



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

VENTILATSIOONI TAGASTUSÕHU PUHASTAMISE MÕJU ENERGIAKASUTUSELE

IMPACT OF RECIRCULATION AIR CLEANING ON VENTILATION ENERGY USAGE

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Kermo Randmäe
/nimi/

Üliõpilaskood 153936EAKI

Juhendaja: Ülar Palmiste, doktorant
/nimi, amet/

(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.

17. mai 2021

Autor: Kermo Randmäe

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

17. mai 2021

Juhendaja: Ülar Palmiste

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

"....."20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Kermo Randmäe (sünnikuupäev: 09.06.1996)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Ventilatsiooni tagastusõhu puhastamise mõju energiakasutusele,

mille juhendaja on Ülar Palmiste,

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.*

/ allkirjastatud digitaalselt /

17.05.2021

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Kermo Randmäe, 153936EAKI

Õppekava, peeriala: EAKI02/15 – Hoonete sisekliima ja veetehnika, küte ja ventilatsioon

Juhendaja: Doktorant, Ülar Palmiste

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Ventilatsiooni tagastusõhu puhastamise mõju energiakasutusele

(inglise keeles) Impact of recirculation air cleaning on ventilation energy usage

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Koostada simulatsioonimudel tsentraalse õhupuhastuse energiakasutuse hindamiseks
2. Analüüsida ventilatsiooni tagastusõhu puhastamise mõju energiakasutusele.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse ja temaatiliste materjalide kogumine ja läbitöötamine. Mudeli koostamine IDA ICE tarkvaraga	12.03.2021
2.	Simulatsioonide teostamine	02.04.2021
3.	Tulemuste analüüs	23.04.2021
4.	Lõputöö kirjutamine	14.05.2021

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: 17. mai 2021.a

Üliõpilane: Kermo Randmäe / allkirjastatud digitaalselt / 17. mai 2021.a

Juhendaja: Ülar Palmiste / allkirjastatud digitaalselt / 17. mai 2021.a

Konsultant: ".....".....20.....a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....20.....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

1. SISSEJUHATUS.....	7
2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	9
2.1 Tagastusõhuga ventilatsioonisüsteemid	9
2.1.1 Protsess hx-diagrammil.....	11
2.2 Õhu puhastamisega välisõhuvahetuse kompenseerimine.....	12
2.2.1 Nõuded õhupuhastusele	14
2.2.2 Õhupuhastuse tehnoloogiad.....	15
2.3 Ülevaade sarnastest uuringutest	19
3. METOODIKA	22
3.1 Simulatsioonimudeli kirjeldus	22
3.2 Modelleerimine	26
3.3 Võrdlusmudelid.....	33
4. TULEMUSED JA ANALÜÜS	37
4.1 Mehaaniliste filtritega skeemid.....	37
4.2 Adsorptsioon filtriga skeem	40
4.3 UVGI õhupuhastiga skeem	41
4.4 HLR õhupuhastiga skeem.....	42
4.5 Erinevate õhupuhastite kombineeritud kasutamine.....	44
4.6 Õhupuhastite energiatarbe võrdlus.....	49
4.7 Õhupuhastuse kuluefektiivsus	52
KOKKUVÕTE	58
SUMMARY.....	60
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	62

Lühendite ja tähiste loetelu

ASHRAE – Ameerika kütte, jahutuse ja õhu konditsioneerimise inseneride ühendus (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*)

CADR - Puhta õhu edastamismäär (*clean air delivery rate*)

DCV – Nõudluspõhine ventilatsioon (*demand control ventilation*)

HEPA – Ülipeenfiltrite klass (*high-efficiency particulate air*)

HLR – USA firma enVerid väljatöötatud seade, mis aitab õhupuhastamisega vähendada ventilatsiooniseadme energiakasutust (*HVAC Load Reduction*)

LOÜ – Lenduvad orgaanilised ühendid

MERV – Filtrite klassifikatsioon ASHRAE järgi (*Minimum Efficiency Reporting Value*)

MET – Soojuseraldusühik – võrdlusarv istudes puhkava inimese keha energiakulu (1 MET = 58,2 W/m²) ja füüsiliselt aktiivse inimese energiakulu vahel, keskmise inimese keha pindala (1,8 m²) korral (*metabolic equivalent of task*)

OCE – Õhupuhasti kuluefektiivsus (*operating cost effectiveness*)

REHVA – Euroopa kütte, ventilatsiooni ja õhu konditsioneerimise ühendus (*Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations*).

UVGI –Bakteritsiidne ultraviolettkiirgus (*Ultraviolet Germicidal Irradiation*).

1. SISSEJUHATUS

Järjest rohkem on hakatud tähelepanu pöörama hoonete energiatarbele. Euroopa Liidu moodustavad hoonete energiakulud 40% kogu liidu energiatarbest [1]. Seetõttu on loodud mitmeid määruseid ja direktiive, mis reguleerivad uute ja oluliselt rekonstrueeritavate hoonete energiatarvet. 2020. aasta 31. detsembrist alates peavad kõik uued ja oluliselt rekonstrueeritavad hooned vastama Euroopa Liidu Energiatõhususe direktiivi (2010/31/EU) nõuetele ehk olema liginullenergia hooned. Seetõttu on oluline, et hoone energiatarve oleks minimaalne. Vastavalt direktiivile tuleb järgida põhimõtet, et kõigepealt tuleb tagada kütte- ja jahutussüsteemide energiatarbe vähendamine minimaalse kulutõhusa tasemeni [1].

Õhupuhastite tehnoloogia areneb kiiremini kui projekteerimise normid ning standardid, seetõttu on Rahvusvaheline Energiaagentuur (*International Energy Agency*) loonud töögrupi Annex 78 „Ventilatsiooni toetamine gaasifaasi õhu puhastamisega, selle rakendus ja mõju energiakasutusele“ (*Supplementing Ventilation with Gas-phase Air Cleaning, Implementation and Energy Implications*). Annex 78 töögrupi peamiseks uurimise põhjuseks on maailmas suurenenud uuringute arv õhupuhastite vallas ning kasvanud gaasifaasi õhupuhastite müük. See on kaasa toonud vajaduse uurida gaasifaasi õhupuhastite mõju õhukvaliteedile, energiakasutusele ning võimalust osaliselt kompenseerida välisõhuvahetust. Veel mainivad nad oma töö kirjelduses, et eelduste kohaselt vähendavad õhupuhastid ventilatsioonisüsteemi energiakasutust ning parandavad õhukvaliteeti. Lisaks on töögrupi üks põhieesmärke luua õhupuhastite testimise meetodid, et erinevad tootjad testiksid puhasteid samadel alustel. Sel põhjusel on see huvipakkuv tehnoloogia, mida tulevikus kasutada [2].

Kvaliteetse sisekliima tagamiseks tuleb kasutada ventilatsiooni, mille sissepuhkeõhu soojendamise ja jahutamise vajaduse vähendamiseks kasutatakse soojus- või energiataagastust. Kõige efektiivsem soojustagastus on täielik retsirkulatsioon, kus kogu väljatõmmatav õhk suunatakse ruumi tagasi, sest puudub sissepuhkeõhu konditsioneerimise vajadus. Sellisel juhul pole aga tagatud piisav õhupuhtuse kriteerium. Õhupuhtuse tagamiseks segatakse retsirkulatsiooni õhku välisõhuga ning kasutatakse ka õhu puhastamist filtrite ja õhupuhastusseadmetega. Eelduste kohaselt võimaldavad õhupuhastid vähendada välisõhu kasutust ning väheneb õhu konditsioneerimise vajadus. Õhupuhastusseadmete kasutamisel tekib süsteemis ka lisaenergia kasutus, kas siis otsene või kaudne. Otsene energiatarve on põhjustatud puhastusseadme elektrienergia vajadusest. Kaudne energiatarve on põhjustatud

puhasti aerodünaamilisest takistusest, mille ületamiseks peab ventilatsioonisüsteemi ventilaator arendama suuremat rõhku ja tarvitama seeläbi rohkem elektrienergiat.

Eestis kasutatakse tagastusõhuga süsteeme arhiivides, hoidlates, ujulates, veekeskustes ning kaubanduskeskustes. Süsteeme reguleeritakse pidevalt ujulates, veekeskustes ja kaubanduskeskustes. Fikseeritud retsirkulatsiooni õhuklapi asendiga süsteemi kasutatakse arhiivides ja hoidlates, kus on välisõhu kogus kogu aeg konstantne.

Käesolevas magistritöös uuritakse tagastusõhu puhastuse mõju ventilatsiooni energiakasutusele, kas energiakasutuse mõttes on otstarbekas kasutada õhupuhastamist või mitte. Uurimismeetodiks on simulatsioonimudel, mis on koostatud programmiga IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) 4.8.

Antud lõputöös on järgmised piirangud:

- Tulemused pole valideeritud, sest puuduvad sobivad mõõtmisandmed tagastusõhu puhastamisega süsteemi kohta;
- Lõputöös ei hinnata simulatsioonitarkvara piirangute tõttu erinevate õhupuhastuse lahenduste mõju siseõhu kvaliteedile.

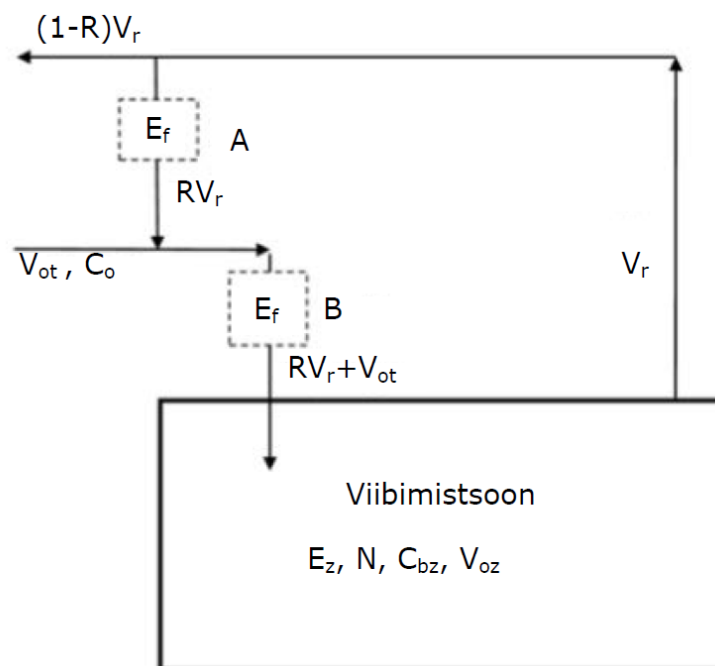
Võtmesõnad: õhupuhastus, õhufiltrid, energiatarbimine, IDA ICE, magistritöö

2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

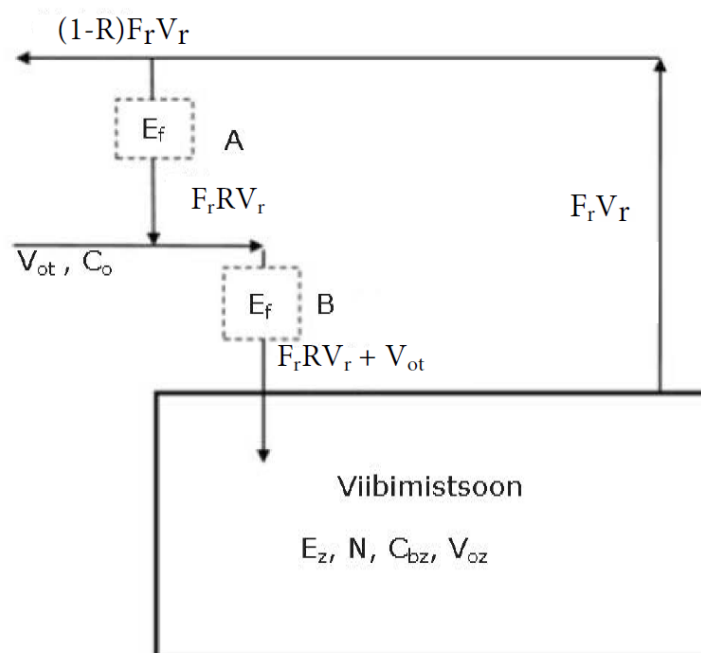
2.1 Tagastusõhuga ventilatsioonisüsteemid

Tagastusõhuks nimetatakse väljatõmbeõhku, mis suunatakse tagasi õhutöötlemisseadmesse [3]. Tagastusõhuga ehk retsirkulatsiooniõhuga ventilatsioonisüsteeme kasutatakse energia kokkuhoiduks [4]. Kui välisõhk, mida kasutatakse sissepuhkeks, on erinevate parameetritega võrreldes ruumiõhuga, tuleb seda töödelda (kütte- või jahutuskalorifeeridega, niisuti või kuivatiga), et tagada kvaliteetne sisekliima. Õhu konditsioneerimise energiakasutuse vähendamiseks on võimalik väljatõmbeõhku taaskasutada tagastusõhuna, sest väljatõmbeõhu soojuslikud omadused on lähedasemad nõutud sissepuhkeõhu parameetritele võrreldes välisõhuga suurel osal aastast. Tagastusõhu kasutamisel tuleb vajadusel rakendada täiendavaid õhupuhastamise meetmeid, et vältida lahenduse negatiivset mõju siseõhu kvaliteedile [5]. Tagastusõhuga süsteeme kasutatakse suurtes hoonetes, kus kasutatakse ventilatsiooniõhku kütmiseks ja jahutamiseks, näiteks ostukeskustes ja kauplusladudes [6].

ASHRAE 62.1 [7] pakub välja kaks erinevat tagastusõhuga ventilatsiooniskeemi, üks konstantse õhuhulga juures (vt Joonis 2.1) ning teine muutuva õhuhulga juures (vt. Joonis 2.2).



Joonis 2.1 Retsirkulatsiooni põhimõtteskeem konstantse õhuhulga juures [7]



Joonis 2.2 Retsirkulatsiooni põhimõtteskeem muutuva õhuhulga juures [7]

Välisõhu kogus konstantse õhuvooluhulga juures statsionaarses olukorras filtri asetusega B määratakse valemiga 2.1.

$$V_{oz} = \frac{N - E_z \cdot R \cdot V_r \cdot E_f \cdot C_{bz}}{E_z \cdot [C_{bz} - (1 - E_f) \cdot C_0]} \quad (2.1)$$

kus

A,B – filtri asukoht,

V – õhuvooluhulk,

C – saasteaine kontsentratsioon,

E_z – ruumi õhu segunemise efektiivsus,

E_f – filtri efektiivsus,

F_r – projekteeritud õhuvoolu vähendamise tegur,

N – saasteaine genereerimise määr,

R – retsirkulatsiooni voolu tegur,

Alaindeks o – välisõhk,

Alaindeks r – väljatõmme,

Alaindeks b – hingamine,

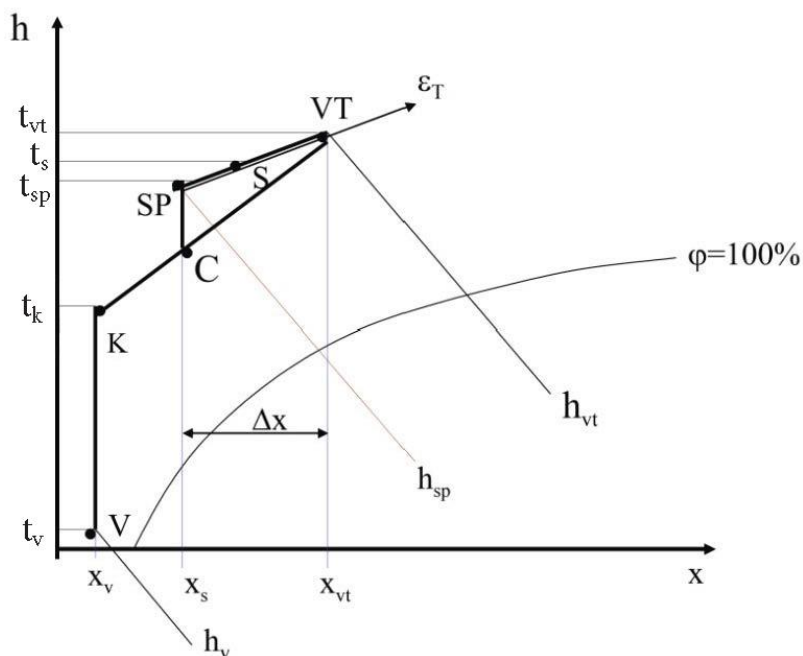
Alaindeks z – tsoon.

Retsirkulatsiooniõhuga süsteemi juhitakse saasteaine kontsentratsiooni järgi, põhiliselt väljatõmbeõhu CO₂ taseme järgi või fikseeritakse retsirkulatsiooniklapi asend ning süsteem on konstantse värske õhu vooluga režiimis.

2.1.1 Protsess hx-diagrammil

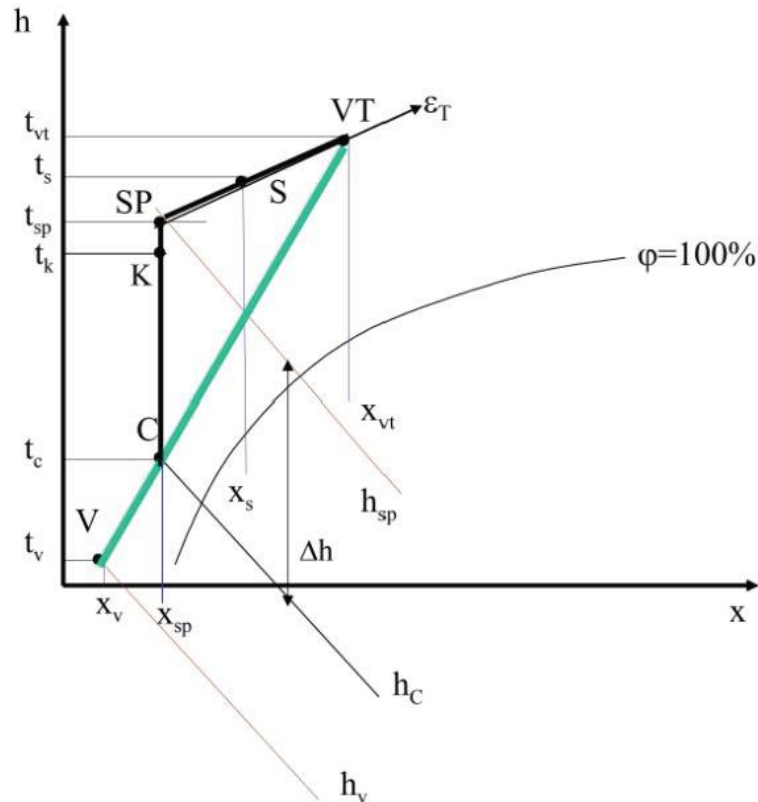
Erinevaid retsirkulatsiooniskeemide konfiguratsioone on välja toodud T.-A. Kõivu õpikus „Õhu konditsioneerimine I. Õhutöötlemisprotsessid“.

Esimeseks skeemiks on talvine õhutöötlemine õhu soojendamisega ja retsirkulatsiooniga peale kalorifeeri (Joonis 2.3), kus väljatõmbeõhk segatakse küttekalorifeeri läbinud välisõhuga. Sellist skeemi kasutatakse kui ilma eelneva õhu soojendamiseta jääks segupunkt C küllastuskõverale $\varphi=100\%$ või sellest allapoole [8].



Joonis 2.3 Talvine õhutöötlemise protsess h-x diagrammil õhu soojendamisega ja retsirkulatsiooniga peale kalorifeeri [8]

Teiseks skeemiks on talvine õhu töötlemine õhu retsirkulatsiooniga enne kalorifeeri (Joonis 2.4), kus väljatõmbeõhk segatakse välisõhuga ning seejärel soojendatakse küttekalorifeeris [8].



Joonis 2.4 Talvine õhutöötlemise protsess h-x diagrammil õhu retsirkulatsiooniga enne kalorifeeri [8]

2.2 Õhu puhastamisega välisõhuvahetuse kompenseerimine

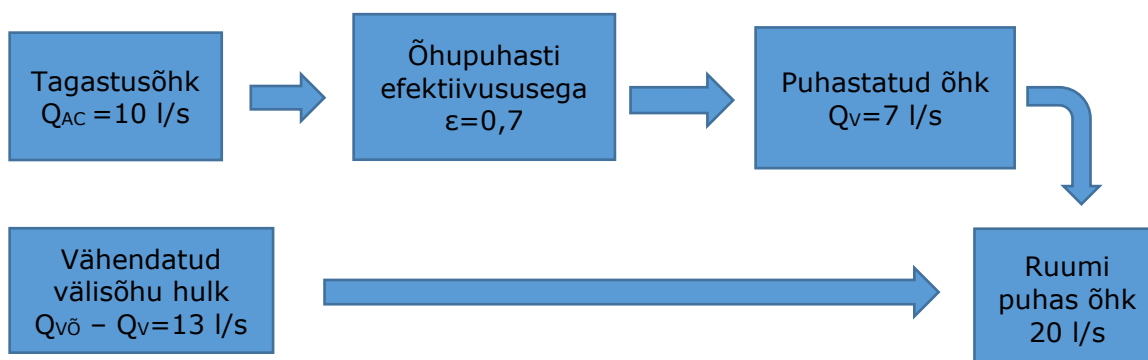
Välisõhuvahetuse kompenseerimine on tagastusõhuga ventilatsioonisüsteemi edasiarendus, kus tagastusõhk puhastatakse saasteainetest ning seejärel saab seda kasutada osaliselt värsket välisõhu asemel. Ventilatsioonisüsteemis kasutatakse retsirkulatsiooniõhu puhastamiseks spetsiaalseid filtreid saasteainete eemaldamiseks väljatõmbeõhust, mis võimaldab puhastatud õhu uuesti kasutamist sissepuhkeks. Seetõttu väheneb välisõhu kasutamise vajadus [5], [9].

Kui vähendatakse välisõhu hulka Q_V võrra peab õhupuhastist läbimineva Q_{AC} õhuhulga ja puhasti efektiivsuse ϵ korrutis olema vähemalt võrdne või suurem Q_V -st (valem 2.2). Sellisel juhul hoitakse sama või paremat õhukvaliteeti, mis oli enne ventilatsiooni välisõhu hulga vähendamist. Korrutist nimetatakse ka puhta õhu edastamismääraks (*CADR – clean air delivery rate*) [9], [10].

$$CADR = Q_{AC} \cdot \varepsilon \geq Q_V \quad (2.2)$$

kus Q_{AC} – õhupuhastit läbiv õhu kogus, l/s,
 ε – puhasti efektiivsus,
 Q_V – vähendatud välisõhu kogus, l/s.

Kui õhupuhastit läbib tagastusõhk kogusega 10 l/s ning õhupuhasti efektiivsus on 0,7, siis sel juhul on puhta õhu edastamismäär 7 l/s. See tähendab, et välisõhu kogust võib vähendada maksimaalselt 7 l/s (vt Joonis 2.5) 20-lt l/s 13-le l/s.



Joonis 2.5 Puhta õhu edastamismäära selgitav joonis

Erinevate õhupuhastusmeetodite kuluefektiivsuse võrdlemiseks kasutatakse puhasti puhastusefektiivsuse ja puhastusseadme võimsuse jagatist, mida nimetatakse õhupuhasti kuluefektiivsuseks (*OCE – operating cost effectiveness*). Puhastusseadme võimsuseks arvestatakse nii ventilaatorite suurenenud võimsusvajadust kui ka puhasti enda elektrilist võimsust. Õhupuhasti kuluefektiivsus leitakse valemiga 2.3 [10].

$$OCE = \frac{CADR}{P_c} \quad (2.3)$$

kus $CADR$ – puhta õhu edastamismäär (valem 2.2), l/s,
 P_c – puhasti summaarne elektrivõimsus, W.

Kui õhupuhasti elektrivõimsus on $P_c = 10$ W ning Joonis 2.5 oleva selgituse põhjal $CADR = 7$ l/s, siis sel juhul on õhupuhasti kuluefektiivsus $OCE = 0,7$ (l/s)/W.

Välisõhu vähendamisel väheneb kütte, jahutuse ja õhu konditsioneerimise koormus, mis suurendab energiasäästu. Õhu konditsioneerimisseadmeid läbib seetõttu väiksem kogus välisõhku, mis on segatud väljatõmbeõhuga, millel on sissepuhkeõhule sarnasemad õhu parameetrid (põhiliselt soojuslikud omadused) kui välisõhul. Seetõttu on väiksem õhutöötlemise vajadus. Energia kokkuhoid sõltub hoonest ning selle asukohast. Uutel

ventilatsioonisüsteemidel saab kasutada väiksemaid kütte- ja jahutuskalorifeere ning seetõttu väheneb süsteemi ehitamise alghind [11].

2.2.1 Nõuded õhupuhastusele

Vähendades õhuvahetust energiasäästu saavutamiseks, midagi muud tegemata, tõuseb tõenäoliselt siseruumi saasteainete hulk ning halveneb sisekliima kvaliteet, mis võib kaasa tuua terviseriske [9].

ASHRAE soovib COVID-19 leviku tõttu kasutada ventilatsiooniõhu puhastamiseks MERV-13 (F7; ePM1 50-70%, ePM2,5 >65%, ePM10 >80%) filtrit ning tihendada filtri ääred, et vähendada õhu võimalust minna filtrist mööda. Lisaks soovib kasutada teiseldatavaid ruumi õhupuhasteid HEPA filtritega ning UVGI (*ultraviolet germicidal irradiation*) kasutamist kõrge riskiga ruumides [12].

REHVA andmetel tuleks COVID-19 leviku tõttu vältida nõudluspõhise ventilatsiooni kasutamist. Samuti tuleks vältida retsirkulatsiooniõhu kasutamist. Soovitatakse sulgeda retsirkulatsiooniklapid ning just hoonetes, kus on haigustele vastuvõtlikumad inimesed, näiteks hooldekodud. Hoonetes, kus ei saa retsirkulatsiooniõhust loobuda, sest kütte- ja jahutuskalorifeerid ei ole piisavalt võimsad, et võimalda ainult välisõhu kasutamist, tuleks retsirkulatsiooniõhu kogust piirata minimaalseks. Täielikuks viiruste eemaldamiseks väljatõmbeõhust tuleb kasutada HEPA filtreid või kasutada väljatõmbekanalisis ultraviolettkiirguse lampe. Olemasolevatesse süsteemidesse on keeruline paigalda HEPA filtrit seega minimaalselt peaks kasutama retsirkulatsiooniõhu puhastamiseks F8 (ePM1 70-80%) filtrit, sest sellel on mõistlik viirust sisaldavate osakeste püüdmise efektiivsus (PM1 osakeste püüdmise efektiivsus 65-90%) [13].

Eestis on COVID-19 leviku piiramiseks lähtunud üldjoontes REHVA poolt välja toodud juhendist [14].

Tabel 2.1 ASHRAE, REHVA ja Eesti COVID-19 ventilatsiooni juhendite kokkuvõtted [12]-[14]

	ASHRAE	REHVA	Eesti
Min. filtri klass	MERV-13 (F7)	ePM1 80%(F8)	ePM1 80%(F8)
Soovituslik filter	HEPA/UVGI	HEPA/UVGI	HEPA/UVGI
Akende avamine	Soovitav	Soovitav	Soovitav
Tagastusõhu kasutamine	Piirata maksimaalselt	Piirata maksimaalselt	Kasutada 100% välisõhku
Õhuvahetus peale inimeste lahkumist ruumist	Kolmekordne õhuvahetus, võimalusel 24/7	2h peale lahkumist, võimalusel 24/7	2h peale lahkumist, võimalusel 24/7

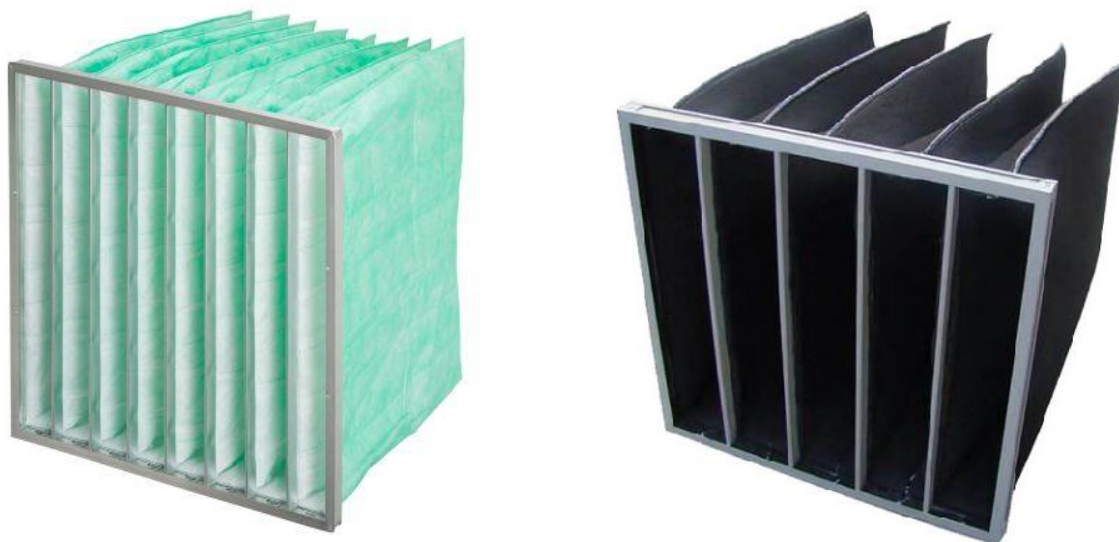
2.2.2 Õhupuhastuse tehnoloogiad

Õhusaasteained võib jagada põhiliselt kolmeks kategooriaks: tahked osakesed, gaasilised ja bioloogilised saasteained. Olemas on erinevaid õhupuhastuse meetodeid ning nende efektiivsus sõltub saasteaine tüübist (täpsemalt vaata Tabel 2.2). Õhu täielikuks puhastamiseks tuleb kombineerida erinevaid õhupuhasteid vastavalt õhus olevatele saasteainetele ning õhupuhasti omadustele [15].

Tabel 2.2 Puhastusmeetodi mõju erinevatele saasteainetele [15]

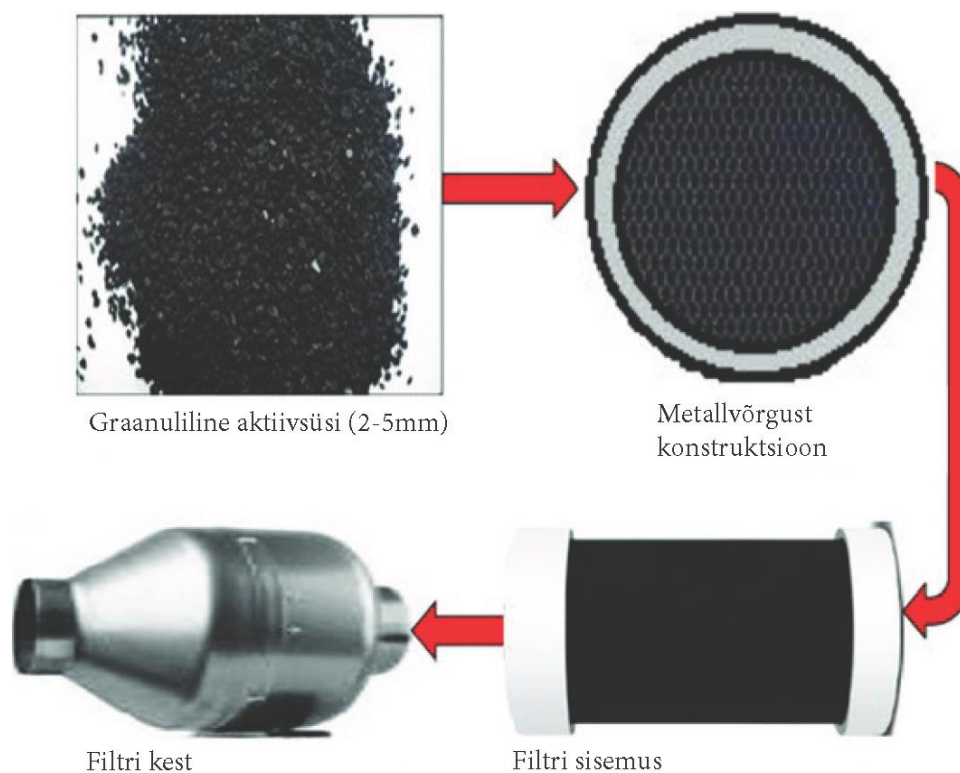
Puhastusmeetod	Saasteained			
	Tahked osakesed	Lenduvad orgaanilised ühendid	Mikroorganismid	
			Bakterid	Viirused
	Diameeter 0,01 - 100 µm	Diameeter 0,0001 - 0,001 µm	Diameeter 0,2 - 10 µm	Diameeter 0,01 - 0,3 µm
Filtreerimine	Efektiivne	Ebaefektiivne	Efektiivne	Ebaefektiivne
Adsorptsioon	Osaliselt efektiivne	Kõrge efektiivsus	Osaliselt efektiivne	Ebaefektiivne
Õhu läbi vee juhtimine	Efektiivne	Osaliselt efektiivne	Ebaefektiivne	Ebaefektiivne
Elektrostaatiline eraldus	Efektiivne	Ebaselge	Osaliselt efektiivne	Ebaefektiivne
Anioon tehnoloogia	Efektiivne	Ebaselge	Osaliselt efektiivne	Ebaefektiivne
Fotokatalüütiline oksüdatsioon	Ebaselge	Efektiivne	Efektiivne	Efektiivne
Plasma puhastus	Ebaselge	Efektiivne	Efektiivne	Efektiivne
UV-kiirgus	Ebaefektiivne	Ebaefektiivne	Kõrge efektiivsus	Kõrge efektiivsus

Mehaaniliste filtrite (vt. Joonis 2.6) efektiivsus muutub suurtes vahemikes ning nad on tehtud konkreetsete osakeste suuruste filtreerimiseks kindla õhuvoolu kiiruse juures. Mehaaniliste kiudfiltrite efektiivsus suureneb filtri tihedusega, mis on otseselt sõltuvuses filtrist tekkiva takistusega. Näiteks HEPA ja ULPA (efektiivsus vastavalt 99.97% ja 99.999%) filtrite takistus on kuskil 250-500 Pa kui tavalisel filtril (efektiivsus 60-90%) on takistus 100-300 Pa. Üldiselt peab filtreid puhastama või vahetama, et vältida aerodünaamilise takistuse kasvu ning samuti vähendada ohtu, et filtrist hakkavad osakesed uuesti eralduma. Mehaanilised filtrid ei eralda õhust gaasilisi saasteaineid, filtri takistus on sõltuvuses puhastus efektiivsusega ehk kõrge puhastusvõimega filtril on kõrge takistus ja vastupidi, neil on kõrge käituskulu – need on kiudfiltrite miinusteks. Plussideks on odav hind ja lihtne filtri paigaldus, samuti kõrge osakeste filtreerimise efektiivsus, kuni 99,99999% [5].



Joonis 2.6 Mehaaniline osakeste kottfilter (vasakul) [15]. Gaasifaasi ja mehaanilise filtri kombinatsioon (paremal) [16]

Gaasifaasi adsorptsioon filtrid (Joonis 2.7) kasutavad tavaliselt füüsikalist adsorptsiooni, et eemaldada gaasifaasis lenduvad orgaanilised ühendid õhuvoolust. Adsorptsioon esineb kui gaasid ühenduvad tahke pinnaga van der Waalsi jõudude tõttu. Graanuline aktiveeritud süsinik on kõige rohkem kasutatav adsorptsiooni materjal. Suurema molaarmassiga LOÜ-sid eemaldab aktiivsüsinik efektiivsemalt kui madala molaarmassiga [16]. Sorbent filtrid muudetakse keemiliselt töödeldud (*chemisorbent*) filtriteks, kui neid kaetakse kaalium- või naatriumpermanganaadiga. Sellisel juhul sorbent reageerib keemiliselt LOÜ-ga ning suudetakse õhust eemaldada osakesed, mis adsorbeeruvad raskemini adsorbendi pinnale [5]. Need keemilised reaktsioonid immutusainega on pöördumatud ning seetõttu reageerinud ühendit ei lasta hiljem õhku tagasi [16]. Nende efektiivsus sõltub gaasi tüübist, gaasi ja adsorbendi kokkupuute ajast, temperatuurist ja õhu niiskusest. Kõrge temperatuuri (max 40 °C) ja suhtelise õhuniiskuse korral (RH<60%) ning lühikese kokkupuute aja jooksul on efektiivsus väiksem [17]. Õhust gaasiliste osakeste eraldamiseks kasutatakse adsorptsiooni selle lihtsuse, efektiivsuse ning madala maksumuse tõttu. Eelisteks on looduslike toorainete kasutus, suur saasteainete puhastus vahemik ning ei põhjusta sekundaarset õhu saastumist. Miinuseks suur aerodünaamiline takistus [15]. Kui sorbent saab saasteaineid täis, tuleb see vahetada või regenereerida [5]. Regenereerimiseks kasutatakse tavaliselt kuumutatud õhku temperatuuril 120-180 °C. Peale regenereerimist on aktiivsüsiniku adsorbeerimisvõimest alles umbes 50% algsest, sest regenereerimisega ei suudeta kõiki LOÜ-sid süsiniku pooridest eemaldada [16].



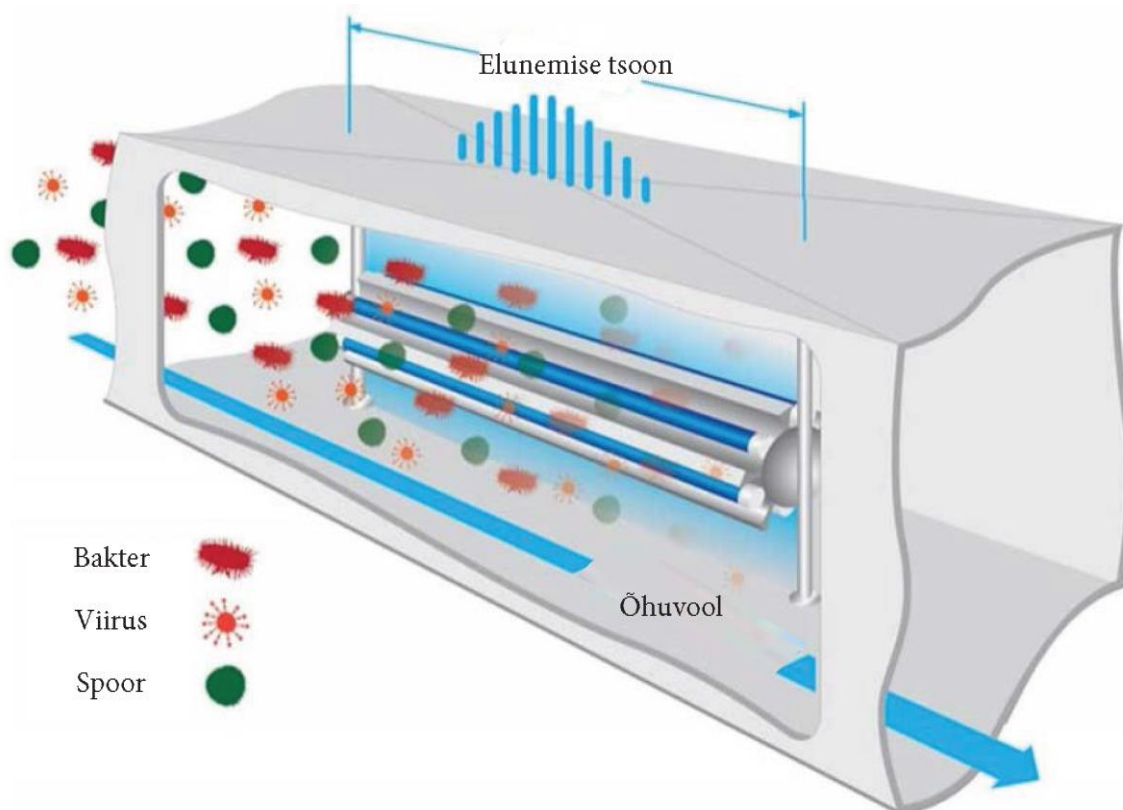
Joonis 2.7 Gaasifaasi filter [18]

Adsorbeeriv aine on tavaliselt paigaldatud salve ning see omakorda puhastatavasse õhujoasse. Tihti on sorbendi graanuli diameeter kuskil 3 mm. Väiksemad graanulid suurendavad massiülekannet õhus olevatelt LOÜ-delt sorbendile, samas tekitab ka suuremat aerodünaamilist takistust. Salved, mis graanuleid hoiavad on tavaliselt 2,5 cm paksused. Et vähendada rõhulangu tuleb paigaldada suur kogus sorbenti ning pikendada saastunud õhu viibimisaega sorbendis. Selle jaoks paigaldatakse filtrid sikk-sakk asetuses [16] või kasutatakse silindrikujulist filtrit [17]. Sorbenti, näiteks aktiveeritud süsinikku kulub 1 m³/s õhuhulga kohta 41 kg [16].

Mõned tootjad pakuvad selliseid filtreid, kus on omavahel kombineeritud sorbent ja kolmedimensiooniline lausriie (vt Joonis 2.6). Sellisel juhul ei puutu sorbendi osakesed üksteisega tihedalt kokku ning saab kasutada väiksema läbimõõduga graanuleid. See tõttu on ka filtri rõhulang väiksem kui salve paigaldatud graanulitel. Samuti on sellisel juhul kasutatava sorbendi mass 5-10 korda väiksem kui salve paigaldatud graanulitega süsteemil [16]. Selliselt töödeldud lausriide CO, NO ja NO₂ absorbeerimisvõime on vastavalt 38%, 100% ja 100% [19].

Bakteritsiidse ultraviolettkiirgusega (UVGI) süsteemid (vt Joonis 2.8) kasutavad lampe, mis eraldavad ultraviolettkiirgust, mille põhiline lainepikkus on 254 nm UV-C vahemikus. UV-C kiirgus kahjustab mikroorganismide DNA- ja RNA-d, mis peatab mikroorganismide

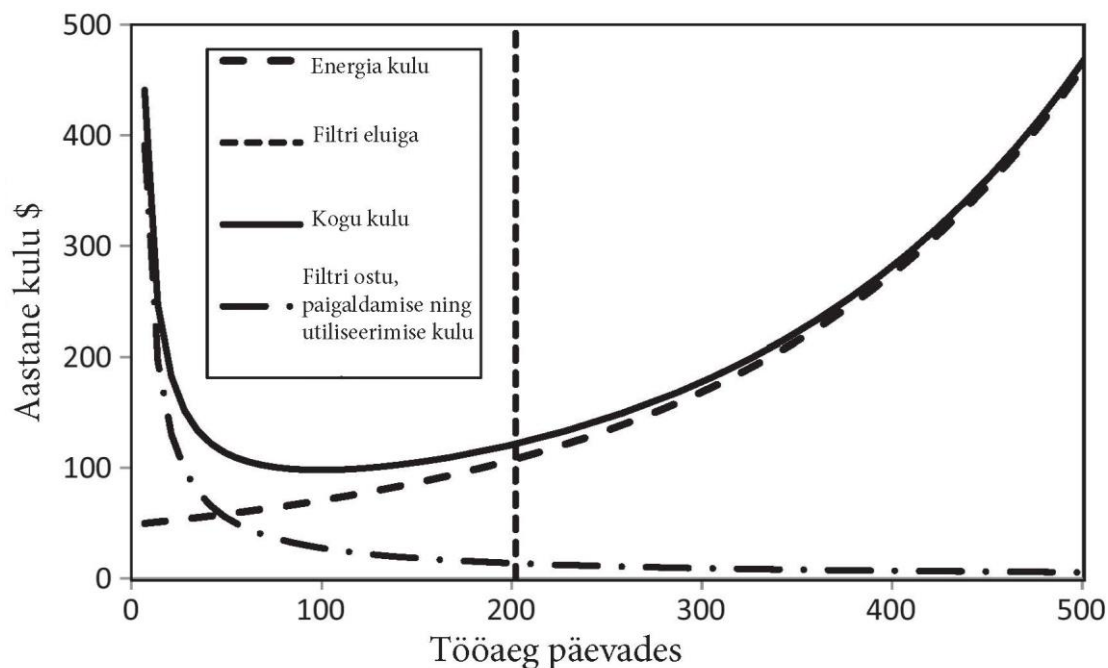
paljunemisvõime [20]. UVGI süsteemi toimimiseks on oluline UV-C kiirguse doos, mis on UV-C kiirguse intensiivsuse ja mikrobioloogilise saasteaine UV-C kiirguse väljas olemise viibimisaja korrutis. Saasteaine viibimisaeg sõltub õhuvoolukiirusest ventilatsioonikanalis ning UV-lampidega sektsiooni pikkusest [21]. Vegetatiivseid baktereid hävitab UV-C kiirgus üle 99,9% ning viiruseid 40-99,8%. Bakterite spore hävitab UV-C kiirgus vahemikus 0-99,9% [17]. Elavhõbeda lambid on tundlikud ümbritseva õhu temperatuurile, üldiselt on UV-lambid projekteeritud töötama temperatuurile 21,5 °C ja kiirusele, mis võiks olla vahemikus 2-2,54 m/s ning lisaks UV-lampide efektiivsus langeb ajas [21]. Lambid kasutavad elektrienergiat (1 lamp 60W, 2,6 kWh/m²) ning eraldavad soojust, kuid nende aerodünaamiline takistus on väike (<8 Pa) [20]. Lampide efektiivsus UV-C kiirguse tootmiseks on 30-31% [21].



Joonis 2.8 UVGI õhupuhasti [22]

Energiakasutus mehaaniliste standardsete volditud filtritel on kuni 10 korda suurem nende algaksumusest ning efektiivsematel filtritel 4-5 korda nende hinnast. Üldiselt moodustab filtri kasutuskulu 81% kogu elutsükli kuludest (LCC). Elutsükli kuludeks on alginvesteering, hooldus, käituskulud ja utiliseerimiskulud. Energiasäästlikum filter võib olla odavam kui tavaline filter, sest arvestades kogu elutsükli kulusid on kogu maksumus väiksem. Filtris tekkiv rõhulang mõjutab energiakasutust, mida suurem on rõhulang seda rohkem kasutatakse ka energiat. Filtri kogu elutsükli kulud moodustavad U-kujulise kõvera (vt. Joonis 2.9). Jooniselt selgub, et aastast energiakasutust saab

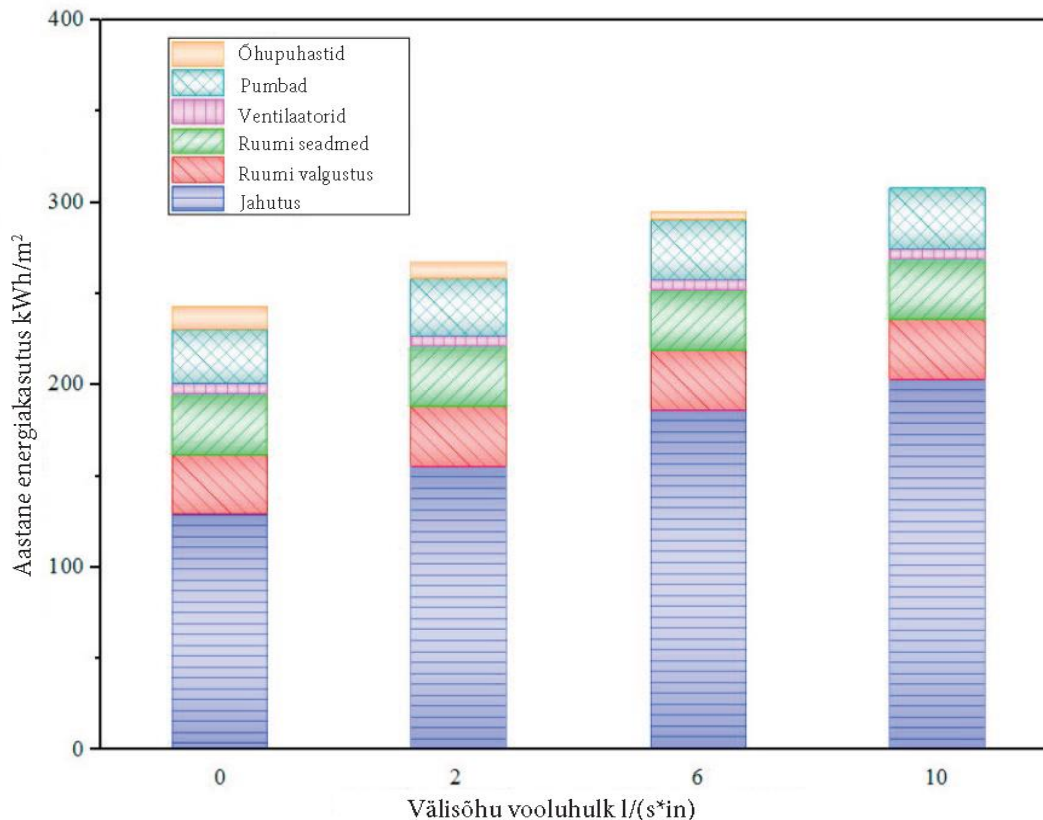
vähendada filtrite õigeaegsel vahetamisel, kui kogukulud jõuavad minimaalse väärtuseni [15]. UVGI puhastussüsteemis vajavad UV-lambid elektrienergiat, suureneb jahutuskoormus ning väheneb küttekoormus. UV-lambi takistus süsteemis on väike ning ei mõjuta energiakasutust [20].



Joonis 2.9 Filtri elutsükli kulud [15]

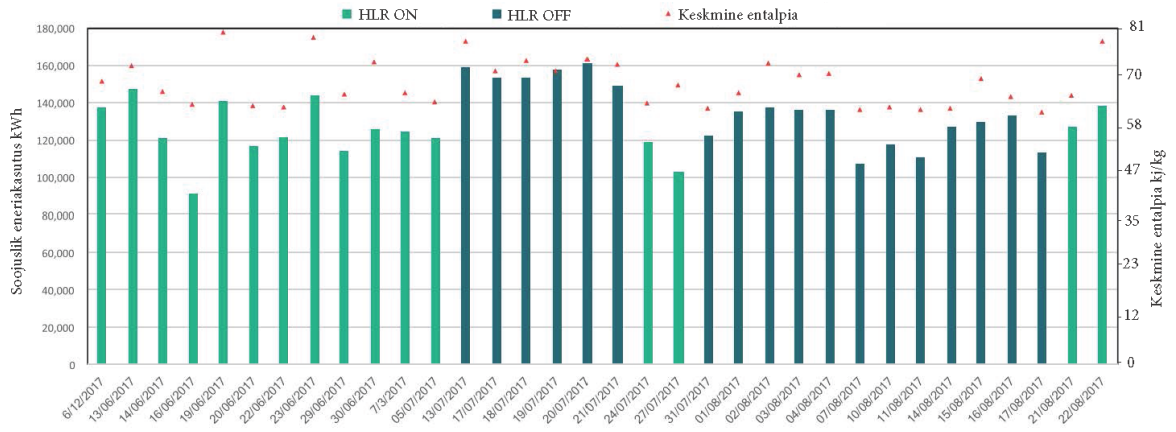
2.3 Ülevaade sarnastest uuringutest

Singapuri Riiklikus Ülikoolis läbi viidud uuringus uuriti väljatõmbeõhu puhastamist ning sellega kaasnevat energiasäästu. Lisa põhjuseks, miks vähendada välisõhu kogust on Singapuri kehv välisõhu kvaliteet. Õhu puhastamiseks kasutati komplekset seadet, mis sisaldas osooni ja aktiivsüsinikuga puhastuselemente. Õhupuhastamise süsteem võimaldas vähendada välisõhu kogust ning see vähendas jahutamiseks kulunud energiat. Troopilises kliimas on pidevalt välisõhu entalpia kõrge ning seetõttu on välisõhu koguse vähendamisel suur mõju jahutusvajadusele. Teostati tunnipõhine analüüs Singapuri test päeva (21. juuni) kohta. Tulemuste võrdlemisel kasutati välisõhu kogusena 10, 6, 2 ja 0 l/(s*in). Tulemustest selgus, et kui näiteks jaanuaris vähendada ühe inimese kohta õhuhulka 10 l/s -> 2 l/s, vähenes elektrienergia kasutus 41% ning aastane elektrienergia kasutus vähenes 40,56 kWh/m² (vt Joonis 2.10) [23].



Joonis 2.10 Ruumi aastane energia kasutus [23]

USA firma enVerid arendas HLR tehnoloogia (seade, mis aitab vähendada ventilatsiooniseadme energiakasutust (*HVAC Load Reduction*)), mis kasutab tahket regenereeritavat sorbent materjali, mis suudab õhust adsorbeerida lisaks LOÜ-le ka süsihappegaasi (CO_2) ning lisaks ei mõjuta sorbendi efektiivsust õhuniiskus. Süsteem kasutab tagastusõhu puhastamist ning seeläbi vähendatakse välisõhu kogust. Energia kokkuhoid saavutatakse jahutus- ja küttevajaduse vähenemisega. Sorbendi regeneratsiooni teostatakse $55-65\text{ }^\circ C$ õhuga kord või kaks 24h jooksul ning see võtab aega 30-60 minutit, et vabastada adsorbeeritud gaasid. Süsteemi on kasutatud mitmetes ehitistes näiteks *UMH (University of Miami – The Herbert) Wellness Center*, kus mõõdeti 44 päeva jooksul jahutusenergiat. Tulemuste põhjal vähenes jahutusenergia $37\% \pm 14,5\%$ [11]. Ameerika Ühendriikide Energeetikaministeriumi tellitud raportis on välja toodud, et enVeridi HLR abil on võimalik vähendada välisõhukogust 80% ning sellega säästetakse suurtes äri- ja tööstushoonetes eelduste kohaselt 20-40% energiat [24]. Külmema kliima kasutusnäide on New Yorgis Manhattanis asuv ärihoone, kus algselt oli sissepuhkes välisõhu kogus 20%, siis peale HLR seadme paigaldamist suudeti õhku nii palju puhastada, et vajalikuks välisõhu koguseks jäi 3%. Sellega säästeti aastas 457 MWh jahutus- ja 1372 MWh kütteenergiat. Suvine energia võrdlus on toodud joonisel (Joonis 2.11) [25].

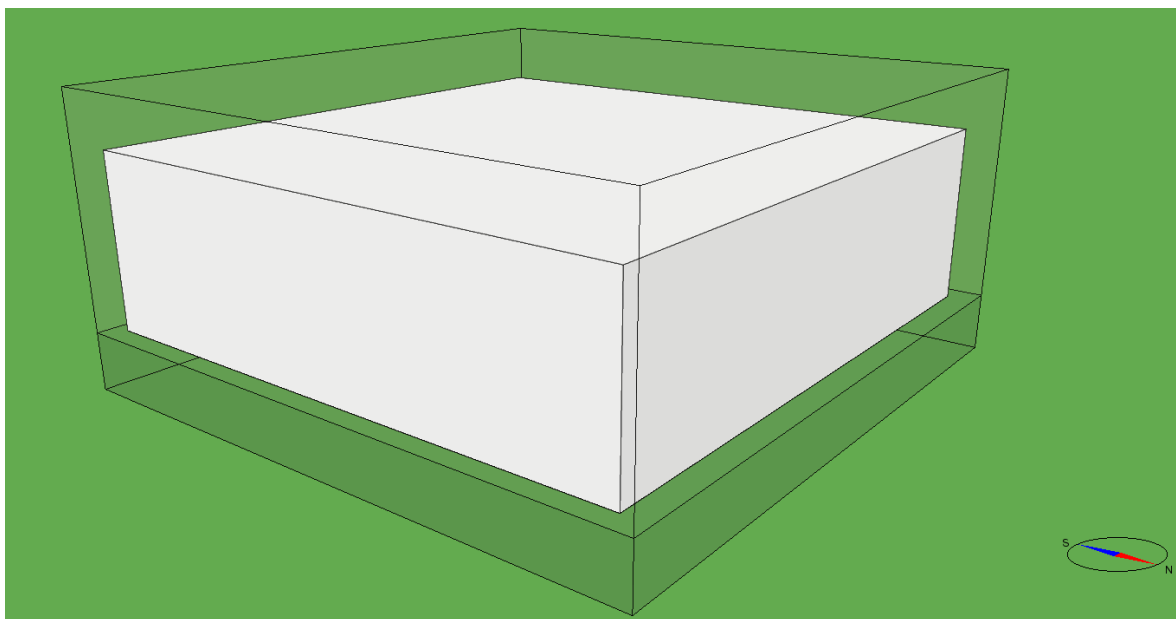


Joonis 2.11 Manhattani ärihoone jahutusenergia, kui HLR on sisse ja välja lülitatud [25]

3. METOODIKA

3.1 Simulatsioonimudeli kirjeldus

Tagastusõhu puhastamisega ventilatsioonisüsteemi uurimiseks koostati testruumi mudel (Joonis 3.1) programmis IDA ICE 4.8. Testruumil puuduvad välispiirded, et vältida ruumi ja väliskeskkonna vahelist soojuslevi. Soojuslevi on ignoreeritud, et vaadelda ainult ventilatsiooniseadme energiakasutust. Testruumi ainukeseks saasteainete eraldajaks on inimene ning simulatsioonides kasutatakse saasteainete märkegaasina CO₂-te. Simulatsioone teostatakse kahe erineva kasutusprofiiliga: kaubandushoone ja kontorihoone profiiliga.



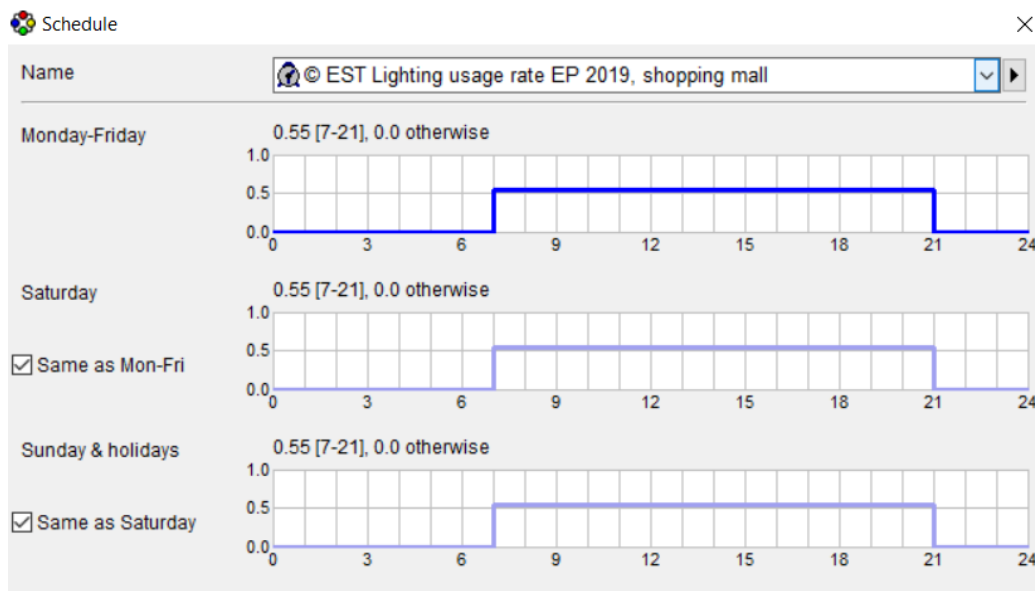
Joonis 3.1 Simuleeritud testruumi 3D mudel

Ruumi andmed:

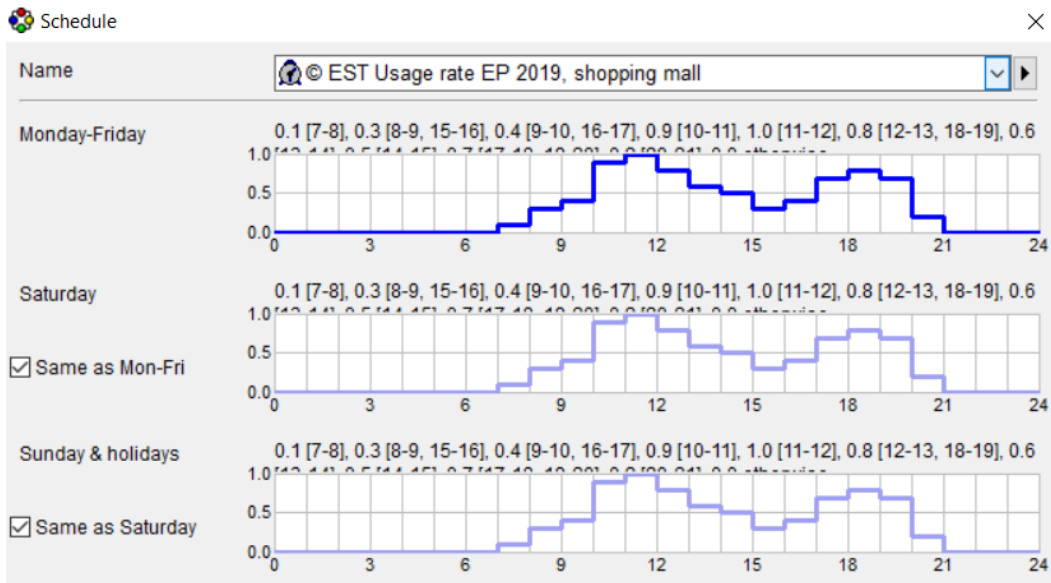
- Pikkus 13 m;
- Laius 13 m;
- Kõrgus 3 m;
- Pindala 169 m²;
- Valgustusvõimsus:
 - Kaubandushoone profiiliga 7 W/m²;
 - Kontorihoone profiiliga 10 W/m²;
- Seadmete võimsus:
 - Kaubandushoone profiiliga 3 W/m²;
 - Kontorihoone profiiliga 12 W/m²;
- Inimeste arv ruumis 0,05882 in/m²;

- Inimeste aktiivsustase 1,2 MET;
- Maksimaalne ventilatsiooni õhuhulk, sissepuhe ja väljatõmme $2 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$;
- Kütte seadearv:
 - Kaubandushoone profiiliga $18 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - Kontorihoone profiiliga $21 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Jahutuse seadearv $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

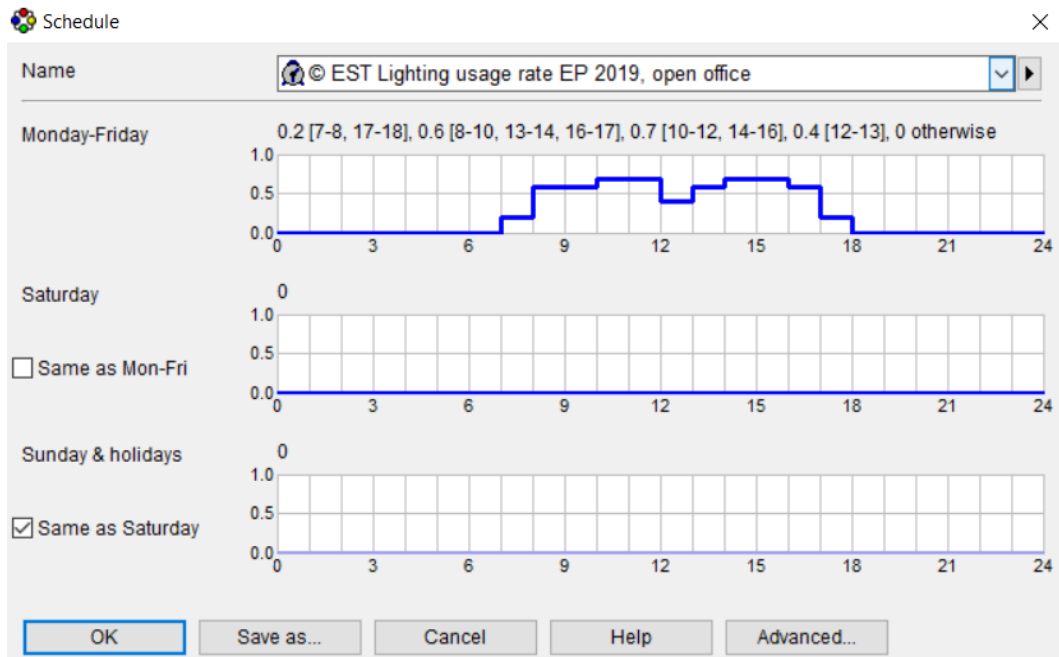
Ruumi kasutatakse vastavalt kasutusprofiilidele, mis on rakendatud valgustuse ja seadmete kasutamisele (Joonis 3.2 ja Joonis 3.4) ning inimeste kohalolekule (Joonis 3.3 ja Joonis 3.4). Kasutusprofiilid on koostatud majandus- ja taristuministri määruse nr 58, "Hoonete energiatõhususe arvutamise meetodika" alusel.



Joonis 3.2 Ruumi valgustuse ja seadmete kaubandushoone kasutusprofiil



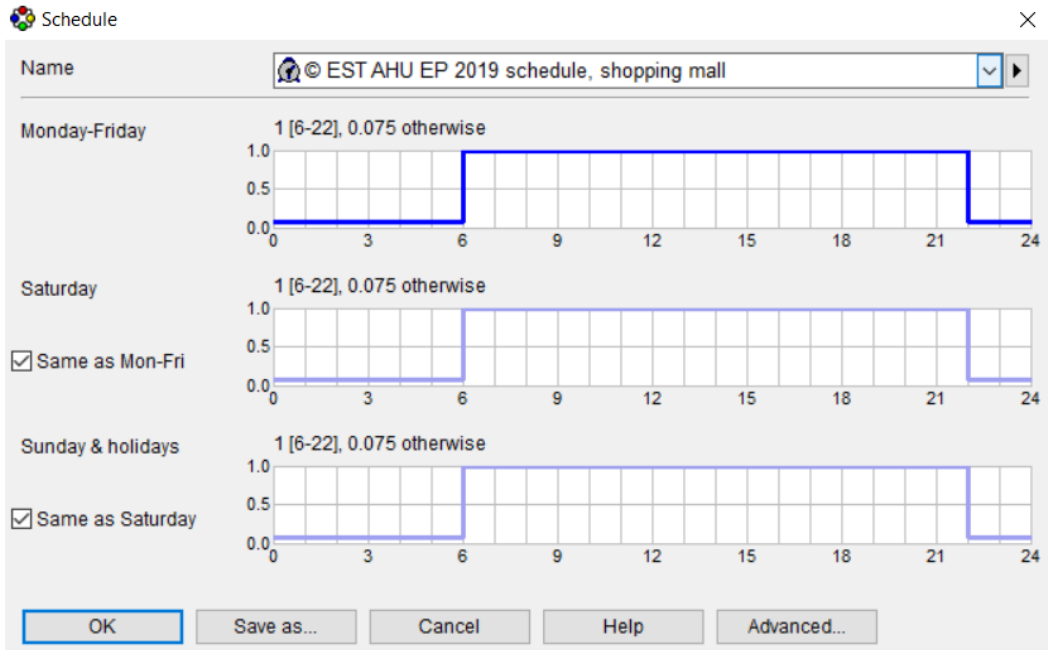
Joonis 3.3 Ruumi inimeste kaubandushoone kohaloleku profiil



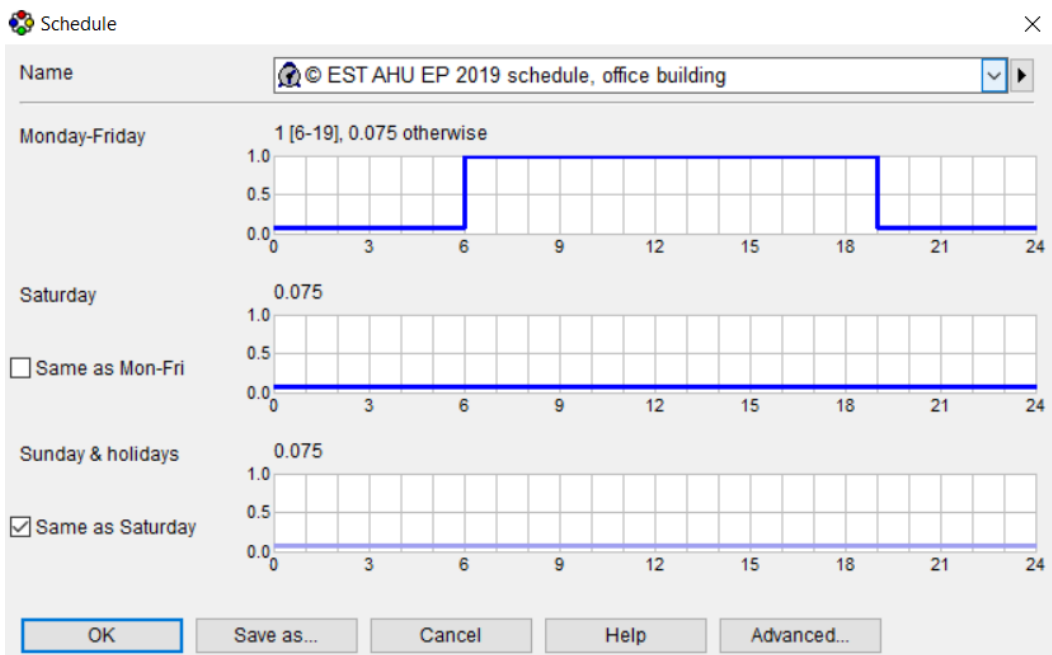
Joonis 3.4 Kontorihoone kasutusprofiili valgustusele, seadmetele ja inimeste kohalolekule

Ventilatsiooniseadme andmed:

- Sissepuhke ventilaatori algne SFP $1 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$;
- Väljatõmbe ventilaatori algne SFP $0,6 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$;
- Soojustagasti suhtarv $0,8$;
- Soojustagastist lahkuv minimaalne temperatuur $-5 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Jahutuskalorifeeri keskmine pinnatemperatuur $12,5 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Sissepuhkeõhu temperatuur $18 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Seadme töötamise graafikud on toodud joonistel (Joonis 3.5 ja Joonis 3.6).



Joonis 3.5 Kaubandushoone profiiliga ventilatsiooniseadme töötamise graafik

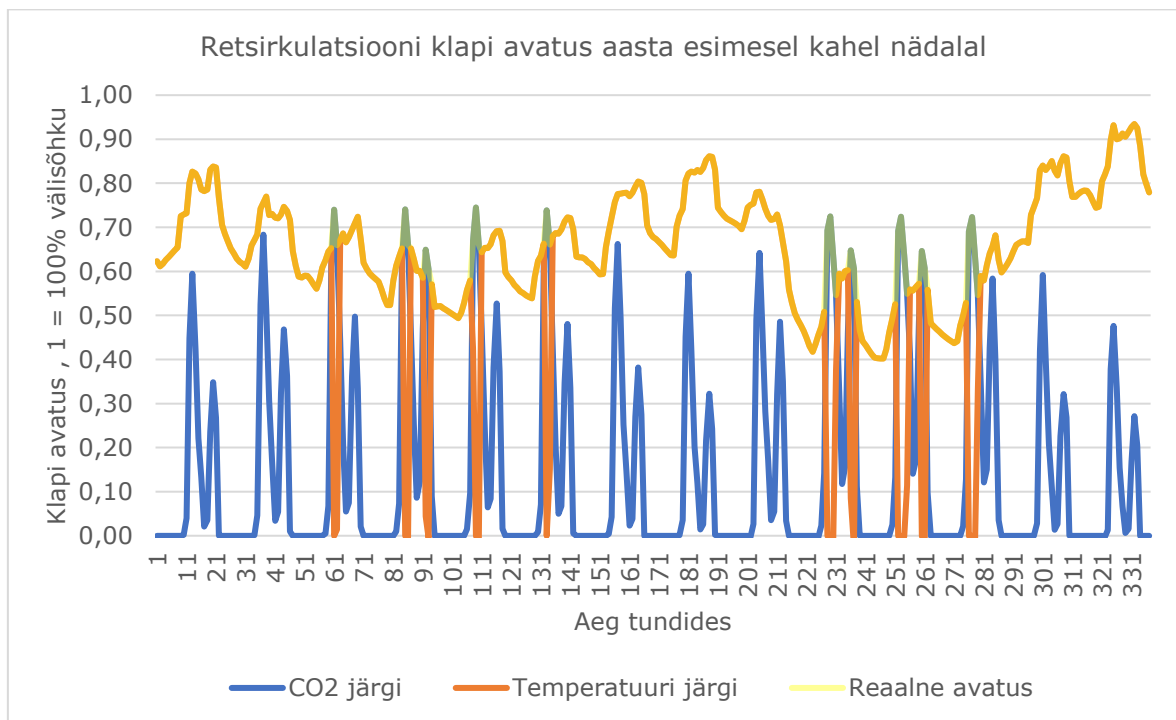


Joonis 3.6 Kontorihoon profiiliga ventilatsiooniseadme töötamise graafik

Simulatsioonides kasutatakse Eesti energiaarvutuste testaasta välisõhu parameetreid. Testaasta koostamiseks on kasutatud 31 aasta (1970-2000) kliimaandmeid, milles on väljatoodud õhutemperatuur, õhuniiskus, päikesekiirgus ja tuule kiirus ning suund [26].

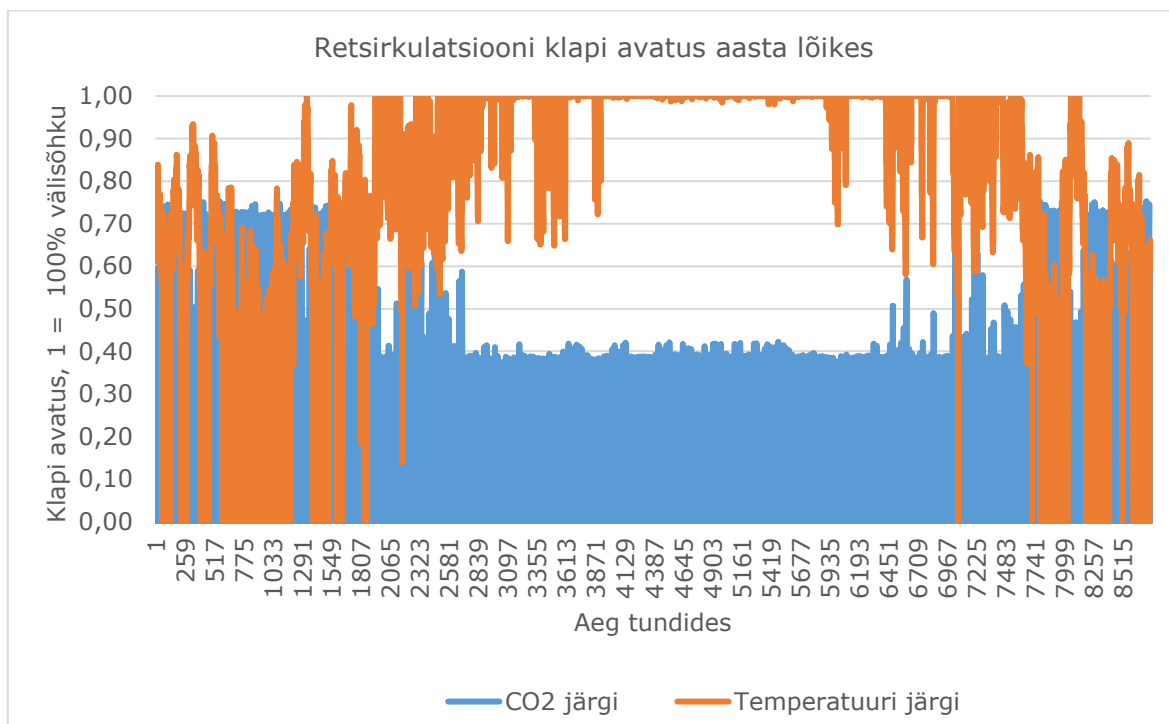
3.2 Modelleerimine

Aluseks on võetud IDA ICE 4.8 programmis olev CO₂ ja väljatõmbeõhu temperatuuri järgi juhtimisega ventilatsiooniseade. Sellele lisati sissepuhke ventilaatori SFP suurenemise funktsioon. Retsirkulatsiooni ja filtri skeemina kasutati ASHRAE poolt välja pakutud skeemi, kus filter asetseb sissepuhke kanalil. Filtreid vahetatakse vastavalt kirjanduses toodud väärtustele. Filtrite lisamisega tõuseb ventilaatori algne SFP ning lisaks filtrite efektiivsuse languga tõuseb nende aerodünaamiline takistus ning suureneb sissepuhke ventilaatori SFP ehk suureneb energiakasutus. Retsirkulatsiooni juhitakse vastavalt väljatõmbeõhu CO₂ sisaldusele ning väljatõmbeõhu temperatuurile, kui CO₂ tase on madal kasutatakse välisõhku 10% ning kui on kõrge kasutatakse sissepuhkeks 100% välisõhku. Vahepealsetel olukordadel segatakse värsket ja väljatõmbeõhku lineaarselt vastavalt madalaima (450 ppm) ja kõrgeima (700 ppm) lubatud CO₂ taseme järgi. Segamissõlmes jälgitakse väljatõmbeõhu temperatuuri ning sel juhul muudetakse välisõhuklapi asendit nii palju, et oleks saavutatud soovitud sissepuhke temperatuur. Kui on jahe ilm, siis avatakse välisõhu klappi vähem ning kui on soe, siis rohkem. Süsteem jälgib mõlemat klapi juhtimisskeemi ning valib alati variandi, mille puhul on välisõhu kogus suurem. Temperatuuri järgi juhitakse seepärast, et vältida jahutuskalorifeeri töötamist jahedal perioodil, kui on võimalik kasutada õhu jahutamiseks energiasäästlikumat lahendust ehk võtta õuest külma välisõhku.



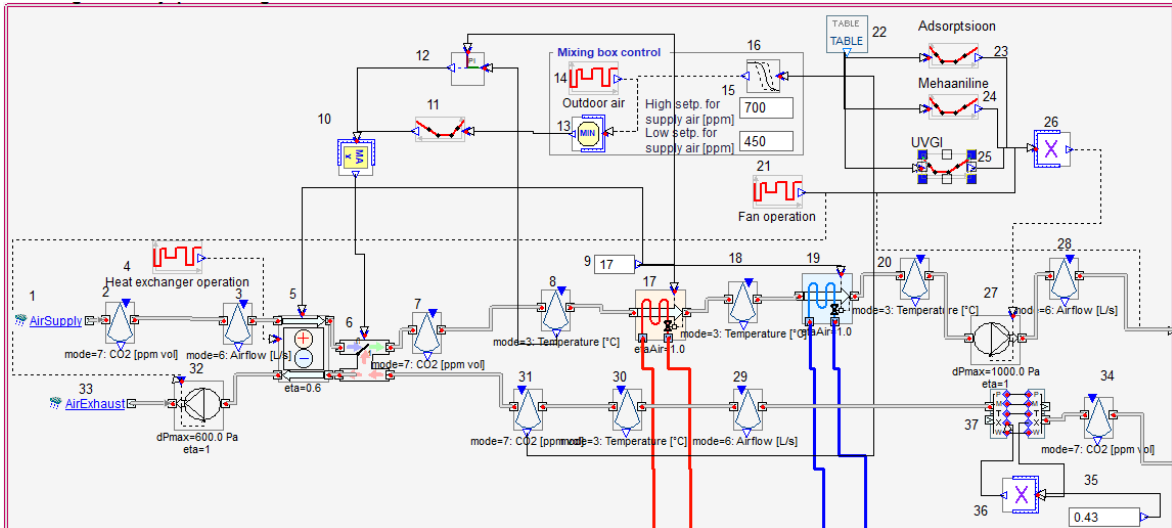
Joonis 3.7 Retsirkulatsiooniklapi avatus kaubandushoone profiiliga aasta esimesel kahel nädalal

Joonisel (Joonis 3.7 on väljatoodud retsirkulatsiooniklapi avatus aasta esimesel kahel nädalal. Kui klapi asend on 0, siis ei kasutata välisõhku ning asendis 1 kasutatakse 100% välisõhku. Joonisel on sinise joonega väljatoodud CO₂ järgi vajalik klapi asend ning oranžiga temperatuuri järgi vajalik klapi asend. Kollasega (kui on temperatuuri järgi siis kergelt oranžikas ning kui on CO₂ järgi siis rohekas värv) on toodud reaalne avatus, mis on kahe juhtimisskeemi suurim väärtus. On näha, et suurem osa aega on domineerivaks juhtskeemiks temperatuur, sest testruumil puuduvad soojuskaod ümbritsevasse keskkonda, kuid vabasoojused on ruumis ikkagi. Joonis 3.8 on toodud retsirkulatsiooniklapi avatus aasta lõikes. Graafikult on näha, et suvisel ajal on klapp rohkem avatud, seda selgitab põhjus, et suvel on välisõhk soojem.

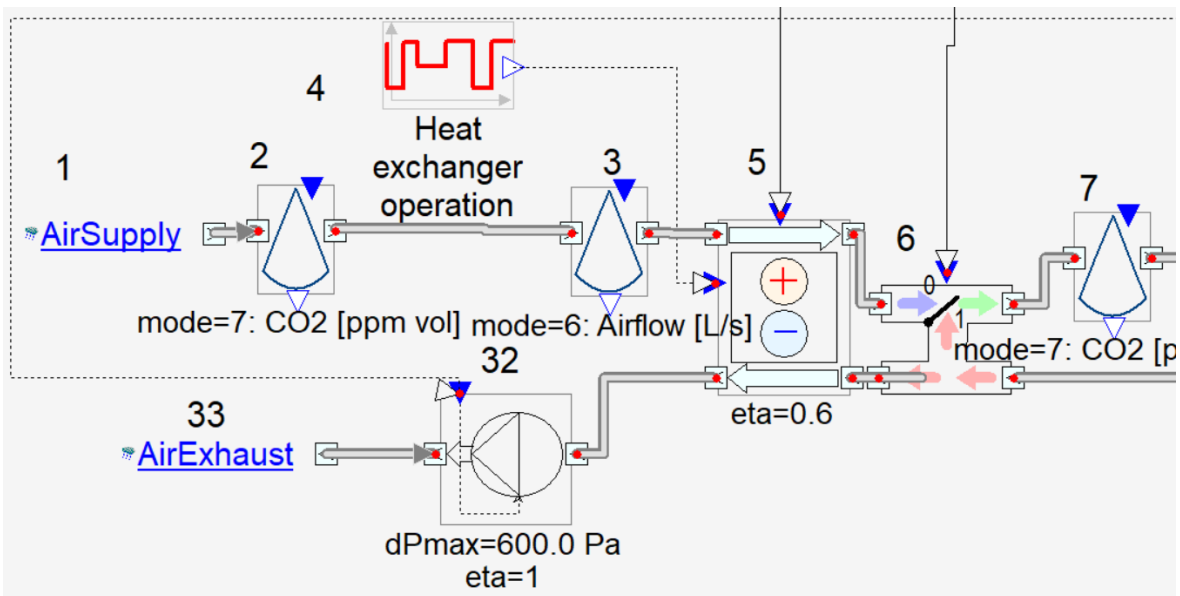


Joonis 3.8 Retsirkulatsiooniklapi avatus kaubandushoone korral aasta lõikes

Järgnevalt on lahti seletatud ventilatsiooniseadme (Joonis 3.9) komponendid, mida nad teevad ning mis on nende seadeväärtused.



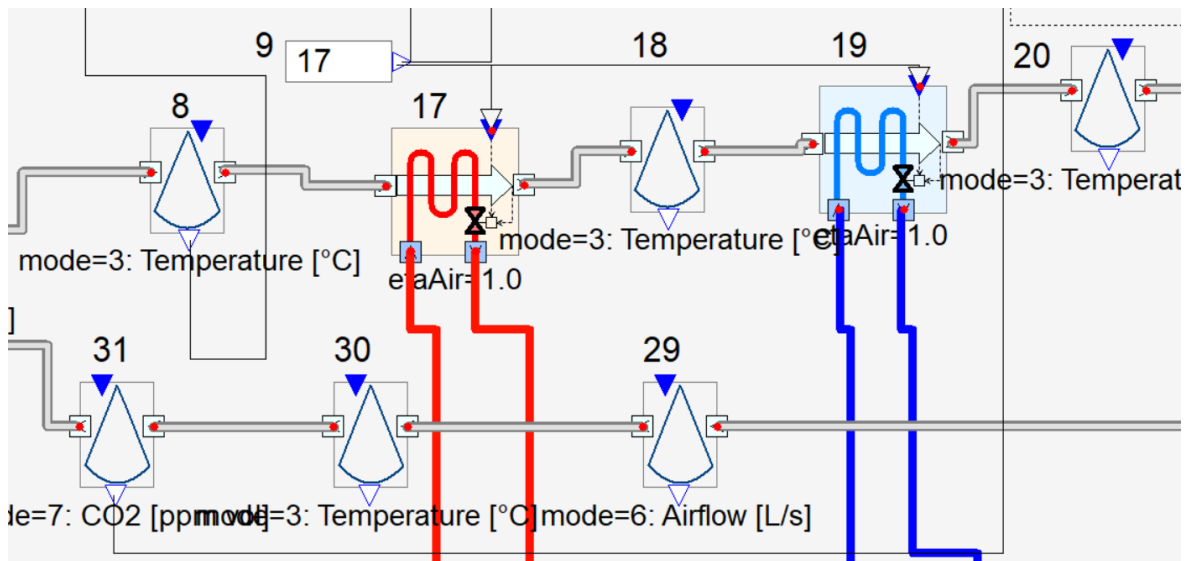
Joonis 3.9 Venilatsiooniseadme skeemi väljavõtte programmist IDA-ICE 4.8



Joonis 3.10 Ventilatsiooniseadme skeemi osa väljavõtte 1

Tabel 3.1 Väljavõtte 1 selgitus

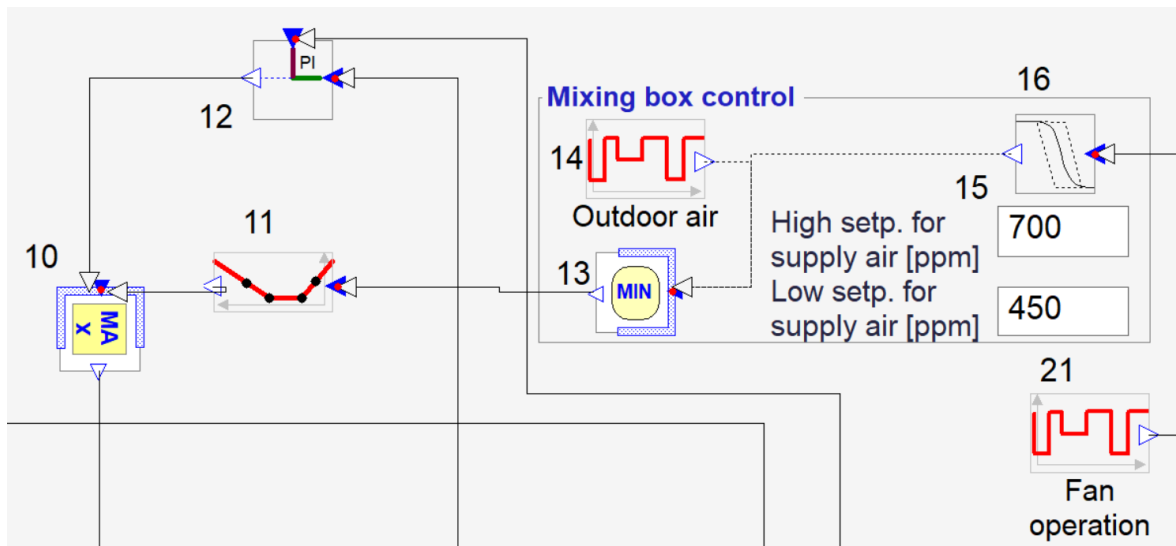
Tähis	Kirjeldus
1	Ventilatsiooniseadme õhuvõtt, kasutatakse Eesti energiaarvutuste testaasta [26] õhuparameetreid.
2	Süsihappegaasi andur, mõõdab välisõhu CO ₂ taset (tasemeks on valitud 400 ppm).
3	Välisõhu vooluhulga mõõtja, mõõdab kui palju välisõhku süsteem kasutab.
4	Soojustagasti töötamise graafik, töötab konstantselt.
5	Soojustagasti, kasutatakse et anda sissepuhkeõhule sarnased soojuslikud omadused, mis on väljatõmbeõhul.
6	Retsirkulatsiooni moodul, segab värsket välisõhku ja ruumist väljatõmmatavat õhku vastavalt väljatõmbeõhu temperatuurile ning CO ₂ tasemele.
7	Süsihappegaasi andur – mõõdab segunenud õhu CO ₂ taset.
32	Väljatõmbeventilaator.
33	Ventilatsiooniseadme väljavise.



Joonis 3.11 Ventilatsiooniseadme skeemi osa väljavõtte 2

Tabel 3.2 Väljavõtte 2 selgitus

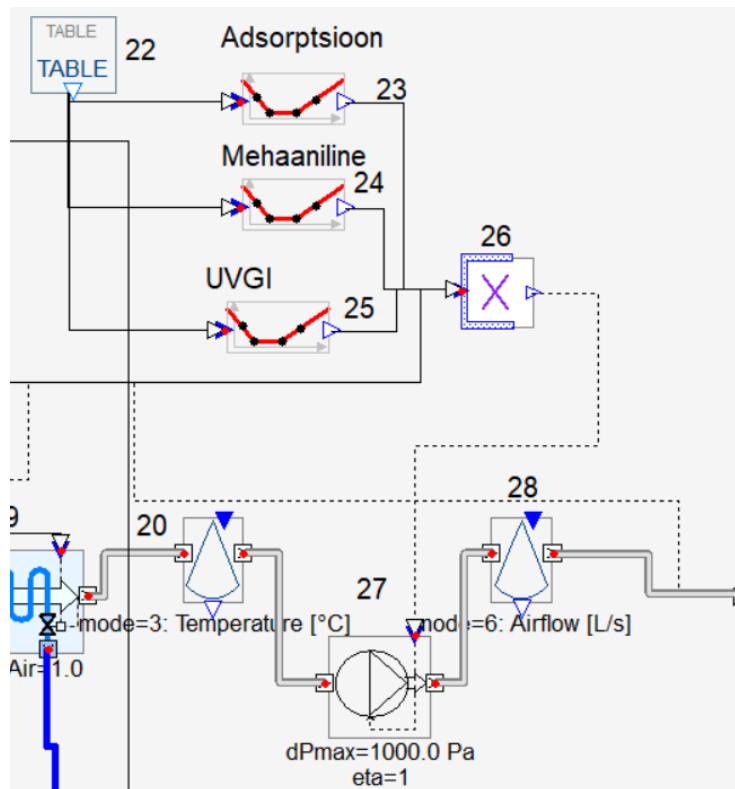
Tähis	Kirjeldus
8	Sissepuhkeõhu temperatuuriandur – mille järgi reguleeritakse retsirkulatsiooniklapi avatust.
9	Seadearv sissepuhkeõhu temperatuurile enne ventilaatorit.
17	Sissepuhkeõhu küttekalorifeer.
18	Temperatuuriandur peale küttekalorifeeri.
19	Sissepuhkeõhu jahutuskalorifeer.
20	Temperatuuriandur peale õhutöötlemist.
29	Väljatõmbeõhu vooluhulga andur.
30	Väljatõmbeõhu temperatuuri andur.
31	Väljatõmbeõhu CO ₂ tasemeandur – mille järgi reguleeritakse retsirkulatsiooniklapi avatust.



Joonis 3.12 Ventilatsiooniseadme skeemi osa väljavõtte 3

Tabel 3.3 Väljavõtte 3 selgitus

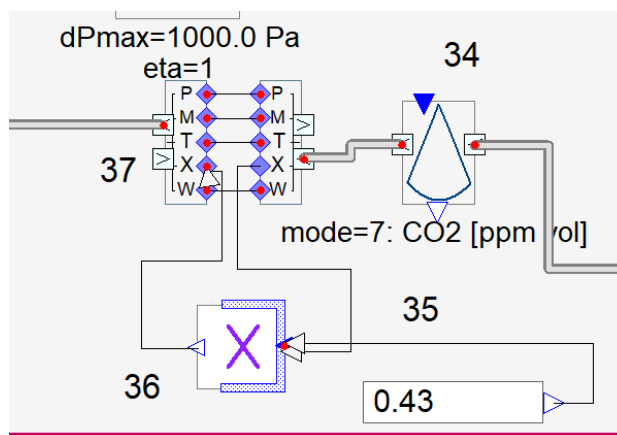
Tähis	Kirjeldus
10	Element, mis valib saadud klapiasendi signaalidest suurima väärtuse ning edastab selle retsirkulatsiooniklapile.
11	Element, mis hoiab minimaalset 10% välisõhu kogust.
12	Element (PI kontroll), mis muudab signaali 0-st 1-ni, vastavalt mõõdetud väljatõmbeõhu temperatuurile ja sissepuhkeõhu temperatuuri seadeväärtusele (17 °C).
13	Valib kasutusgraafikult ja CO ₂ tasemeandurilt saadud klapi asendi väärtustest väikseima.
14	Retsirkulatsiooniõhu kasutamise graafik (töötab koguaeg konstantselt).
15	Väljatõmbeõhu CO ₂ seadeväärtused.
16	Muudab signaali vastavalt mõõdetud väljatõmbeõhu CO ₂ tasemetele 0-st 1-ni, vastavalt seadeväärtuste vahemikule.
21	Ventilaatorite töötamise graafik (töötab vastavalt kaubandushoone ja kontorihoone profiilidele).



Joonis 3.13 Ventilatsiooniseadme skeemi osa väljavõtte 4

Tabel 3.4 Väljavõtte 4 selgitus

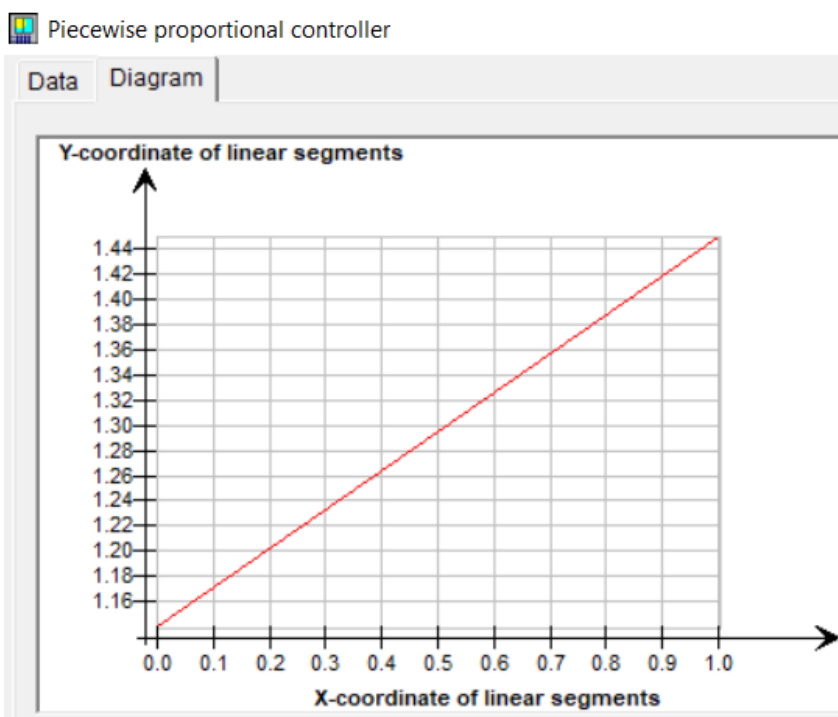
Tähis	Kirjeldus
22	Tabel/graafik mis teisendab aastased 8760 tundi vahemikku 0 kuni 1.
23	Adsorptsioon filtrist põhjustatav SFP tõusu graafik.
24	Mehaanilisest filtrist põhjustatav SFP tõusu graafik.
25	UVGI õhupuhastist põhjustatav SFP tõusu graafik.
26	Erinevate filtrite SFP muutuste ja sissepuhke ventilaatori töötamise signaali korrutis.
27	Sissepuhke ventilaator, kus sissepuhkeõhu temperatuur tõuseb 1 kraadi võrra.
28	Sissepuhkeõhu vooluhulga andur.



Joonis 3.14 Ventilatsiooniseadme skeemi osa väljavõtte 5

Tabel 3.5 Väljavõtte 5 selgitus

Tähis	Kirjeldus
34	Väljatõmbeõhu CO ₂ andur enne CO ₂ taseme vähedamist (HLR seadet) väljatõmbe õhust.
35	enVerdi HLR seadme CO ₂ eraldamise efektiivsus 57% ($1-0,57=0,43$) [27].
36	Suurendab väljatõmbeõhu CO ₂ taset 0,43 korda.
37	<i>AirMux</i> element, mis lahutab õhuvoolu osadeks. Alates ülemisest: rõhk, massivooluhulk, temperatuur, CO ₂ tase, niiskussisaldus.



Joonis 3.15 Filtri takistuse põhjustatud SFP tõusu muutus ajas

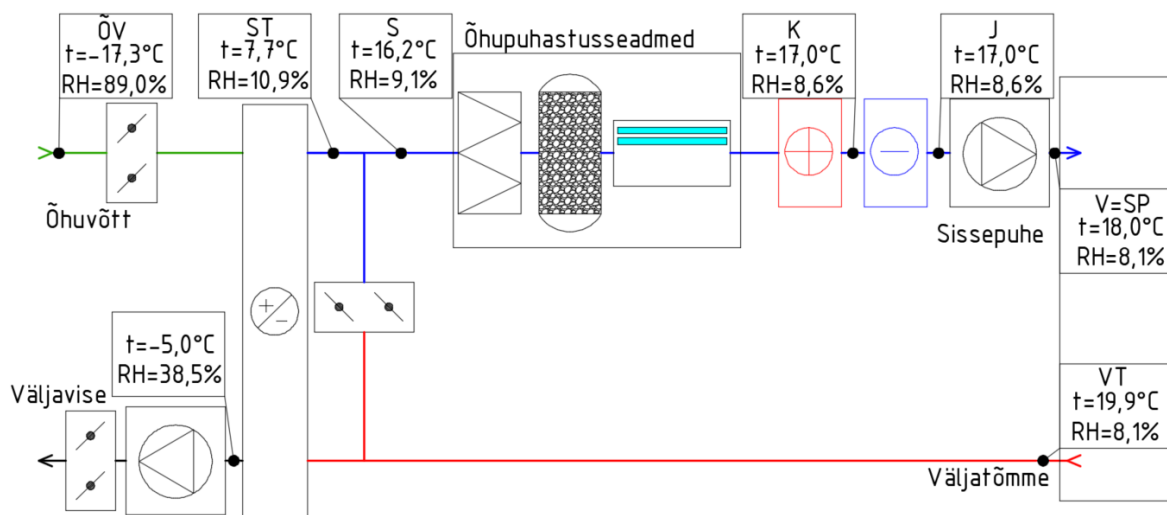
Üleval oleval joonisel (Joonis 3.15) on toodud ühe filtri ajas muutuv takistus. Graafikult on näha, et algselt on filtri takistus väiksem ning aja möödudes selle takistus suureneb, sest filter täitub järk-järgult saasteainetega, mille läbimiseks kulub järjest rohkem energiat. Rõhutõusust põhjustatud SFP suurenemise modelleerimiseks suurendati ventilaatori tööd, mis algselt on määratud töötama vahemikus 0-st 1-ni, üle 1. Vastavalt filtri takistusele muutub ventilaatori poolt tekitatud rõhkude vahe niimoodi, et algne ventilaatori poolt tekitatav rõhutõus on 1000 Pa ning lisades sinna filtri, mille algne takistus on 140 Pa, siis on sellisel juhul ventilaatorisse minev signaal 1,14, mis põhjustab ventilaatori rõhu tõusu 1,14 korda ehk antud simulatsioonis on ventilaatori poolt põhjustatav rõhu tõus 1140 Pa.

3.3 Võrdlusmudelid

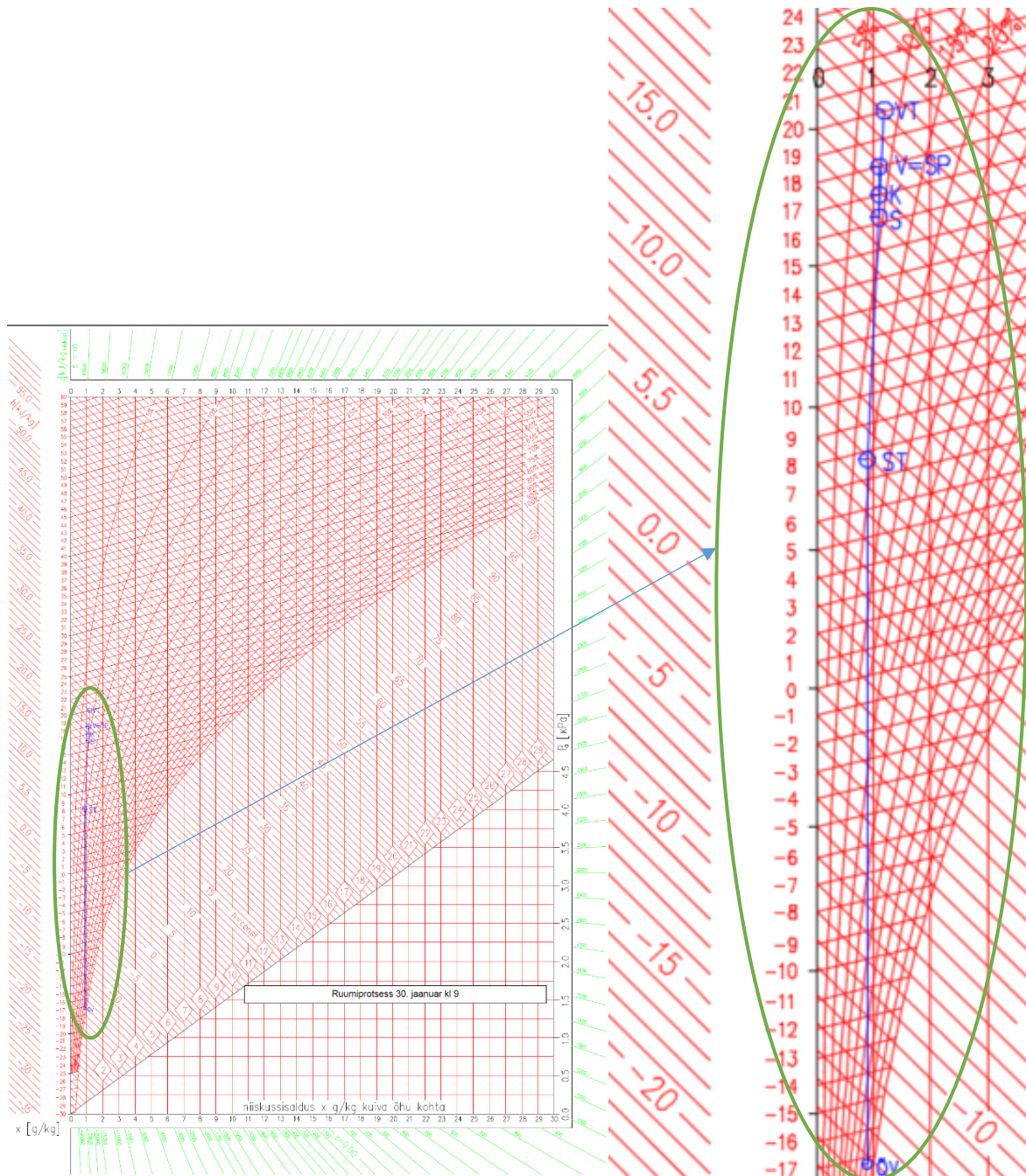
Antud töös vaadeldakse erinevaid ventilatsiooniskeemi mudeleid. Võrdlusmudeliteks kasutatakse kolme skeemi:

- Retsirkulatsiooniskeem, kus ei ole kasutatud õhupuhastust;
- Skeem, kus kasutatakse sissepuhkeks 100%-selt välisõhku;
- Nõudluspõhine, 100% välisõhku kasutav skeem.

Võrdlusmudelite saamiseks lülitatakse baasmudelisse teatud komponendid välja. Retsirkulatsiooniskeemil muudetakse filtrite rõhulangud 0-ks ning lülitatakse välja CO₂ taseme alandamine väljatõmbeõhus. Joonistel (Joonis 3.16 ja Joonis 3.17) on välja toodud retsirkulatsiooni kasutatavate stsenaariumite ja võrdlusmudeli õhuparameetrid kõige külmemas olukorras (30.01.21 kell 9:00). Mollier' h-x diagrammil (Joonis 3.17) on näha, et väljatõmbeõhu (VT) niiskussisaldus on madal ning talvises olukorras on madal ka välisõhu (ÕV) niiskussisaldus. Sellepärast et niiskussisaldused on sarnased on ka Mollier' h-x diagrammil moodustunud õhutötluse "joon" peaaegu, et püstloodis sirgena üles minev.



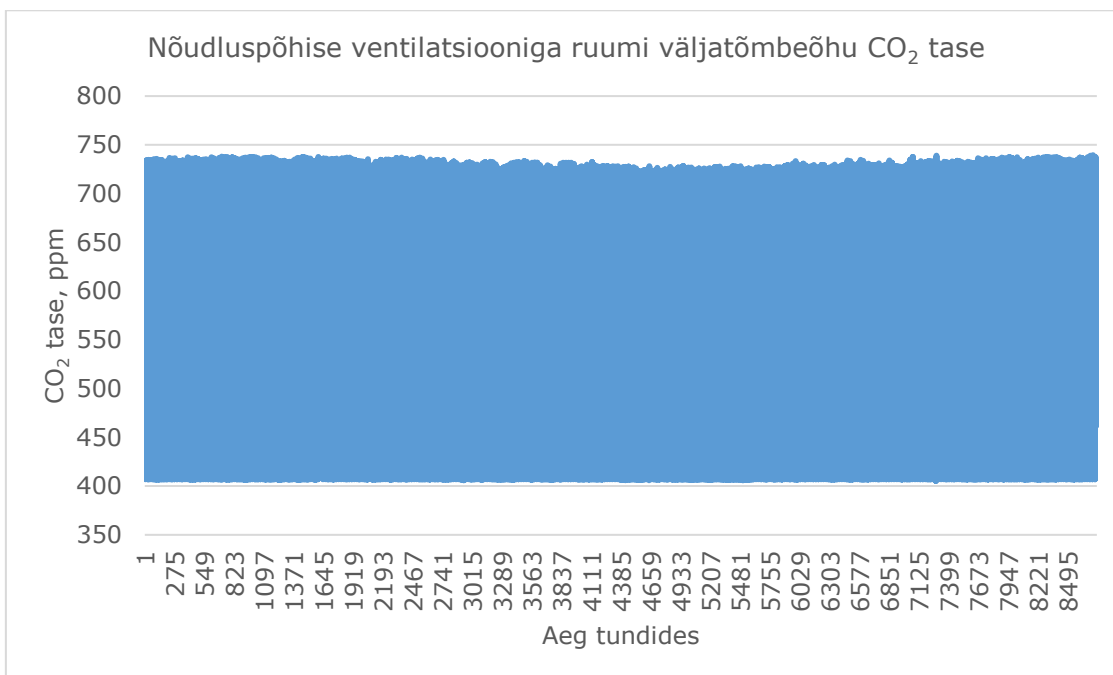
Joonis 3.16 Ventilatsiooniseadme põhimõtteskeem koos 30.01.2021 kell 9:00 simulatsiooni õhuparameetritega



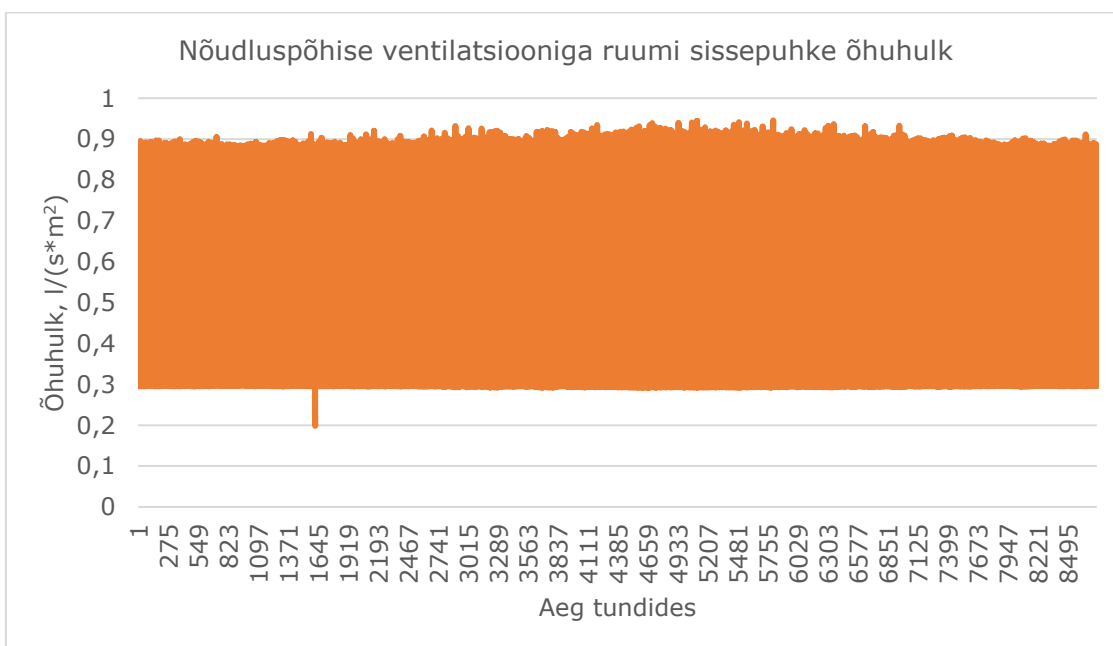
Joonis 3.17 Retsirkulatsiooni skeemi kasutava simulatsiooni Mollier' h-x-diagramm 30.01.21 kell 9:00

Ainult välisõhku kasutaval süsteemil muudetakse lisaks retsirkulatsiooni baasmudeli muudatustele retsirkulatsiooniklapi asend fikseerituks niimoodi, et tagastusõhuklapp on suletud ja värskõhuklapp avatud. Nõudluspõhise skeemi jaoks muudetakse konstantse õhu vooluhulgaga skeem muutuva õhuhulgaga skeemiks, mida juhitakse väljatõmbeõhu CO₂ järgi, mille piirväärtuseks on 750 ppm (Joonis 3.18) ja väljatõmbeõhu temperatuuri, mille piirväärtuseks on 25 °C. Nõudluspõhisel skeemil on sissepuhke õhuhulk küllaltki

väike (Joonis 3.19) ning seega ka välisõhukogus, mis hoiab kokku nii ventilaatorite kui ka õhu konditsioneerimise energiat.



Joonis 3.18 Nõudluspõhise ventilatsiooniga ruumi väljatõmbeõhu CO₂ tase



Joonis 3.19 Nõudluspõhise ventilatsiooniga ruumi sissepuhke õhuhulk

Erinevate stsenaariumite skeemid nii kaubandushoone kui ka büroohoone profiiliga on:

- Ainult mehaanilise filtriga skeem;

- Erinevate filtriklassidega (9 tk);
- Ainult adsorptsioonfilter;
- Ainult UVGI õhupuhastusseade;
- Ainult enVeridi HLR süsteem;
- Erinevad filtrite kombinatsioonid;
 - Erinevate filtriklassidega + adsorptsioon söefilter + UVGI (9 tk);
 - Erinevate filtriklassidega + HLR +UVGI (9 tk).

4. TULEMUSED JA ANALÜÜS

Tulemused on toodud nii kaubandushoone kui ka kontorihoone profiiliga teostatud õhupuhasüsteemide simulatsioonidest. Kaubandushoone simulatsioonid on tabelites välja toodud järjekorranumbri järel oleva .1-ga (näiteks 1.1; 2.1; 3.1 ... jne) ning kontorihoone puhul .2-ga (näiteks 1.2; 2.2 3.2 ... jne).

4.1 Mehaaniliste filtritega skeemid

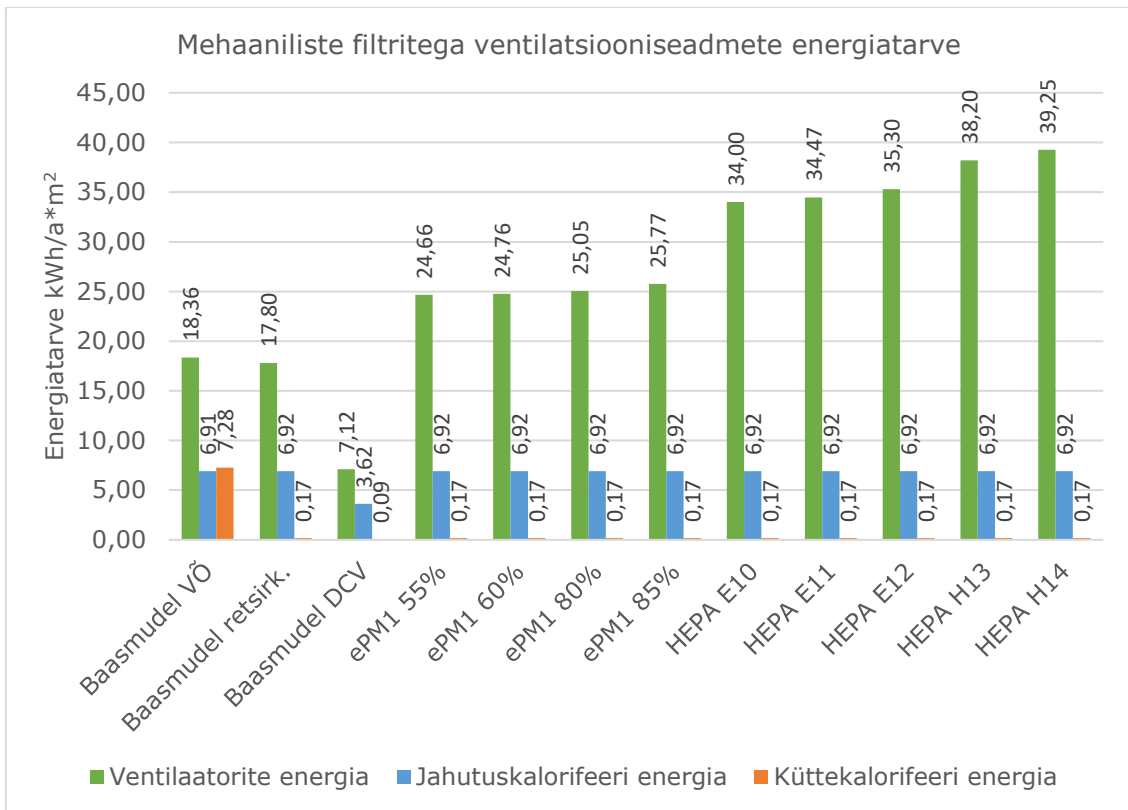
Eelnevalt toodud skeemil (Joonis 3.9) lülitatakse välja adsorptsioon, HLR ja UVGI õhupuhasüsteemi ning simulatsioonis vaadeldakse ainult erinevate mehaaniliste filtrite mõju ventilatsiooniseadme energiakasutusele. Filtreid vahetatakse kord aastas v.a HEPA filtreid, mida vahetatakse kord kahe aasta jooksul, seetõttu on aastases simulatsioonis kasutatud pool HEPA filtri maksimaalsest takistusest. Tabelites (Tabel 4.1 ja Tabel 4.2) on välja toodud erinevad stsenaariumid erinevate filtrite klassidega, juurde on lisatud ka simulatsioonides kasutatud filtrite takistused, mis on saadud tootja andmelehel [28].

Tabel 4.1 Kaubandushoone profiiliga erinevate stsenaariumide energiakasutus ning filtri rõhukadu

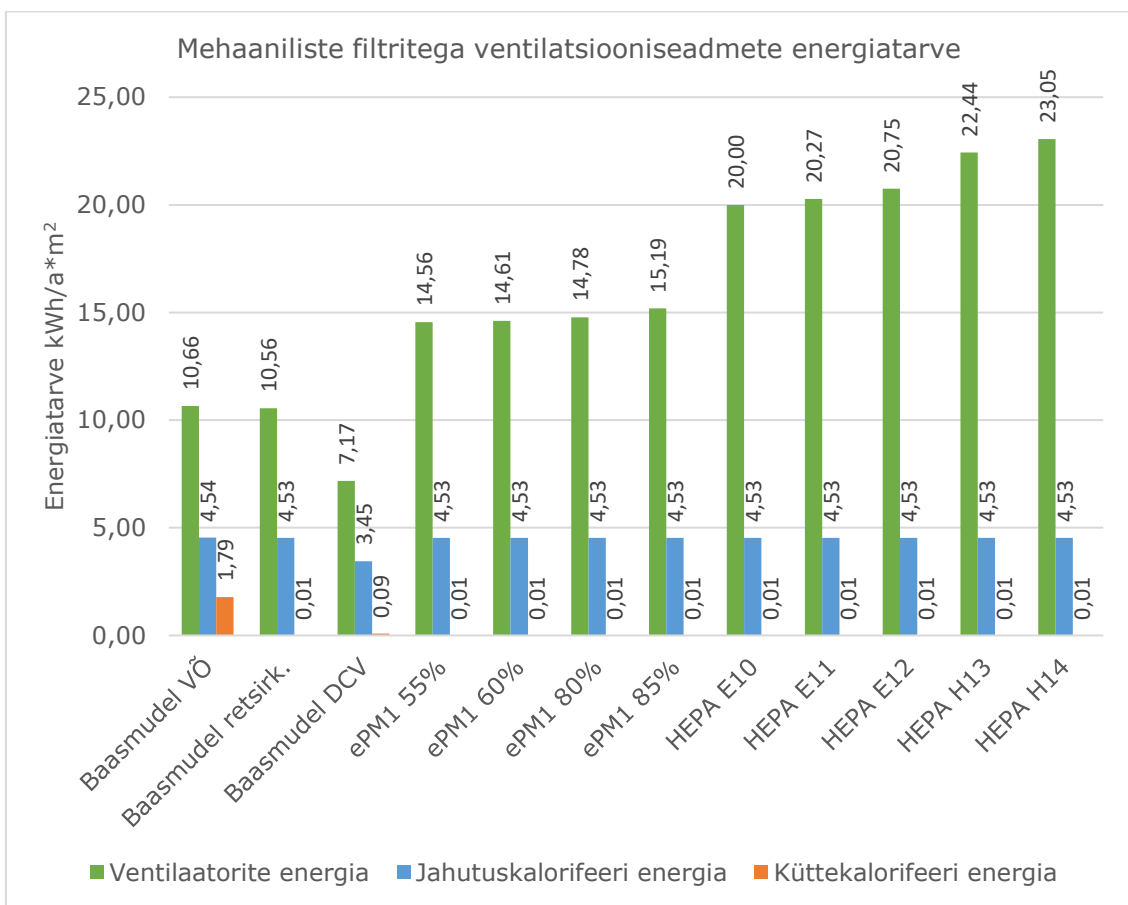
Jrk. nr.	Stsenaarium	Ventilaatorite energia, kWh/(a*m ²)	Jahutuskalorifeeri energia, kWh/(a*m ²)	Küttekalorifeeri energia, kWh/(a*m ²)	Energia kokku, kWh/(a*m ²)	Energiatarbe suurenemine võrreldes Baasmudel retsirk.	Algne rõhukadu, Pa	Lõpp rõhukadu, Pa	Õhupuhasüsteemi el. energia, kWh/(a*m ²)	Algne eelfiltri ePM10 70% rõhukadu, Pa	Lõpp eelfiltri ePM10 70% rõhukadu, Pa
1.1	Baasmudel VÕ	18,36	6,91	7,28	32,55	31%	0	0	0,00		
2.1	Baasmudel retsirk.	17,80	6,92	0,17	24,89	0%	0	0	0,00		
3.1	Baasmudel DCV	7,12	3,62	0,09	10,84	-56%	0	0	0,00		
4.1	ePM1 55%	24,66	6,92	0,17	31,75	28%	62	450	0,00		
5.1	ePM1 60%	24,76	6,92	0,17	31,85	28%	69	450	0,00		
6.1	ePM1 80%	25,05	6,92	0,17	32,14	29%	90	450	0,00		
7.1	ePM1 85%	25,77	6,92	0,17	32,86	32%	140	450	0,00		
8.1	HEPA E10	34,00	6,92	0,17	41,09	65%	125	313	0,00	55	450
9.1	HEPA E11	34,47	6,92	0,17	41,56	67%	140	320	0,00	55	450
10.1	HEPA E12	35,30	6,92	0,17	42,39	70%	165	333	0,00	55	450
11.1	HEPA H13	38,20	6,92	0,17	45,29	82%	250	375	0,00	55	450
12.1	HEPA H14	39,25	6,92	0,17	46,34	86%	280	390	0,00	55	450

Tabel 4.2 Kontorihoone profiiliga erinevate stsenaariumite energiakasutus ning filtri rõhukadu

Jrk. nr.	Stsenaarium	Ventilaatorite energia, kWh/(a*m ²)	Jahutuskalorifeeri energia, kWh/(a*m ²)	Küttekalorifeeri energia, kWh/(a*m ²)	Energia kokku, kWh/(a*m ²)	Energiatarbe suurenemine võrreldes Baasmudel retsirk.	Algne rõhukadu, Pa	Lõpp rõhukadu, Pa	Õhupuhansti el. energia, kWh/(a*m ²)	Algne eelfiltri ePM10 70% rõhukadu, Pa	Lõpp eelfiltri ePM10 70% rõhukadu, Pa
1.2	Baasmudel VÕ	10,66	4,54	1,79	16,99	13%	0	0	0,00		
2.2	Baasmudel retsirk.	10,56	4,53	0,01	15,09	0%	0	0	0,00		
3.2	Baasmudel DCV	7,17	3,45	0,09	10,71	-29%	0	0	0,00		
4.2	ePM1 55%	14,56	4,53	0,01	19,09	26%	62	450	0,00		
5.2	ePM1 60%	14,61	4,53	0,01	19,14	27%	69	450	0,00		
6.2	ePM1 80%	14,78	4,53	0,01	19,31	28%	90	450	0,00		
7.2	ePM1 85%	15,19	4,53	0,01	19,73	31%	140	450	0,00		
8.2	HEPA E10	20,00	4,53	0,01	24,53	63%	125	313	0,00	55	450
9.2	HEPA E11	20,27	4,53	0,01	24,80	64%	140	320	0,00	55	450
10.2	HEPA E12	20,75	4,53	0,01	25,28	68%	165	333	0,00	55	450
11.2	HEPA H13	22,44	4,53	0,01	26,97	79%	250	375	0,00	55	450
12.2	HEPA H14	23,05	4,53	0,01	27,58	83%	280	390	0,00	55	450



Joonis 4.1 Mehaaniliste filtritega ventilatsiooniseadmete energiatarve



Joonis 4.2 Kontorihoone profiiliga, mehaaniliste filtritega ventilatsiooniseadmete energiatarve

Joonistelt (Joonis 4.1 ja Joonis 4.2) on näha, et võrreldes 100% välisõhku kasutanud seadmega kulub retsirkulatsioonisüsteemiga seadmetel vähem energiat küttekalorifeerile, sest välisõhu kogus on väiksem. Retsirkulatsiooniga skeemidel on keskmine värskeõhuklapi avatus kaubandushoone profiiliga 64% ja kontorihoone profiiliga 97%. Kontorihoone profiili korral kasutatakse rohkem välisõhku, sest vabasoojuste hulk on oluliselt suurem kui kaubandushoone profiili korral ning seetõttu on tarvis suuremat jahutuskoormust, mille tarvis kasutatakse välisõhku. Siinkohal on oluline meeles pidada, et lõputöös kasutati abstraktset testruumi, millel puudusid soojuskaod, mis on vähese kütteenergiakasutuse ja suurema jahutusenergia (välisõhu kasutuse) põhjuseks. Realistlikemates oludes teeb küttekalorifeer rohkem tööd, sest kaubanduspindu köetakse tõenäoliselt õhuga. Joonistelt (Joonis 4.1 ja Joonis 4.2) on näha, et filtrite kasutamisel ning nende efektiivsuse tõusuga kasvab ventilaatorite energiatarve. Kaubandushoone profiiliga on suuremad ventilaatorite, jahutus- ja kütteenergiad, sest kasutusprofiil on aasta lõikes pikem. Ühe profiili lõikes ei muutu kütte- ja jahutusenergiad erinevate filtrite kasutamisel, sest sissepuhkeks kasutatav välisõhukogus on ühe profiili stsenaariumitel sama.

4.2 Adsorptsioon filtriga skeem

Skeemil (Joonis 3.9) lülitatakse välja mehaanilised filtrid, HLR ja UVGI õhupuhasti ning simulatsioonis vaadeldakse ainult adsorptsioon söefiltri mõju ventilatsiooniseadme energiakasutusele. Adsorptsioon filtri taksistusena kasutati 110 Pa, mis oli välja toodud tootja andmelehel [29]. Adsorptsioon filtriga ventilatsiooniskeemi energiakasutus on toodud järgnevas tabelis (vt Tabel 4.3). Energiakasutuse kasv tekib filtri kaudsest energia vajadusest, mis väljendub ventilaatoritele kulunud energia kasvus. Simulatsioonides pole arvestatud olukorraga, kus adsorptsioon filter võiks mehaaniliselt mustuda ning seetõttu on filtri alg- ja lõpptakistused simulatsioonis võrdsed.

Tabel 4.3 Adsorptsioon filtriga skeemi energiakasutus

Jrk. nr.	Stsenaarium	Ventilaatorite energia, kWh/(a*m ²)	Jahutuskalorifeeri energia, kWh/(a*m ²)	Küttekalorifeeri energia, kWh/(a*m ²)	Energia kokku, kWh/(a*m ²)	Energiaarbe suurenemine võrreldes Baasmudel retsirk.	Algne rõhukadu, Pa	Lõpp rõhukadu, Pa	Õhupuhasti el. energia, kWh/(a*m ²)
1.1	Baasmudel VÕ	18,36	6,91	7,28	32,55	31%	0	0	0,00
2.1	Baasmudel retsirk.	17,80	6,92	0,17	24,89	0%	0	0	0,00
3.1	Baasmudel DCV	7,12	3,62	0,09	10,84	-56%	0	0	0,00
13.1	Adsorptsioon	20,50	6,92	0,17	27,59	11%	110	110	0,00
1.2	Baasmudel VÕ	10,66	4,54	1,79	16,99	13%	0	0	0,00
2.2	Baasmudel retsirk.	10,56	4,53	0,01	15,09	0%	0	0	0,00
3.2	Baasmudel DCV	7,17	3,45	0,09	10,71	-29%	0	0	0,00
13.2	Adsorptsioon	12,12	4,53	0,01	16,66	10%	110	110	0,00

4.3 UVGI õhupuhastiga skeem

Skeemil (Joonis 3.9) lülitatakse välja mehaanilised filtrid, adsorptsioon ja HLR õhupuhasti ning simulatsioonis vaadeldakse ainult UVGI puhasti mõju ventilatsiooniseadme energiakasutusele. Bakteritsiidse ultraviolettkiirgusega õhupuhasti takistusena kasutati 8 Pa ning arvestati UV-lampide summaarseks võimsuseks 60 W. Lambid on sisselülitatud kui ventilatsiooniseade töötab ehk 24/7.

Tabel 4.4 UVGI õhupuhasti energiakasutus

Jrk. nr.	Stsenaarium	Ventilaatorite energia, kWh/(a*m ²)	Jahutuskalorifeeri energia, kWh/(a*m ²)	Küttekalorifeeri energia, kWh/(a*m ²)	Energia kokku, kWh/(a*m ²)	Energia tarbe suurenemine võrreldes Baasmudel retsirk.	Algne rõhukadu, Pa	Lõpp rõhukadu, Pa	Õhupuhasti el. energia, kWh/(a*m ²)
1.1	Baasmudel VÕ	18,36	6,91	7,28	32,55	31%	0	0	0,00
2.1	Baasmudel retsirk.	17,80	6,92	0,17	24,89	0%	0	0	0,00
3.1	Baasmudel DCV	7,12	3,62	0,09	10,84	-56%	0	0	0,00
14.1	UVGI	18,11	7,13	0,11	30,60	23%	8	8	3,11
1.2	Baasmudel VÕ	10,66	4,54	1,79	16,99	13%	0	0	0,00
2.2	Baasmudel retsirk.	10,56	4,53	0,01	15,09	0%	0	0	0,00
3.2	Baasmudel DCV	7,17	3,45	0,09	10,71	-29%	0	0	0,00
14.2	UVGI	10,71	4,62	0,01	20,58	36%	8	8	3,11

Tulemustest on näha, et UVGI õhupuhasti korral suureneb jahutuskoormus ning väheneb küttekoormus. See on põhjustatud UV-lampide soojuseraldusest, mille peavad kalorifeerid tasakaalustama. Põhiline energia juurdekasv tuleneb UV-lampide energiakasutusest, ventilaatorite energiakasutus suureneb minimaalselt.

4.4 HLR õhupuhastiga skeem

EnVerid *HVAC Load Reduction* süsteem kasutab toimimiseks elektrienergiat nii adsorptsiooni kui ka regeneratsiooni faasis. Simulatsioonis on arvestatud, et regeneratsioon toimub pool tundi ööpäevas ning kasutab sel hetkel 5,5 kW elektrienergiat, adsorptsioon toimub ülejäänud ajal ning kasutab seejuures elektrienergiat 300 W [30]. Aastane HLR õhupuhasti energiatarve on leitud valemiga 4.1.

$$E = P \cdot t * 1000 \quad (4.1)$$

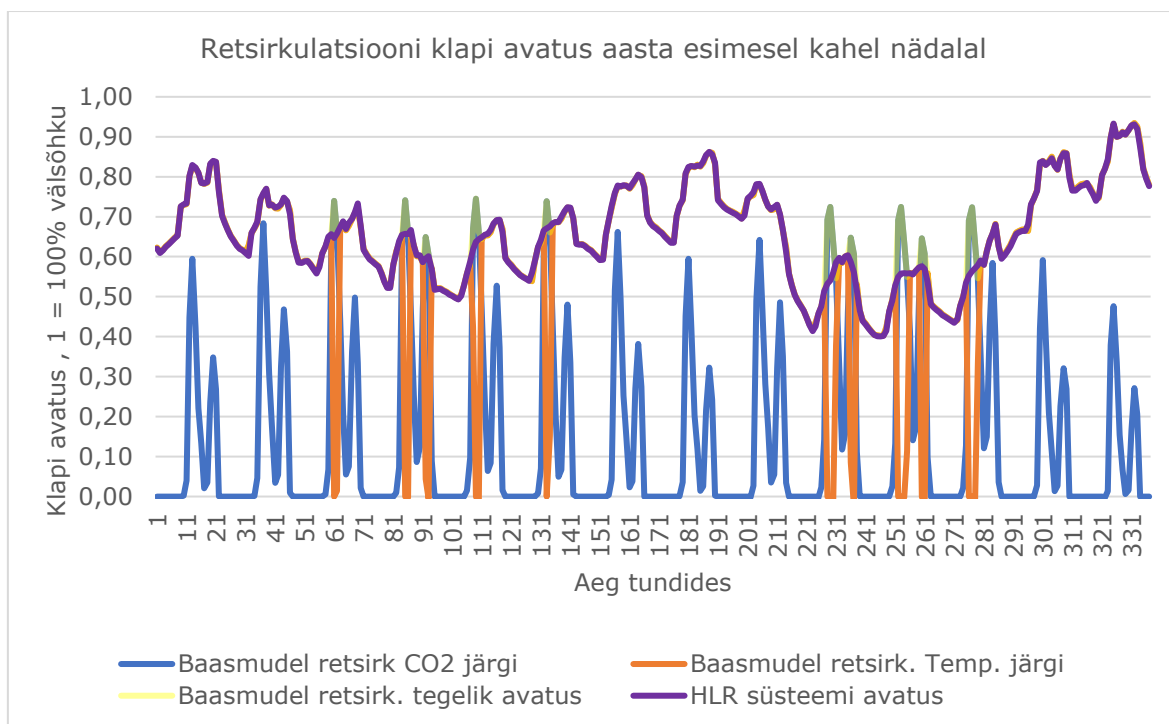
- kus E – aastane energiatarve, kWh,
 P – tarbitav võimsus, W,
 t – aeg mille jooksul energiatarvet mõõdetakse, h.

HLR süsteemiga teostatud simulatsioonide tulemused on mõlema profiili kohta toodud alljärgnevas tabelis (Tabel 4.5).

Tabel 4.5 HLR õhupuhasti energiatarve

Jrk. nr.	Stsenaarium	Ventilaatorite energia, kWh/(a*m ²)	Jahutuskalorifeeri energia, kWh/(a*m ²)	Küttekalorifeeri energia, kWh/(a*m ²)	Energia kokku, kWh/(a*m ²)	Energia tarbe suurenenine võrreldes Baasmudel retsirk.	Algne rõhukadu, Pa	Lõpp rõhukadu, Pa	Õhupuhasti el. energia, kWh/(a*m ²)
1.1	Baasmudel VÕ	18,36	6,91	7,28	32,55	31%	0	0	0,00
2.1	Baasmudel retsirk.	17,80	6,92	0,17	24,89	0%	0	0	0,00
3.1	Baasmudel DCV	7,12	3,62	0,09	10,84	-56%	0	0	0,00
15.1	HLR	17,79	6,90	0,01	45,91	84%	0	0	21,21
1.2	Baasmudel VÕ	10,66	4,54	1,79	16,99	13%	0	0	0,00
2.2	Baasmudel retsirk.	10,56	4,53	0,01	15,09	0%	0	0	0,00
3.2	Baasmudel DCV	7,17	3,45	0,09	10,71	-29%	0	0	0,00
15.2	HLR	10,56	4,53	0,01	36,30	141%	0	0	21,21

HLR süsteem suudab eraldada väljatõmbeõhust lisaks teistele gaasilistele saasteainetele ka süsihappegaasi ning seetõttu on sellel skeemil väiksem ventilaatorite, kütte- ja jahutuskalorifeeri energiatarve, sest süsteemis kasutatakse vähem välisõhku. Joonisel (Joonis 4.3) on näha, et HLR süsteemi korral jääb ära süsihappegaasist põhjustatud välisõhuklapi avanemine (kõik rohekad maksimumid jäävad ära) ning seetõttu ka küttekalorifeeri töötamine, sest süsteem suudab eraldada väljatõmbeõhust lisaks teistele gaasilistele saasteainetele ka süsihappegaasi, mis mõjutab retsirkulatsiooniklapi asendit.



Joonis 4.3 Kaubandushoone profiiliga HLR süsteemi retsirkulatsiooniklapi avatus aasta esimesel kahel nädalal

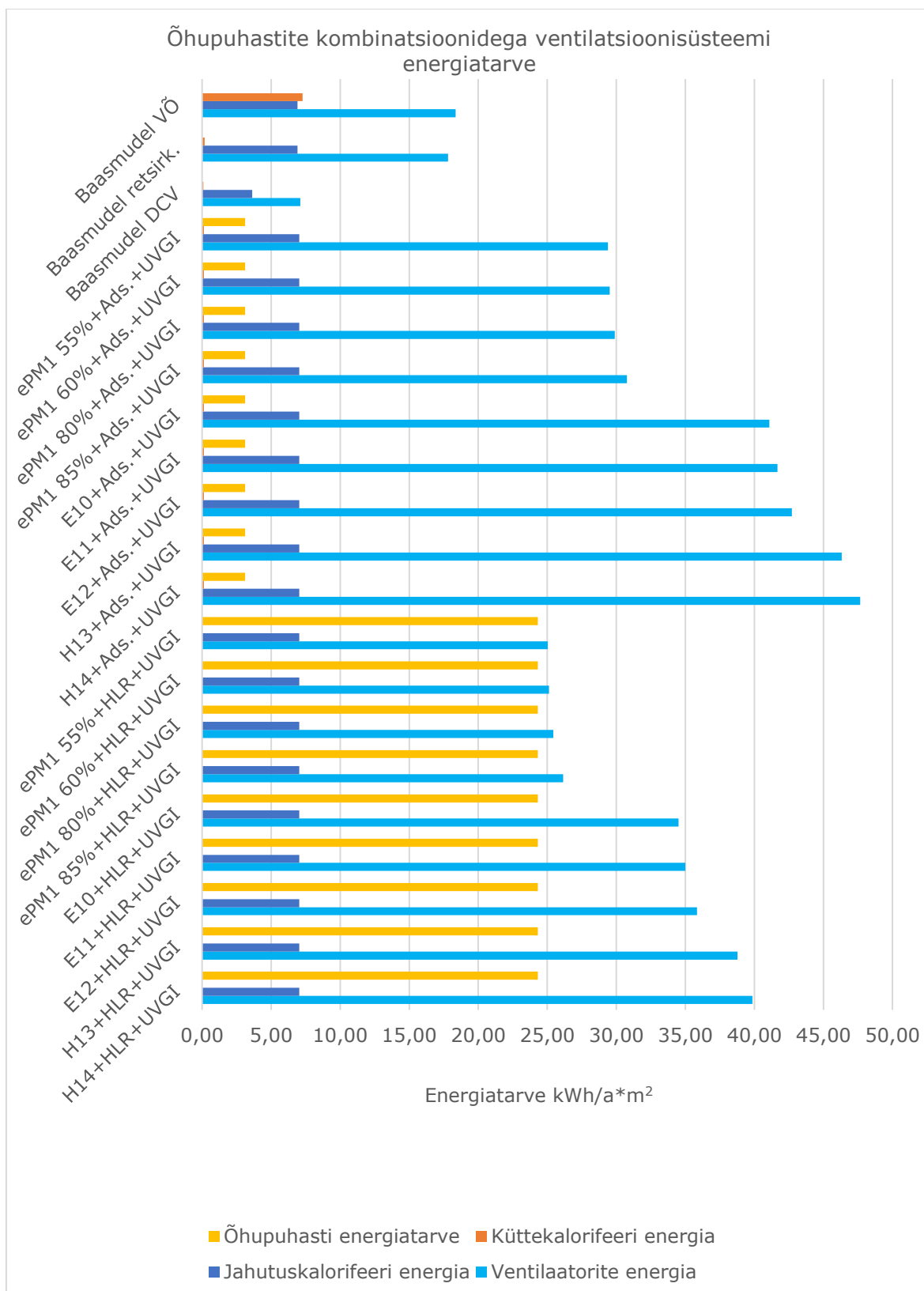
4.5 Erinevate õhupuhastite kombineeritud kasutamine

Simulatsioonides teostati 18 erinevat õhupuhastite kombinatsiooni, kõikide eelnevalt katsetatud mehaaniliste filtritega nii kaubandushoone kui ka kontorihoone profiiliga. Esimeses 9-s kombinatsioonis on kasutatud erinevaid mehaanilisi filtreid koos UVGI ja adsorptsioon söefiltriga ning ülejäänud 9-s kombinatsioonis kasutati erinevaid mehaanilisi filtreid koos HLR ja UVGI õhupuhastiga. Alljärgnevas tabelis (Tabel 4.6) ja graafikutel (Joonis 4.4 ja Joonis 4.5) on välja toodud tulemused nii kaubandus- kui ka kontorihoone profiili kohta.

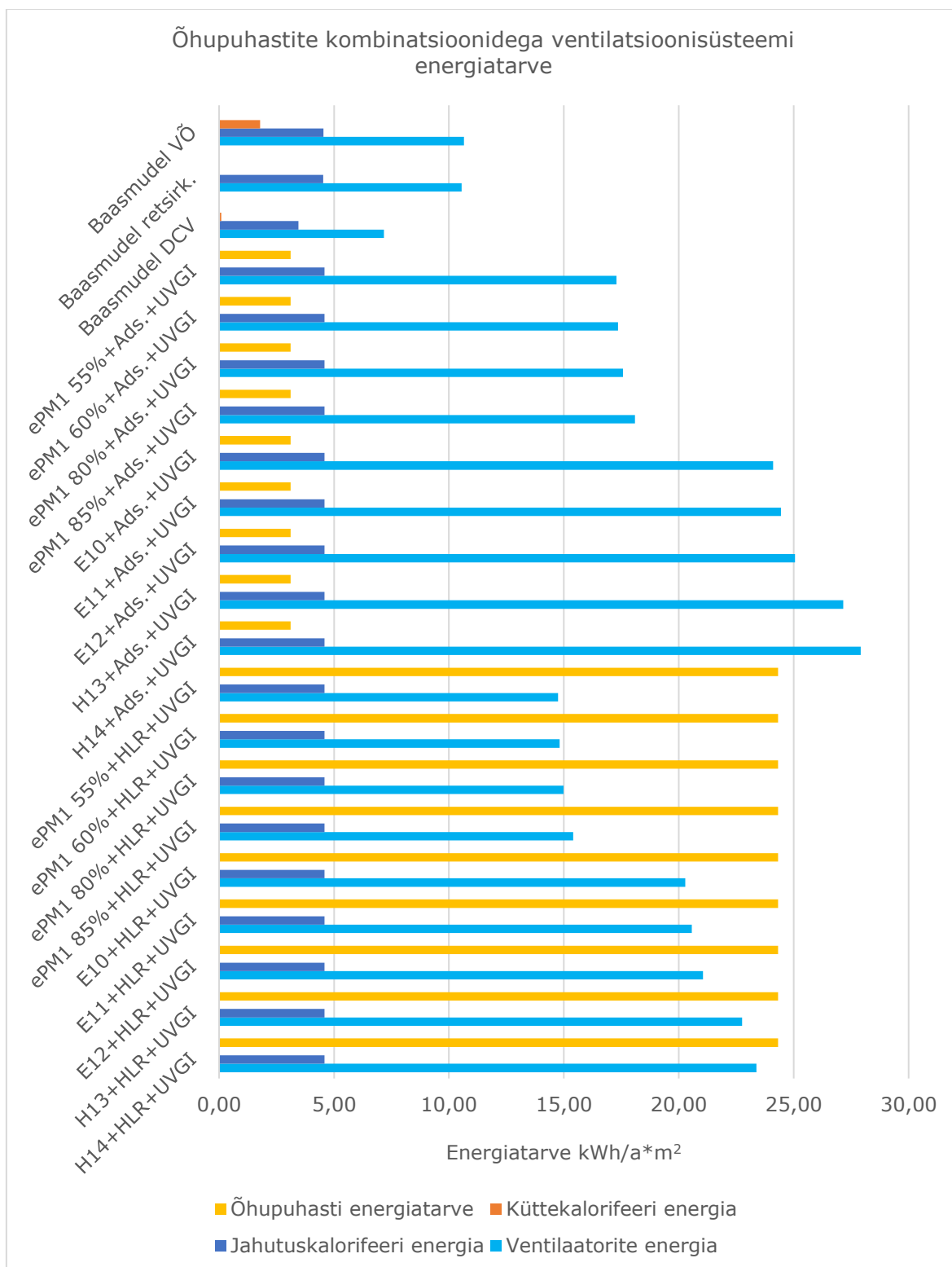
Tabel 4.6 Erinevate õhupuhastite kombinatsioonid kaubandushoone ja kontorihoone profiiliga

Jrk. nr.	Stsenaarium	Ventilaatorite energia, kWh/(a*m ²)	Jahutuskalorifeeri energia, kWh/(a*m ²)	Küttekalorifeeri energia, kWh/(a*m ²)	Energia kokku, kWh/(a*m ²)	Energiaarbe suuremine võrreldes Baasmudel retsirk.	Algne rõhukadu, Pa	Lõpp rõhukadu, Pa	Õhupuhasti el. energia, kWh/(a*m ²)	Algne eelfiltri ePM10 70%	Lõpp eelfiltri ePM10 70% rõhukadu, Pa
1.1	Baasmudel VÕ	18,36	6,91	7,28	32,55	31%	0	0	0,00		
2.1	Baasmudel retsirk.	17,80	6,92	0,17	24,89	0%	0	0	0,00		
3.1	Baasmudel DCV	7,12	3,62	0,09	10,84	-56%	0	0	0,00		
16.1	ePM1 55%+Ads.+UVGI	29,40	7,04	0,13	39,68	59%	180	568	3,11		
17.1	ePM1 60%+Ads.+UVGI	29,52	7,04	0,13	39,80	60%	187	568	3,11		
18.1	ePM1 80%+Ads.+UVGI	29,89	7,04	0,13	40,17	61%	208	568	3,11		
19.1	ePM1 85%+Ads.+UVGI	30,78	7,04	0,13	41,06	65%	258	568	3,11		
20.1	E10+Ads.+UVGI	41,08	7,04	0,13	51,37	106%	243	431	3,11	55	450
21.1	E11+Ads.+UVGI	41,68	7,04	0,13	51,96	109%	258	438	3,11	55	450
22.1	E12+Ads.+UVGI	42,73	7,04	0,13	53,01	113%	283	451	3,11	55	450
23.1	H13+Ads.+UVGI	46,34	7,04	0,13	56,62	127%	368	493	3,11	55	450
24.1	H14+Ads.+UVGI	47,66	7,04	0,13	57,94	133%	398	508	3,11	55	450
25.1	ePM1 55%+HLR+UVGI	25,03	7,03	0,01	56,39	127%	70	458	24,32		
26.1	ePM1 60%+HLR+UVGI	25,13	7,03	0,01	56,49	127%	77	458	24,32		
27.1	ePM1 80%+HLR+UVGI	25,43	7,03	0,01	56,79	128%	98	458	24,32		
28.1	ePM1 85%+HLR+UVGI	26,15	7,03	0,01	57,51	131%	148	458	24,32		
29.1	E10+HLR+UVGI	34,51	7,03	0,01	65,88	165%	133	321	24,32	55	450
30.1	E11+HLR+UVGI	35,00	7,03	0,01	66,36	167%	148	328	24,32	55	450
31.1	E12+HLR+UVGI	35,85	7,03	0,01	67,21	170%	173	341	24,32	55	450
32.1	H13+HLR+UVGI	38,78	7,03	0,01	70,14	182%	258	383	24,32	55	450
33.1	H14+HLR+UVGI	39,85	7,03	0,01	71,22	186%	288	398	24,32	55	450
1.2	Baasmudel VÕ	10,66	4,54	1,79	16,99	13%	0	0	0,00		
2.2	Baasmudel retsirk.	10,56	4,53	0,01	15,09	0%	0	0	0,00		
3.2	Baasmudel DCV	7,17	3,45	0,09	10,71	-29%	0	0	0,00		
16.2	ePM1 55%+Ads.+UVGI	17,29	4,58	0,01	24,99	66%	180	568	3,11		
17.2	ePM1 60%+Ads.+UVGI	17,36	4,58	0,01	25,06	66%	187	568	3,11		
18.2	ePM1 80%+Ads.+UVGI	17,57	4,58	0,01	25,27	67%	208	568	3,11		

Jrk. nr.	Stsenaarium	Ventilaatorite energia, kWh/(a*m ²)	Jahutuskalorifeeri energia, kWh/(a*m ²)	Küttekalorifeeri energia, kWh/(a*m ²)	Energia kokku, kWh/(a*m ²)	Energiaarve suurenemine võrreldes Baasmudel reitsirk.	Algne rõhukadu, Pa	Lõpp rõhukadu, Pa	Õhupuhassti el. energia, kWh/(a*m ²)	Algne eelfiltri ePM10 70%	Lõpp eelfiltri ePM10 70% rõhukadu, Pa
19.2	ePM1 85%+Ads.+UVGI	18,09	4,58	0,01	25,79	71%	258	568	3,11		
20.2	E10+Ads.+UVGI	24,10	4,58	0,01	31,80	111%	243	618	3,11	55	450
21.2	E11+Ads.+UVGI	24,45	4,58	0,01	32,14	113%	258	618	3,11	55	450
22.2	E12+Ads.+UVGI	25,06	4,58	0,01	32,75	117%	283	618	3,11	55	450
23.2	H13+Ads.+UVGI	27,15	4,58	0,01	34,85	131%	368	618	3,11	55	450
24.2	H14+Ads.+UVGI	27,92	4,58	0,01	35,62	136%	398	618	3,11	55	450
25.2	ePM1 55%+HLR+UVGI	14,75	4,58	0,01	43,66	189%	70	458	24,32		
26.2	ePM1 60%+HLR+UVGI	14,81	4,58	0,01	43,72	190%	77	458	24,32		
27.2	ePM1 80%+HLR+UVGI	14,98	4,58	0,01	43,89	191%	98	458	24,32		
28.2	ePM1 85%+HLR+UVGI	15,40	4,58	0,01	44,31	194%	148	458	24,32		
29.2	E10+HLR+UVGI	20,28	4,58	0,01	49,19	226%	133	321	24,32	55	450
30.2	E11+HLR+UVGI	20,56	4,58	0,01	49,47	228%	148	328	24,32	55	450
31.2	E12+HLR+UVGI	21,06	4,58	0,01	49,97	231%	173	341	24,32	55	450
32.2	H13+HLR+UVGI	22,76	4,58	0,01	51,67	242%	258	383	24,32	55	450
33.2	H14+HLR+UVGI	23,38	4,58	0,01	52,29	247%	288	398	24,32	55	450



Joonis 4.4 Kaubandushoone profiiliga, erinevate õhupuhasstite kombinatsioonidega ventilatsioonisüsteemide energiatarve



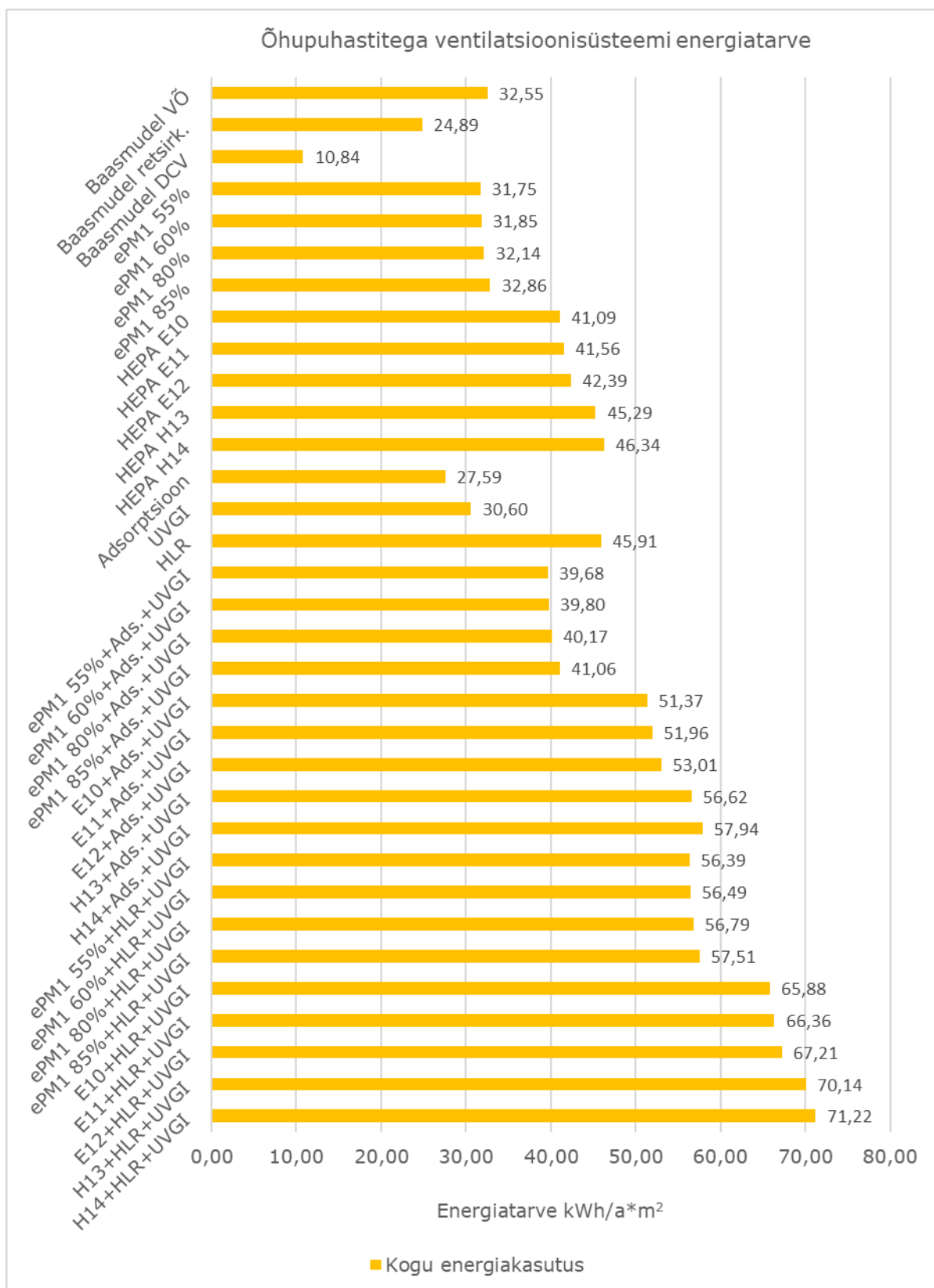
Joonis 4.5 Kontorihoone profiiliga, erinevate õhupuhasüsteemide kombinatsioonidega ventilatsioonisüsteemide energiatarve

Esimesel üheksal kombinatsioonil on suurem ventilaatorite energiatarve, sest nendes stsenaariumites on adsorptsioon söefilter, mille takistus on 110 Pa. Viimasel üheksal kombinatsioonil on adsorptsioon söefiltri asemel enVerid HLR seade, millel puudub

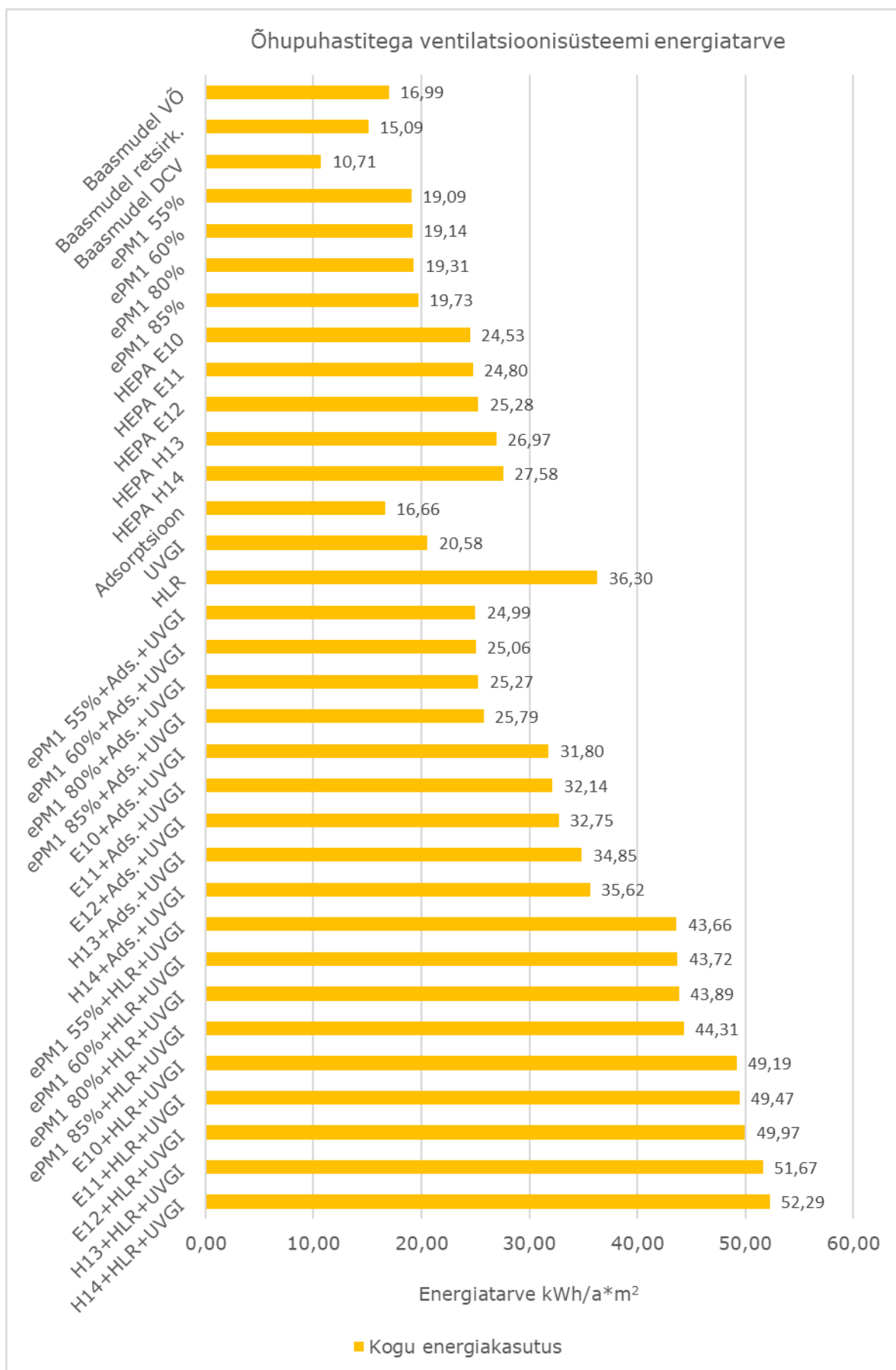
aerodünaamiline takistus olemasolevale ventilatsioonisüsteemile, sest sellel on sisseehitatud ventilaator. See-eest kasutab HLR süsteem käitamiseks küllaltki palju elektrienergiat, mis avaldab kogu energiakasutuses suuremat energeetilist mõju kui söefiltri takistus.

4.6 Õhupuhastite energiatarbe võrdlus

Järgnevatel joonistel (Joonis 4.6 ja Joonis 4.7) on välja toodud kõikide lõputöös käsitletud ventilatsiooni simulatsioonide kogu energiatarve. Üldpilt on mõlema profiili korral samasugune, et suurema takistusega puhastusseadmel on üldiselt suurem energiakasutus. Seetõttu on ühe komponendilistel skeemidel väiksem energiatarve kui kombinatsioonidel. Kõige rohkem energiat kasutab mõlema profiili korral kombinatsioon, kus kasutakse mehaanilist filtrit HEPA H14, EnVeridi HLR adsorptsioon seadet ja UVGI õhupuhastit. Seda põhjustab HEPA H14 filtri kõrge aerodünaamiline takistus ning suur HLR seadme elektritarve.



Joonis 4.6 Kaubandushoone profiiliga õhupuhastitega ventilatsiooniseadmete energiatarve võrdlus



Joonis 4.7 Kontorihoone profiiliga õhupuhastitega ventilatsiooniseadmete energiatarbe võrdlus

4.7 Õhupuhastuse kuluefektiivsus

Lõputöös kasutatakse õhupuhastite efektiivsuse mõju hindamiseks kaudset meetodit, sest simulatsiooniprogramm IDA ICE ei võimalda logida siseõhu kvaliteeti (ainuke saasteaine, mida logib on CO₂). Õhupuhastite hindamiseks kasutatakse käesolevas lõputöös õhupuhasti kuluefektiivsust OCE, mis leitakse valemi 2.3 järgi. Seejuures on arvestatud, et mitme õhupuhasti summaarse puhta õhu edastamismäära CADR leidmiseks summeeritakse puhastite efektiivsused ning seejärel arvutatakse CADR valemi 2.2 järgi. Arvutustes kasutatud õhuhulk on kasutusprofiili aasta keskmine sissepuhkeõhu hulk. Suurenenud ventilaatori võimsus leiti baasmudeli ventilaatori ja vaadeldava stsenaariumi ventilaatori energiatarbe vahe ning aasta tundide abil. Sarnaselt leiti ka õhupuhasti võimsus. Tablites (Tabel 4.7 ja Tabel 4.8) on välja toodud OCE nii kaubandushoone kui ka kontorihoone profiilil erinevate õhupuhastite ja nende kombinatsioonide korral. Tabelites on stsenaariumid järjestatud kuluefektiivsuse kasvu järgi.

Tabel 4.7 Kaubandushoone profiiliga testruumi OCE erinevate õhupuhastite ja nende kombinatsioonide korral

Stsenaarium	Puhasti efektiivsus1	Puhasti efektiivsus2	Puhasti efektiivsus3	Puhasti efektiivsus4	Õhuhulk l/(s*m ²)	SP ventilaatori energia kWh/m ²	Õhupuhasti energia kWh/m ²	Suurenenud ventilaatori võimsus, W/m ²	Puhasti võimsus W/m ²	Suurenenud võimsus kokku W/m ²	CADR kokku (l/s)/m ²	OCE (l/s)/W
Baasmudel retsirk.	0	0	0	0	1,38	11,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Baasmudel DCV	0	0	0	0	0,57	4,51	0,00	- 0,81	0,00	- 0,81	0,00	0,00
Baasmudel VÕ	0	0	0	0	1,38	11,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
HLR	0	0,76	0	0	1,38	11,62	21,21	0,00	2,42	2,42	1,05	0,43
HEPA H14	0,99995	0	0	0,2	1,38	33,07	0,00	2,45	0,00	2,45	1,66	0,68
HEPA H13	0,9995	0	0	0,2	1,38	32,02	0,00	2,33	0,00	2,33	1,66	0,71
H14+HLR+UVGI	0,99995	0,76	0,99	0,2	1,38	33,61	24,32	2,51	2,78	5,29	4,08	0,77
HEPA E10	0,85	0	0	0,2	1,38	27,82	0,00	1,85	0,00	1,85	1,45	0,79
H13+HLR+UVGI	0,9995	0,76	0,99	0,2	1,38	32,53	24,32	2,39	2,78	5,16	4,07	0,79
E10+HLR+UVGI	0,85	0,76	0,99	0,2	1,38	28,27	24,32	1,90	2,78	4,68	3,87	0,83
HEPA E12	0,995	0	0	0,2	1,38	29,12	0,00	2,00	0,00	2,00	1,65	0,83
HEPA E11	0,95	0	0	0,2	1,38	28,30	0,00	1,90	0,00	1,90	1,59	0,84
E12+HLR+UVGI	0,995	0,76	0,99	0,2	1,38	29,60	24,32	2,05	2,78	4,83	4,07	0,84
E11+HLR+UVGI	0,95	0,76	0,99	0,2	1,38	28,75	24,32	1,96	2,78	4,73	4,01	0,85

Stsenaarium	Puhasti efektiivsus1	Puhasti efektiivsus2	Puhasti efektiivsus3	Puhasti efektiivsus4	Õhuhulk I/(s*m ²)	SP ventilaatori energia kWh/m ²	Õhupuhasti energia kWh/m ²	Suurenenud ventilaatori võimsus, W/m ²	Puhasti võimsus W/m ²	Suurenenud võimsus kokku W/m ²	CADR kokku (l/s)/m ²	OCE (l/s)/W
ePM1 55%+HLR+UVGI	0,55	0,76	0,99	0	1,38	18,78	24,32	0,82	2,78	3,59	3,18	0,88
ePM1 60%+HLR+UVGI	0,6	0,76	0,99	0	1,38	18,88	24,32	0,83	2,78	3,60	3,25	0,90
ePM1 85%+HLR+UVGI	0,85	0,76	0,99	0	1,38	19,90	24,32	0,95	2,78	3,72	3,59	0,97
ePM1 80%+HLR+UVGI	0,8	0,76	0,99	0	1,38	19,18	24,32	0,86	2,78	3,64	3,52	0,97
ePM1 55%	0,55	0	0	0	1,38	18,49	0,00	0,78	0,00	0,78	0,76	0,97
ePM1 60%	0,6	0	0	0	1,38	18,58	0,00	0,79	0,00	0,79	0,83	1,04
H14+Ads.+UVGI	0,99995	0,7	0,99	0,2	1,38	41,41	3,11	3,40	0,36	3,75	4,00	1,06
H13+Ads.+UVGI	0,9995	0,7	0,99	0,2	1,38	40,08	3,11	3,25	0,36	3,60	4,00	1,11
E12+Ads.+UVGI	0,995	0,7	0,99	0,2	1,38	36,47	3,11	2,84	0,36	3,19	3,99	1,25
E10+Ads.+UVGI	0,85	0,7	0,99	0,2	1,38	34,83	3,11	2,65	0,36	3,00	3,79	1,26
E11+Ads.+UVGI	0,95	0,7	0,99	0,2	1,38	35,42	3,11	2,72	0,36	3,07	3,93	1,28
ePM1 85%	0,85	0	0	0	1,38	19,59	0,00	0,91	0,00	0,91	1,18	1,29
ePM1 80%	0,8	0	0	0	1,38	18,88	0,00	0,83	0,00	0,83	1,11	1,34
ePM1 55%+Ads.+UVGI	0,55	0,7	0,99	0	1,38	23,14	3,11	1,31	0,36	1,67	3,10	1,86
ePM1 60%+Ads.+UVGI	0,6	0,7	0,99	0	1,38	23,26	3,11	1,33	0,36	1,68	3,17	1,88
ePM1 85%+Ads.+UVGI	0,85	0,7	0,99	0	1,38	24,52	3,11	1,47	0,36	1,83	3,51	1,92
ePM1 80%+Ads.+UVGI	0,8	0,7	0,99	0	1,38	23,28	3,11	1,33	0,36	1,69	3,44	2,04
UVGI	0	0	0,99	0	1,38	11,81	3,11	0,02	0,60	0,62	1,37	2,20
Adsorptsioon	0	0,7	0	0	1,38	14,32	0,00	0,31	0,00	0,31	0,97	3,14

Tabel 4.8 Kontorihoonet profiiliga testruumi OCE erinevate õhupuhastite ja nende kombinatsioonide korral

Stsenaarium	Puhasti efektiivsus1	Puhasti efektiivsus2	Puhasti efektiivsus3	Puhasti efektiivsus4	Õhuhulk I/(s*m ²)	SP ventilaatori energia kWh/m ²	Õhupuhasti energia kWh/m ²	Ventilaatori suurenenud võimsus, W/m ²	Puhasti võimsus W/m ²	Suurenenud võimsus kokku W/m ²	CADR kokku (l/s)/m ²	OCE (l/s)/W
Baasmudel retsirk.	0	0	0	0	0,85	6,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Baasmudel DCV	0	0	0	0	0,55	4,54	0,00	0,25	0,00	0,25	0,00	0,00

Stsenaarium	Puhasti efektiivsus1	Puhasti efektiivsus2	Puhasti efektiivsus3	Puhasti efektiivsus4	Õhuhulk /(s*m ²)	SP ventilaatori energia kWh/m ²	Õhupuhasti energia kWh/m ²	Ventilaatori suurenenud võimsus, W/m ²	Puhasti võimsus W/m ²	Suurenenud võimsus kokku W/m ²	CADR kokku (l/s)/m ²	OCE (l/s)/W
Baasmudel VÕ	0	0	0	0	0,85	6,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
HLR	0	0,76	0	0	0,85	6,75	21,21	0,00	2,42	2,42	0,64	0,26
H14+HLR+UVGI	0,99995	0,76	0,99	0,2	0,85	19,56	24,32	1,46	2,78	4,24	2,49	0,59
ePM1 55%+HLR+UVGI	0,55	0,76	0,99	0	0,85	10,92	24,32	0,48	2,78	3,25	1,94	0,60
H13+HLR+UVGI	0,9995	0,76	0,99	0,2	0,85	18,93	24,32	1,39	2,78	4,17	2,49	0,60
ePM1 60%+HLR+UVGI	0,6	0,76	0,99	0	0,85	10,98	24,32	0,48	2,78	3,26	1,98	0,61
E10+HLR+UVGI	0,85	0,76	0,99	0,2	0,85	16,45	24,32	1,11	2,78	3,88	2,36	0,61
E11+HLR+UVGI	0,95	0,76	0,99	0,2	0,85	16,73	24,32	1,14	2,78	3,92	2,45	0,62
E12+HLR+UVGI	0,995	0,76	0,99	0,2	0,85	17,23	24,32	1,20	2,78	3,97	2,49	0,63
ePM1 80%+HLR+UVGI	0,8	0,76	0,99	0	0,85	11,16	24,32	0,50	2,78	3,28	2,15	0,66
ePM1 85%+HLR+UVGI	0,85	0,76	0,99	0	0,85	11,57	24,32	0,55	2,78	3,33	2,19	0,66
HEPA H14	0,99995	0	0	0,2	0,85	19,25	0,00	1,43	0,00	1,43	1,01	0,71
HEPA H13	0,9995	0	0	0,2	0,85	18,63	0,00	1,36	0,00	1,36	1,01	0,75
HEPA E10	0,85	0	0	0,2	0,85	16,19	0,00	1,08	0,00	1,08	0,89	0,82
HEPA E12	0,995	0	0	0,2	0,85	16,95	0,00	1,16	0,00	1,16	1,01	0,87
HEPA E11	0,95	0	0	0,2	0,85	16,47	0,00	1,11	0,00	1,11	0,97	0,88
ePM1 55%	0,55	0	0	0	0,85	10,75	0,00	0,46	0,00	0,46	0,46	1,02
H14+Ads.+UVGI	0,99995	0,7	0,99	0,2	0,85	24,09	3,11	1,98	0,36	2,33	2,44	1,05
H13+Ads.+UVGI	0,9995	0,7	0,99	0,2	0,85	23,32	3,11	1,89	0,36	2,25	2,44	1,09
ePM1 60%	0,6	0	0	0	0,85	10,81	0,00	0,46	0,00	0,46	0,51	1,10
E12+Ads.+UVGI	0,995	0,7	0,99	0,2	0,85	21,23	3,11	1,65	0,36	2,01	2,44	1,21
E10+Ads.+UVGI	0,85	0,7	0,99	0,2	0,85	20,27	3,11	1,54	0,36	1,90	2,32	1,22
E11+Ads.+UVGI	0,95	0,7	0,99	0,2	0,85	20,62	3,11	1,58	0,36	1,94	2,40	1,24
ePM1 85%	0,85	0	0	0	0,85	11,39	0,00	0,53	0,00	0,53	0,72	1,36
UVGI	0	0	0,99	0	0,85	6,86	3,11	0,01	0,60	0,61	0,84	1,37
ePM1 80%	0,8	0	0	0	0,85	10,98	0,00	0,48	0,00	0,48	0,68	1,40
ePM1 55%+Ads.+UVGI	0,55	0,7	0,99	0	0,85	13,46	3,11	0,77	0,36	1,12	1,89	1,69
ePM1 60%+Ads.+UVGI	0,6	0,7	0,99	0	0,85	13,53	3,11	0,77	0,36	1,13	1,94	1,71
ePM1 85%+Ads.+UVGI	0,85	0,7	0,99	0	0,85	14,26	3,11	0,86	0,36	1,21	2,15	1,77
ePM1 80%+Ads.+UVGI	0,8	0,7	0,99	0	0,85	13,74	3,11	0,80	0,36	1,15	2,10	1,82
Adsorptsioon	0	0,7	0	0	0,85	8,32	0,00	0,18	0,00	0,18	0,59	3,30

Tabelitest selgub, et kuluefektiivseim on mõlema profiili korral adsorptsioon söefilter (kaubandushoone profiili korral $OCE = 3,14$ (l/s)/W ja kontorihoone profiili korral $OCE = 3,30$ (l/s)/W). Seejuures tuleb arvestada, et adsorptsioon filter eemaldab õhust ainult gaasilisi saasteaineid. Seetõttu on kombinatsioon, kus kasutatakse ePM1 80% mehaanilist filtrit, söefiltrit ning UVGI õhupuhastit, kuluefektiivseim õhupuhastuse lahendus, sest suudab õhust eraldada nii gaasilisi kui ka tahkeid saasteaineid ning lisaks ka hävitada viiruseid ja baktereid. Nii kaubandushoone kui ka kontorihoone profiilide korral on tulemuste järjestuse algus ja lõpp samad, algab enVeridi HLR süsteemiga ning lõppeb adsorptsioon söefiltriga. Keskmiste OCE väärtuste juures esineb erinevate profiilide korral OCE väärtustes mõningaid erinevusi. Tulemustest selgub, et enVeridi HLR süsteem pole väga efektiivne ning on kulukas, kuid arvestada tuleb ka asjaolu, et tegemist oli testruumiga, millel puudusid soojuskaod ümbritsevasse keskkonda.

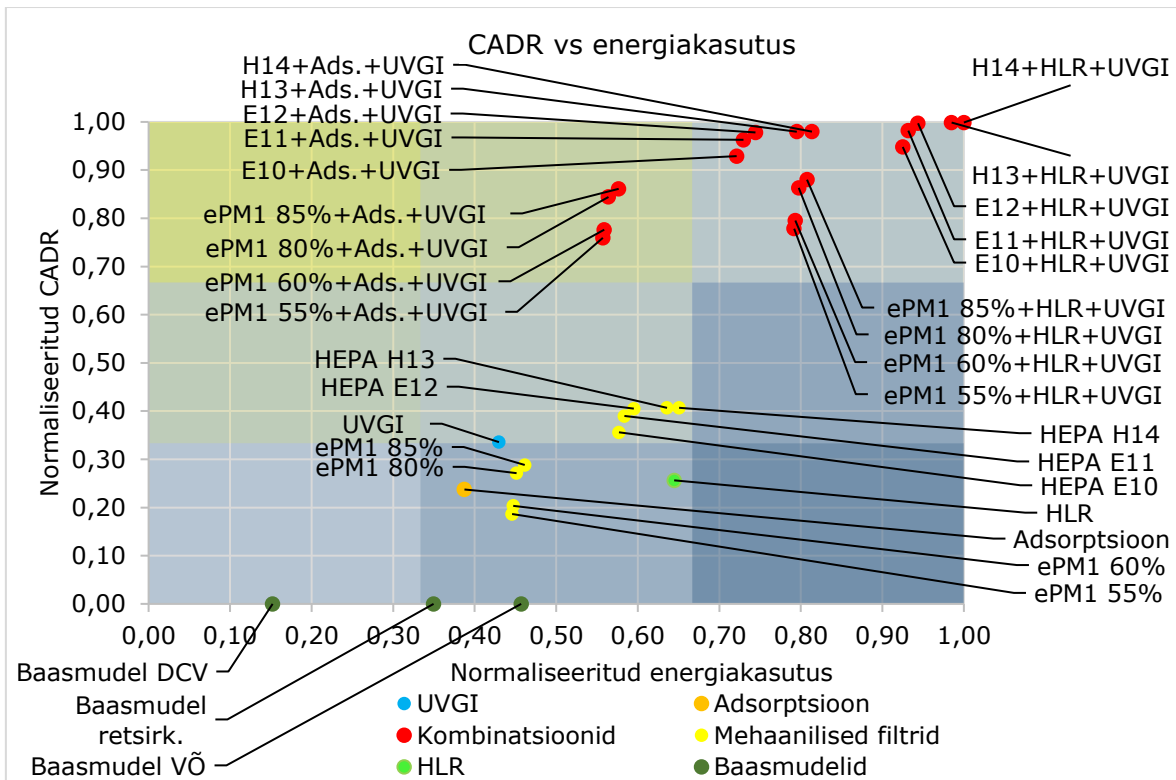
Kaubandushoone profiilil on erinevate filtri kombinatsioonide korral keskmine CADR ($CADR = 2,73$ (l/s)/m²) suurem kui kontorihoone profiilil ($CADR = 1,67$ l/s/m²). Samuti on suurem ka OCE, vastavalt 1,19 (l/s)/W ja 1,07 (l/s)/W. See tuleneb kasutusprofiilist, kaubandushoone kasutatakse igapäevaselt kella 7:00-st kuni 21:00-ni ning kontorihoone ainult tööpäeval 7:00-st kuni 18:00-ni. Seejuures töötab ventilatsioon täisvõimsusel lisaks veel tund aega enne ja pärast kasutusaega, muul ajal töötab tootlikkusega 7,5% maksimaalsest. Seepärast on kaubandushoone profiiliga keskmine sissepuhkeõhu kogus suurem kui kontorihoone profiili korral. Kui puhastit läbi suurem õhukogus, siis on ka suurem CADR väärtus. Seejuures suureneb ka ventilaatorite ja kalorifeeride energiatarve, kuid mitte nii palju, et seetõttu oleks OCE väiksem.

Energiakasutuse ja õhupuhastuseefektiivsuse kaudseks hindamiseks on joonistel välja toodud kaubandushoone (Joonis 4.8) ja kontorihoone (Joonis 4.9) profiiliga erinevate puhastussüsteemide puhta õhu edastamismäärad (CADR) ja süsteemi kogu energiatarbe suhtelised väärtused süsteemide simuleerimisel saadud maksimaalsesse väärtusesse. Saadud tulemus on sarnane OCE-le, kuid erineb selle poolest, et arvestatud on kogu süsteemi poolt tarbitud energiaga, mitte ainult puhasti põhjustatud energia kasvuga.

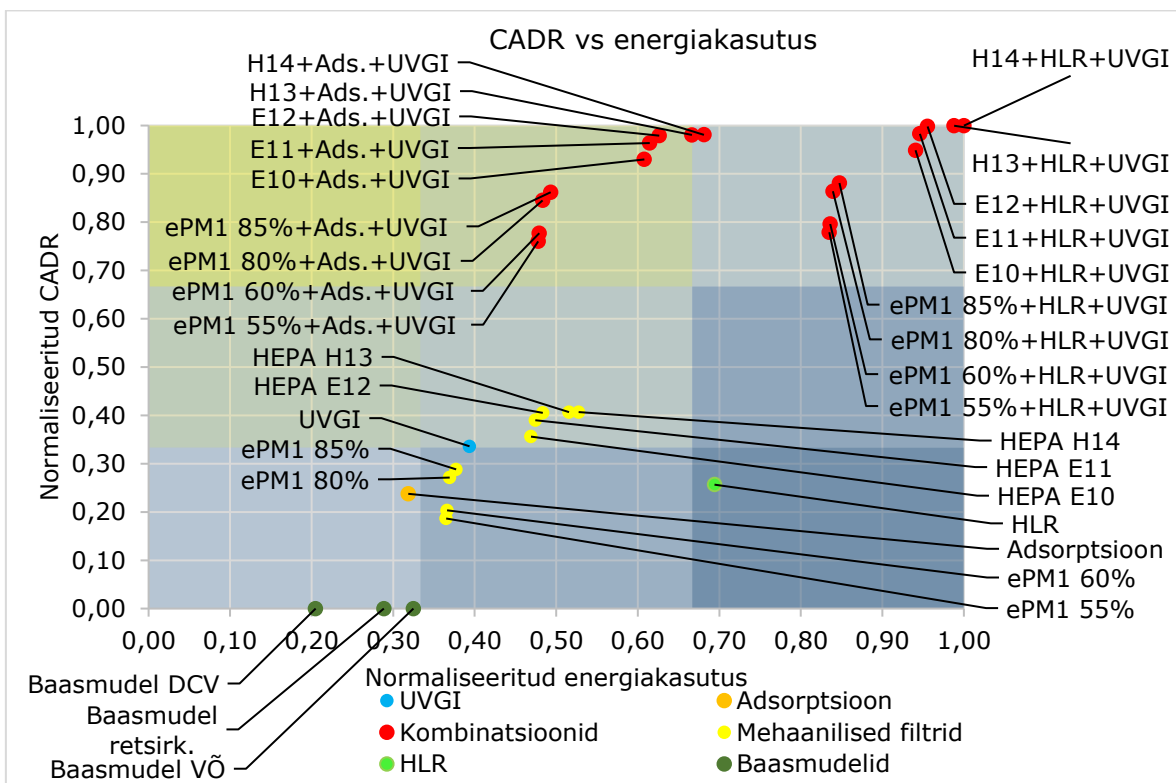
Graafikutel (Joonis 4.8 ja Joonis 4.9) on selgelt eristatavad 3 gruppi: (1) baasmudelid; (2) ühe komponendilised puhastid; (3) puhastite kombinatsioonid. Ühe komponendilistest puhastitest moodustub veel eraldi kaks gruppi: (2.1) mehaaniliste HEPA filtritega (millele on lisatud ka eelfilter) ja HLR süsteemiga grupp ning (2.2) mehaaniliste mitte HEPA filtritega ja UVGI süsteemiga grupp. Seetõttu jagunevad ka kombinatsioonid nelja väiksemasse gruppi vastavalt kombinatsioonides olevatele

üksikutele õhupuhastitele. Esimesse (3.1) kõige energiasäästlikumasse gruppi kuuluvad kombinatsioonid, milles on mehaanilised mitte HEPA filtrid, adsorptsioon söefilter ja UVGI õhupuhasti. Teise (3.2) gruppi kuuluvad kombinatsioonid, kuhu kuuluvad mehaanilised HEPA filtrid, adsorptsioon söefilter ja UVGI õhupuhasti. Kolmandasse (3.3) gruppi kuuluvad kombinatsioonid, kus on mehaanilised mitte HEPA filtrid, HLR ja UVGI õhupuhastid. Neljandasse (3.4) kõige rohkem energiat tarbivasse gruppi kuuluvad kombinatsioonid, kus on mehaanilised HEPA filtrid, HLR ja UVGI õhupuhastid. Kombinatsioonide grupid (3.1) ja (3.2) asetsevad graafikutel trendijoonest ülevalpool, grupid (2.2) ja (3.3) asetsevad trendijoonel ning grupid (2.1) ja (3.4) asetsevad trendijoonest allpool.

Simulatsioonipunktid, mis on lähemal punktile, kus suhteline energiakasutus on 0 ja suhteline CADR on 1, on eelistatud puhastuslahendused, sest need on energiasäästlikumad ja efektiivsemad. Vähem eelistatud lahendused on all paremas servas asuvad simulatsioonipunktid, sest on kulukamad ja vähem efektiivsed. Joonistel on heledama (kollasema) taustaga alad eelistatud ja tumedama taustaga alad vähem eelistatud asukohad simulatsioonipunktide asetsemiseks joonisel. Kui OCE määramisel oli tulemustest kõige suurema väärtusega adsorptsioon söefilter, siis alltoodud õhupuhastuse ja energiakasutuse sõltuvusest efektiivseim ja säästlikum on kombinatsioon mehaanilise filtri ePM1 80%, adsorptsioon söefiltri ja UVGI õhupuhastiga, sest asub graafikutel kõige lähemal punktile, kus suhteline puhta õhu edastamismäär on 1 ja suhteline energiakasutus 0.



Joonis 4.8 Kaubandushoone profiiliga CADR ja energiakasutus



Joonis 4.9 Kontorihoone profiiliga CADR ja energiakasutus

KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös uuriti ventilatsiooni tagastusõhu puhastamise mõju energiakasutusele. Uuring viidi läbi simulatsiooni tarkvara IDA ICE 4.8 põhjal. Tulemused pole ühegi hoonega valideeritud, sest puuduvad sobivad mõõtmisandmed tagastusõhu puhastamisega süsteemi kohta.

Tagastusõhu puhastamise mõju hindamiseks loodi programmi IDA ICE simulatsiooni testruum mõõtmetega 13 x 13 x 3 m, millel puudub väliskeskkonnaga soojusvahetus, et vaadelda konkreetset ventilatsiooniseadme energiakasutust erinevate õhupuhastuse lahenduste kasutamise korral. Simulatsioone teostati kahe erineva kasutusprofiiliga: kaubandushoone ja kontorihoone profiiliga. Kasutusprofiilid on koostatud majandus- ja taristuministri määruse nr 58, "Hoonete energiatõhususe arvutamise meetodika" alusel.

Kokku teostati 66 erinevat simulatsiooni, kus katsetati 9 erineva efektiivsusega mehaanilist filtrit, adsorptsioon söefiltrit, enVerid HLR süsteemi (seade, mis aitab õhupuhastamisega vähendada ventilatsiooniseadme energiakasutust) ning bakteritsiidset UV-kiirgusel põhinevat õhupuhastit ning nende kombinatsioone. Tulemuste põhjal võrreldi erinevate stsenaariumite energiakasutust ning lisaks määrati CADR (puhta õhu edastamismäär) ja OCE (õhupuhasti kuluefektiivsus). Retsirkulatsiooni õhku kasutanud baasmudeliga võrreldes suurenes filtrite kasutamisel süsteemi elektrienergia tarbimine ning seejuures soojus- ja jahutusenergia kasutus ei muutunud. Mehaanilistel filtritel sõltuvalt kasutusprofiilist ja filtriklassist suurenes energiakasutus 26-86%. UVGI-I (bakteritsiidne ultraviolettkiirgus) suurenes energiakasutus võrreldes baasmudeliga kaubandushoone profiiliga 23% ja kontorihoone profiiliga 36%. EnVerid HLR süsteemiga suurenes energiakasutus kaubandushoone profiiliga 84% ja kontorihoone profiiliga 141%.

Õhupuhastite kombinatsioonide korral suurenes energiatarve sõltuvalt kombinatsioonist ja profiilist 59% kuni 247%. Arvestades energiakasutust ja õhupuhastuse efektiivsust osutus lõputöös käsitletud õhupuhastite hulgast kuluefektiivseimaks puhastite kombinatsioon, kuhu kuulusid mehaaniline filter klassiga ePM1 80%, adsorptsioon söefilter ja UVGI õhupuhasti. Sellise kombinatsiooni töötamise kuluefektiivsus kaubandushoone profiiliga on $OCE = 2,04$ (l/s)/W ja kontorihoone profiiliga on $OCE = 1,82$ (l/s)/W. Suhteline energiakasutus maksimaalsest simulatsioonides saadud tulemustest on kaubandushoone profiiliga 0,56 ja kontorihoone profiiliga 0,55. Suhteline puhta õhu edastamismäär maksimaalsest on kaubandushoone profiili korral 0,84 ja kontorihoone profiiliga 0,85.

Käesolevast magistritööst järeldub, et ventilatsiooni tagastusõhu puhastamisega suureneb ventilatsiooniseadme energiakasutus ventilaatorite töö ja õhupuhasti energiakasutuse tõttu. Kindlasti tuleb arvestada, et simuleeriti ruumi, millel puudus ühendus väliskeskkonnaga, mis pole omane ühelegi hoonele. Seetõttu võivad reaalsed lisatud puhastitega ventilatsiooniseadmete energiakasutused oluliselt erineda käesolevas töös esitatust. Põhiliseks muutuse põhjuseks võiks olla ruumi soojuskao, mida ei käsitletud uurimaks konkreetselt õhupuhasti energiakasutust.

Magistritöö autor leiab, et töö täiustamiseks järgnevates uuringutes võiks kasutada olemasoleva hoone andmeid, mis kasutab tagastusõhu puhastamist. Sellise hoone puudumisel on mõne konkreetse hoone tüübi jaoks analüüsi tegemisel abiks hoone tegelikud vabasoojused, kasutusprofiilid ja välispiirete soojusläbivused. Samuti võiks tulevastes uuringutes käsitleda õhupuhastamise abil välisõhu vahetuse kompenseerimist, mis tõenäoliselt suudab demonstreerida energiakasutuse vähenemist.

SUMMARY

In this master's thesis, the impact of recirculation air cleaning on ventilation energy usage was studied. The study was performed based on simulation software IDA ICE 4.8. The results have not been validated with any buildings due to the lack of suitable measurement data for recirculation air purification systems.

To assess the impact of the recirculation air cleaning, a 13 x 13 x 3 m simulation test room with no heat dissipation to the outdoors was created in simulation program IDA ICE to specifically evaluate energy usage of the ventilation system when using different air purification solutions. The simulations were performed with two different usage profiles: a commercial and an office building profiles. The used profiles have been compiled on the basis of Regulation No. 58. of the Minister of Economic Affairs and Communications, "Methodology for calculating the energy performance of buildings.

A total of 66 different simulations were performed, testing 9 mechanical filters with different efficiencies, an adsorption filter, an enVerid HLR system (HVAC (heating, ventilation and air conditioning) load reduction system), an UVGI (Ultraviolet germicidal irradiation) and their combinations. Based on the results, the energy consumption of different scenarios was compared and in addition CADR (Clean air delivery rate) and OCE (Operating cost effectiveness) were determined. Compared to the base model using recirculated air, the use of filters increased the electricity consumption of the system. Energy usage of mechanical filters increased by 26-86% depending on the usage profile and filter class. UVGI's energy usage increased by 23% compared to the base model with a commercial building profile and 36% with an office building profile. With the enVerid HLR system, energy consumption increased by 84% with a commercial building profile and 141% with an office building profile.

For air cleaner combinations, energy usage increased from 59% to 247% depending on the combination and usage profile. Considering the energy consumption and the efficiency of air purification, the most cost-effective of the air purifiers discussed in the thesis was a combination of a mechanical filter of class ePM1 80%, adsorption activated carbon filter and UVGI air purifier. The operating cost effectiveness of such a combination with a commercial building profile is $OCE = 2.04$ (l/s)/W and with an office building profile $OCE = 1.82$ (l/s)/W. The relative energy consumption from the maximum of simulation results is 0,56 for a commercial building profile and 0,55 for an office building profile. The relative clean air delivery rate from the maximum is 0,84 for a commercial building profile and 0,85 for an office building profile.

In conclusion, this master's thesis states that by cleaning the recirculation air, the energy consumption of the ventilation unit increases due to the operation of fans and the energy usage of the air cleaner. It must be taken into account that a test room with no connection to the external environment, which is not typical for any building, was simulated. Therefore, the actual energy usage of the ventilation unit with added air cleaners may significantly differ from results presented in this thesis. The main reason for the difference could be the heat loss in the room, which was not specifically addressed in the evaluation of energy use of the air cleaner.

The author of this master's thesis believes that further research should be conducted to take into account data from an existing building that uses recirculation air purification. In the absence of such a building for some specific building types the actual free heat of the building, the usage profiles and the thermal conductivity of the external boundaries will help to obtain more accurate results. For further studies one should consider to evaluate compensating outdoor air exchange rate with air purification, which will be able to demonstrate a reduction in energy usage.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Euroopa Parlament ja Euroopa Liidu Nõukogu, "Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv 2010/31/EL, 19. mai 2010, hoonete energiatõhususe kohta," *Euroopa Liidu Teat.*, pp. 13–35, 2010, [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?uri=celex:32010L0031> Kasutatud: 09.04.2021.
- [2] "Annex 78," 2021. [Online]. Available: <https://annex78.iea-ebc.org/> Kasutatud 09.04.2021.
- [3] "EVS-EN 12792:2004 Hoonete ventilatsioon. Tähised, terminoloogia ja tingmärgid," *Eesti Standardikeskus*, 2004.
- [4] J. Joo, Q. Zheng, G. Lee, J. T. Kim, and S. Kim, "Optimum energy use to satisfy indoor air quality needs," *Energy Build.*, vol. 46, pp. 62–67, 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.10.045.
- [5] J. Dieckmann, K. Mckenney, and J. Brodrick, "Air purification to reduce oa," *ASHRAE J.*, vol. 51, no. 4, pp. 68–70, 2009.
- [6] "TTJA koostas juhendi avalike hoonete tehnosüsteemide töö seadistamisest viiruse leviku tõkestamiseks." 2020, [Online]. Available: <https://www.ttja.ee/et/uudised/ttja-koostas-juhendi-avalike-hoonete-tehnosusteemide-too-seadistamisest-viiruse-leviku-0> Kasutatud 30.03.2021.
- [7] N. H. Agopian et al., "Ventilation for acceptable indoor air quality," *ASHRAE Stand.*, vol. 2019, no. 62.1-2019, pp. 1–92, 2019.
- [8] T.-A. Kõiv, "Õhu konditsioneerimine I, Õhutöötlemisprotsessid." Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, Tallinn, 2006.
- [9] W. J. Fisk, H. Destailats, and M. a Sidheswaran, "Saving Energy and Improving IAQ through," no. May, pp. 27–29, 2011.
- [10] U. Palmiste and H. Voll, "Gas-phase optical fiber photocatalytic reactors for indoor air application: A preliminary study on performance indicators," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 251, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/251/1/012055.
- [11] M. Deru, J. Degraw, M. Deru, and J. Degraw, "Energy Performance Validation of a Gaseous Air Cleaning Technology for Commercial Buildings Energy Performance Validation of a Gaseous Air Cleaning Technology for Commercial Buildings," no. February, 2020.
- [12] ASHRAE, "Guidance for Building Operations During the COVID-19 Pandemic," *ASHRAE J.*, no. May, pp. 72–74, 2020, [Online]. Available: https://www.ashrae.org/file_library/technical_resources/ashrae_journal/2020journaldocuments/72-74_ieq_schoen.pdf Kasutatud: 18.02.2021.

- [13] REHVA, "REHVA COVID-19 guidance document," November 17, 2020. [Online]. Available: https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_V4_23112020.pdf Kasutatud 18.02.2021
- [14] EKVVY, "KUIDAS KÄITADA HOONETE TEHNOSÜSTEEME KORROONAVIIRUSHAIGUSE COVID-19 (SARS-COV-2) LEVIKU TÕKESTAMISEKS." [Online]. Available: <https://www.ekvy.ee/et/component/content/article/26-eesti/uudised-et/86-kuidas-kaeitada-hoonete-tehnosuesteeme-koroonaviirushaiguse-covid-19-sars-cov-2-leviku-tokestamiseks?Itemid=300> Kasutatud 18.02.2021.
- [15] G. Liu *et al.*, "A review of air filtration technologies for sustainable and healthy building ventilation," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 32, no. December 2016, pp. 375–396, 2017, doi: 10.1016/j.scs.2017.04.011.
- [16] W. J. Fisk, "Can sorbent-based gas phase air cleaning for VOCs substitute for ventilation in commercial buildings?," *IAQ Conf.*, 2008.
- [17] J. Gustavsson, a Ginestet, P. Tronville, and M. Hyttinen, *Air filtration in HVAC systems*, no. 11. 2010.
- [18] P. Julio and V. Aguilar, "Preliminary Study of Activated Carbon Filters for Pollutants Removal in Diesel Engines .," no. August, 2016, doi: 10.18488/journal.13/2016.5.2/13.2.31.45.
- [19] R. Khajavi, M. M. S. Bahadoran, A. Bahador, and A. Khosravi, "Removal of microbes and air pollutants passing through nonwoven polypropylene filters by activated carbon and nanosilver colloidal layers," *J. Ind. Text.*, vol. 42, no. 3, pp. 219–230, 2013, doi: 10.1177/1528083711434653.
- [20] B. Lee, W. Bahnfleth, and K. Auer, "LIFE-CYCLE COST SIMULATION OF IN-DUCT ULTRAVIOLET GERMICIDAL IRRADIATION SYSTEMS," Eleventh International IBPSA Conference Glasgow, Scotland, 2009 pp. 1159–1166. [Online]. Available: https://www.aivc.org/sites/default/files/BS09_1159_1166.pdf Kasutatud 27.03.2021.
- [21] W. Kowalski, *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook - UVGI for Air and Surface Disinfection*. 2009.
- [22] A. Limited, C. Courtyard, and N. Yorkshire, "In-Duct UV-C Air Purification - A Beginners Guide," [Online]. Available: <https://www.puravent.co.uk/blog/post/in-duct-uv-c-air-purification-a-beginners-guide> Kasutatud 02.04.2021.
- [23] X. Cui, B. Mohan, M. R. Islam, S. K. Chou, and K. J. Chua, "Energy saving potential of an air treatment system for improved building indoor air quality in Singapore," *Energy Procedia*, vol. 143, pp. 283–288, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.685.

- [24] W. Goetzler, "Energy Savings Potential and RD&D Opportunities for Commercial Building HVAC Systems U.S. DOE," no. December, p. 172, 2017, [Online]. Available: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/12/f46/bto-DOE-Comm-HVAC-Report-12-21-17.pdf> Kasutatud: 16.02.2021
- [25] EnVerid Systems Inc., "Confidential Financial Services Client," pp. 1–14, 2017, [Online]. Available: <https://enverid.com/resources/case-studies/hvac-energy-savings-at-financial-services-company/> Kasutatud 16.02.2021.
- [26] T. Kalamees and J. Kurnitski, "Estonian test reference year for energy calculations," pp. 40–58, 2006, [Online]. Available: https://www.kirj.ee/public/va_te/eng-2006-1-4.pdf Kasutatud 25.02.2021.
- [27] V. Systems and A. R. Reserved, "HLR® and 62.1 IAQP © 2017," 2017, [Online]. Available: <https://1mt8a52djp7m2aumsi1wlvv7-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2020/03/Webinar-Enverid-Canada.pdf> Kasutatud: 19.04.2021.
- [28] Afprofilters, "Catalogue-UK-AFPRO-Filters-2020-LR," 2020, [Online]. Available: <https://www.afprofilters.com/wp-content/uploads/2020/02/Catalogue-UK-AFPRO-Filters-2020-LR.pdf> Kasutatud: 02.03.2021.
- [29] "HS-AKP-26 – Activated Carbon Cartridge." [Online]. Available: <https://www.luftfilterbau.de/cms/upload/2012/en-data/EN-09-D03-HS-AKP26.pdf> Kasutatud 02.03.2021.
- [30] EnVerid, "Hlr 15r," 2021. [Online]. Available: <https://enverid.com/wp-content/uploads/2021/03/HLR-15R-2021-03-25-2021-V1.pdf> Kasutatud 02.03.2021.