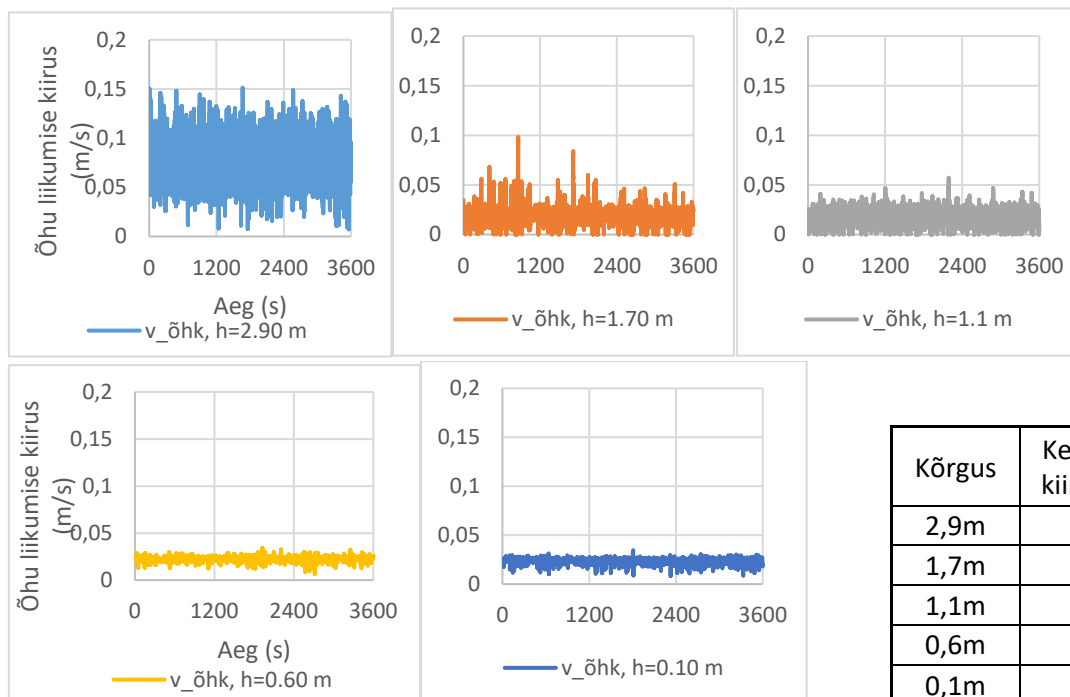
Operatiivne temperatuur põrandjahutusel jäi katses 25,1°C juurde. Antud tulemus tagab sisekliima klassi I. Operatiivne temperatuur on võrdne ligikaudu ruumi temperatuuride keskväärtusega.



Joonis 6 - Ruumi temperatuurid põrandjahutusel (autori joonis)

3.1.3 Õhu liikumise kiirused

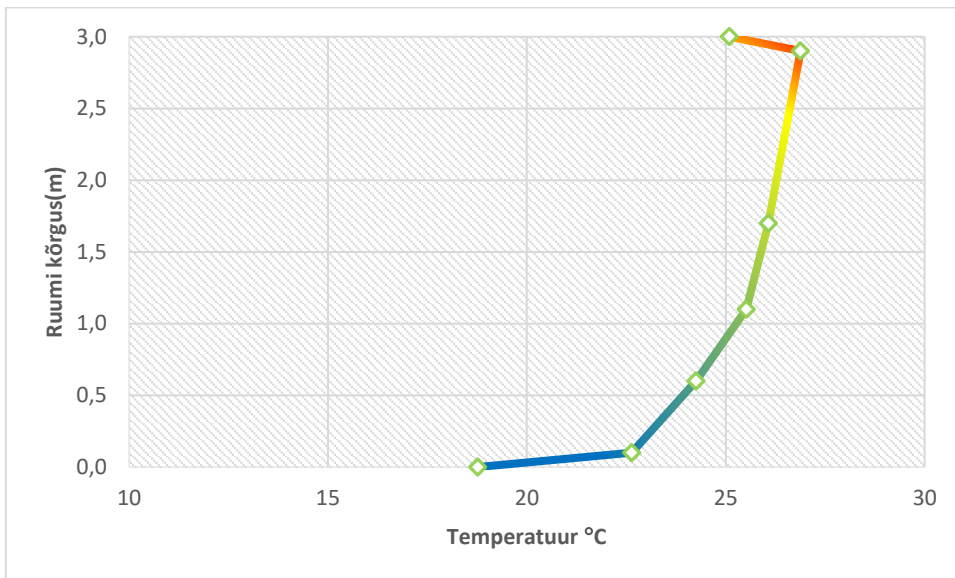
Vastavalt joonisele 7 on põrandajahutuse puhul kõiksugune ruumi konvektiivne õhuvool viidud minimaalseks. See aga oli hüpoteetiliselt eeldatav, kus konvektiivset ülekannet ei saa tekkida, sest füüsikaliselt külmem ja tihedam õhk vajub alla. Viibimistsooni kiirused jäävad kõik 0,02 m/s. See tagab õhu liikumise sisekliima klassi I. Ruumi lae all on tekkinud ülejäänud ruumist kõrgem konvektiivsus ehk 0,08 m/s, kuid isegi antud väärtus tagaks sisekliima klassi I.



Joonis 7 - Õhu liikumise kiirused erinevatel kõrgustel (autori joonised)

3.1.4 Põrandjahutuse gradient

Põrandjahutuse puhul tekkis maksimaalne temperatuuride vahe 8,1°C. Põranda keskmine temperatuur jäi 18,7°C juurde. Autori hinnangul võib võimendada ebamugavustunnet, lisaks suurele õhutemperatuurierinevusele, ka põranda madal temperatuur, mis suvisel perioodil võib läbi madala soojusisolatsiooniga jalagades tekitada jahedat tunnet.



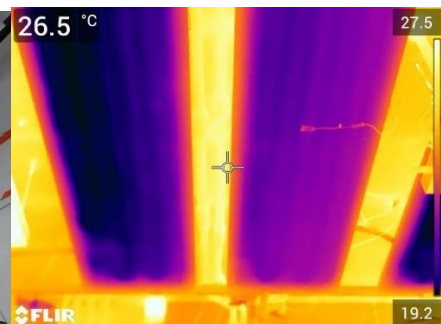
Joonis 8 - Põrandjahutuse gradient (autori joonis)

3.2 Kiirguspaneeljahutus

Katses kasutati 8 Zehnderi Carboline 600x3000mm jäige mineraalvillaga isoleeritud kiirguspaneeli. Paneelid olid jaotatud vastavalt joonisele 2. Katse käigus oli pealevoolu temperatuur 15°C. Paneelid olid paigaldatud 4 paari, mis tähendab, et kaks paneeli on paigaldatud jadamisi ja ühe paneeli tagasivoolutemperatuur on teise paneeli pealevoolu temperatuur. Vastavalt joonisele 31 on näha, et temperatuuride erinevus on 1,4°C.



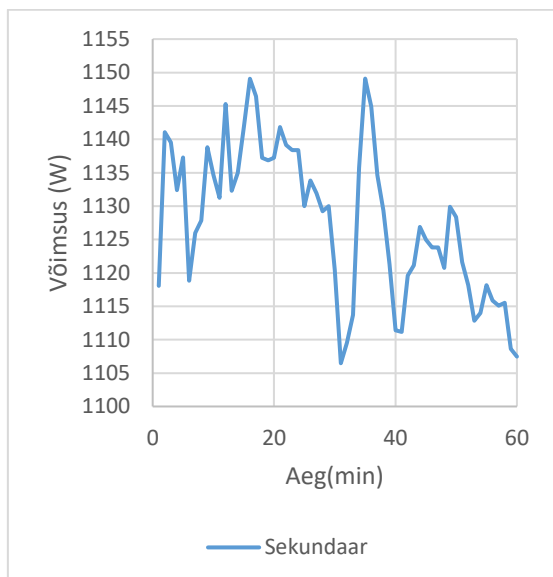
Pilt 9- Kiirguspaneellide jaotus ruumis (autori pilt)



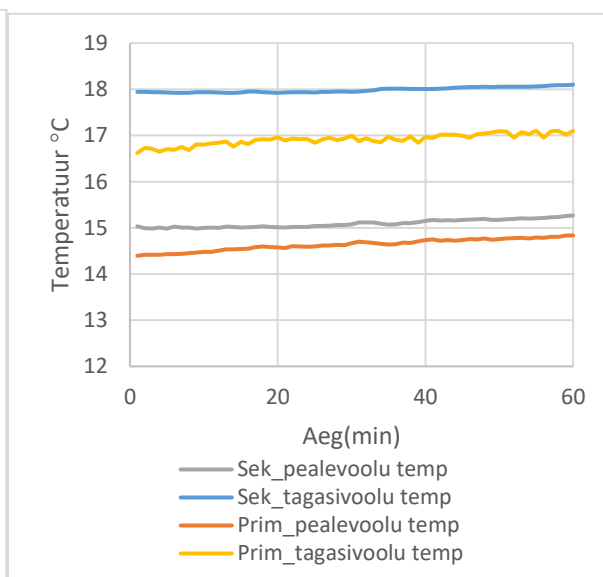
Pilt 10 - Ühe kiirguspaneeli paari termograafiline pilt (autori pilt)

3.2.1 Võimsusväljastus

Kiirguspaneeljahutuse puhul saavutati keskmiseks võimsusväljastuseks 1123 W. Kogu paneelide efektiivne pind oli 14,4 m², mis teeb paneelide erivõimsuseks 78 W/m². Tootja deklareeritud jahutusvõimsus on 177W paneeli kohta, kui temperatuuride vahe on 9°C. See teeks teoreetiliseks koguvõimsuseks 1416W.



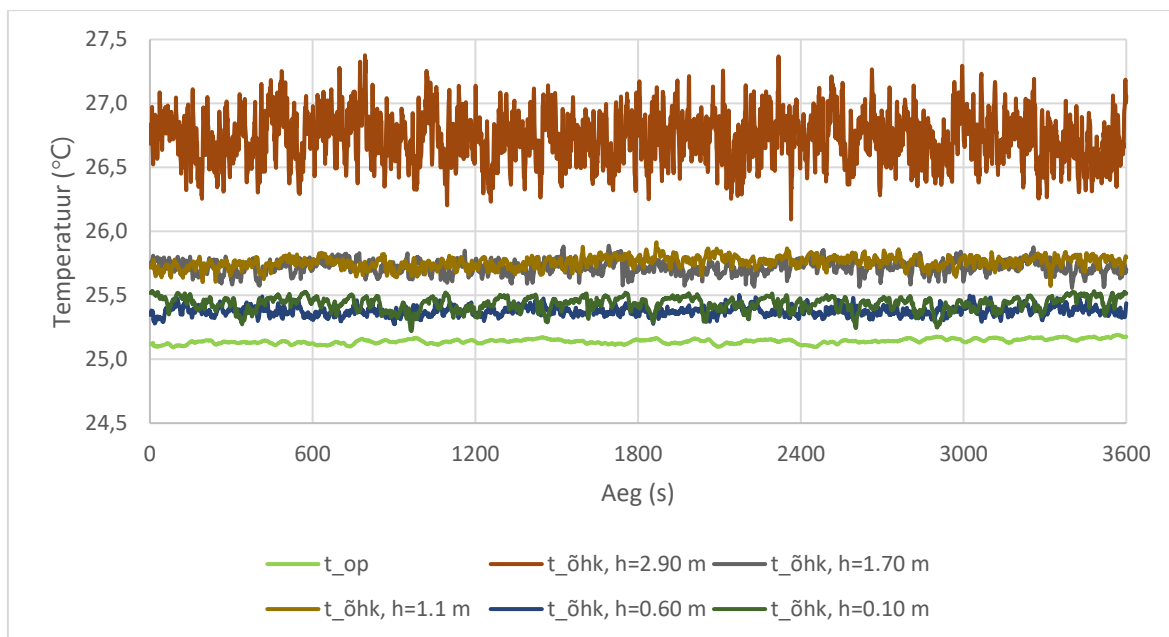
Joonis 9 - Kiirguspaneeljahutuse võimsus (autori joonis)



Joonis 10 - Primaar ja sekundaarpoole temperatuurid (autori joonis)

3.2.2 Ruumi temperatuurijaotus ja operatiivne temperatuur

Vastavalt joonisele 3 on näha, et ruumi temperatuur jääb vahemikku 25,4 kuni 26,8°C. Sellest viibimistsooni temperatuurid jäävad 25,4 kuni 25,7°C vahemikku. Võib väita, et viibimistsooni temperatuuride erinevus, mis on ligikaudu 0,3 kraadi, suure tõenäosusega ei tekita inimeses ebamugavust. Kuna laepaneelide ja lae vahele jääb 15 cm ruumi ja füüsikaliselt koguneb lae alla soojem õhk nagu ka hüpoteetiliselt võis eeldada. Paneeli all olev temperatuuriandur mõõtis 10cm paneeli all olevat õhutemperatuuri, mis oli keskmiselt 25,5°C. Sellest võib järeldada, et isegi kui paneeli pinna temperatuur on 9,2 kraadi madalam, ei ole tekkinud suurt konvektiivset õhuvahetust..

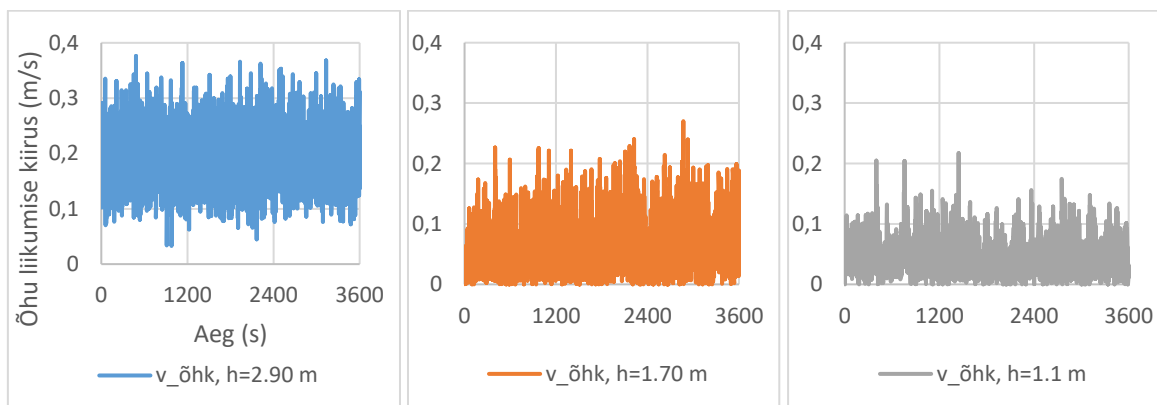


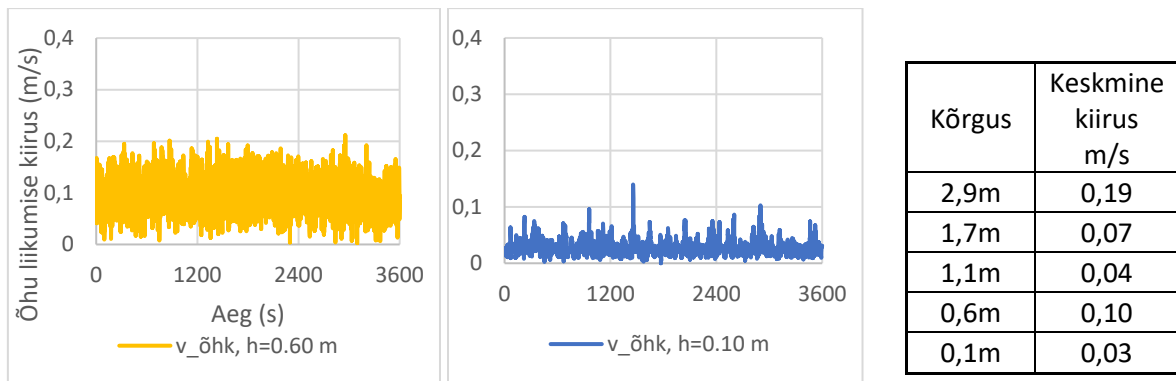
Joonis 11 – Kiirguspaneeljahtuse temperatuuride jaotus ühe tunni jooksul (autori joonis)

Ruumis mõõdetud operatiivne temperatuur oli $25,1^{\circ}\text{C}$, mis jääb vastavalt sisekliima klassile II ülemise piirväärtuse ligidale. Võrreldes operatiivset temperatuuri ja üleüldisi ruumi temperatuure, siis võib väita, et operatiivne temperatuur oli üsna ligilähedane õhutemperatuurile. Autor arvab, et natukene madalam operatiivne temperatuur tuli kiirguspaneelide madalast kiirgustemperatuurist, mille osakaal 9% ruumi ümbritsevast pinnast.

3.2.3 Õhu liikumise kiirused

Kiirguspaneelide puhul oli viibimistsooni kõrgeim keskmine õhu liikumise kiirus $0,1\text{ m/s}$, mis tagab sisekliima I klassi. Suurim keskmine kiirus oli lae alla $2,9\text{m}$ kõrgusel, milleks oli $0,19\text{ m/s}$. Kõrgem kiirus lae all viitab sellele, et kiirguspaneelidel tekkiv konvektiivne õhuvool sunnib õhu ringlema.





Joonis 12 - Kiirguspaneeli tekitatud õhu liikumise kiirused erinevate kõrgustel (autori joonis)

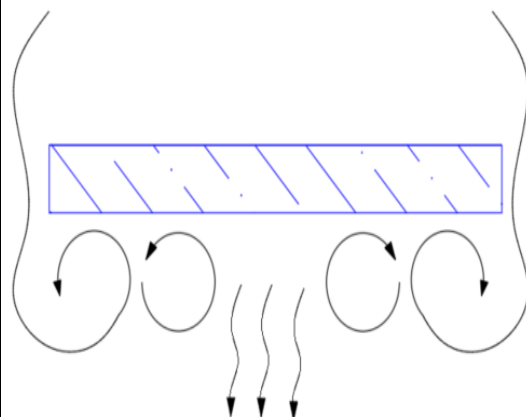
3.2.4 Kiirguspaneeljahutuse suitsukatse

Suitsukatsega visualiseeriti kiirguspaneelide poolt põhjustatud õhuliikumist ruumis. Selleks lasti suitsu paneelide ja lae vahel olevasse ligikaudu 15 cm suurusesse vahesse. Suits kandus lae ja paneeli vahel laiali ning andis võimaluse visuaalselt tuvastada õhuliikumist. Autori sõnul oli õhuliikumine väga väike ja vaevu tuvastatav. Paneelide äärtelt oli liikumine kõige tuvastatavam, mis on kujutatud joonisel 13. Vaadeldes joonist 12, siis mõõtetulemused näitavad, et lae all toimuvad suuremad õhuliikumised, kui viibimistsoonis, kuid keskväärtusena jäävad kõik mõõtepunktid sisekliima II klassi tingimustesse.

Kütte puhul on kiirguspaneelide kiirguslik ja konvektiivne mõju deklareeritud vastavalt 70%/30%. Jahutuse puhul kindlasti ei vasta need tõele, kuid suitsukatsest järeldades on siiski kiirguslik komponent kiirguspaneelidel üsna suur.



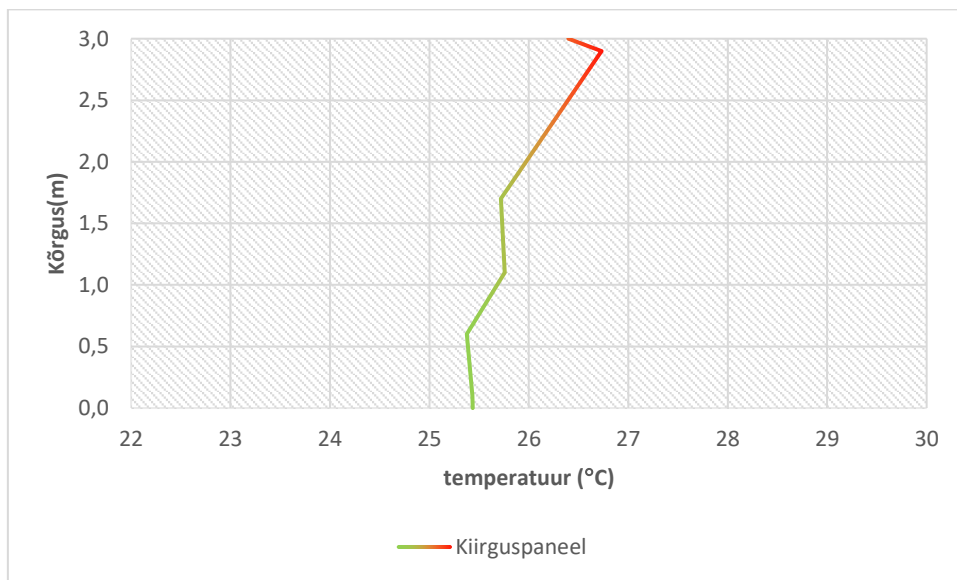
Pilt 11 - Kiirguspaneelide suitsukatse (autori pilt)



Joonis 13 - Kiirguspaneeli põhjustatud õhuliikumine (autori joonis)

3.2.5 Gradient

Kiirguspaneeli temperatuuri gradient tagab viibimistsooni temperatuuride erinevuse sisekliima klassi I. Kogu temperatuuride erinevus ulatus 1,3 °C.



Joonis 14 - Kiirguspaneeljahutuse gradient (autori joonis)

3.3 Ventilaatoriga radiaatorjahutus

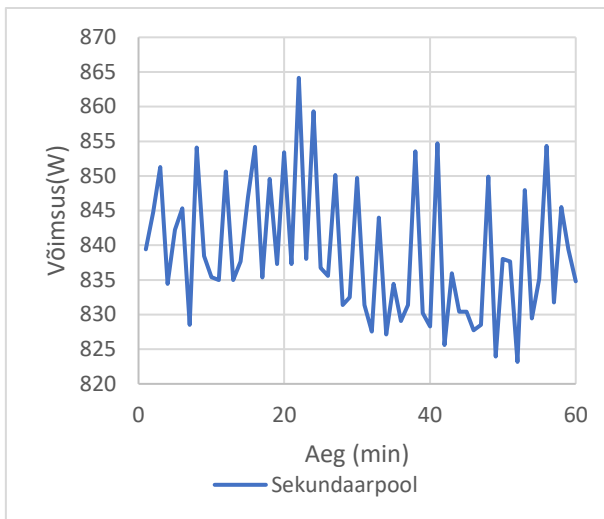
Katses kasutati Vasco poolt tehtud prototüüpset radiaatorid, mis hõlmas endas üsnagi standartset plekkradiaatorit, mille tootjaks oli Grubber Heizkörper. Toote mudel oli Classic uni C22-600-1200. Radiaatori oli altühendusega. Radiaatorile oli lisatud 10 ventilaatorit. Ventilaatorite eesmärk oli mehaaniliselt tekitada radiaatoris konvektiivsust ja läbi selle tõsta võimsusväljastust. Radiaatorile teostati kaks katset. Algselt oli radiaatorile seadistatud madal kiirusaste, millega teostati esimene katse. Teisel katsel pandi ventilaatorid maksimaalsel kiirusel tööle. Mõlema katse puhul määrati pealevoolu temperatuuriks 15 °C.



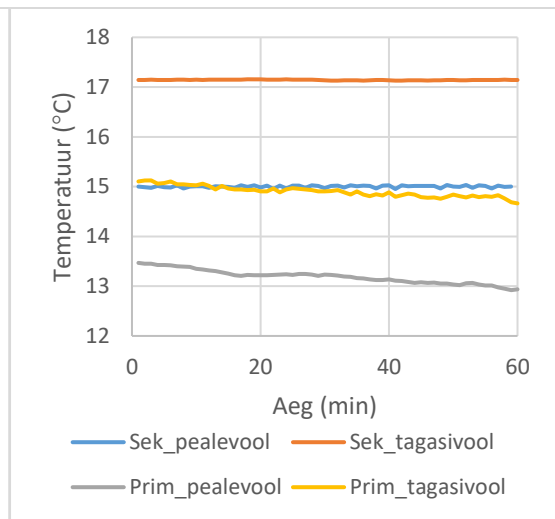
Pilt 12 - Radiaatori ventilaatorid vasakul ja radiaatori üldine pilt paremal (autori pildid)

3.3.1 Võimsusväljastus

Esimese katse puhul määrati pealevoolu temperatuur 15 °C peale. Radiaatori ventilaatorid töötasid madalal kiirusel ja keskmine pealevoolu vooluhulk oli 337 l3/h. Katsega saavutati tagasivoolu temperatuur 17,1°C ning võimsuseks 839 W. See teeb 210 W ühe radiaatori kohta. Katsel saavutati pealevoolu ja tagasivoolu temperatuuride vaheks 2,1°C.

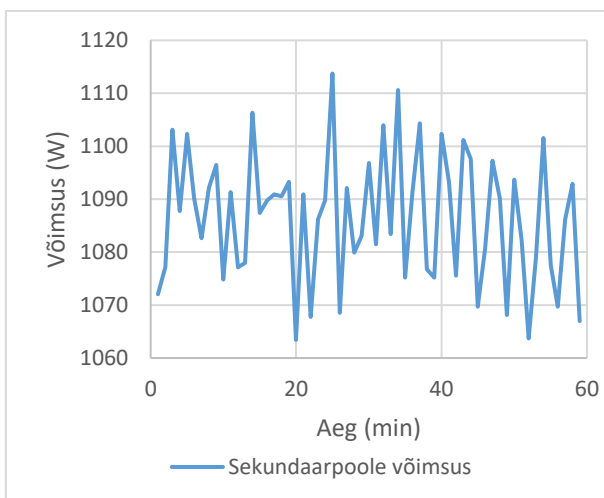


Joonis 15 Radiaatorjahutuse võimsusväljastus aeglasel kiirusel(autori joonis)

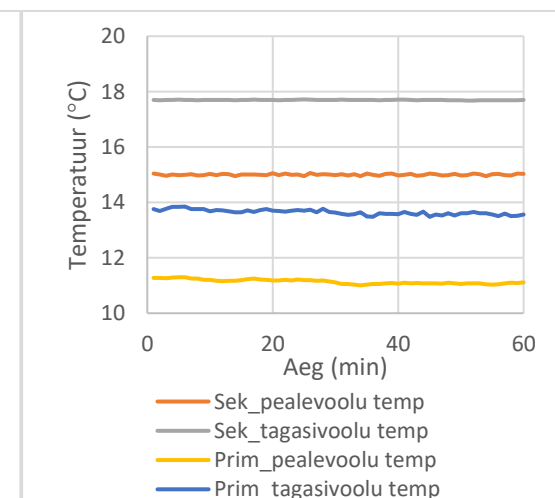


Joonis 16 - Primaar ja sekundaarpoole temperatuurid (autori joonis)

Teise katse puhul määrati pealevoolu temperatuur samuti 15 °C peale. Ventilaatorid aga töötasid maksimaalsel kiirusel ja keskmine vooluhulk 346 l/h. Teise katse puhul saavutati kõrgem tagasivoolu temperatuur ehk 2,7 °C, mis tähendab ka suuremat võimsust. Jahutusvõimsuseks saavutati keskmiselt 1087W, mis teeb ühe radiaatori kohta 272W.



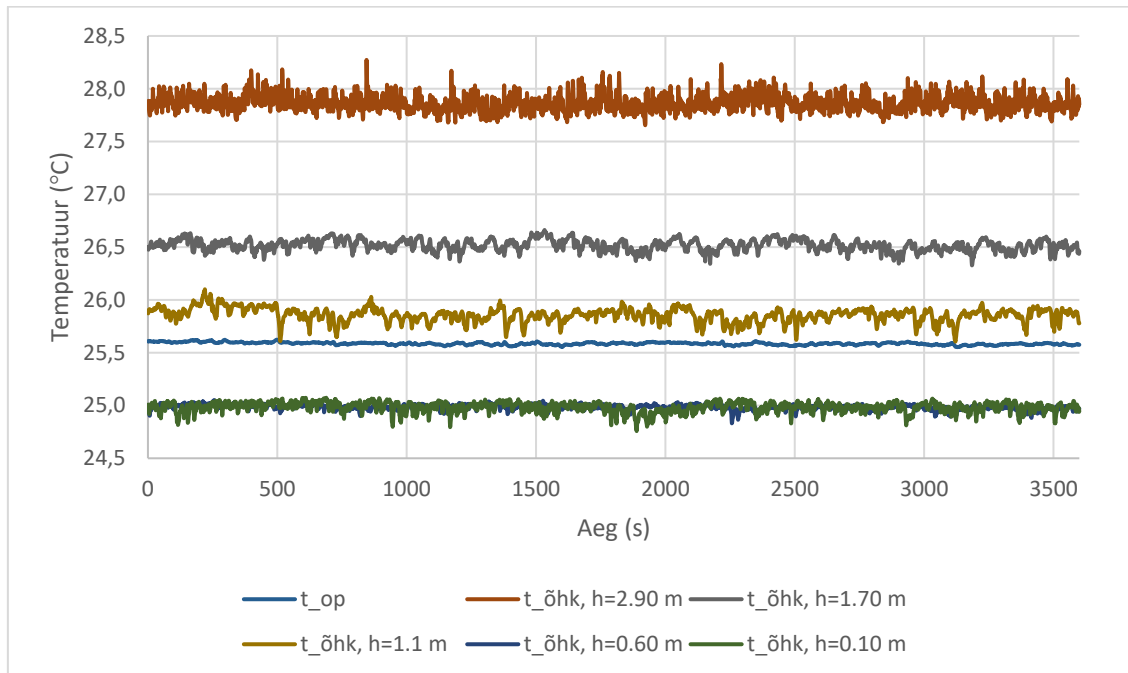
Joonis 17 – Radiaatorjahutuse võimsusväljastus kiirel kiirusel(autori joonis)



Joonis 18 - Primaar ja sekundaarpoole temperatuurid (autori joonis)

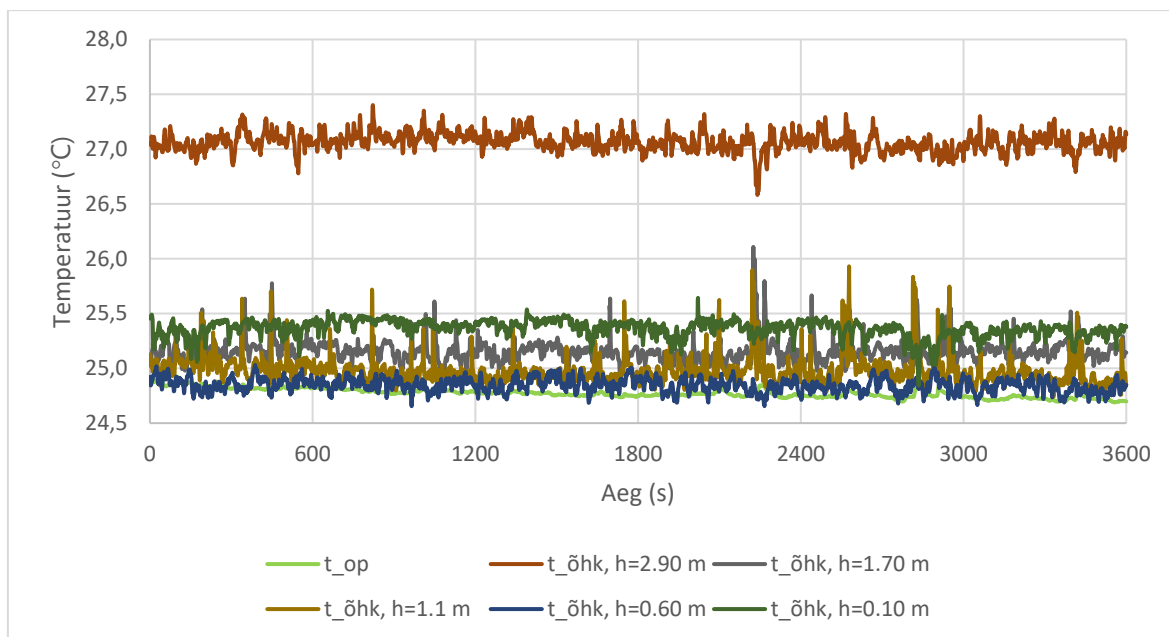
3.3.2 Ruumi temperatuurijaotus ja operatiivne temperatuur

Madala ventilaatori kiiruse puhul on näha, et õhk on osaliselt kihistunud. Madalaim viibimistsooni temperatuur on 25 °C ja kõrgeim 26,5 °C. Küll aga tagab 0,9°C viibimistsooni õhutemperatuuride erinevus sisekliima I klassi. Operatiivne temperatuur jääb 25,6 kraadi juurde, mis tagab sisekliima II klassi. Lae vastu on kogunenud oluliselt kõrgema temperatuuriga õhk, milleks on 27,9 °C.



Joonis 19 - Radiaatorjahutuse(aeglasel kiirusel) õhutemperatuuride erinevused ruumi eri kõrgustel (autori joonis)

Teise katse ajal tõsteti radiaatorite ventilaatorite kiirus maksimaalseks ja see suurendas ruumis õhujoo liikumist ning jahutusvõimsust. Sellest tulenevalt saavutati oluliselt ühtlasem õhutemperatuur viibimistsoonis. Viibimistsooni temperatuuride vahe jäi 0,5°C sisse, mis tagab kindlalt sisekliima klassi I. Suuremal kiirusel jõudis õhujuga laeni ning jahutas laealust õhu temperatuuri, ning saavutas keskmiselt 27°C. Operatiivne temperatuur liikus võrreldes ventilaatorite madala kiiruse katsega oluliselt madalamale ehk 24,8°C juurde, mis tagab ka sisekliima klassi I.



Joonis 20 - Radiaatorjahutuse(kiirel kiirusel) õhutemperatuuride erinevused ruumi eri kõrgustel (autori joonis)

3.3.3 Õhu liikumise kiirus

Kõrgus	Radaator/ täis kiirus	Radaator/ aeglane kiirus
2,9m		
1,7m		
1,1m		
0,6m		
0,1m		
2,9m	0,11	0,15
1,7m	0,08	0,05
1,1m	0,12	0,03
0,6m	0,09	0,03
0,1m	0,06	0,04

Tabel 4 - Radiaatorjahutuse õhu liikumise kiirused erinevatel kõrgustel (autori joonis)

Tulemused näitavad, et suur ventilaatorite kiirus tekitab ruumis rohkem õhu liikumist, kui madal kiirus. Suure kiiruse puhul on maksimaalne viibimistsooni õhu liikumise kiirus 0,12 m/s, kui madala puhul on kõrgeim 0,05 m/s. Mõlemal juhul aga tagab süsteem sisekliima klassi I. Madala ventilaatorite kiiruse puhul tekkis lae alla väga suure muutlikkusega õhuvool, mis varieerus 0,6 ja 0 m/s vahel. Suurel kiirusel oli õhujuga küll juhitud lakke, kuid seal on näha, et tegemist on küllaltki ühtlase õhu liikumisega, mille keskmiseks kiiruseks oli 0,11 m/s.

3.3.4 Suitsukatse

Suitsukatsetel puhuti radiaatori alumisse otsa suitsu, mis läbi radiaatori jahtus ja visualiseeris ventilaatoritest põhjustatud õhujuga. Esimesel katsel (pilt 13) kasutati täisvõimsusega ventilaatoreid. Katses oli näha läbi võre tulevaid õhujugasid, mis omavahel tekitasid tugevalt turbolentse õhuliikumise. Ventilaatorite maksimaalse kiiruse juures jõudis turbolentne juga laeni välja ja hakkas edasi ruumi poole liikuma nii mõõda lage kui ka otse ruumi. Ruum täitus mõnekümne sekundiga täielikult suitsuga.

Teise katse puhul kasutati aeglast ventilaatorite kiirust. Katse käik põhines esimesel, kuid aeglase kiiruse puhul käitus suits oluliselt teist moodi. Suits väljus radikast samuti väga turbolentselt, kuid õhujuga jõudis ~1,7m kõrgusele, kus edasi pöördus ta ruumi keskele. Edasi laskus see põranda poole ja hakkas mõõda põrandat laiali liikuma. Antud õhuliikumise käitumine võib seletada, miks madalama kiiruse juures oli ruumi temperatuuride erinevused suuremad, kui kõrge kiiruse puhul. Samuti autori sõnul võib üheks põhjuseks olla radiaatori lähistel olev ventilatsiooni plafoon. Kuna ventilatsiooni plafoon ei jaotanud õhku laiali, vaid suunas selle otse alla, siis võis see häirida radiaatori õhujoa liikumist. (pilt 13)



Pilt 13 - Radiaatorjahutuse suitsukatse. Vasakul kiire kiirus ja paremal aeglane kiirus (autori pildid)

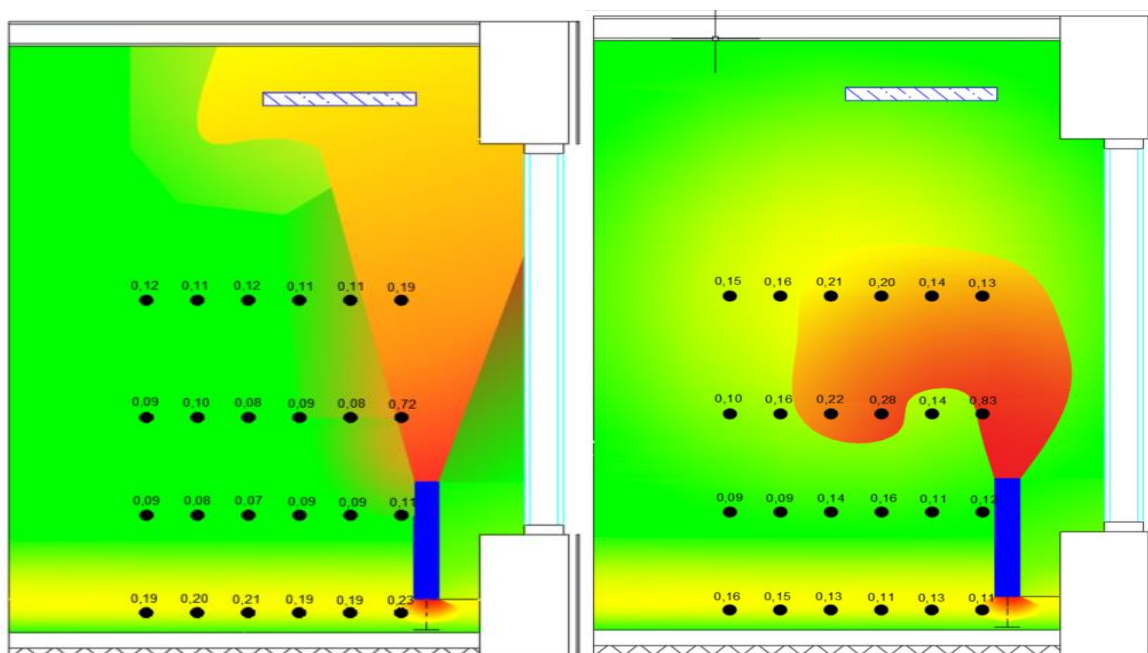
3.3.5 Õhujuga

Õhujoa ilmsestamiseks tehti kuus 1 minutilist õhuliikumise mõõtmist erinevatsest kaugustest. Õhu liikumise kiirust mõõdeti sisekliima mõõtestendiga Comfort Sense. Kiirusi mõõdeti 4 kõrgusel, milleks olid 0,1m; 0,6m; 1,1m; 1,7m. Mõõtepunktide kaugused radiaatorist olid, 5, 20, 40, 60, 80 ja 100cm.

Mõõtetulemustes oli näha, et kõrgel kiirusel oli viibimistsooni põhjustatud õhuliikumised minimaalsed ja sisekliima klass I oli igati täidetud. Kõige kiirem õhuliikumise kiirus mõõdeti 1,1m kõrgusel ja 5cm kaugusel radiaatorist, milleks oli 0,72 m/s, mis autori arvates vaibus suhteliselt kiiresti tänu tugevale turbolentssele õhuliikumisele. Põranda lähedal toimub samuti ruumi keskosast erinev liikumine. Liikumise üheks põhjuseks võib autori arvates olla radiaatori enda õhu sissetõmme, mis põhjustab põranda kohal natukene suurema õhuliikumise, kui ruumi keskväärtus.

Madalama kiiruse puhul jõudis õhujuga viibimistsooni ja võib tekitada inimeses ebamugavust. Viibimistsoonis punktis 40cm/1,1m mõõdeti õhukiiruseks 0,28, mis tagab kõiges sisekliima III klassi. Muidugi peab arvestama antud kohas ventilatsiooni mõju ja ebakorrektsset plafooni, mis võib antud katsele mõjuda võimendava elemendina.

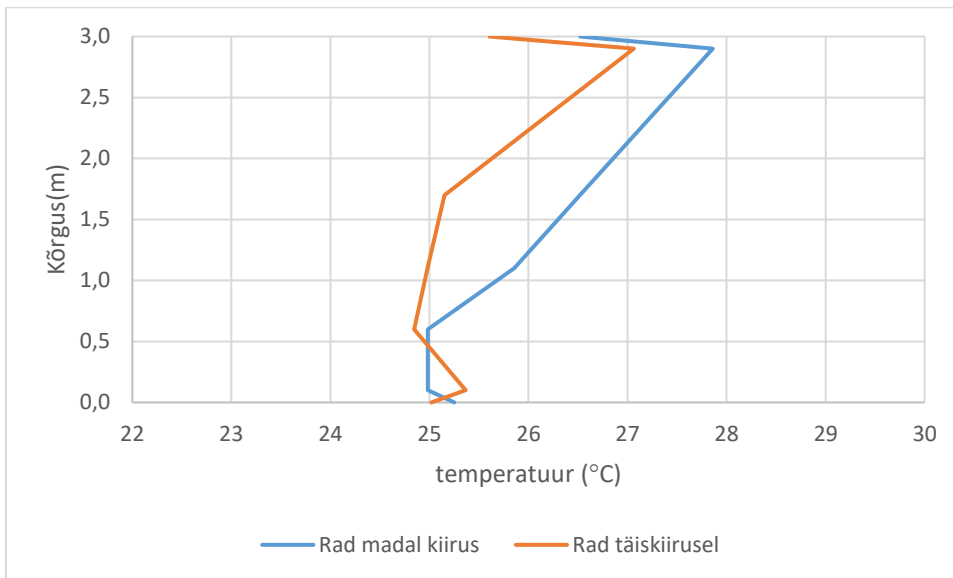
Vastavalt mõõdetud tulemustele konstrueeris autor tõenäolise õhu liikumiskiirused põhjustatud nii kiirest ventilaatori kiirusest kui ka madalast.



Pilt 14 - Radiaatorjahutuse õhujuga kiirel kiirusel(vasakul) ja õhujuga aeglase kiirusel(paremal) (autori joonis)

3.3.6 Gradient

Radiaatorjahutuse temperatuuri gradient erines madala ja kiire ventilaatorite võimsuse puhul, kus madala ventilaatorite kiiruse puhul oli temperatuuride erinevus viibimistsoonis 1,5°C. Kõrge kiiruse puhul saavutati viibimistsooni temperatuuride maksimaalne erinevus 0,5°C. Madala kiiruse puhul kihistus ruumi õhk rohkem ja maksimaalne temperatuur lae all oli 0,8°C võrra kõrgem ehk 27,9°C

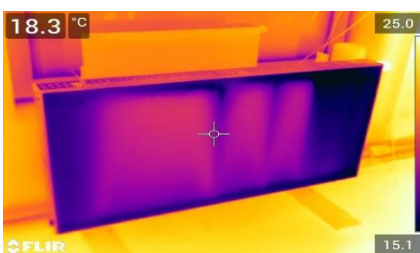


Joonis 21 - Radiaatorjahutuse gradiendid (autori joonis)

3.3.7 Radiaatori temperatuurijaotus

Vastavalt radiaatori termograafiafile oli näha, et jahutusväljastus oli küllaltki ebahühtlane. Visuaalsel hinnangul tulenes autori arvates see ebahühtlasest ventilaatorite paiknemisest. Radiaatori otstest puudusid ventilaatorid täielikult.

Autori hinnangul võib prototüübile 1-2 ventilaatori lisamisel radiaatori jahutusväljastust ühtlustada. Samuti pakub autor välja, et ventilaatorite paigutamine radiaatori alumisse osasse aitab õhuvoolul rahuneda radiaatori ribide vahel ja muutuda ühtlasemaks. Selle tulemusel võib madalama kiiruse puhul saavutada õhujoa jõudmise kõrgemale.



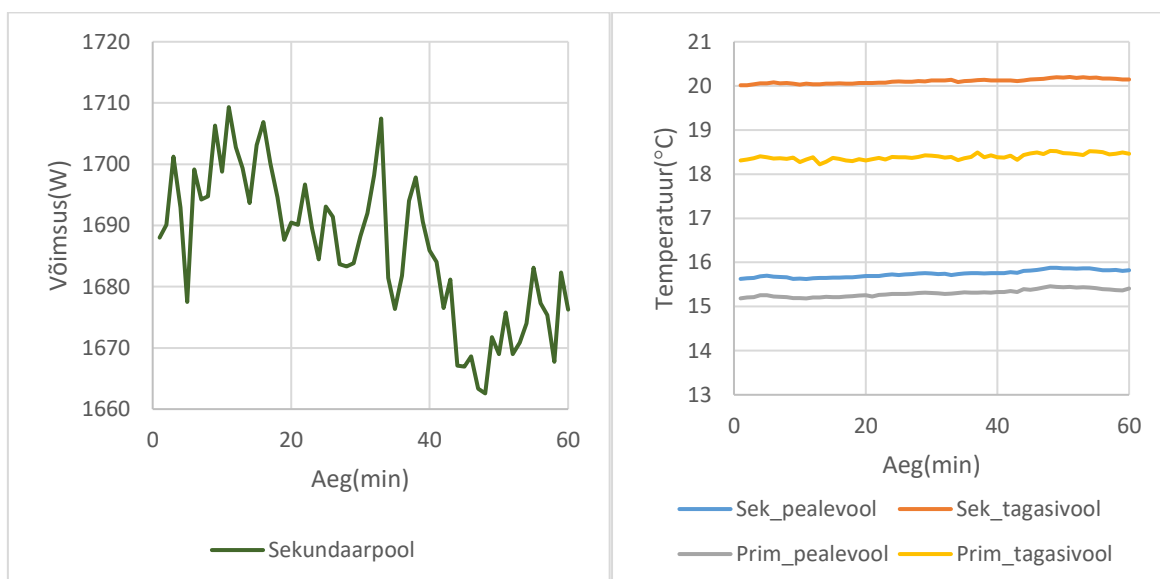
Pilt 15 - Radiaatori termograafiline pilt (autori pilt)

3.4 Puhurkonvektor

Puhurkonvektor jahutuse puhul kasutati ruumis kahte Midea MKG-300 siseseadte. Masina õhuvahetus kõrgel kiirusel on 510 m³/h. Katses kasutati madalat kiirust, mille õhuhulk oli 310 m³/h. Masina väljaviske kõrgus asus 2,5m kõrgusel. Seadmetele määrati pealevoolu temperatuur 15 °C, kuid katses jäi see 15,3 °C peale keskmiselt. Seadme õhuvõtt toimus 25,7°C juures.

3.4.1 Võimsusväljastus

Külmakandja pealevoolu vooluhulk oli katse vältel keskmiselt 332 l/h. Katses saavutati koguvõimsuseks 1686 W, mis teeb ühe masina kohta 843 W.



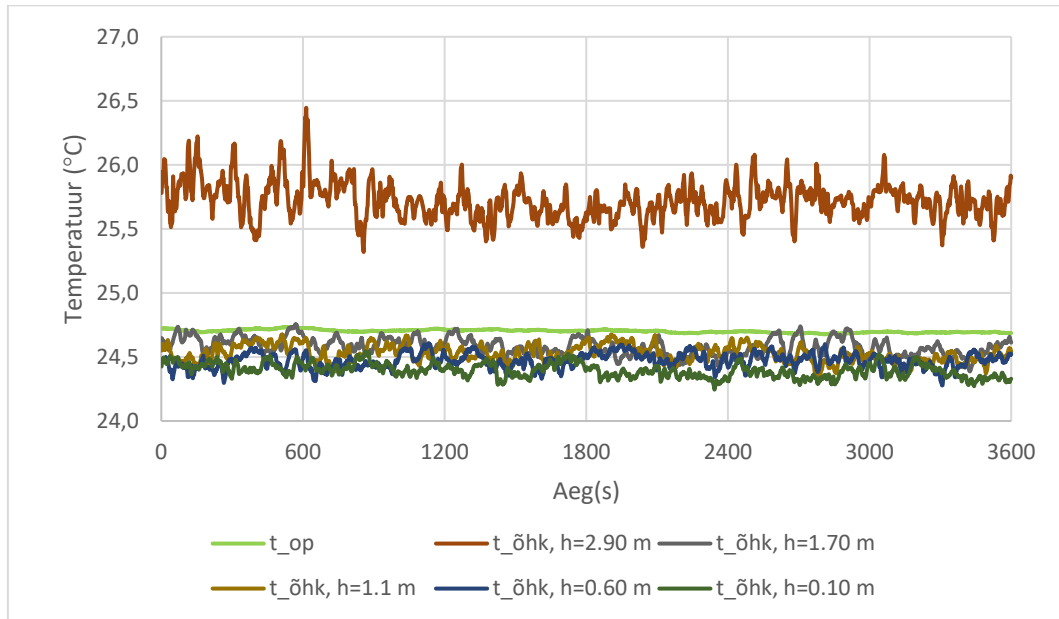
Joonis 22 – Puhurkonvektori võimsusväljastus (autori joonis)

Joonis 23 - Primaar ja sekundaarpoole temperatuurid (autori joonis)

3.4.2 Ruumi temperatuurijaotus ja operatiivne temperatuur

Puhurkonvektor põhjustas ruumi 1,3 °C ruumiõhu temperatuuride erinevuse. Viibimistsooni temperatuuride erinevus oli praktiliselt olematu ehk 0,2 °C. See tuleneb tõenäoliselt puhurkonvektori tööpõhimõtte olemusest, kus ruumi puhutakse tugev turbolentne õhujuga, mis segab ruumis olevat õhku. On näha, et operatiivne temperatuur on viibimistsoonide temperatuuridest kõrgem. Autori arvates võib tulemus olla põhjustatud kahest põhjusest. Kuna puhurkonvektor tekitab ruumi ainult konvektiivset jahutusvõimsust ja ruumi ümbritsevad tarindid olid kõrgema temperatuuriga kui õhk.

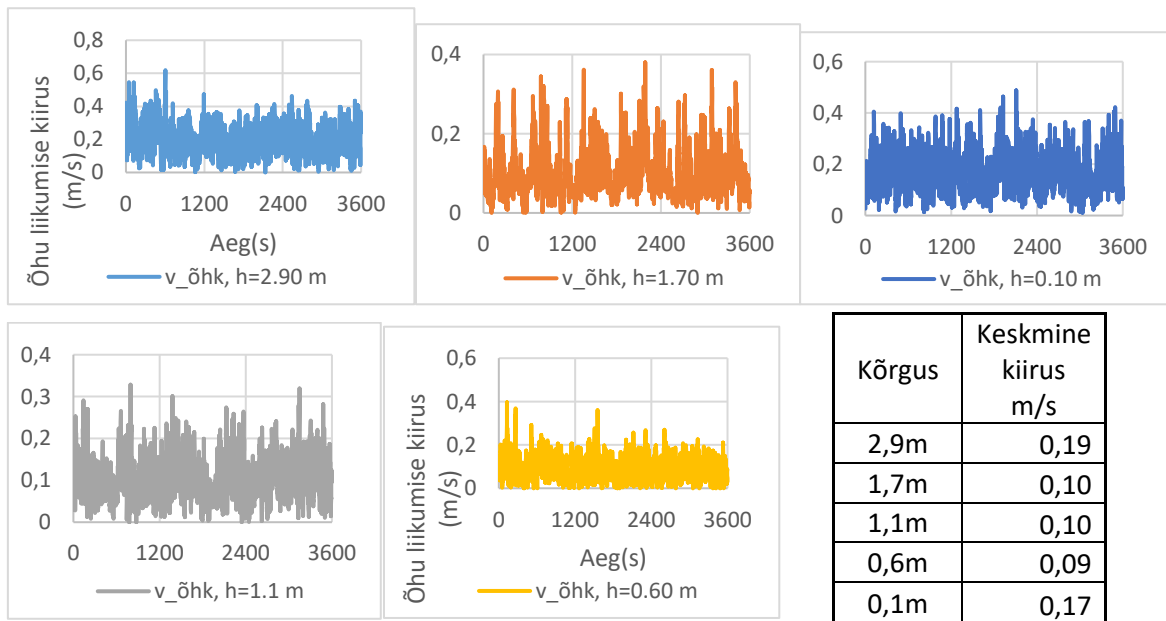
Operatiivne temperatuur tagab sisekliima klassi I.



Joonis 24 - Puhurkonvektori õhutemperatuuride muutus erinevatel kõrgustel

3.4.3 Õhu liikumise kiirus

Puhurkonvektori puhul on näha iga kõrguse peal suurt varieeruvust kiiruses. Seda põhjustab tõenäoliselt suur õhujuga, mis tekitab kaotilist õhu liikumist ruumis. On näha, et põrandal on viibimistsooni kõige suurem keskmine õhu liikumine ehk 0,17 m/s, mis tagab sisekliima klassi II. Ruumi kõige suurem õhu kiirus mõõdeti laes, mis keskmiselt oli 0,19 m/s.



Joonis 25 – Puhurkonvektori õhu liikumise kiirused erinevatel kõrgustel (väljaspool puhurkonvektori mõjutsooni)(autori joonised)

3.4.4 Suituskatse

Suitsukatse puhul kasutati ühte kahest puhurkonvektorist. Puhurkonvektori õhuvõtt oli masina kohal, kuhu suunati toru abil suitsu. Suits läbis puhurkonvektori jahutuspatareid ja väljus suure turbolentse kiirusega masinast. Seade oli sätestatud kõrge kiiruse peale. Masina õhu juhtlaba oli suunatud maksimaalsele kõrgusele, mida seade võimaldas.

Suitsukatsetes oli näha, et masina poolt tekitatud õhujuga suundus otse viibimistsooni ja visuaalselt sai eeldada, et õhuliikumise kiirused on kõrgemad, kui ühegi sisekliima klassi lubatud kiirused. Õhujuga suundus põrandast vastu ja seal liikus mööda põrandat valdavalt suurel kiirusel edasi ja jagunes ruumi laiali.

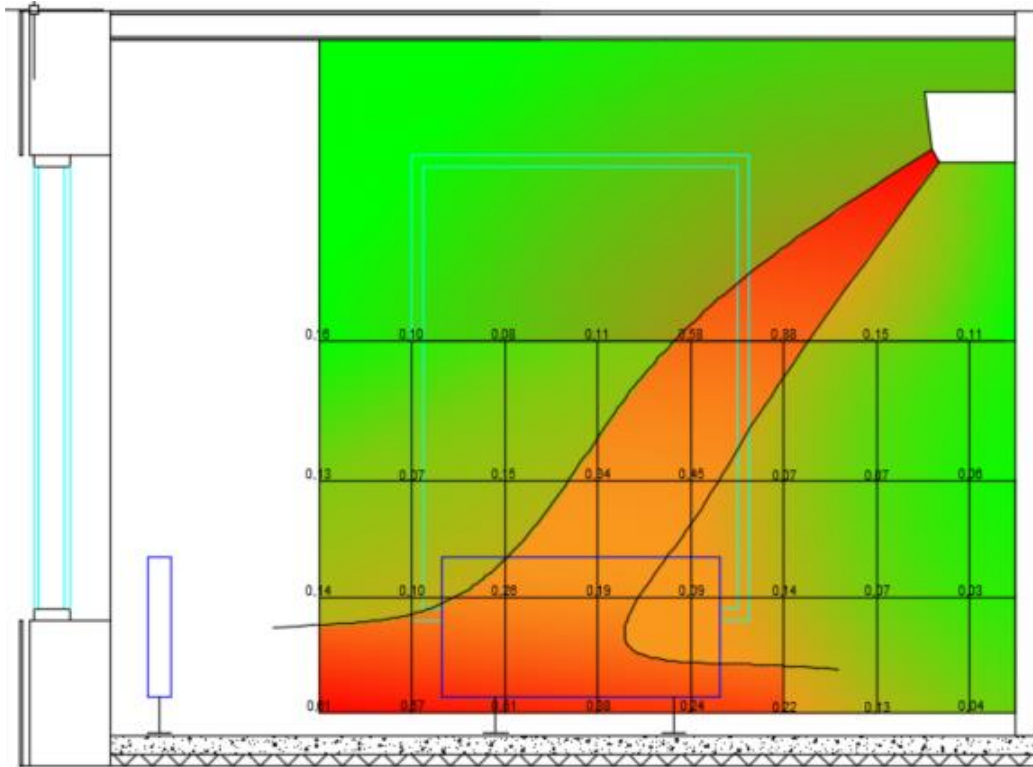


Pilt 16 – Puhurkonvektori suitsukatse (autori pilt)

3.4.5 Õhujuga

Õhujuga mõõdeti analoogselt radiaatori puhul. Sammuks valiti 40cm ja mõõdeti kuni 3m kaugusele seinast. Seinast esimene kaugus võeti 20cm. Tulemused näitasid vastavalt suitsukatsele, et õhujuga on suunatud otse viibimistsooni. Selle tulemusena mõõdeti viibimistsoonis kuni 0,88 m/s õhuliikumise kiiruseks. Antud kiirus viib puhurkonvektori IV sisekliima klassi, mis viitab puudulikule sisekliimale.

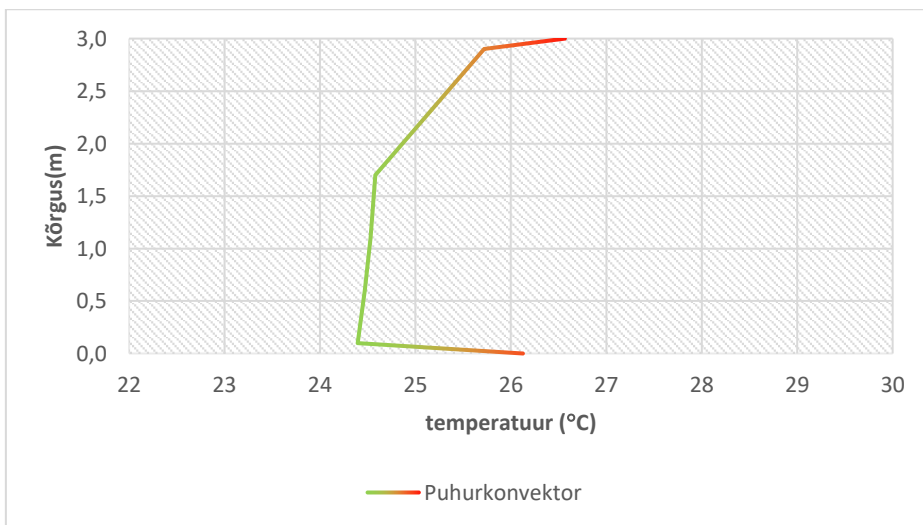
Vaadeldes ruumi planeeringut, siis antud seadet ei ole võimalik paigutada nii, et see ei tekitaks ühelegi kontorilaua taga istuvale inimesele ebamugavust.



Joonis 26 – Puhurkonvektori põhjustatud õhujuga ruumi (autori joonis)

3.4.6 Gradient

Puhurkonvektori ühtlane temperatuuride jaotus tagab sisekliima klassi I. Tulemuses on näha, et põranda pinnatemperatuur on oluliselt kõrgem, kui 0,1m kõrgusel olev õhutemperatuur. Autor arvab, et tegemist on põranda soojusmahtuvusega, mis testimisel ei jõudnud normaliseeruda. Tänu minimaalsele temperatuuride erinevusele 0,1-1,1m vahel tagab puhurkonvektor kindlalt sisekliima I klassi.



Joonis 27 - Puhurkonvektori gradient (autori joonis)

3.5 Jahutussüsteemide võrdlus

3.5.1 Soojusliku mugavuse võrdlus

Soojuslikku mugavust hinnati kolme nähtuse põhjal. Õhu liikumise kiirus, operatiivne temperatuur ja õhutemperatuuride erinevusest 0,1m ja 1,1m vahel.

Õhu liikumise kiirusest lähtuvalt on kõige parem süsteem põrandjahutus, mille konvektiivne õhuvool on viidud praktiliselt olematuks. Kõik süsteemid peale puhurkonvektori saavutasid sisekliima klassi I ja puhurkonvektor klassi II(arvestab ruumi keskväärtust) . Küll aga näitas lisamõõtmised, et puhurkonvektori tsoonis on ruumis väga suure õhu liikumise kiirusega, mis ei taga ka kõige kehvemat klassi ehk võib lugeda sisekliima puudulikuks.

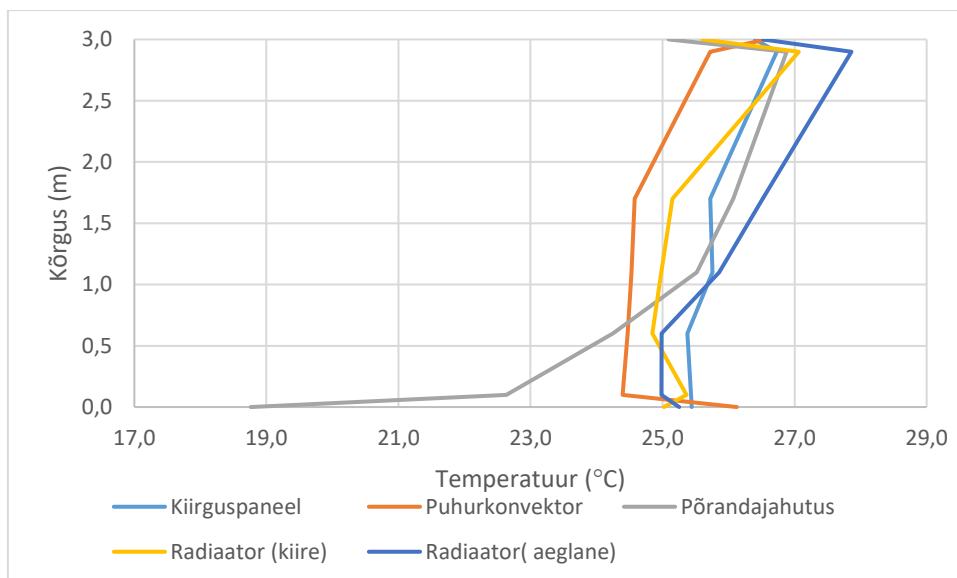
Kiirguspaneelide puhul on näha, et paneelidest tekib mõningane konvektiivne õhuvool otse alla, mis tuleneb tõenäoliselt külmema õhu langemisest alla poole.

Radiaatorjahutuse puhul määrab olulist rolli ventilaatorite kiirus. Suurema ventilaatori kiiruse puhul suureneb ruumi üldine keskmine kiirus kõrgemaks. Küll aga näitasid lisamõõtmised, et vahetult radiaatori ees olevas tsoonis toimus kõrge kiirusega radiaator paremini, mis suunas õhujoa lakke ning madala kiiruse puhul pöördus õhujuga liiga kiiresti viibimistsooni, mis põhjustas väikeses ulatuses sisekliima klassidesse sobimatut õhukiirust.

	Kiirguspaneel	Puhurkonvektor	Põrandajahutus	Radiaator (kiire)	Radiaator (aeglane)
Kõrgus	Keskmine kiirus m/s	Õhujoa maksimaalne kiirus m/s	Keskmine kiirus m/s	Keskmine kiirus m/s	Keskmine kiirus m/s
2,9m	0,19	0,19	0,08	0,11	0,15
1,7m	0,07	0,88	0,02	0,08	0,05
1,1m	0,04	0,45	0,02	0,12	0,03
0,6m	0,10	0,25	0,02	0,09	0,03
0,1m	0,03	0,61	0,02	0,06	0,04

Tabel 5 - Süsteemide õhu liikumise kiiruse võrdlustabel (autori tabel)

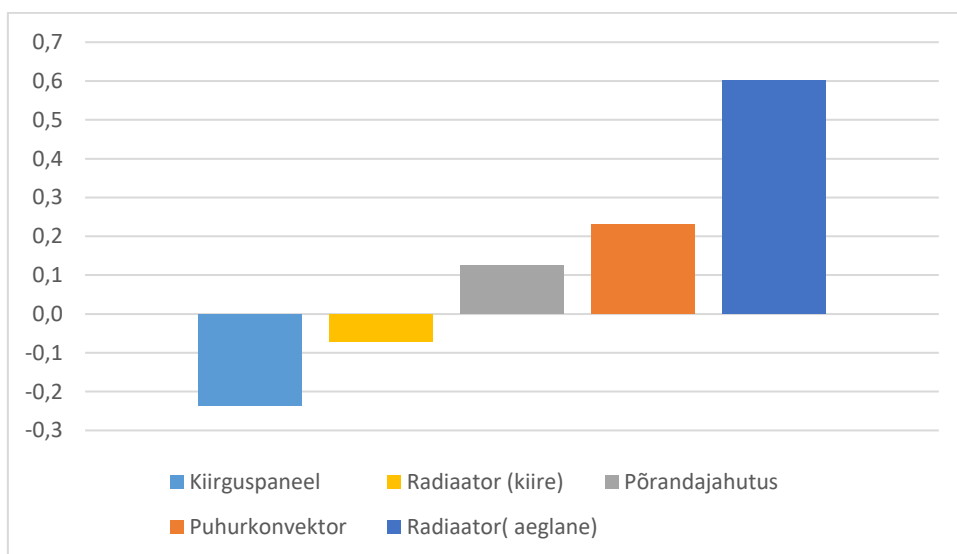
Õhutemperatuuride erinevuses viibimistsoonis oli kõige mugavam puhurkonvektorsüsteem, mille viibimistsooni temperatuuride erinevus oli 0,2 °C. See tagas ka vastavalt standardile sisekliima klassi I. Kõige kehvem süsteem õhutemperatuuride erinevuses oli põrandjahutus, mille viibimistsooni temperatuuride vahe 0,1 ja 1,1m vahel oli 3,9 °C, mis kategoriseerus sisekliima III klassi. Nii radiaatorjahutus(kiirel) kui ka kiirguspaneeljahutus saavutasid mõlemad sisekliima klassi I. Radiaatorjahutus madalal kiirusel saavutas sisekliima II klassi



Joonis 28 - Süsteemide gradientide võrdlusgraafik (autori joonis)

Operatiivse temperatuuri puhul võrreldi istuva inimese massikeskme kõrguse õhutemperatuuri ja operatiivse temperatuuri vahet.

Kiirguspaneel saavutas kõige parema operatiivse temperatuuri, mis ulatus $0,2^{\circ}\text{C}$ madalamaks $0,6\text{m}$ kõrgusest õhutemperatuurist. Samuti saavutas kõrgel kiirusel radiaator madalama operatiivse temperatuuri kui õhutemperatuuri. Nii puhurkonvektori kui ka põrandjahutuse puhul oli operatiivne temperatuur kõrgem kui õhu temperatuur $0,6\text{m}$ kõrgusel. Kõige halvema tulemuse saavutas madalal kiirusel radiaatorjahutus, mille operatiivne temperatuur oli $0,6^{\circ}\text{C}$ võrra kõrgem.



Joonis 29 - Süsteemide operatiivse temperatuuri erinevuse graafik lähtuvalt $0,6\text{m}$ kõrguse õhutemperatuurist (autori joonis)

3.5.2 Jahutusvõimsuse väljastuse võrdlus

Kõige suurema võimsuse saavutas puhurkonvektor, mis saavutas ainukesena üle 50 W/m² erivõimsuse. Seda eeldas ka autor katse alguses, kuna puhurkonvektoril on võime mehaaniliselt suurt kogust õhku ringi käidelda. Kõik teised süsteemid jäid alla 40 W/m². Põrandjahutus saavutas kõige madalama võimsusväljastuse, milleks oli 775W ehk 25 W/m². Sellise süsteemi kasutus on võimalik väga väikeste koormuste puhul.

Samuti oli radiaatorjahutuse võimsus suhteliselt madal. Küll aga on suur potentsiaal antud lahenduses. Kuna vanades renoveeritud küttesüsteemidega paneelmajades on plekkradiaatorid tavaline nähtus, siis ventilaatorite lisamisega on teoreetiliselt võimalik küttesüsteemid optimaalsete kuludega muuta suveperioodiks jahutussüsteemiks. Võimsusväljastus võib olla üsnagi arvestatav lähtudes sellest, et paneelmajade radiaatorite suurused on suhteliselt suured võrreldes tänapäevaste energiatõhusamate hoonetega.

Kiirguspaneelide erivõimsus põrandapinna suhtes oli radiaatoriga võrreldavalt madal, kuid erivõimsus paneeli pinna kohta saavutati 78 W/m². Seega on võimalik ka suure koormusega ruume jahutada, kui suudetakse vähemalt 90% lae pinnast paneelidega ära katta, kuid seda piiritlevad juba sisearhitektuurilised lahendused.

	Kiirguspaneel	Puhurkonvektor	Põrandajahutus	Radiaator (kiire)	Radiaator(aeglane)
Koguvõimsus (W)	1123	1686	775	1087	839
Erivõimsus (W/m ²)	36,2	54,4	25,0	35,1	27,1

Tabel 6 - Süsteemide võimsusväljastuse võrdlustabel (autori tabel)

3.6 Kondenseerumise kontroll

Selleks, et süsteemi pealevoolu lubada 15 kraadilist peab olema tagatud ka õige suhteline niiskus ruumis. 25°C ja 50% suhtelise niiskuse kastepunkt on 15 °C. Sellelt tulenevalt peab olema sissepuhke õhk konditsioneeritud, et vältida kondenseerumist süsteemide pindadel. Kondenseerumise kontrollimiseks on valitud üks kõige niiskemast ja kuumemast suvepäevast, mis viimase 16 aasta Riigi ilmteenistus on registreerinud Tallinnas. 2011 21. juulil mõõdeti õhutemperatuuriks 27,5 kraadi ja suhteliseks õhuniiskuseks 68%. Lisaks ventilatsioonile lisab ka ruumi inimene veeauru(41W), mis tuleb arvestada ventilatsiooniõhu kuivatamisel. Tulenevalt kahest niiskuskoormuse tekitajast peab ventilatsiooni õhku kuivatama minimaalselt 1,33 kg/h vett. Arvutus arvestab ainult katseruumi ventilatsiooni.

KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös uuriti kiirguspaneeli, ventilaatoritega radiaatori, puhurkonvektori ja põrandajahutuse võimsusväljastust ja mõju soojuslikule mugavusele. Soojusliku mugavuse hindamiseks ja süsteemide klassifitseerimiseks võeti aluseks EVS-EN 16798-1:2019. Soojusliku mugavuse hindamiseks vaadeldi õhutemperatuuride muutust ruumi eri kõrguste ja samuti õhu liikumise kiirusi. Samuti vaadeldi operatiivset temperatuuri.

Katse teostati Tallinna Tehnikaülikooli testhoones. Katses vaadeldi ühte 31 m² ruumi, kus oli paigaldatud kõik 4 süsteemi. Radiaatorsüsteemis oli neli C22-600-1200 radiaatorit. Kiirguspaneelsüsteemis oli kaheksa 600x3000 kiirguspaneeli. Puhurkonvektorsüsteemis kasutati kahte siseseadet ja põrandjahutuse puhul oli kogu 31m² ala kaetud põrandaaluse torustikuga.

Testhoone ruumis 9 paigutati ruumi astus nii, et see imiteeriks kontoriruumi. Inimeste kujutamiseks kasutati vastavalt EN 14240 tehtud 6 soojusmannekeeni. Soojusmannekeenid tekitasid vabasoojust nende sisse paigaldatud 3 hõõglambi abil ja jaotasid seda analoogselt inimesele. Ruumis mõõdeti soojusliku mugavuse mõõtestendiga operatiivset temperatuuri ja 5 kõrgusel õhu temperatuure koos õhu liikumise kiirusega. Samuti mõõdeti tarindite pinnatemperatuure hindamaks gradienti.

Uurimusest tuli välja, et õhu liikumise kiiruse suhtes saavutasid kõik süsteemid peale puhurkonvektori sisekliima klassi I ja puhurkonvektor saavutas klassi II. Küll aga toodi välja, et puhurkonvektor ja madala kiirusega radiaator tekitasid ruumi spetsiifilise õhujoa, mille tõttu olid teatud tsoonid sisekliima mõistes puudulikud ja inimesele ebamugavad.

Temperatuuride erinevuses saavutas kõige väiksema erinevuse vastavalt standardis EVS-EN 16798-1:2019 toodud kõrgustel 0,1-1,1m puhurkonvektor, mille temperatuuride erinevus oli ainult 0,2°C. Nii puhurkonvektor, kiirguspaneel kui ka radiaatorjahutus kiirel kiirusel saavutasid sisekliima klassi I. Põrandjahutuse puhul toimus tugev õhu kihistumine ja temperatuuride erinevus oli 0,1 ja 1,1 m vahel 2,9 °C. Põrandjahutus saavutas vastavalt kihistumisele sisekliima klassi II, kuid madala põrandapinna temperatuuri tõttu kukkus klassifikatsioon III taseme peale.

Operatiivset temperatuuri hinnati suhtena istuva inimese massikeskme kõrgusel. Selle tulemusena saavutas kiirguspaneel ja kiirel kiiruse radiaator madalama operatiivse

temperatuuri kui 0,6m kõrgusel olev õhu temperatuur. Nii põrandjahutuse kui ka madala kiirusega radiaatori puhul saavutati vastavalt 0,2 ja 0,1°C võrra kõrgem operatiivne temperatuur. Puhurkonvektor näitas, et kuigi ruumi õhutemperatuurid olid väga väiksel vahemikul varieeruvad, siis operatiivne temperatuur oli kõikidest temperatuuridest kõrgem ja lausa 0,6 °C kõrgem, kui kõrgusel 0,6m.

Võimsusväljastus oli kõige suurem puhurkonvektoril, mis saavutas 1686 W ehk 54 W/m² kohta. Puhurkonvektor oli ka ainuke süsteem, mis saavutas üle 50 W/m². Teised süsteemid jäid kõik alla 40 W/m². Radiaatorjahutus saavutas aeglasel kiirusel erivõimsuseks 27W/m² kohta ja kiirel kiirusel 35 W/m². Põrandjahutus saavutas kõige madalama erivõimsuse, milleks oli 25 W/m² kohta.

Kiirguspaneelid saavutasid erivõimsuseks 36 W/m² põranda pinna kohta, kuid 78W/m² kiirguspaneeli pinna kohta, mis võimaldab neid kasutada ka suure jahutuskoormusega ruumides, kui paneele on võimalik jaotada võimalikult optimaalselt ruumi lakke.

SUMMARY

In this master 's thesis, the radiant panel, fan assisted radiator, fan coil and floor cooling power output and impact on thermal comfort were studied. EVS-EN 16798-1: 2019 is the basis for the assessment of thermal comfort and the classification of systems indoor climate class. To assess thermal air comfort, the change in temperature at different heights of the room as well as the velocities of the air were observed. The operating temperature was also observed.

The experiment was performed in the test building of Tallinn University of Technology. One 31 m² room with all 4 systems installed was observed in the experiment. There were four C22-600-1200 radiators in the fan assisted radiator system. There were eight 600x3000 radiation panels. In fan-coil systems two indoor units were used and for floor cooling, the entire 31m² area was covered with underfloor piping.

In room 9 of the test building, the room was arranged to mimic an office space. 6 dummies made according to EN 14240 were used to imitate humans. The dummies generated free heat using 3 incandescent bulbs installed in it and distributed it approximately like free heat generated by humans. In the room, the operating temperature and the air temperatures at 5 altitudes with the air velocity were measured with a thermal comfort test stand. The surface temperatures of the structures were also measured to evaluate the temperature gradient.

The study showed that all systems except the fan-coil achieved a class I indoor climate in terms of air velocity and the fan-coil reached class II. However, it was pointed out that the fan-coil and the low-speed radiator created a specific air flow in the room, due to which certain zones were deficient in terms of indoor climate and uncomfortable for people.

The smallest difference in the temperature difference was achieved according to the standard EVS-EN 16798-1: 2019 at the heights of 0.1-1.1 m, the temperature difference of which was only 0.2°C. Both the fan coil, the radiant panel and the radiator cooling at high speed reached the indoor climate class I. In the case of underfloor cooling, strong air stratification took place and the temperature difference was 2.9°C between 0.1 and 1.1 m. The floor cooling reached class II indoor climate according to the stratification, but due to the low floor surface temperature, the classification fell to level III.

The operating temperature was evaluated as the ratio of the height of the sitting person's center of gravity. As a result, the radiation panel and high-speed radiator reached an operating temperature lower than the air temperature at a height of 0.6 m. Both the floor cooling and the low-speed radiator achieved 0.2 and 0.1 °C higher operating temperatures. The fan-coil showed that although the room air temperatures varied over a very small range, the operating temperature was higher than all temperatures and even 0.6 °C higher than at a height of 0.6 m.

The power output was highest on the fan-coil, which reached 1686 W or 54 W/m². The fan-coil was also the only system to achieve more than 50 W/m². The other systems were all less than 40 W/m². The radiator cooling reached a specific power of 27 W/m² at a slow speed and 35 W/m² at a fast speed. The floor cooling achieved the lowest specific power of 25 W/m².

The radiant panels achieved a specific power of 36 W/m² per floor surface, but 78 W/m² per radiant panel surface, which allows them to be used even in rooms with a high cooling load, if the panels can be distributed as optimally as possible in the room ceiling.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Keskkonnaministeerium, Kliimapoliitika põhialused aastani 2050, 2019, Loetud aadressil:https://ec.europa.eu/clima/sites/lts/lts_ee_en.pdf?fbclid=IwAR0sfRg1yoHwYx0gfHmZcX_JxvXNaJuTqM9nyj3e0bwKRy_4O0YWY0IPviQ Kasutatud: 17.12.2021
- [2] The European Committee for Standardization, „Energy performance of buildings - part 1: Impact of building automation, controls and building management - modules m10-4,5,6,7,8,9,10“ Loetud aadressil: <https://www.sis.se/produkter/byggnadsmaterial-och-byggnader/skydd-av-och-i-byggnader/varmeisolering/ss-en-15232-12017/> Kasutatud: 10.12.21
- [3] H. Voll, „Passiivsete arhitektuuriliste jahutusmeetmete kasutamine ühiskondlike hoonete kavandamisel. Innovatiivne lähenemine energiakokkuhoiule“ Loetud aadressil: <https://www.rkas.ee/sites/default/files/public-uploaded/files/juhendid/P%C3%A4evavalgus%20ja%20energiat%C3%B5husus.pdf> Kasutatud: 26.11.2021
- [4] T.-A. Kõiv ja A. Rant, *Hoonete küte*, 2. parandatud ja täiendatud trükk. Tallinn: TTÜ kirjastus, 2013.
- [5] Olli A. Seppänen ja W. Fisk, „Some Quantitative Relations between Indoor Environmental Quality and Work Performance or Health“ *HVAC&R Research*, vol. 12, no. 4, pp 957-973, 2006. Loetud aadressil: <https://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/10789669.2006.10391446?scroll=top&needAccess=true> Kasutatud: 19.12.2021
- [6] U.S. Department of Energy, Buildings Energy Data Book, 2011. Loetud aadressil: <http://web.archive.org/web/20130214012609/http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/default.aspx> Kasutatud: 08.12.2021
- [7] Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, EVS-EN ISO 7730:2006, EVS. Loetud aadressil: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-7730-2006> Kasutatud: 09.10.2021

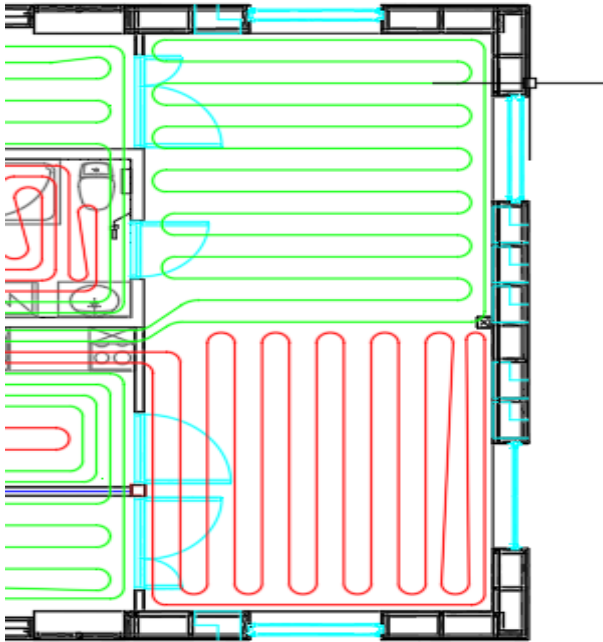
- [8] M. Bourdeau, X. qiang Zhai, E. Nefzaoui, X. Guo, P. Chatellier „Modeling and forecasting building energy consumption: a review of data-driven techniques“ *Sustain Cities Soc*, vol. 48,101533, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101533>
- [9] Yuanjin Xu, Fei Li, Armin Asgari, „Prediction and optimization of heating and cooling loads in a residential building based on multi-layer perceptron neural network and different optimization algorithms“ *Energy*, vol. 240, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122692>
- [10] H. Voll, E. Abel ja T. Tark, *Hoonete energiatarve ja sisekliima*, 2. parandatud ja täiendatud trükk. Tallinn: OÜ Presshouse, 2014.
- [11] B. Olesen, “Radiant floor cooling systems,” *ASHRAE J.*, vol. 50, no. 9, 16-22, 2008, https://www.researchgate.net/publication/235969797_Radiant_floor_cooling_systems (07.12.2021)
- [12] J. Feng, S. Schiavon, ja F. Bauman, “Cooling load differences between radiant and air systems,” *Energy Build.*, vol. 65, 301-321, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.06.009.
- [13] Lan Ding, „Thermal performance of ceiling radiant cooling panel with a segmented and concave surface: Laboratory analysis“ *Energy Reports*, vol. 6, 1409-1415, DOI:10.1016/j.egyr.2020.11.008
- [14] Du H, Lian Z, Lai D, Duanmu L, Zhai Y, Cao B, Zhang Y, Zhou X, Wang Z, Zhang X, Hou Z, Comparison of thermal comfort between radiant and convective systems using field test data from Chinese Thermal Comfort Database, *Building and Environment* (2022), doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108685>.
- [15] A. Odyjas, A. Górka, „Simulations of floor cooling system capacity“, *Applied Thermal Engineering*, vol. 51, no. 1–2, p. 84-90, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.08.029>
- [16] Zehnder, „Everything you need to know about Radiant Heating but didn't dare ask“ Loetud aadressil: <https://zehnder.ee/wp-content/uploads/RHC-brochure.pdf> Kasutatud: 08.12.21

- [17] Uponor, Radiant Cooling Design Manual. Minnesota United States, 2013. Loetud aadressil:<https://azaranstore.com/download/articles/238%20Radiant%20Cooling%20Design%20Manual.pdf> Kasutatud: 10.11.2021
- [18] V. Russak, A. Kallis, „EESTI KIIRGUSKLIIMA TEATMIK“ Tallinn, 2003. Loetud aadressil: https://www.ilmateenistus.ee/wp-content/uploads/2013/01/eesti_kiirguskliima_teatmik.pdf Kasutatud: 10.12.2021
- [19] Riigi ilmateenistuse kodulehekül. Riigi ajaloolised ilmaandmed. Loetud aadressil: <http://www.ilmateenistus.ee/kliima/ajaloolised-ilmaandmed/> Kasutatud: 26.11.2021
- [20] T. Kalamees ja J. Kurnitski, “Estonian test reference year for energy calculations.,” Proc. Est. Acad. Sci. Eng., vol. 12, no. 1, 40–58, 2006. https://www.kirj.ee/public/va_te/eng-2006-1-4.pdf (26.11.2021)
- [21] T. Kalamees ja J. Vinha, „Estonian Climate Analysis for Selecting Moisture Reference Years for Hygrothermal Calculations“ Journal of Building Physics, vol. 27, no. 3, 2004. <https://doi.org/10.1177/1097196304038839>
- [22] H. Voll, „Passiivsete arhitektuuriliste jahutusmeetmete kasutamine ühiskondlike hoonete kavandamisel. Innovatiivne lähenemine energiakokkuhoiule“ Loetud aadressil: <https://www.rkas.ee/sites/default/files/public-uploaded/files/juhendid/P%C3%A4evavalgus%20ja%20energiat%C3%B5husus.pdf> Kasutatud: 26.11.2021
- [23] Sisekeskkonna lähteandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust keskkonnast, valgustusest ja akustikast, EVS-EN 16798-1:2019/NA:2019, EVS. Loetud aadressil: <https://www.evs.ee/et/evs-en-16798-1-2019-na-2019> Kasutatud: 09.10.2021
- [24] Keskkonna soojuslikud omadused. Mõõtevahendid füüsikaliste suuruste mõõtmiseks, EVS-EN ISO 7726:2003, EVS. Loetud aadressil: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-7726-2003> Kasutatud: 08.12.2021

- [25] M. Santamouris, „Cooling the buildings – past, present and future“, *Energy and Buildings*, vol. 128, p. 617-638, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.034>
- [26] S. Link, “ Terviklik lähenemine energiatõhusale planeerimisele ja ehitamisele ” 2012, Loetud aadressil: <https://www.slideserve.com/miranda/jahutus-terviklik-l-henemine-energiat-husale-planeerimisele-ja-ehitamisele-siim-link-tallinna-tehnika-likool-soojust> Kasutatud: 10.12.21
- [27] Design Code for Heating Ventilation and Air Conditioning of Civil Buildings, GB 50736-2012, China Standard Press, Beijing (2012), Loetud aadressil: <https://www.chinesestandard.net/PDF.aspx/GB50736-2012> Kasutatud: 26.11.2021
- [28] Z. Wang, Y. Ding, G. Geng, N. Zhu „Analysis of energy efficiency retrofit schemes for heating, ventilating and air-conditioning systems in existing office buildings based on the modified bin method“ *Energy Convers.* Vol. 77, pp. 233-242, 2014 DOI:10.1016/j.enconman.2013.09.037
- [29] Tartu Ülikool, *Konvektsioon*. Loetud aadressil: <https://sisu.ut.ee/soojus/konvektsioon> Kasutatud 01.12.2021
- [30] Oasis, *What is a Fan Coil Unit - FCU Aircon?* (2020), Loetud aadressil: <https://www.oasis-aircon.com/blog/what-is-a-fan-coil-unit-fcu-aircon> Kasutatud: 08.12.21
- [31] Imit Blog, *Fan coil: strengths and weaknesses of having heating and cooling together* (2020) Loetud aadressil: <https://blog.imit.it/en/home/fan-coil-strengths-and-weaknesses-of-having-heating-and-cooling-together/> Kasutatud: 10.12.2021
- [32] Kensaheatpumps, *Fan Assisted Radiators and Heat Pumps* (2021) Loetud aadressil: <https://www.kensaheatpumps.com/wp-content/uploads/2014/09/Factsheet-Fan-Assisted-Radiators-V2.pdf> Kasutatud: 01.12.2021
- [33] NOBE, TTÜ Tehnoloogiline testhoone, 2013. Loetud aadressil: <https://nobe.ee/projektid/ttu-tehnoloogiline-testhoone/> Kasutatud: 26.11.2021

- [34] Nibe kodulehekülg. Nibe Split ACVM 270 paigaldus- ja hooldusjuhend. Loetud aadressil: <https://www.nibe.eu/assets/documents/19289/331202-4.pdf> Kasutatud: 26.11.2021
- [35] Eurom, E-Convect metal 1000. Loetud aadressil: <https://eurom.nl/en/product/heating/convectors/e-convect-metal-1000/> Kasutatud 26.11.2021
- [36] OneSet, kodulehekülg, Air/Water/Soil Temperature Senso. Loetud aadressil <https://www.onsetcomp.com/products/sensors/tmcx-hd/>, Kasutatud: 11.10.2021
- [37] FLIR Systems, Inc kodulehekülg. Advanced Thermal Camera Flir E95. Loetud aadressil: <https://www.flir.com/products/e95/?model=78503-0301> Kasutatud: 10.12.2021
- [38] OneSet, kodulehekülg, OBO 4-Channel Analog Data Logger. Loetud aadressil, <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/ux120-006m/> Kasutatud: 11.10.2021
- [39] Testo, Testo 440 dP - Air velocity and IAQ measuring instrument with differential pressure sensor. Loetud aadressil: <https://www.testo.com/en-US/testo-440-dp/p/0560-4402> Kasutatud: 10.12.2021
- [40] Testo, testo 405i - Hot-wire anemometer wireless Smart Probe Loetud aadressil: <https://www.testo.com/en-US/testo-405i/p/0560-1405>. Kasutatud: 10.12.2021
- [40] Dantec Dynamics, "ComfortSense specification," 2019

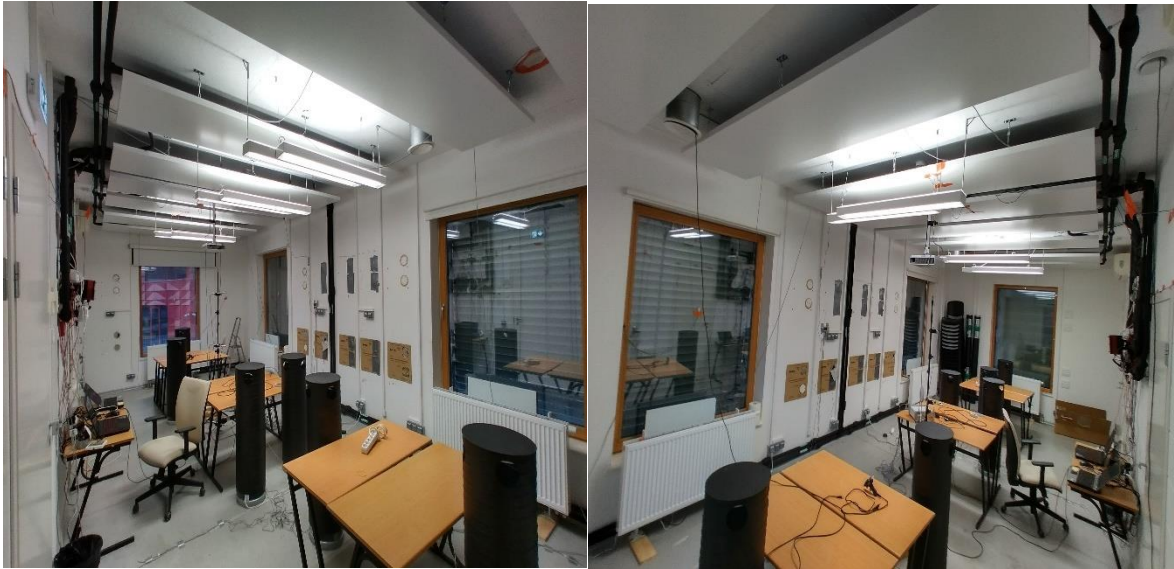
LISAD



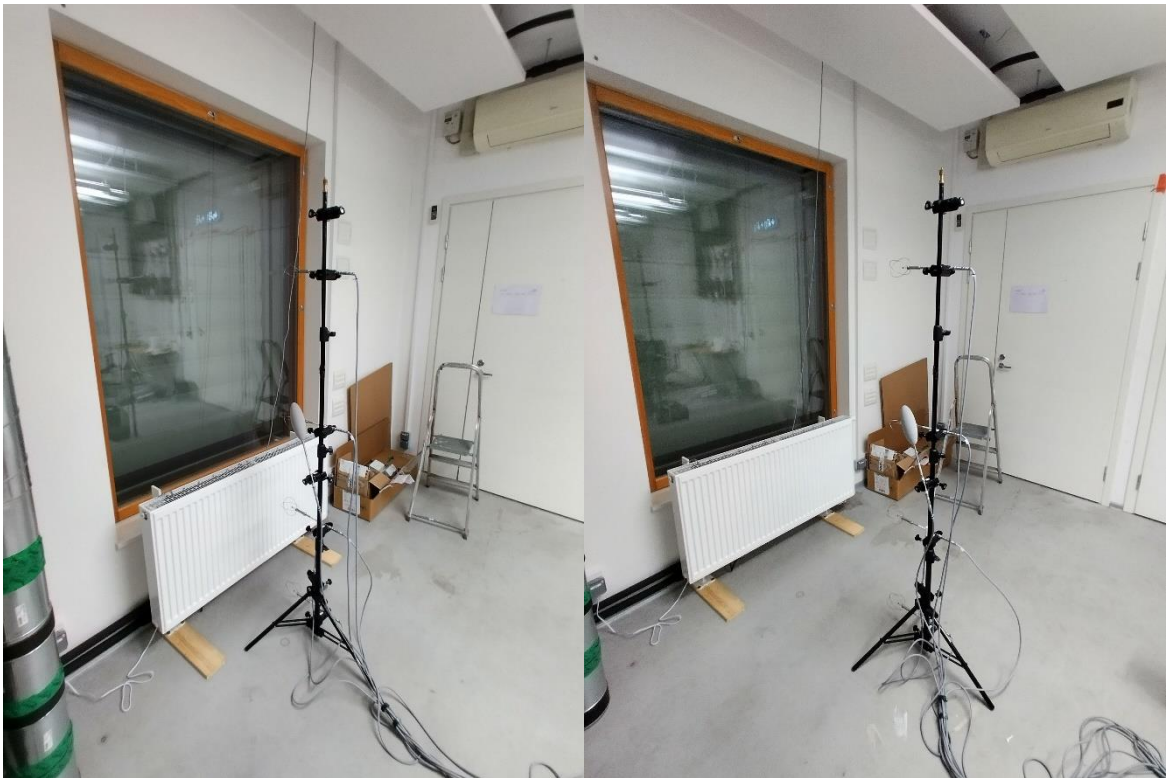
Lisa 1 - Põrandakontuuride teostusjoonis



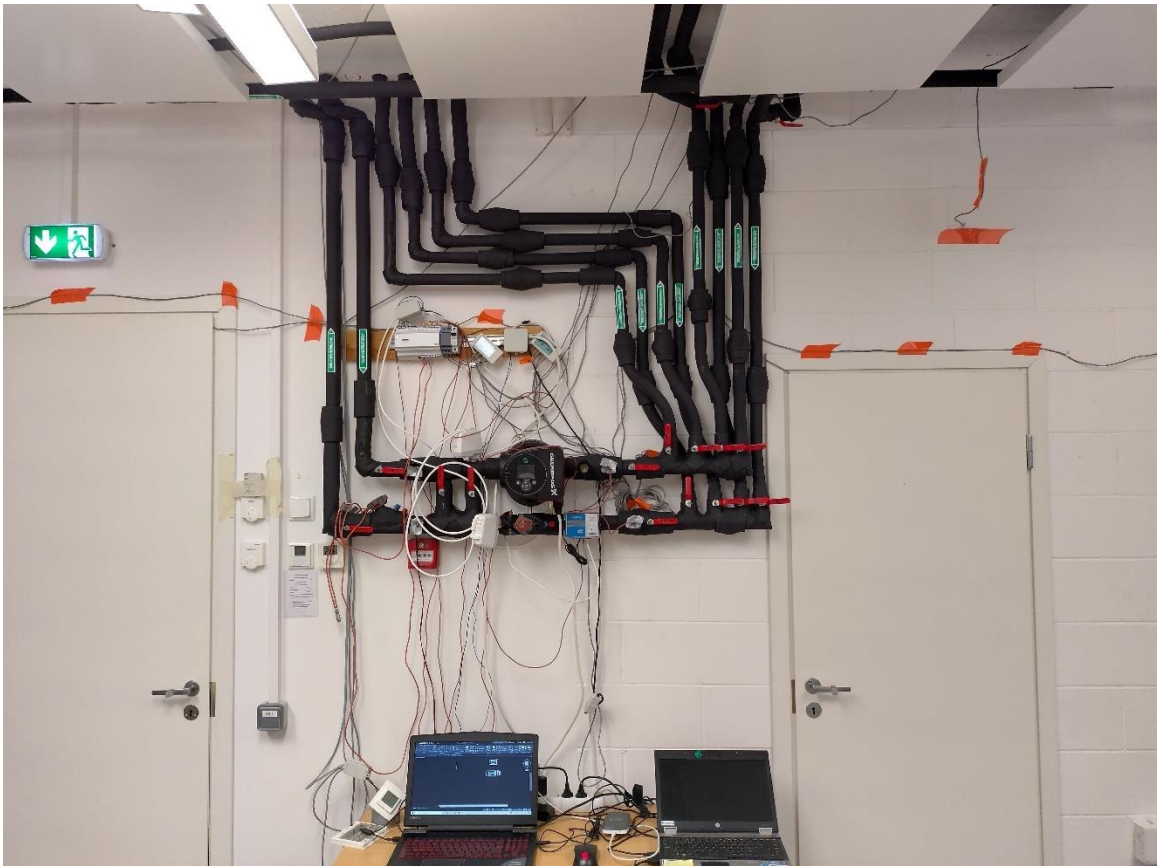
Pilt 17 - Ventilatsiooni suitsukatse, mis näitas halba õhu jaotust ruumis



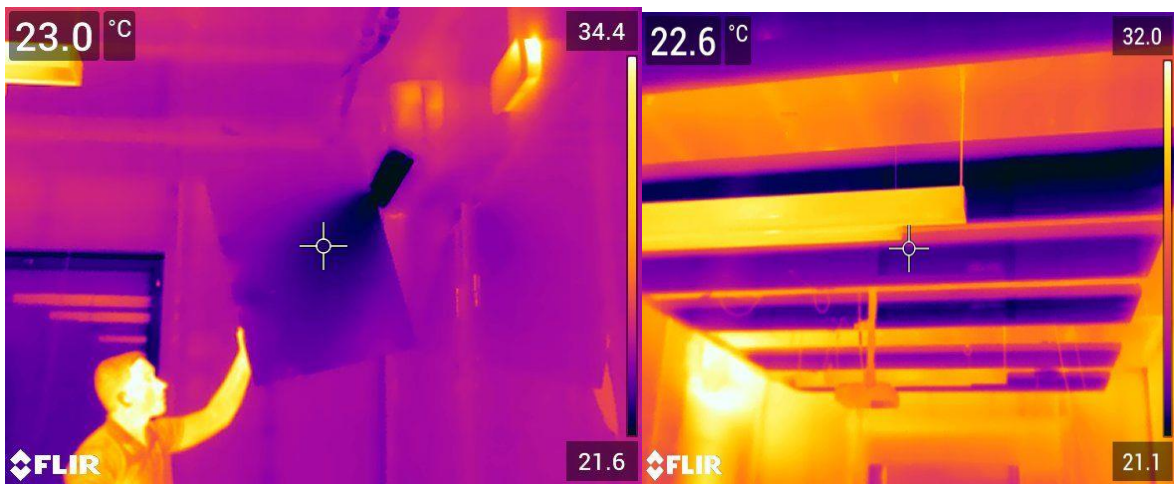
Pilt 18 - Katseruim (autori pilt)



Pilt 19 - Radiaatori õhu liikumise kiiruste mõõtmised

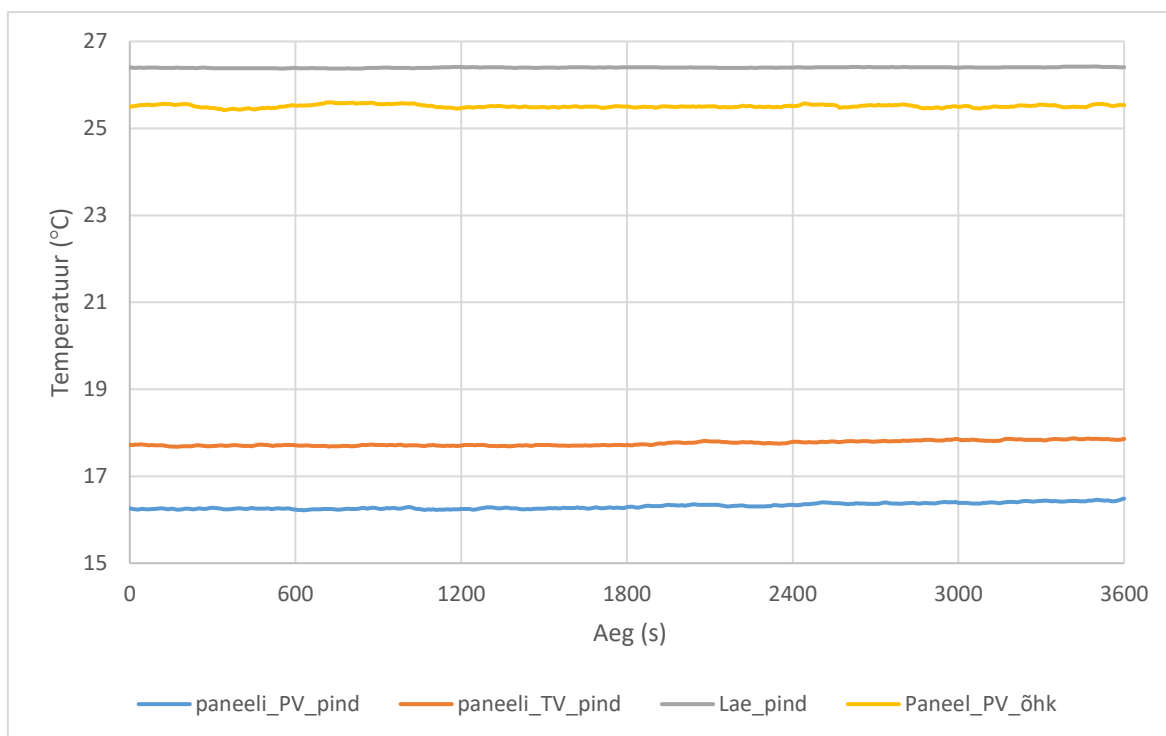


Pilt 20 - Segamissõlm (autori pilt)

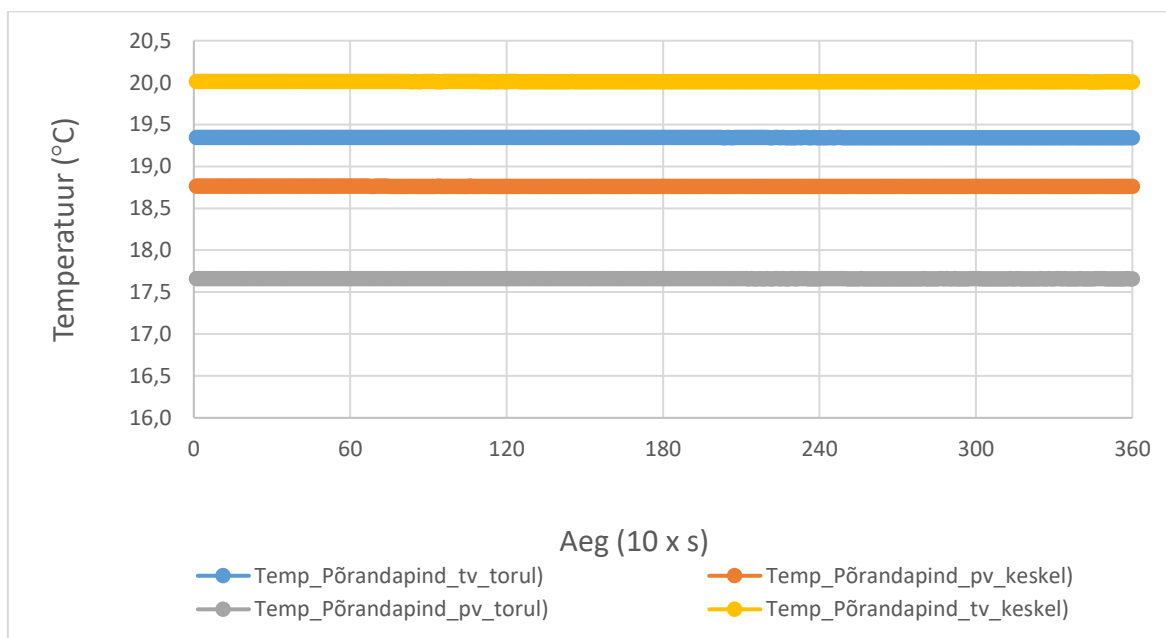


Pilt 21 - Puhurkonvektori õhujuga termokaamera (vasakul) kiirguspaneelide termograafiline pilt tööseisundis (paremal) (autori pildid)

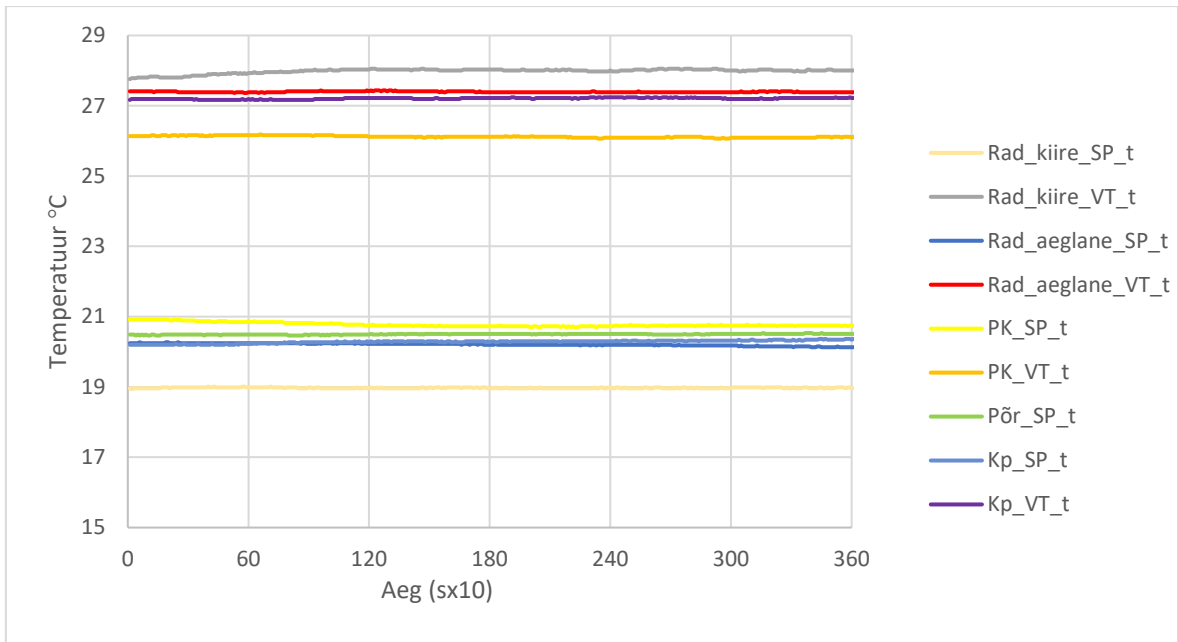
GRAAFILINE LISA



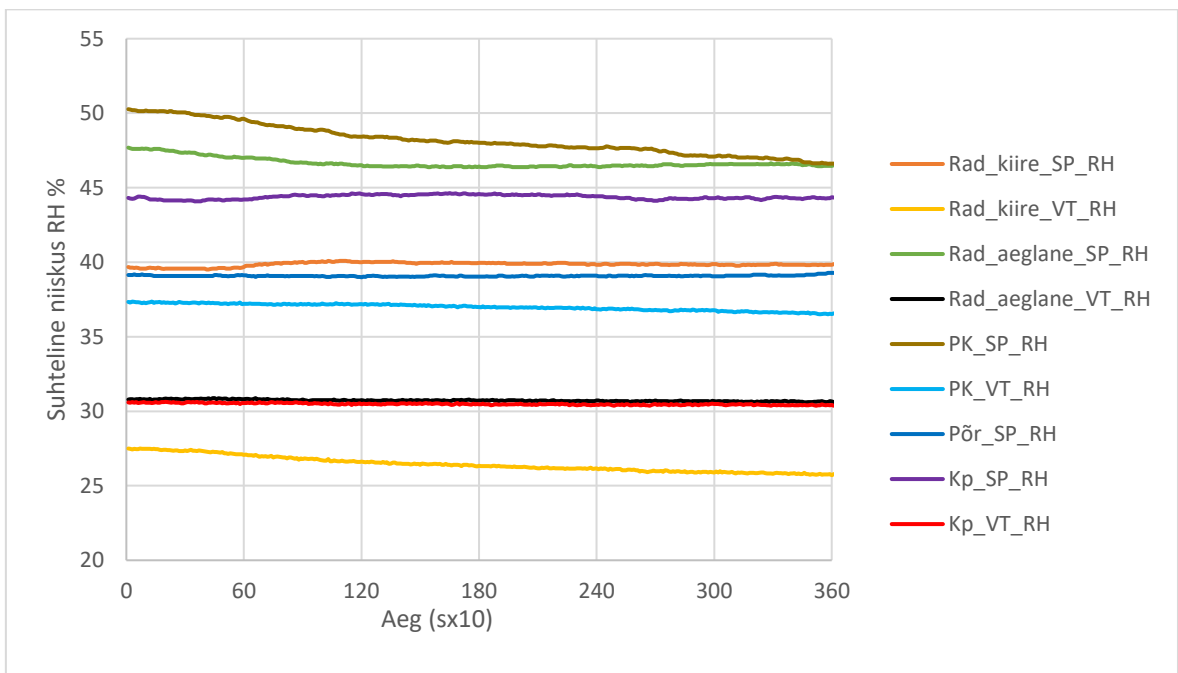
Joonis 30 - Kiirguspaneeli pinnatemperatuurid ja muud katse iseloomulikud temperatuurid (autori joonis)



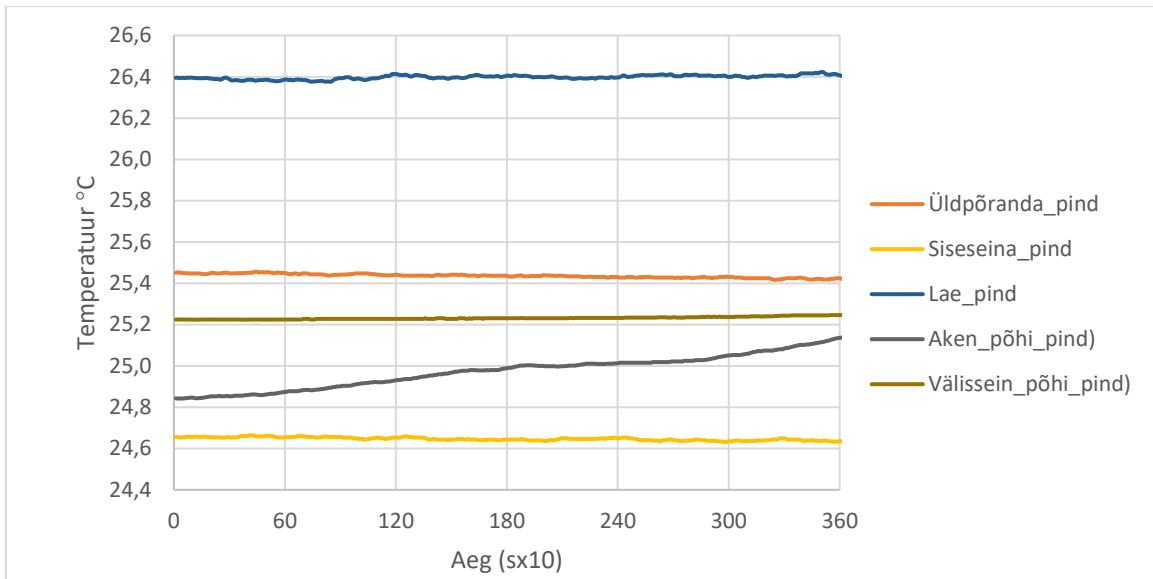
Joonis 31 - Põranda pinnatemperatuurid põrandjahutusel (autori joonis)



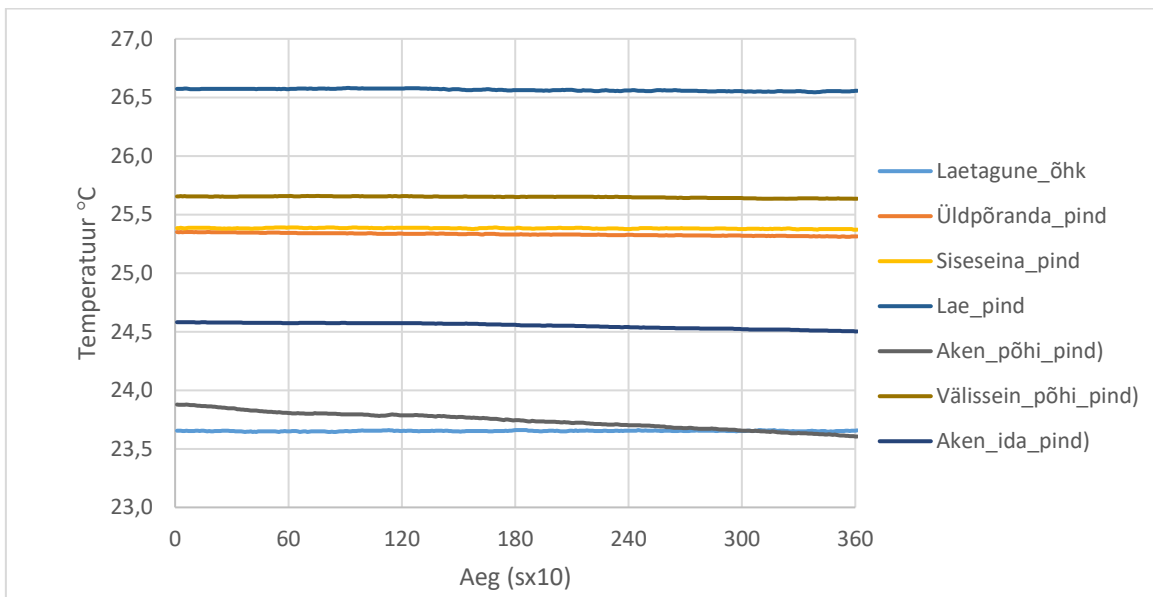
Joonis 32 - Mõõdetud ventilatsiooni temperatuurid katsete ajal (autori joonis)



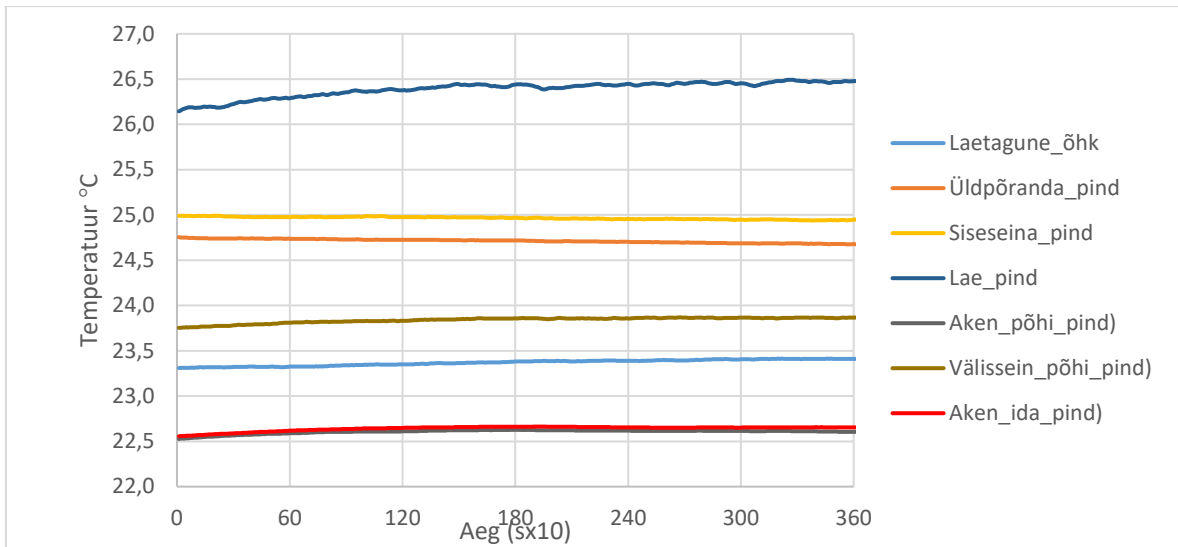
Joonis 33 - Mõõdetud ventilatsiooni suhtelised niiskused katsete ajal (autori joonis)



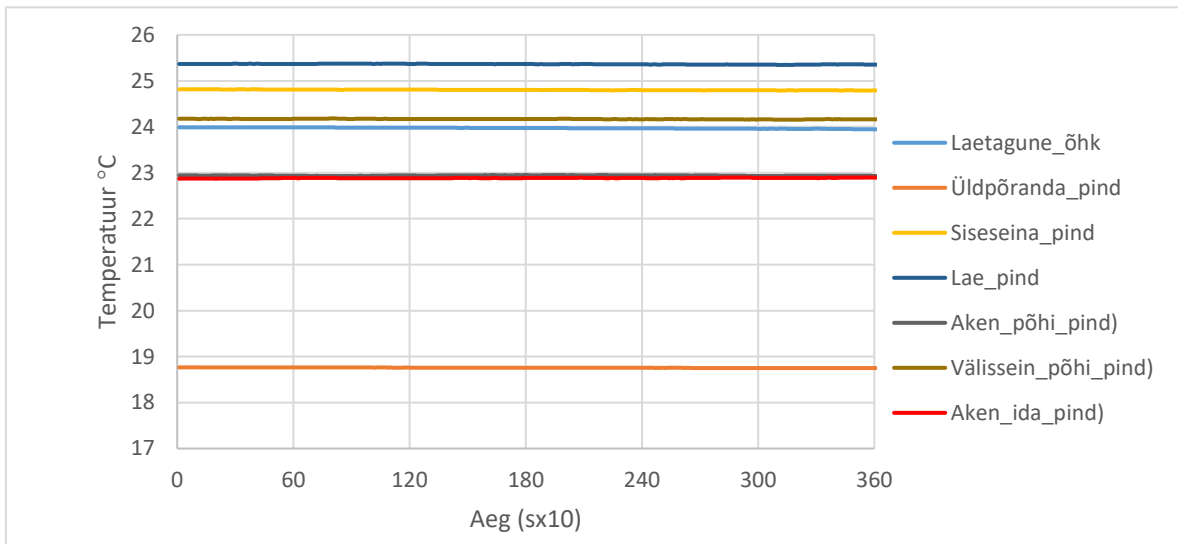
Joonis 34 - Kiirguspaneeli katsel ruumi pindade temperatuurid (autori joonis)



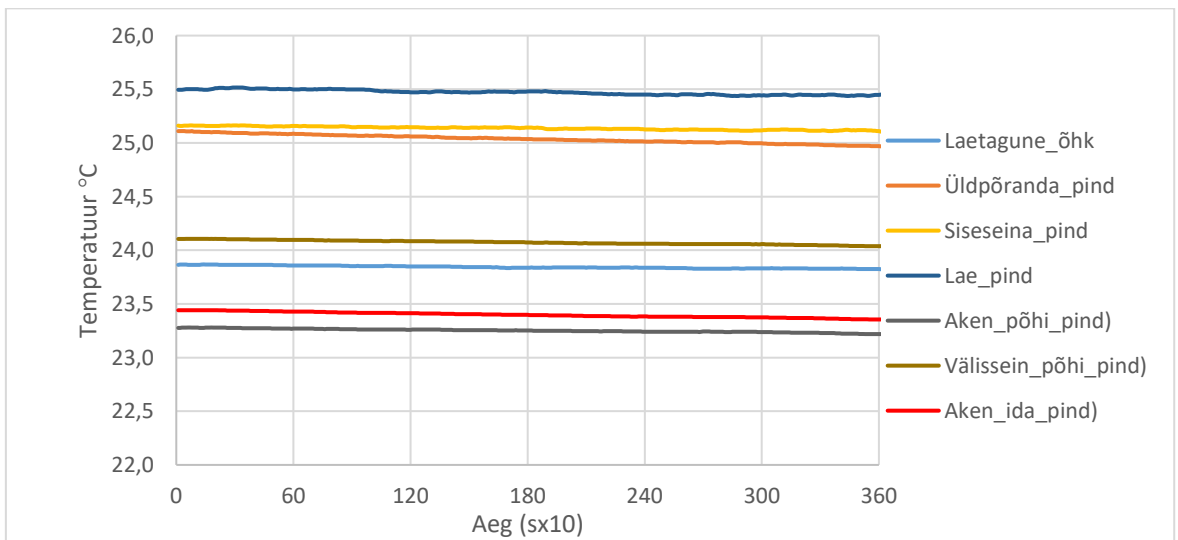
Joonis 35 - Radiaatori aeglase kiiruse katsel ruumi pindade temperatuurid (autori joonis)



Joonis 36 - Radiaatori kiire kiiruse katsel ruumi pindade temperatuurid (autori joonis)



Joonis 37 - Põrandjahutuse katsel ruumi pindade temperatuurid (autori joonis)



Joonis 38 - Puhurkonvektori katse ruumi pindade temperatuurid (autori joonis)