

**TAL
TECH**

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Instituudi nimetus

**VENTILAATORI JUHTIMISE OPTIMEERIMINE
MUUTUVA ÕHU VOOLUHULGAGA
VENTILATSIOONISÜSTEEMIDES**

**FAN CONTROL OPTIMIZATION OF VARIABLE AIR
VOLUME VENTILATION SYSTEMS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Heiki Tomann
/nimi/

Üliõpilaskood 202922EAXM

Juhendaja: Alo Mikola, Vanemteadur
/nimi, amet/

Tallinn 2024

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

“22” mai 2024

Autor: Heiki Tomann

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“22” mai 2024

Juhendaja: Alo Mikola

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

“.....”2024... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Heiki Tomann (sünnikuupäev: 14.02.1980)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
VENTILAATORI JUHTIMISE OPTIMEERIMINE MUUTUVA ÕHU VOOLUHULGAGA
VENTILATSIOONISÜSTEEMIDES

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on Alo Mikola (*juhendaja nimi*)

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/

22. mai 2024

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Heiki Tomann, 203922EAXM (nimi, üliõpilaskood)
Õppekava, peeriala: EAXM15 Hooned ja rajatised (kood ja nimetus)
Juhendaja(d): Vanemteadur, Alo Mikola, +372 5664 7035
Ekspert, Karl-Villem Võsa, +372 5850 0018 (amet, nimi, telefon)
Konsultant:(nimi, amet)
..... (ettevõtte, telefon, e-post)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) VENTILAATORI JUHTIMISE OPTIMEERIMINE MUUTUVA ÕHU VOOLUHULGAGA VENTILATSIOONISÜSTEEMIDES.

(inglise keeles) FAN CONTROL OPTIMIZATION OF VARIABLE AIR VOLUME VENTILATION SYSTEMS.

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Anda katselisele analüüsile toetuv hinnang erinevate juhtimisvõtete rakendamisele VAV ventilatsioonisüsteemis.
2. Analüüsida erinevate juhtimismeetodite eeliseid ja puudusi.
3. Analüüsida, millised ventilaatori juhtimisstrateegiad on süsteemi toimimise jaenergiasäästu vaates teistest paremad ja mida võiks tulevikus põhjalikumalt uurida.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse ülevaade ning metoodika lühikirjeldus, töö esitamine vahekontrolliks	22.02.2024
2.	Laborikatsete ettevalmistus ja läbiviimine	15.04.2024
3.	Andmeanalüüs ja tulemuste graafiline vormistamine	25.04.2024
4.	Lõputöö vormistamine ning esitamine	22.05.2024

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 22. mai 2024a

Üliõpilane: Heiki Tomann 22. mai 2024a
/allkiri/

Juhendaja: Alo Mikola 22. mai 2024a
/allkiri/

Kaasjuhendaja: Karl-Villem Võsa 22. mai 2024a
/allkiri/

Programmijuht: Simo Ilomets 22. mai 2024a
/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA	7
Tähiste ja lühendite loetelu	8
1 SISSEJUHATUS.....	9
2 KIRJANDUSE ÜLEVAADE	10
3 TEOREETILISED ALUSED	12
3.1 Ventilatsiooni õhukanalite kavandamine	12
3.1.1 Staatilise rõhu taastamise meetod (Static regain)	13
3.1.2 Konstantse hõõrdeteguri meetod (Equal friction)	14
3.1.3 Konstantse kiiruse meetod (Constant velocity)	14
3.2 Ventilatori juhtimine	14
3.3 Ventilatsioonisüsteemide liigitus.....	16
3.3.1 CAV-süsteem	17
3.3.2 VAV-süsteemid	17
3.4 VAV-klapp	19
3.5 VAV-süsteemide juhtimismeetodid	20
3.5.1 Konstantse staatilise rõhu hoidmisel põhinev juhtimisstrateegia	20
3.5.2 Staatilise rõhu lähtestamisel põhinev juhtimisstrateegia (SPR).....	20
3.5.3 Süsihappegaasi kontsentratsiooni lähtestamisel põhinev juhtimis- strateegia	23
3.5.4 Time Average Ventilation - TAV.....	23
3.5.5 Vea-adaptiivne juhtimise strateegia (Fault adaptive controls)	24
4 METOODIKA.....	26
4.1 Laboratoorsed katsevahendid	26
4.1.1 Kasutatavad seadmed ja mõõteriistad.....	27
4.2 Laboratoorne katsestend 1	28
4.3 Laboratoorne katsestend 2	31
4.3.1 Katsestend 2 aerodünaamiline arvutus ja kontrollmõõtmised	32
4.3.2 Katsestend 2 konstantse staatilise rõhu järgi juhtimine	35
4.3.3 Katsestend 2 lineaarselt proportsionaalse rõhu järgi juhtimine	39
4.3.4 Katsestend 2 staatilise rõhu lähtestamise (SPR) järgi juhtimine	40
4.3.5 Katsestend 2 tulemuste kohaldamine näidissüsteemile.....	42
5 TULEMUSED JA ANALÜÜS	44
5.1 Katsestend 1 mõõtetulemused	44
5.2 Katsestend 2 aerodünaamilise arvutuse ja mõõte-tulemuste võrdlus.....	46
5.3 Konstantse staatilise rõhu juhtimismeetodi mõõte-tulemused ja analüüs....	47

5.4	Lineaarselt proportsionaalse staatilise rõhu juhtimismeetodi mõõtetulemused ja analüüs	55
5.5	SPR juhtimismeetodi mõõtetulemused ja analüüs.....	61
5.6	Näidishoone ventilaatorite energiatarve	66
6	JÄRELDUSED.....	68
	KOKKUVÕTE	70
	SUMMARY.....	72
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	74

EESSÕNA

Antud magistritöös uuriti erinevaid võimalusi muutuva õhu vooluhulgaga ventilatsioonisüsteemide ventilaatorite energiatarbe optimeerimiseks. Hinnati kolme erineva ventilaatori juhtimisstrateegia mõju võimsustarbele ning anti hinnang süsteemi toimimisele.

Autor tänab südamest juhendajat Alo Mikolat ning kaasjuhendajat Karl-Villem Võsa, kelle abi ja nõuandeid magistritöö tegemisel hindan ülikõrgelt. Samuti on soov tänada kõiki Taltech'i õppejõude, kellega loengutes kokkupuudet omasin. Taltech on uuendusmeelne, meeldiva õpikeskkonnaga ja oma ala asjatundjatega täidetud õppeasutus, kus on olnud väga meeldiv uusi teadmisi omandada.

Eraldi soovin tänada oma abikaasat Kristiinat ja lapsi Elist ja Liisat, kes on minusse uskunud ja mind aidanud.

Magistritöö võtmesõnad: muutuva õhu vooluhulgaga ventilatsioon, ventilaatori võimsustarve, lineaarselt proportsionaalne juhtimine, staatilise rõhu lähtestamine, magistritöö

Tähiste ja lühendite loetelu

Tähised

CO_2 – süsinikdioksiid

V – ruumi kubatuur, m^3

A – kanali ristlõike pindala, m^2

L – õhu vooluhulk, m^3/h

p_{kogu} – kogurõhk, Pa

p_{dyn} – dünaamiline rõhk, Pa

p_{stat} – staatiline rõhk, Pa

λ_H – hõõrdetakistuse koefitsient

Re - Reynoldsi arv

K - absoluutne karedus õhukanalil

d - kanali läbimõõt, m

v – õhu liikumise kiirus, m/s

ν - õhu kinemaatiline viskoossus

ρ – õhu tihedus, kg/m^3

P - on ventilaatori võimsus, W

p – ventilaatori poolt arendatav rõhk, Pa

η - ventilaatori efektiivsus.

Δp_m - ventilatsiooniseadme rõhulang Pa;

Δp_t - torustiku rõhulang Pa.

Δp_v - ventilaatori rõhutõus Pa

η_{ft} - ventilaatori summaarne kasutegur

τ_d - seadme käidutundide arv (h) ööpäevas arvutuslikul õhu vooluhulgal

τ_w - seadme käidupäevade arv (d) nädalas arvutuslikul õhu vooluhulgal

t - arvutusperioodi pikkus 8760 h

Lühendid

CAV – Constant Air Volume

VAV – Variable Air Volume

TRAV – Terminal Regulated Air Volume

SPR – Static Pressure Reset

TAV – Time Average Ventilation

AHU – Air Handling Unit

PID - Proportional Integral Derivative

HVAC – Heating, Ventilation, and Air Conditioning

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers

SMACNA - Sheet Metal and Air Conditioning Contractors National Association

1 SISSEJUHATUS

Erinevate uurimuste tulemusel on leitud, et paljud ventilatsioonisüsteemid on ebaefektiivsed. Seda nii puuduliku siseõhu kvaliteedi vaates, kui ka energiakasutuse seisukohast [1]. Ebapiisav ventilatsioon võib näiteks suurendada haigestumist ülemiste hingamisteede haigustesse [2], [3]. Samamoodi vähendada inimeste tööviljakust ning kahandada õpitulemusi [4], [5]. Ventilatsioonisüsteemides, mille kasutus on ebaühtlane, kuid arvutuslik õhuvahetus suur, omab energiatarbe puhul kriitilist tähtsust süsteemi juhtimine. Tihti ei tööta väljaehitatud ventilatsioonisüsteemid projekteeritud tingimustel ning õhu saastatus ületab normidega ette nähtud piire või on energiatarve ebamõistlikult suur [6].

Kasvav energiavajadus on üks suurimaid väljakutseid, millega hetkel inimkonna tööstuslik, keskkonnaalane ja ühiskondlik areng silmitsi seisab. Seepärast on oluline, et kasutatavad lahendused oleksid säästlikud ja ressursse mitteraiskavad.

Euroopa Liidu keskkonnakaitsealaste eesmärkide saavutamise vajadus, energiakandjate hindade jätkuva kallinemise kontekstis, on järjest enam muutnud aktuaalseks energiasäästlikud lahendused tehnoloogia valdkondades [7], [8].

Käesolev lõputöö toetub laboris tehtud katsetele, kus rakendati erinevaid ventilatsioonisüsteemi juhtimisvõtteid ning hinnati süsteemi efektiivsust. Töös keskendutakse ventilatsioonisüsteemide energiatõhusamaks muutmise võimalustele. Konkreetsemalt erinevate juhtimis põhimõtete kasutamisega muutuva õhu vooluhulgaga ventilatsioonisüsteemis (VAV), et alandada ventilaatorite energiatarbimist.

Magistritöö peamiseks eesmärgideks on:

- Anda katselisele analüüsile toetuv hinnang erinevate juhtimisvõtete rakendamisele VAV ventilatsioonisüsteemis.
- Tuua välja erinevate juhtimismeetodite positiivsed ja negatiivsed aspektid.
- Millised ventilaatori juhtimisstrateegiad on energiasäästu vaates teistest paremad ja mida võiks tulevikus edasi uurida.

Lõputöö on jagatud viieks peatükiks, millest esimeses antakse teemaga seotud kirjanduse ülevaade. Teises osas käsitletakse valdkonna teoreetilisi aluseid. Kolmandas peatükis kirjeldatakse katsetulemuste analüüsi metoodikat ja mõõtmiste läbiviimist. Neljandas osas tuuakse välja töö tulemused ning esitatakse tulemustel põhinev analüüs. Viiendas osas esitatakse järeldused ning kokkuvõtte, milles antakse ka soovitusi perspektiivsete uurimissuundade püstitamiseks.

2 KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Hoonete sisekliima parameetrite tagamisel on oluline roll ventilatsioonil. Konditsioneerimissüsteeme hakati ehitama eelmise sajandi 1930-ndatel aastatel USA-s. Siis oli tegu eranditult konstantse õhu vooluhulgaga ventilatsioonisüsteemidega (CAV – *Constant Air Volume*). 1970-ndatel, suure energiakriisi ajal, hakati mõtlema energia kokkuhoiu peale ning tekkisid esimesed muutuva õhu vooluhulgaga ventilatsioonisüsteemid (VAV – *Variable Air Volume*). 1990-ndatel toimus suur areng VAV-süsteemide automaatika optimeerimise valdkonnas. [9]

Ühena esimestest uuris Hartman oma töödes sissepuhke ventilaatori integreeritud juhtimist, lähtudes VAV tsoonide õhu vooluhulkadest (TRAV). Kui hoone üheski VAV tsoonis ei esinenud tipukoormust, vähendati juhtimisloogika abil staatilist rõhku sissepuhke õhukanalis. TRAV-i puhul ei olnud peamine uuendus süsteemide mehaanilised komponendid, vaid viis, kuidas süsteem töötas. Uurimuses töötati välja matemaatiline mudel ventilaatori kiiruse muutmiseks. Sellisel kujul süsteemi juhtides tekkis oluline arvutuslik energiakulu kokkuhoid (~50%), võrreldes VAV-süsteemidega, mida juhiti konstantse staatilise rõhu järgi. [10]

Hydeman ja Stein vähendasid oma uurimuses astmeliselt õhukanali staatilise rõhu seadeväärtust, kuni üks või mitu VAV-klappi näitavad, et nõutud õhu vooluhulga säilitamiseks on vaja rohkem rõhku. Kui selliste VAV-klappide arv ületas etteantud piirväärtuse, suurendas kontroller staatilise rõhu seadeväärtust teatud sammu võrra. Rakendatud meetod vältis PID - juhtimisega seotud stabiilsusprobleeme, tekitades eraldi reaktsioonaja staatilise rõhu seadeväärtuse suurendamiseks ja vähendamiseks. Meetodi puhul võib õhuvoolu hulga asemel sisendina rakendada ka näiteks pöördklapi asendit. [11]

Rose ja Kopko uurisid võimalusi, kuidas tõhusamalt juhtida algelisi pneumaatiliste VAV-klappidega ventilatsioonisüsteeme. Vanematel pneumaatilistel VAV klappidel puudusid väljundid hoone ühtsesse automaatikasüsteemi ja neid ei saanud distantsilt jälgida. Selle asemel, et kõiki klappe eraldi mõõtma hakata, kasutasid Rose ja Kopko oma uurimuses ventilaatori juhtimisel nõ „keskmise VAV klapi“ asendiväärtust. Eeldusel, staatilise ja dünaamilise rõhu jagatis on konstant ning süsteemis ei ole pidevalt maksimaalset või ka minimaalset tarbimist, saab ventilatsiooniagregaadi (AHU) ventilaatori tööle panna mingil keskmisel või selle-lähedasel rõhul. [12]

Koulani, Hviid ja Terkildsen uurisid tavalise true/false loogika (0/1) asemel „fuzzy“ juhtimis-loogika rakendamist, kus „1“ ja „0“ asemel kasutatakse vahemikke 0...1-ni. Sellises edasiarendatud juhtimissüsteemis (Trim and Respond) mõõdetakse kõikides VAV-klappides staatilist rõhku ja genereeritakse alarm, kui klapp on avatud rohkem kui

85%. Alarm on aktiivne niikaua, kui klapp sulgub 80%-ni. Lisaks lähtestatakse staatilise rõhu parameeter peakanalis iga 90 sekundi tagant. Rõhu vahemiku ülemiseks piiriks oli süsteemi maksimaalsele õhu vooluhulgale vajalik staatiline rõhk ja alumiseks piiriks VAV-klappide toimimiseks nõutud minimaalne staatiline rõhk. Antud uuringu miinuseks oli asjaolu, et ei arvestatud siseõhu kvaliteedi tagamise parameetritega. [13]

Rismanchi ja Zambrano uurisid võimalusi vähendada väikeste ja keskmiste suurusega projektide rajamiskulusid. Selleks on välja arendamisel süsteemid, kus tavaliste VAV-klappide asemel on kasutusel mootorajamiga pöördklappe ja ei mõõdeta rõhku iga klapi juures, vaid juhtimine käib läbi erinevate algoritmide. Suurimaks väljakutseks sellise süsteemi puhul on kaudselt hinnata ja juhtida õhu vooluhulka ilma seda reaalselt mõõtmata. [14]

Kaam, Raftery ja Cheng märkisid on töös, et tüüpilises VAV-süsteemis on VAV-klapid suurema osa ajast miinimum õhu vooluhulga seadepunktis. Samas on see seadepunkt sageli kõrgem, kui normides määratletud minimaalne ventilatsiooninõue. Tulemuseks on suurem energiakasutus ja ruumide üle jahutamise oht. Lahendusena pakutakse välja ajakeskmise ventilatsiooni (TAV) juhtimisstrateegia kasutamist. TAV strateegia kohaselt hoitakse VAV-klappi vaheldumisi kas osaliselt avatud või siis täielikult suletud asendis. Tingimuseks on see, et keskmine õhu vooluhulk üle mingi ajaperioodi vastab standardis ettenähtud normväärtusele. Võrreldes enamlevinud strateegiatega, kus aluseks võetakse üks kriitiline tsoon, mille VAV-klapp on maksimaalselt avatud, vähendas TAV strateegia oluliselt kulusid küttele ja jahutusele. Samuti vähenes ventilaatori käitamisele kulunud energiahulk ca 15%. [15]

Wu, Yoon ja Tong uurimuses kasutati süsteemi kogutakistuse madalal hoidmiseks ja mugava sisekliima tagamiseks difusioonventilatsiooni, kus ripplae taha antav sissepuhke õhk difundeerub läbi poorsest materjalist või ka ripplakke tehtud väikeste avade ruumi selliselt, et ei tekiks tõmbust ka suurte jahutuskoormuste korral. Difusioonmaterjalist lagede takistus jääb ~ 2 Pa juurde ja annab läbi väiksema süsteemi kogutakistuse suurema energiasäästu. [16]

3 TEOREETILISED ALUSED

Ruumi ventilatsioonisüsteemi eesmärk on ruumi varustamine puhta õhuga ning samaaegselt ruumis tekkinud saasteainete eemaldamist. Ventilatsiooni abil on võimalik ruumi mõningal määral jahutada, kui sissepuhkeõhk on jahedam ruumiõhust, või kütta, kui sissepuhkeõhk on soojem ruumiõhust. Olenemata sellest, et ruumi kütmine või jahutamine võib vajada õhu kvaliteedi tagamisega võrreldes suuremat õhu vooluhulka, on viimane alati ruumi ventilatsiooni peaülesanne. Seega on alati esmatähtsaks ülesandeks saasteainete eemaldamine ruumist, et hoida õhu kvaliteeti või õhu puhtust etteantud tasemel. Mõlemal juhul on määrav õhu vooluhulga suurus. Vajadusel saab ventilatsiooni abil mõjutada ka ruumiõhu niiskust. [17]

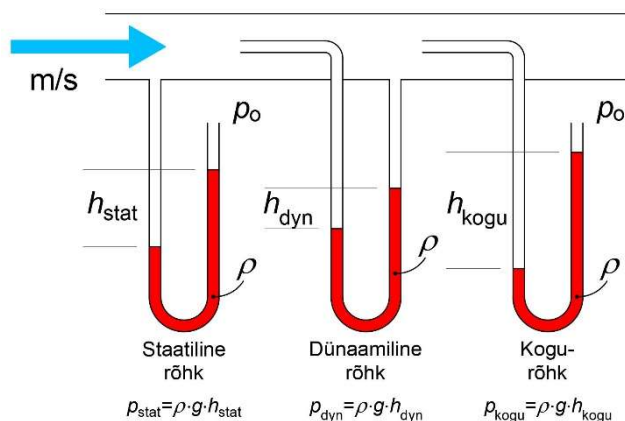
Seoses keskkonnavalaste seaduste ning direktiivide rangemaks muutumisega ning energiahindade kiire kasvuga on nii uute, kui ka rekonstrueerimisele kuuluvate hoonete tehnosüsteemide kavandamisel üks peamisi eesmärke sisekliima tagamine võimalikult väikese energiakuluga [18]. Teoreetilises osas antakse ülevaade erinevate ventilatsioonisüsteemide ehitusest ning nende eelistest ja puudustest. Ventilatsioonisüsteemide energiakasutuse vähendamise juures tuleb mõista süsteemide ülesehitusest tingitud piiranguid ning arvestada sisekliima tagamise nõudeid. Energia kokkuhoid ei saa tulla inimeste mugavuse arvelt.

3.1 Ventilatsiooni õhukanalite kavandamine

Ventilatsiooni õhukanalite kavandamisel lähtutakse üldjuhul süsteemi kasutusotstarbest süsteemi ülesehitusest ja süsteemi vajadustest. Ventilatsioonikanalite suuruse kavandamisel võib lähtuda ASHRAE käsiraamatus esitatud projekteerimis protseduuridel, mis põhineb ASHRAE SMACNA HVAC Systems kanalite projekteerimise juhendile. Juhendis kasutatakse kanalite läbimõõtude arvutamisel kas staatilise rõhu taastumise, võrdse hõõrdumise või konstantse kiiruse meetodite abi. [19]

Kogurõhk näitab õhuvoolu energiat. Staatiline rõhk näitab õhuvoolu potentsiaalset energiat. Oma olemuselt on see rõhk kanali seintel. Dünaamiline rõhk on õhuvoolu kineetiline energia, mis on väljendatav valemiga [19]:

$$p_{dyn} = \frac{\rho \times v^2}{2} \left[\frac{Pa \times kg}{m^2} \right] \quad (1)$$



Joonis 1 Staatiline rõhk, dünaamiline rõhk, kogurõhk

Mida suurem on õhuvoolukiirus, seda suurem on dünaamiline rõhk ja kineetiline energia.

$$p_{kogu} = p_{stat} + p_{dyn} [Pa] \quad (2)$$

Õhu liikumisel kanalis/AHU-s tekib rõhukadu. Rõhk kaob kahes kohas a) hõõrdele b) kohalikele takistustele.

Rõhukadu hõõrdele ja kohalikele takistustele on võrdeline dünaamilise takistusega [19]:

$$\Delta p_H = \lambda_H \times \frac{l}{d} \times \frac{\rho \times v^2}{2} [Pa] \quad (3)$$

kus

$$\lambda_H = 0,11 \times \left(\frac{68}{Re} + \frac{K}{d} \right)^{0,25} \quad (\text{hõõrdetakistuse koefitsient}),$$

Re = Reynoldsi arv (milline on voolamise iseloom?),

K = absoluutne karedus õhukanalil (nt. lehtterasel 0,1mm, krohvil, betoonil 3 - 6mm, tellismüüritis 10mm),

d = kanali läbimõõt.

3.1.1 Staatilise rõhu taastamise meetod (Static regain)

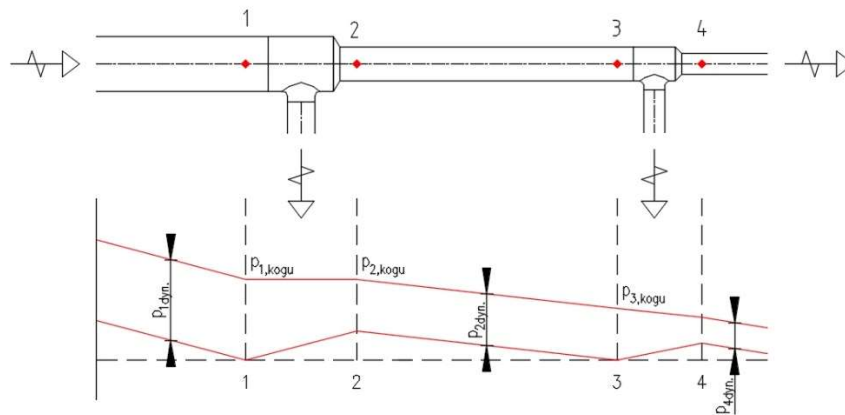
Üldjuhul tekivad õhukanalites rõhukaod hõõrdele ning kohttakistustest. Kui aga vähendada ventilatsioonikanali hargnemistes ja üleminekutes õhu liikumise kiirust süsteemselt, tekitatakse olukord, kus dünaamiline rõhk teiseneb staatiliseks rõhuks, kompenseerides hõõrdumisest tingitud rõhukadusid. Meetod põhineb Bernoulli võrrandil, mille järgi õhukiiruse alandamisel toimub dünaamilise rõhu muundumine staatiliseks rõhuks.

$$\frac{\rho \times v_2^2}{2} = \frac{\rho \times v_1^2}{2} - (p_{2,kogu} - p_{3,kogu}) - (p_{1,kogu} - p_{2,kogu}) \quad (4)$$

kus

p_{kogu} – kogurõhk Pa,

p_{dyn} – dünaamiline rõhk Pa,
 v – õhu liikumise kiirus m/s,
 ρ – õhu tihedus kg/m³.



Joonis 2 Staatilise rõhu taastamise meetod.

Selline lähenemine tagab kõikide harude ja lõppelementide juures sarnase staatilise rõhu ning lihtsustab oluliselt süsteemi tasakaalustamist. [19], [20]

3.1.2 Konstantse hõõrdeteguri meetod (Equal friction)

Konstantse hõõrdeteguri saavutamiseks on oluline kanalisüsteem projekteerida selliselt, et õhuvoolu kiirus jääb kogu süsteemi ulatuses ühtlaseks. See tähendab, et kanalite läbimõõt ja põlvede raadiused valitakse nii, et hõõrdetegur püsib ühtlane [19].

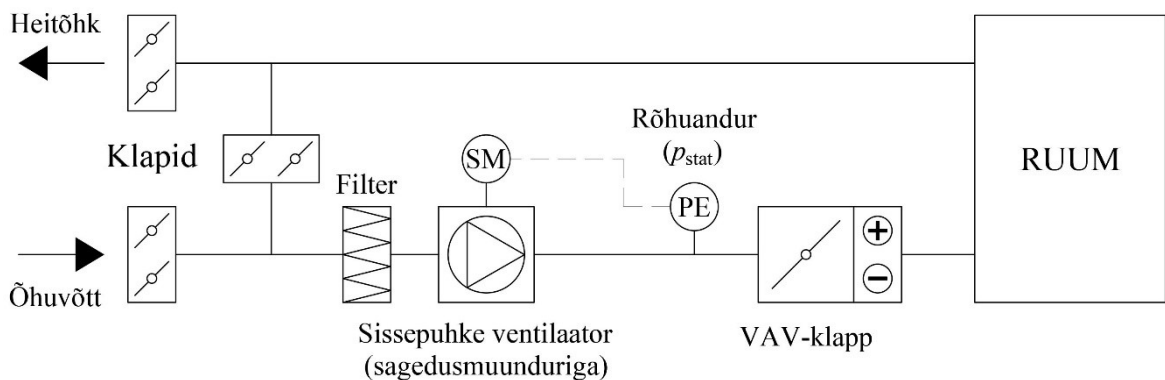
3.1.3 Konstantse kiiruse meetod (Constant velocity)

Konstantse kiiruse meetod keskendub õhukanalite mõõtmete dimensioneerimisel, õhuvoolu kiirusele ning ideaalis jääb see kogu süsteemi ulatuses samaks. Teades konkreetsete ruumide õhuvahetusi, saab valida õhukanalite läbimõõdud selliselt, et õhuvoolu kiirus jääb konstantseks kogu süsteemi ulatuses. Suuremad õhuvoolu kiirused tähendavad süsteemis suuremat rõhukadu ning läbi selle ka energiakulu [19].

3.2 Ventilaatori juhtimine

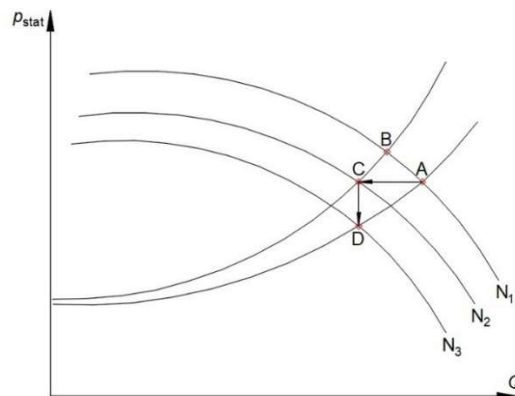
Levinumaid viise ventilaatori juhtimiseks VAV-süsteemides on kasutada konstantse väärtusega staatilise rõhu tööpunkti. Rõhk peab olema piisav, et tagada kõikide tsoonide projektijärgseid õhu vooluhulkasid. Osalise koormuse tingimustes tarbib sellise lähenemise puhul aga ventilaator rohkem võimsust kui vaja [21].

Alloleval joonisel on kujutatud lihtsat, ühe tsooniga VAV-süsteemi, mille sissepuhke ventilaatori tööd juhitakse sagedusmuunduri ja rõhuanduri abil.



Joonis 3 VAV-süsteem [21].

Edasi kirjeldatakse VAV-süsteemi juhtimist konstantse staatilise rõhu kontrollistrateegia järgi. Vastav protsess on kujutatud joonisel 2. Oletame, et jahutuskoormus testruumis langeb ja VAV-klapp hakkab sulguma. Selle tulemusel süsteemi takistus ja staatiline rõhk tõusevad. Joonisel kirjeldab seda olukorda lõik A-B. Samal ajal hakkab sagedusmuundur ventilaatori pöördeid maha võtma (N_1-N_2), et tagada konstantset rõhku süsteemis (B-C). Nüüd aga on VAV-klapp osaliselt suletud ja süsteem töötab suurenenud takistuse tingimustes. Seega on osalise süsteemi töökoormuse puhul konstantse staatilise rõhu tööpunkt suurem kui vaja. Avades uuesti VAV-klappi ja vähendades ventilaatori pöördeid (C-D) tagatakse väiksem ventilaatori energiakulu läbi. [21]



Joonis 4 Ventilaatori tööpunkti muutumine VAV-süsteemis [21].

Ventilaatorid saab laias laastus jagada kaheks. Väiksemad ventilaatorid (kuni 5kW) on enamjaolt elektrooniliselt kommuteeritud mootoritega (EC - *Electronically Commutated motors*). Suuremates ventilaatorites (üle 5kW) PM ja AC mootorite puhul on kasutusel sagedusmuundurid (VFD – *Variable Frequency Drives*). [22]

Ventilaatori võimsusvajadus on leitav järgmisest seosest:

$$P = \frac{\Delta p \times q}{\eta} [W] \quad (5)$$

kus

P - on ventilaatori võimsus [W],

q - õhu vooluhulk [m³/s],

p - ventilaatori poolt arendatav rõhk [Pa],

η - ventilaatori efektiivsus.

Ideaalis on ventilaatori võimsuse tarbimine võrdne õhu vooluhulgale ülekantava võimsusega. Praktikas annavad tootjad ventilaatoritele kaasa efektiivsuskõverad, mis illustreerivad erinevate kiiruste juures ventilaatorite tõhusust. Ventilaatori võimsusvajadust ja järelkult ka kogu energiavajadust saab vähendada, vähendades ventilatsioonisüsteemi õhuvoolu hulka ja/või staatilist rõhku [22].

Kui vaadata ventilatsioonisüsteemide summaarset elektri energiatarvet (ventilaatorid, klapiajamid, kalorifeeride ringluspumbad), siis sissepuhke ja väljatõmbe ventilaatorite osakaal tarbimises võib ulatuda vastavalt 50% ja 33%-ni kogutarbimisest [23]. Seega energiasäästu mõttes on mõistlik tegeleda just ventilaatorite energiatarbe vähendamisega. Vähendades ventilaatori tootlikust (õhu vooluhulka) 20% võrra, väheneb ventilaatori võimsustarve 49%. Valemid 6, 7, 8 kirjeldavad ventilaatori pöörete, tootlikkuse, rõhu ja võimsuse ruut- ja kuupseosesid [22].

Süsteemi õhu vooluhulk on võrdeline ventilaatori pöörete arvu suhtega:

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right); L_1 = L_2 \times \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \quad (6)$$

Süsteemi rõhk on võrdeline ventilaatori pöörete arvu suhtega ruudus:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2; p_1 = p_2 \times \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad (7)$$

Süsteemi võimsus on võrdeline ventilaatori pöörete arvu suhtega kuubis:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3; P_1 = P_2 \times \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad (8)$$

3.3 Ventilatsioonisüsteemide liigitus

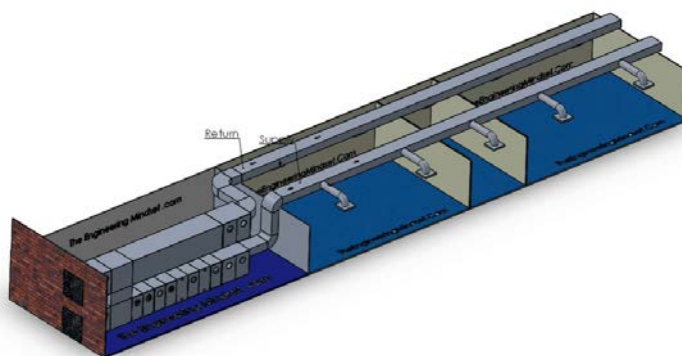
Üldjuhul saab ventilatsioonisüsteemid jagada kaheks: ainult väljatõmbesüsteemideks ning sissepuhke- ja väljatõmbesüsteemideks. Puhtalt väljatõmbesüsteemide juures peab arvestama võimalike kõrvalmõjudega nagu ebaühtlane temperatuur üle ruumi või tuuletõmbus. Selle vältimiseks peab ruumi õhuvahetuse kordarv olema väiksem kui 0,5h⁻¹ [17]. Väljatõmbesüsteemid võivad olla lahendatud väljatõmbeventilaatoriga või loomuliku ventilatsiooniga. Väljatõmbeventilaatori puhul peame arvestama elektrikulu ning võimaliku tekkiva müraga. Loomuliku ventilatsiooni õhu vooluhulk oleneb ka välistemperatuurist. Välisõhk pääseb väljatõmbesüsteemides ruumi läbi avatud

uste/akende, spetsiaalsete õhuvõtuavade (värskeõhuklappide) või ka seinas olevate pragude ja ebatiheduste kaudu. Värskeõhuklappides saab kasutada filtrit ja müra summutavat elementi. Väljatõmbesüsteemidel puudub reeglina soojustagastus, mis teeb nad energiakasutuse vaates ebaefektiivseks. [17]

Tänapäevastes hoonetes kasutatakse enamasti sissepuhke- väljatõmbesüsteeme. Süsteemid koosnevad sissepuhke- ja väljatõmbeosast. Lisaks on süsteemides ka seadmed, mis võimaldavad kontrollida ruumi puhutava õhu parameetreid (nt. temperatuur, niiskus, puhtus). Üks võimalus sissepuhke- väljatõmbesüsteeme liigitada on nad jagada konstantse õhu vooluhulgaga süsteemideks (CAV) ja muutuva õhu vooluhulgaga süsteemideks (VAV). [17]

3.3.1 CAV-süsteem

CAV ventilatsioonisüsteeme sobib kasutada kohtades, kus õhuvahetus on kogu aeg ühesugune. Näiteks saab tuua ööpäevaringselt töös olevad tootmishooned, laod, ostukeskused. CAV-süsteemi on mõistlik kasutada hoonete puhul, kus inimeste arv ja ventilatsiooninõuded peaaegu ei muutu. CAV ventilatsiooni kasutatakse ka kontserdisaalides, mis ei ole pidevalt kasutudes, kuid on samas prognoositava täituvusega. Süsteem töötab nominaalse õhu vooluhulgaga, kuid ainult siis, kui ruum on kasutusel. Energia kokkuhoiu mõttes ei ole CAV-süsteemid väga paindlikud [24]. Lihtsa CAV-süsteemi (joonis 5.) moodustavad ventilatsiooniagregaat (AHU - *Air Handling Unit*), sissepuhke- ja väljatõmbebetorustik, CAV-klapid õhu vooluhulkade seadistamiseks ja ruumide lõppelemendid.



Joonis 5 CAV-süsteemi ülesehitus

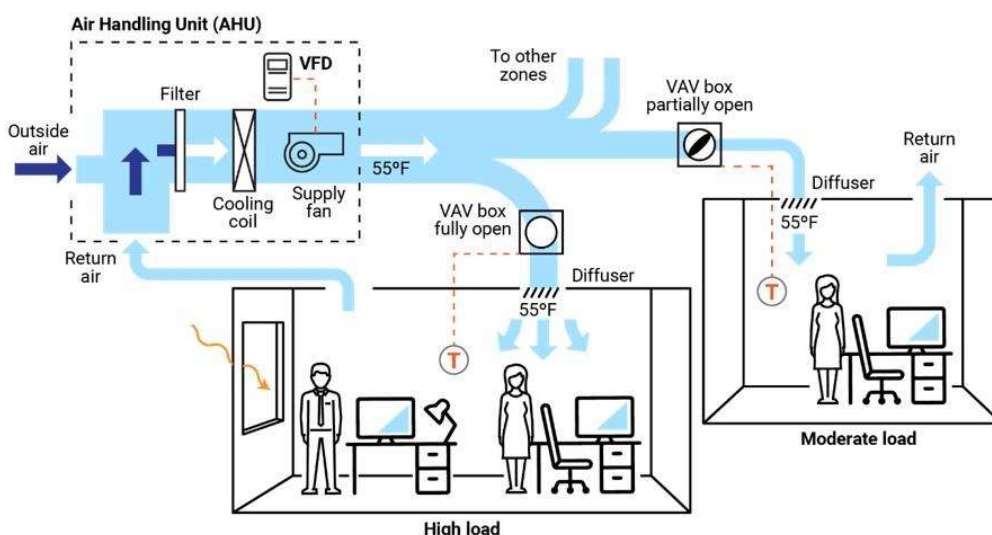
3.3.2 VAV-süsteemid

VAV-süsteemid on kasutusel kohtades, kus ventilatsiooniseadmed on sageli osalise koormuse all. Heaks näiteks on büroo- ja äripinnad, kus ruumide kasutus on juhuslik ja muutub pidevalt.

VAV-süsteemil on CAV-süsteemi ees mitmeid eeliseid. Näiteks CAV-süsteemis töötab jahutuskompressor ja ventilaator temperatuuri saavutamiseni täiskoormusel ja alles seejärel lülitub kompressor välja. See aga põhjustab temperatuuri kõikumisi seadepunkti ümber. VAV-süsteemis on temperatuuri reguleerimine oluliselt täpsem, sest vastavalt vajadusele on võimalik õhukogust sujuvalt suurendada või vähendada [25].

Teiseks saab välja tuua energiasäästu ja seadmete väiksema kulumise. VAV-süsteemi ventilaatori juhtimine, eriti kaasaegsete elektrooniliste muutuva kiirusega ajamite puhul, vähendab ventilaatorite energiatarbimist, mis võib moodustada olulise osa hoone koguenergia vajadusest [23].

Eelisenä on ka suurema niiskuse eraldamise võime sissepuhkeõhust. VAV-süsteemis õhuvool väheneb osalise koormuse tingimustes ja õhk puutub pikemat aega (kiirus on väiksem) jahutuspatareiga kokku. Rohkem niiskust kondenseerub välja, kuivatades passiivselt sissepuhkeõhku ning tagades seeläbi mugavamad ruumitingimused. [11]



Joonis 6 VAV-süsteemi ülesehitus

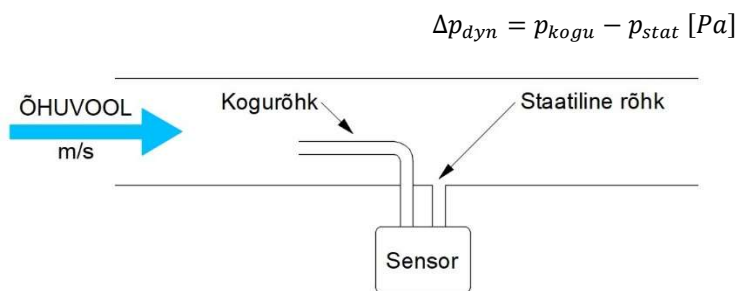
VAV-süsteemide toimimine ja efektiivsus sõltub kahest põhielemendist: VAV-klappidest (joonis 6), mis reguleerivad pöördklapi abil õhuvoolu hulka üksikutes tsoonides ja ventilaatorite kiirusregulaatoritest, mis reguleerivad tootlikust [19].

Traditsioonilistes muutuva õhu vooluhulgaga süsteemis on VAV-klapi ülesandeks reguleerida õhuvahetust ja temperatuuri tsoonis. Lihtsamad VAV-klapid koosnevad kontrollerist elektrilisest ajamist, pöördklapi ja dünaamilise rõhu mõõtmisel põhinevast õhuvoolu andurist. Keerulisematel võib olla lisaks küttekalorifeer, temperatuuriandur, lisaventilaator ja ultraheli õhuvoolu andur. Tulenevalt VAV-süsteemide suhteliselt keerulisest ülesehitusest, esineb eksploatatsioonis päris palju probleeme, mis on seotud

nii mehaanilise, elektrilise ja juhtimisautomaatika poolega Seetõttu on VAV-süsteemid levinud põhiliselt keskmistes ja suurtes ehitusprojektides. [19], [26]

3.4 VAV-klapp

Õhu voluhulka VAV-klapis saab mõõta mitmel moel. Õhuvoolu kiiruse otseseks mõõtmiseks saab kasutada näiteks ultraheli õhuvoolukiiruse mõõtjat, mis on aga oma hinnatasemelt võrdlemisi kallis. Alternatiivina leiame VAV-klapist kõige sagedamini sondi, mis on mõõdab ühelt poolt kogurõhku ja teiselt poolt staatilist rõhku kanalisis.



Joonis 7 Dünaamilise rõhu mõõtmine VAV-klapis.

Teades kogurõhku ja staatilist rõhku, saame seega leida dünaamilise rõhu, mille abil on võimalik arvutada õhuvoolu kiirust, mida kirjeldab valem 9:

$$\Delta p_{dyn} = \frac{\rho \cdot v^2}{2} [Pa]; v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{dyn}}{\rho}} [m/s] \quad (9)$$

Teades õhuvoolu kiirust VAV-klapis ning selle ristlõike pindala, on võimalik leida õhu voluhulk kasutades järgmist seost:

$$Q = v \cdot A \quad (10)$$

K-faktori kasutamine konstandina kirjeldab õhukanali ristlõike pindala ja sondis (Pitot toru) mõõdetud dünaamilise rõhu vahelist seost. Mida suurem on K-faktor, seda väiksem on minimaalne kontrollitav õhu voluhulk VAV-klapis. Õhuvoolu arvutamiseks K-faktori abil saab kasutada järgmist valemit:

K-faktor (FläktWoods)

$$L = k \cdot \sqrt{\Delta p_{dyn}} [l/s]; k = \frac{Q}{\sqrt{\Delta p_{dyn}}} \quad (11)$$

L – õhu voluhulk (l/s);

Δp_{dyn} – dünaamiline rõhk (Pa);

$$L = 3,6 \cdot k \cdot \sqrt{\Delta p_{dyn}} \left[\frac{m^3}{h} \right]; k = \frac{Q}{3,6 \cdot \sqrt{\Delta p_{dyn}}} \quad (12)$$

L – õhu vooluhulk (m^3/h);

Δp_{dyn} – dünaamiline rõhk (Pa).

3.5 VAV-süsteemide juhtimismeetodid

Kuigi VAV-lahendused on oma olemuselt tõhusad energiakulude kokkuhoidmise vaates, siis optimaalse viisi leidmine sisekliima parameetrite tagamise ja energiakulu kokkuhoiu mõttes on võrdlemisi keeruline. Minimaalne energiakulu saavutatakse võimalikult väikese staatilise rõhu ja õhu vooluhulga hoidmise läbi.

3.5.1 Konstantse staatilise rõhu hoidmisel põhinev juhtimisstrateegia

Lihtsaima juhtimislahenduse puhul seadistatakse peale ehituse valmimist süsteem hoidma konstantset õhu vooluhulka või konstantset staatilist rõhku, mingi kindla kasutusprofiili järgi. VAV-klapid seadistatakse mingile kindlale vooluhulgale ja ventilaator hoiab süsteemi kogu õhu vooluhulka. Tihti on aga seadeväärtused tegeliku olukorraga võrreldes suure varuga, mis võib põhjustada ebamugavust kasutamisel ja energia raiskamist. Konstantse staatilise rõhu juhtimismeetodi põhipuuduseks on see, et meetod ei suuda arvesse võtta tegelikku rõhuvajadust.

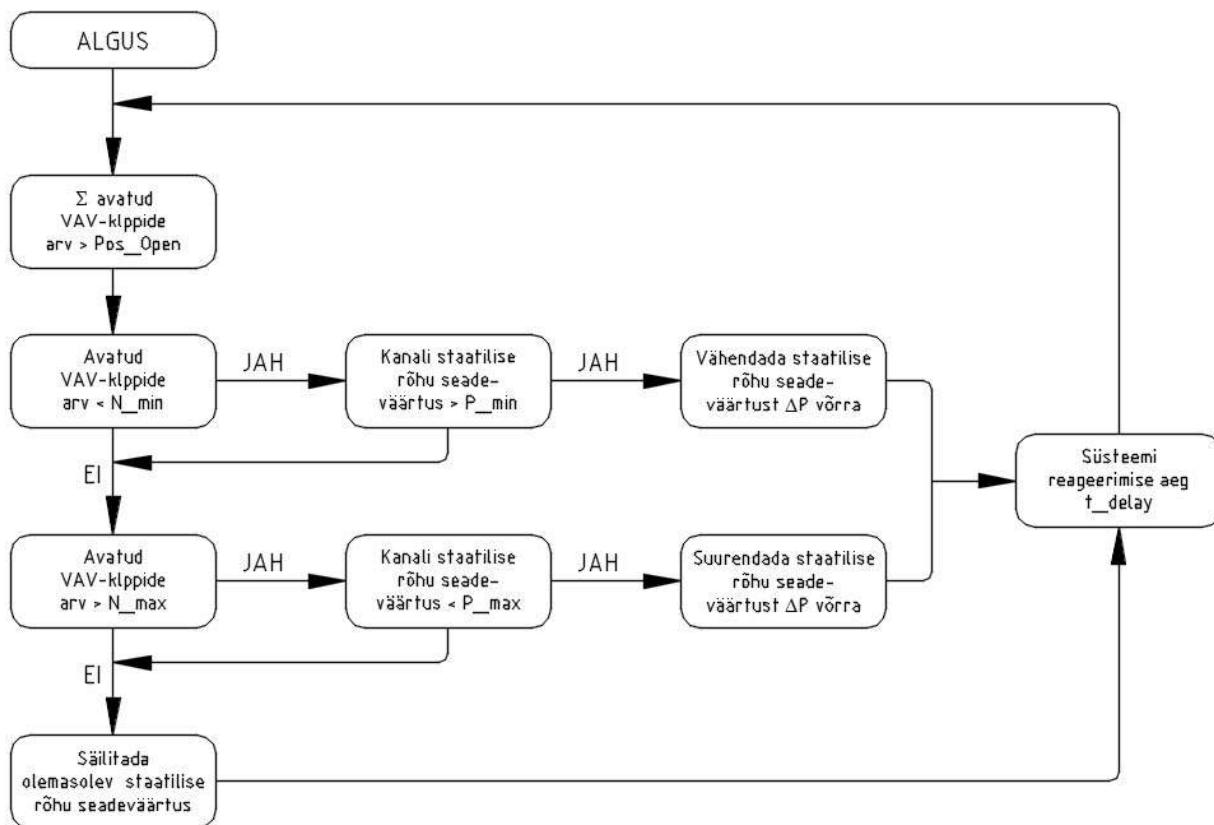
Sellise olukorra vältimiseks on välja töötatud erinevaid juhtimise strateegiaid, mis arvestavad tegelikke vajadusi. Näiteks võib tuua staatilise rõhu lähtestamise (SPR) strateegia, CO₂ lähtestamise strateegia, ajast sõltuvad juhtimismeetodid, rikete analüüsil põhinevad juhtimismeetodid jne. [15], [27], [28], [29]

VAV-süsteemid on võrreldes CAV-süsteemidega efektiivsemad, sest arvestatakse vajaminevat õhu vooluhulka erinevates tsoonides. Tõhusa juhtimisstrateegia valimisel on oluline teada süsteemi ülesehitust ja sellele esitatavaid nõudeid. VAV-süsteemide vanemad lahendused eeldasid juba projekteerimisfaasis paika pandud õhu vooluhulkasid, mis seadistati välja peale süsteemi valmimist. Reeglina olid seadenumbrid üledimensioneeritud põhjustades konditsioneeritavates tsoonides ebamugavustunnet ja suurenenud ventilaatorite energiakulu [27].

3.5.2 Staatilise rõhu lähtestamisel põhinev juhtimisstrateegia (SPR)

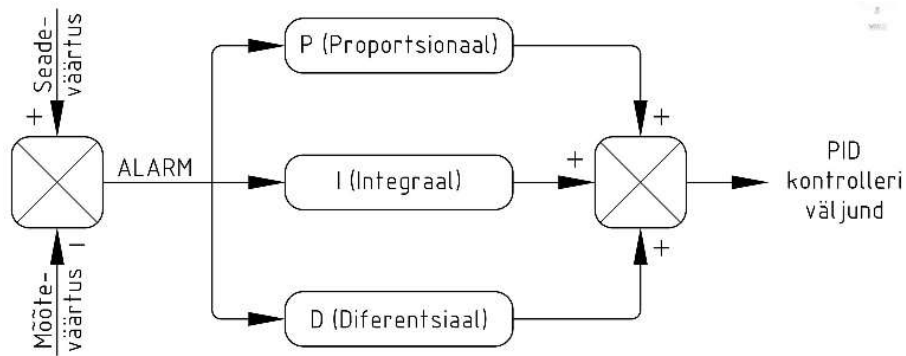
Levinud strateegiaks ventilaatorite energiasäästlikumaks juhtimiseks VAV-süsteemis on staatilise rõhu lähtestamise (SPR - Static Pressure Reset) juhtimine või kriitilise tsooni lähtestamise juhtimine PID (Proportional Integral Derivative) kontrolleri abil [27].

Tavaliselt paigaldatakse ventilatsiooni õhukanalisse rõhuandur, mis reguleerib ventilaatori kiirust ja sellele vastavalt õhuvoolu hulka VAV-süsteemis. Ventilaatori kiirust reguleeritakse nii, et staatiline rõhk anduri asukohas on kogu aeg konstantne. SPR-juhtimise korral juhitakse staatilist rõhku kanalisiselt selliselt, et vähemalt üks tsoon jääb töötamise ajal mistahes koormustingimuste korral avatuks. VAV-klapi asendi muutmine osalise koormuse tingimustes toob automaatselt kaasa rõhulanguse kõikides teistes süsteemi VAV-klappides. SPR-juhtimise idee on hoida pöördklapid koormuse vähenemisel võimalikult avatud. Seda tehakse staatilise rõhu seadepunkti lähtestamisega madalamale väärtusele. Maksimalne energiasääst saavutatakse olukorras, kus kriitilise tsooni ehk suurima rõhulangusega tsooni pöördklapp hoitakse mistahes koormuse korral täiesti avatuna [30].



Joonis 8 SPR-juhtimise põhimõte.

PID-kontrolleri algoritm sisaldab kolme eraldiseivat konstantset parameetrit ja vastavalt sellele nimetatakse seda ka kolme seaduspärasusega juhtimiseks: proportsionaal-, integraal- ja diferentsiaalreguleerimine; vastavalt siis P, I ja D.



Joonis 9 PID-kontrolleri põhimõtteskeem

Lihtsustatult öeldes saab neid signaale ajas interpreteerida: P sõltub protsessi staatilisest veast, I on akumulatsioon mineviku vigadest ja D on ennustus tuleviku vigadest, põhinedes jooksvatele muutujate väärtustele. Nende kolme tegevuse kaalutud summat kasutatakse protsessi kohandamiseks kontrolleri töös. [32]

$$u(t) = K \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (13)$$

kus

$u(t)$ on mudeli sisendsignaali,

$e(t)$ ehk vea signaal on defineeritud kui $e(t) = r(t) - y(t)$,

$r(t)$ on vastav sisendsignaali.

Proportsionaallüli (P) tekitab väljundsignaali, mis on võrdeline (proportsionaalne) tegeliku vea väärtusega. Proportsionaalset signaali saab võimendada korrutades seda võimendusteguriga (konstandiga) K_p , mida nimetatakse proportsionaalse võimenduse teguriks. Suur proportsionaalse signaali väärtus tekib suure sisendsignaali muutuse korral. Kui proportsionaalse signaali väärtus on liiga suur, siis võib süsteem muutuda ebastabiilseks. Kui väärtus jääb liiga väikeseks, siis võib reguleerimine jääda samuti liiga väikeseks, kui süsteemile mõjuvad häiringud. [32]

Integraalregulaatori (I) väljundsignaal on proportsionaalne nii vea suuruse- kui ka vea kestusega. PID-regulaatori reguleerimisvea suuruse integraal on summa hetkelisest veast aja jooksul ning annab kogunenud nihkest infot. Integraalse signaali kasutamine kiirendab protsessi muutmise kiirust ja kõrvaldab jäänud vead, mis võivad ilmned. [32]

Protsessi vea tuletis (D) arvutatakse nii, et määratakse reguleeritava suuruse kõrvalekalle (viga) aja kestel ning mitmekordistatakse selle väärtust korrutades seda diferentseerimislüli võimendusteguriga. Tuletise väärtus ennustab süsteemi käitumist ja parandab süsteemi stabiilsust. Tuletise väärtust kasutatakse aga harva praktikas, kuna tema loomuliku stabiilsuse tõttu ei saa mõõta müra taset. [32]

Praktikas tuleks samas kasutada väärtusi, mis on mõnevõrra väiksemad kui 100%, kuna PID-kontrolleriga reguleerimine arvestab viga mõlemale poole seadepunkti väärtust. Soovituslik seadesuurus jääb 85...95% vahele [33].

3.5.3 Süsihappegaasi kontsentratsiooni lähtestamisel põhinev juhtimisstrateegia

Süsihappegaasi kontsentratsiooni lähtestamisel põhinev juhtimisstrateegia eesmärk on samuti optimeerida energiatõhusust, säilitades samal ajal siseruumides õhukvaliteeti.

Kontseptsioon hõlmab õhuvahetuse reguleerimist vastavalt süsihappegaasi (CO₂) kontsentratsioonile hõivatud ruumis. Inimese väljahingatavas õhus on arvestatav kogus CO₂-te, seega selle kontsentratsiooni jälgimine annab võimaluse hinnata ruumide hõivatust. Kui hõivatus on madal, näiteks lõunapauside ajal või öösel, saab süsteem vähendada õhu vooluhulka (sh temperatuuri), tagades samal ajal minimaalse normikohase ventilatsiooni. [14]

Ventilatsioonisüsteemi tööd reaajas hõivatuse põhjal dünaamiliselt kohandades aitab CO₂ kontsentratsiooni lähtestamisel põhinev juhtimisstrateegia ruumides vältida üle ventileerimist (sh kütmist/jahutamist). Antud strateegia on laialdaselt kasutusel ärihoonete HVAC-süsteemide jõudluse ja energiakasutuse optimeerimisel. [34]

3.5.4 Time Average Ventilation - TAV

Üldjuhul on VAV-klappidel tootja poolt etteantud minimaalne õhu vooluhulk, alla mille neid ei saa juhtida (puudub mõõtetäpsus/võime). ASHRAE standardis 62.1 kirjeldatakse ventilatsiooni protsessi üle kokkulepitud ajaperioodi, keskmiste tingimuste alusel, kus klappide minimaalne õhu vooluhulk sellisel kujul rolli ei mängi.

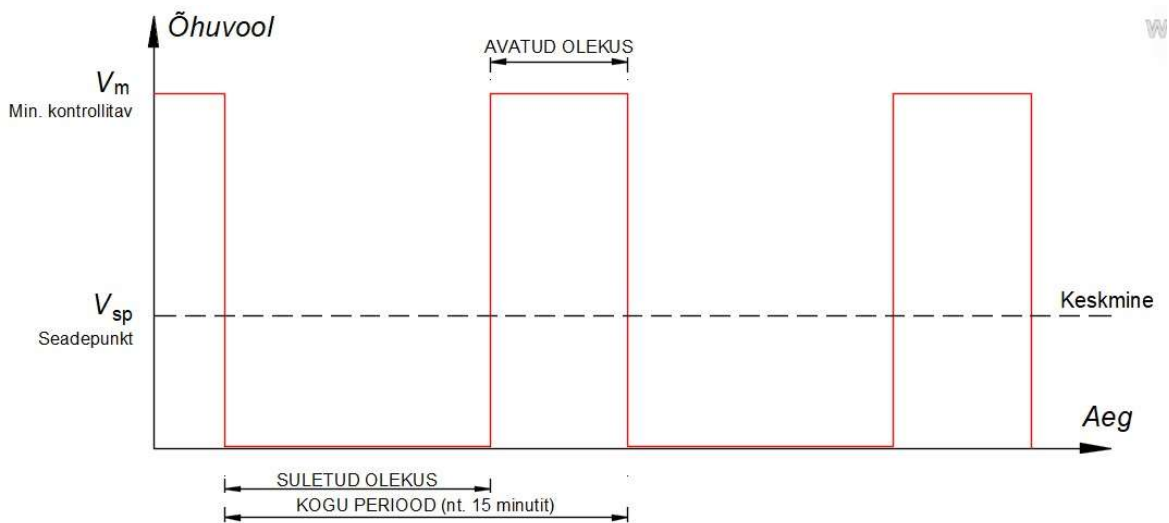
Antud lähenemise puhul on VAV-klapid väiksema hõivatusega ajal 100% suletud asendis ning suurema hõivatusega ajal tehakse klapid uuesti lahti. Tinglikult saab seda nimetada ajakeskmiseks ventilatsiooniks (TAV) või ka vahelduvaks ventilatsiooniks. [15], [35]

Strateegiat rakendades on võimalik õhu vooluhulka tsoonis alandada VAV-klapi miinimum seadeväärtusest madalamatele õhukogusele, samal ajal ikkagi tagades ruumis viibijatele värsket õhu.

Tavalises VAV-süsteemis on VAV-klapi kontrollerite abil tsoonides paika seadistatud minimaalne võimalik õhu vooluhulk, mida klapp reguleerida suudab. Harvad ei ole olukorrad, kus tsooni pindala ja hõivatuse järgi saadud standardi järgsed õhukogused on väiksemad VAV-klapi minimaalsest seadeväärtusest.

Vähendades õhu

vooluhulka on võimalik minimiseerida ventilaatori käitamisele kuluvat energiat. Lisakokkuvõid tekib ka väiksema õhu vooluhulga jahutamise vajadusest.



Joonis 10 TAV põhimõte

Et vältida erinevate tsoonide samaaegselt TAV režiimi sattumist, korrutatakse esimene avatud periood juhusliku arvuga (0...1) läbi. Eesmärgiks on tagada võimalikult konstantne summaarne õhuvool kogu tsükli jooksul, isegi olukorras, kui kõik VAV-klapid lülituvad korraga TAV-režiimi (nt. kui kogu hoones toimub temperatuuri langus). [35]

3.5.5 Vea-adaptiivne juhtimise strateegia (Fault adaptive controls)

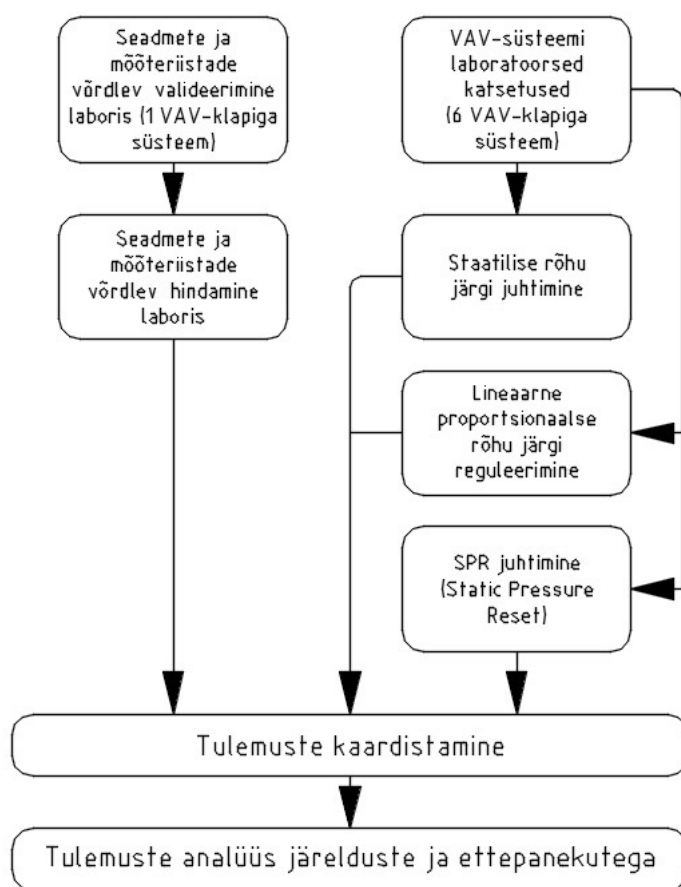
Strateegia eesmärk on tagada ventilatsioonisüsteemi sujuv ja tõrgeteta toimimine isegi juhul, kui tekivad probleemid või talitlushäired. Süsteemi juhtimine hõlmab erinevaid funktsioone [28], [36], [37]:

- Veakoodide tuvastamine ja diagnostika: Süsteem suudab automaatselt tuvastada ja registreerida veakoode, mis võimaldab operaatoril või hooldustehnikul kiiresti tuvastada ja lahendada probleeme.
- Varukomponentide aktiveerimine: Kui süsteem tuvastab komponendi rikke või talitlushäire, võib see aktiveerida varukomponendi või -süsteemi automaatselt, et tagada katkematu töö.
- Veakoha kohandamine: Süsteem võib kohandada oma tööparameetreid või režiime vastavalt tuvastatud veale, näiteks reguleerides õhuvoolu hulka või temperatuuri, et kompenseerida rikkega seotud probleeme.
- Alarmide ja teavituste genereerimine: Süsteem genereerib automaatselt hoiatusi või teavitusi operaatoritele või hooldustehnikutele, et anda neile teada tuvastatud veast või talitlushäirest.

Kokkuvõttes võimaldab veadaptiivne juhtimise strateegia ventilatsioonisüsteemil kohandada oma tööd ja reageerida dünaamiliselt erinevatele probleemidele või talitlushäiretele, tagades seeläbi süsteemi usaldusväärse ja tõrgeteta toimimise .

4 METOODIKA

Käesolevas peatükis antakse ülevaade lõputöö tegemisel kasutatud metoodikast, kirjeldatakse mõõteseadmeid, katsete lähteparameetreid ja uuritavaid objekte. Katsetamine on jagatud kaheks osaks. Esimeses osas tegeldakse katseseadmete tundmaõppimise ja valideerimisega. Teises osas ehitatakse välja keerulisem süsteem, mis jäljendab reaalset ventilatsioonisüsteemi ning selle juhtimisel rakendatakse erinevaid algoritme. Joonisel 11 on esitatud metoodilist protsessi kirjeldav struktuurskeem:



Joonis 11 Metoodilise protsessi struktuurskeem











4.1 Laboratoorsed katsevahendid

Järgnevas alapeatükis tuuakse välja laboratoorsete katsete läbiviimiseks kasutatud seadmete kirjeldused ja andmed. Lisaks tutvustatakse katsestendide ülesehitust ja juhtimismeetodeid. Suund on siin lihtsamast keerulisemaks.

4.1.1 Kasutatavad seadmed ja mõõteriistad

Katsete juures kasutati erinevaid seadmeid andmete logimiseks, ventilaatorite töö juhtimiseks, staatilise- ja diferentsiaalrõhu mõõtmiseks ja õhu vooluhulkade mõõtmiseks. Seadmete tehnilised andmed on esitatud Tabelis 1.

Tabel 1 Katseseadmed

Seadme nimetus	Parameetrid	Mõõtepiirkond	Mõõtetäpsus	Foto
Tuuletunnel TRAMFS160	Õhuvoolukiirus, Õhu vooluhulk, diferentsiaalrõhk	0.69–8.29 m/s, 16–166 l/s, 900–1100 hPa	±5%	
Systemair PCA1000D2	Õhu vooluhulk, Staatiline-rõhk	0...1000 Pa	±1,3%	
Grant Squirrel Data Logger	2CH 100Hz USB, RS232 SD card	Int. mem 14M readings	Pt100/1000 RTD sensors 4-20mA	
Johnson Controls EasyIQ	FS-20+FW-14+FS-32			
Magnesense Dwyer MS-W2X	Diferentsiaalrõhk	-100 kuni +100 hPa	±5%	
VERIS T-VER-PXU-L	Staatiline-rõhk	0 kuni +250 hPa	±5%	
Lindab UltraLink® FTMU-160	Õhu vooluhulk, ultraheli	$Q_{nom} = 141 \text{ l/s}$	±5%	
HVSA-125-1-2, Fläktwoods	Õhu vooluhulk, Diferentsiaalrõhk	k-factor = 6 $Q_{nom}=93 \text{ l/s}$	±12...15%	
HVSA-160-1-2, Fläktwoods	Õhu vooluhulk, Diferentsiaalrõhk	k-factor = 10 $Q_{nom}=145 \text{ l/s}$	±12...15%	
ULSA-125 Fläktwoods	Õhu vooluhulk, ultraheli	$Q_{nom}=118 \text{ l/s}$	±4...10%	

4.2 Laboratoorne katsestend 1

VAV ventilatsiooni süsteemide erinevate komponentide paremaks tundmaõppimiseks koostati alustuseks 1 VAV-klapiga süsteem, millele paigaldati dubleerivad mõõteseadmed (rõhk, õhu vooluhulk). Laboratoorne katsestend 1 koosneb järgmistest elementidest:

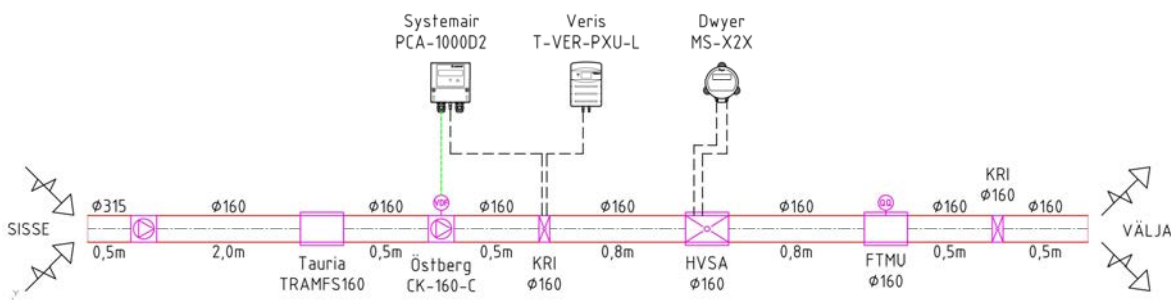
- õhukanal (Ø160),
- telgventilaator (CK 160 C, EC, ÖSTBERG),
- kontroll_1 (Anemomeeter, TRAMEC-0004, Tauria),
- kontroll_2 (PCA 1000D2, Systemair),
- 1 VAV-klapp (HVSA-160-1-2, Fläktwoods),
- dif. rõhuandur (Magnesense Dwyer + Flaktwoods IRIS160),
- Data Logger Squirrel Grant 2020 Series,
- ultraheli õhu vooluhulga mõõtja (Fläktwoods_Optivent_ULSA).

Õhu vooluhulka saab vaadata Systemair PCA1000D2 kontrollierist, Lindabi FTMU ultraheli õhu vooluhulga mõõtjast ja Tauria TRAMEC-0004 anemomeeter/kontrollierist. Staatilist rõhku on võimalik kontrollida Systemair PCA1000D2 kontrollierist, Tauria TRAMEC-0004 anemomeeter/kontrollierist, Magnesense Dwyer MS-W2X rõhuandurist ja VERIS T-VER-PXU-L rõhuandurist. Mõõtetäpsus võib sõltuda seadme paigalduse asukohast, kuna laminaarse ja turbulentsse õhuvoolu puhul on mõõtetäpsus erinev. Samuti võib mõõtepiirkondade äärealadel tulemuste usaldusväärsus küsitav olla.

Ventilatsiooni süsteemide planeerimisel jälgitakse erinevaid põhimõtteid, mis kokkuvõttes tagavad optimaalse tulemuse. Vajalik õhu vooluhulk, õhu kiirus kanalis, õhukanalite läbimõõdud, sobiv kanaliventilaator, süsteemikomponentide takistus – kõik need faktorid mõjutavad süsteemi toimivust.

Süsteemi mõjutavad lisaks füüsilistele komponentidele erinevad automaatikaseaded. Klappide mootorajamite reageerimisajad vs kontrolleri vastavad parameetrid. Võib juhtuda, et süsteem reageerib muutustele liiga aeglaselt ja ei vasta etteantud tingimustele. Liiga kiiresti parameetreid muutes võib süsteem jääda ka ebastabiilseks. Sellest arusaamiseks pandi kokku 4 erineva konfiguratsiooniga 1 VAV-klapiga süsteemi. Süsteemi toimivuse hindamiseks vaadati ventilaatori tootlikkust ja õhu vooluhulga tagamist. Lisaks fikseeriti rõhud ja õhuvoolu kiirus kanalis ning muudeti kontrolleri seadeid (proportional band).

Esimesel juhul (joonis 12) on tegu sisepuhke süsteemiga, mille lisatakistusi tekitatud ei ole.



Joonis 12. 1 VAV-klapiga stand (sisepuhe)

Teises katses (joonis 13) lisati kanali nõ survepoole peale kaks 90° põlve, mille eesmärgiks oli tekitada süsteemile lisatakistus ja turbulentset õhuvoolu vahetult enne VAV-klappi. HVSA-160 VAV-klapi mõõtetäpsus sõltuvalt sirge kanalitoru olemasolust enne klappi on näidatud tabelis 2.

Tabel 2 HVSA-160 VAV-klapi mõõtetäpsus

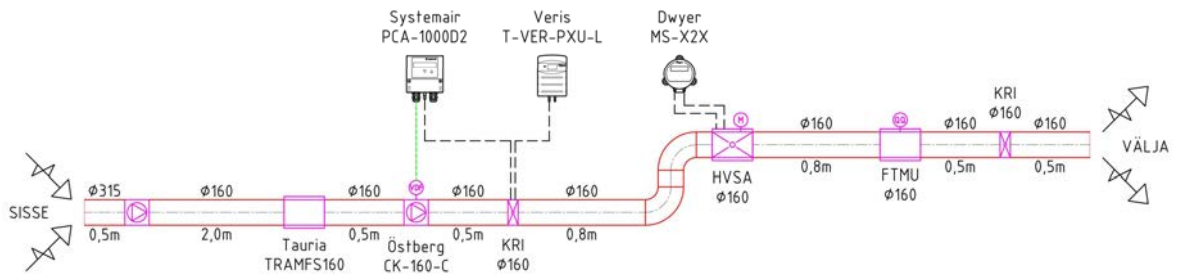
VAV-KLAPP HVSA, Ø160	L	
		±12%
	≥ 2D	≥ 0D

Fläktwoods si HVSA-160 VAV-klapi järele on katseskeemides paigaldatud Lindabi FTMU ultraheli õhu vooluhulga mõõtja, mille abil on võimalik VAV-klapi mõõdetud näite võrrelda. FTMU mõõtetäpsus sõltuvalt sirge kanalitoru olemasolust enne klappi ja mõõtesensori paigutusest on näidatud tabelis 3.

Tabel 3 FTMU ultraheli õhu vooluhulga mõõtja mõõtetäpsus

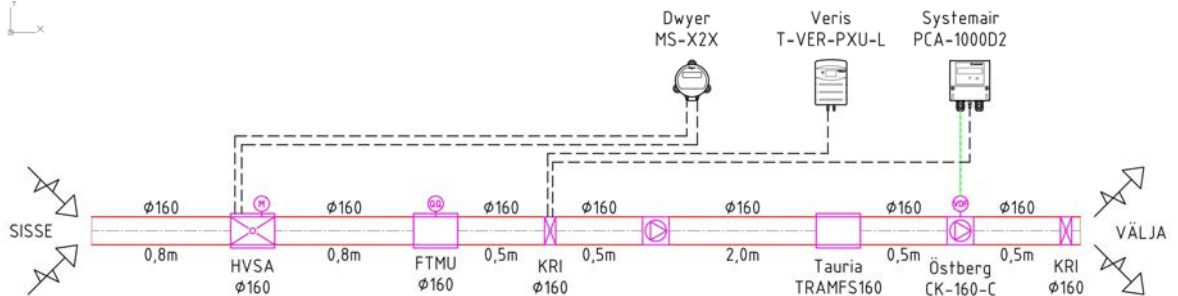
		* Sensori asukoht			
		2-4-Ød	>4-5-Ød	>5-Ød	
Põlv		Siseraadius (Parim asukoht)	5	5	5
Põlv		Välisraadius (Halvim asukoht)	20	10	5

Katsestand 1 katseskeemide kokkupanekul arvestati sirge toru pikkuseks min. ≥5-Ød ning eeldatavaks mõõtetäpsuseks ±5%.

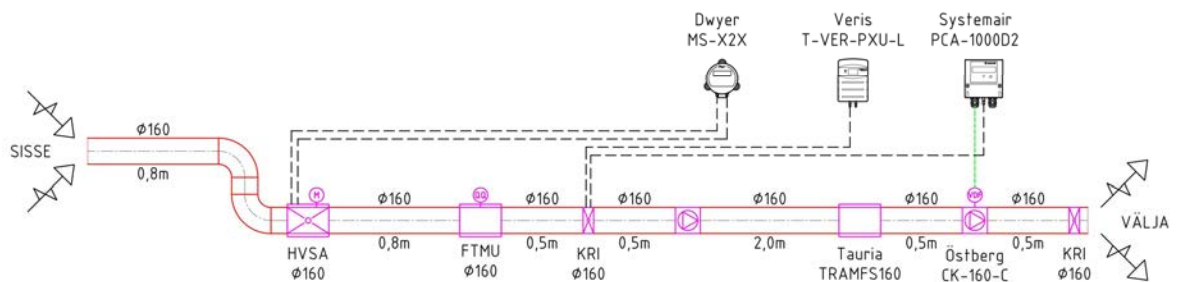


Joonis 13. 1 VAV-klapiga stand (sissepuhe, põlvedega)

Kolmandal katseskeemil (joonis 14) on tegu väljatõmbe süsteemiga, mille lisatakistusi tekitatud ei ole.



Joonis 14. 1 VAV-klapiga stand (väljatõmme)



Joonis 15. 1 VAV-klapiga stand (väljatõmme, põlvedega)

Neljandas katses (joonis 15) lisati kanali nõ imipoole peale kaks 90° põlve, mille eesmärgiks oli analoogselt teise katsega tekitada süsteemile lisatakistus vahetult enne VAV-klappi. Juhul kui turbulentsed õhuvoolud kuidagi VAV-klapi tööd mõjutavad, tuleb see hiljem analüüsi käigus välja.

Katseseeriade tulemusena tekib õhu vooluhulkade ja rõhkude varieeruvuse tabel, mille pealt saab hinnata erinevate süsteemi komponentide toimivust. Samuti tekib süsteemi karakteristik.

4.3 Laboratoorne katsestend 2

Laboris ehitatud ventilatsioonisüsteem püüab legendi kohaselt jäljendada tüüpilise büroohoone tööruume. Ruumid on arvestusliku põrandapinnaga 32 m² ja mahutavad 4 inimest 8 m²/in. Arvestuslik õhuvahetus on 10 l/(s·in.) so kõikide ruumide peale kokku 240 l/s.

Laboratoorne katsestend 2 koosneb järgmistest elementidest:

- õhukanalid (Ø100...315),
- telgventilaator (Prio-315, AC, Systemair),
- 6 VAV-klappi (HVSA-125, HVSA-160, Fläktwoods),
- 6 Ultraheli õhu vooluhulga mõõtjat (Fläktwoods_Optivent_ULSA),
- KRI reguleerklapid (KRI-100...160, ETS-NORD),
- kontrolleri_3 (Johnson Controls EasyIQ seeria moodulid FS-20, FS-32, FW-14),
- PC arvuti koos CPT Tools 3.0.0-2 (Sedona Framework).



Joonis 16 Laboratoorne katsestend 2

Süsteemi peakanal on Ø315 mm torust ja haruliinid Ø125 mm ja Ø160 mm läbimõõduga torudest. Süsteemi takistuse suurendamiseks (haruliinide pikkuste imiteerimiseks) on kasutatud IRIS-tüüpi reguleerklappe, mille seadearvud on valitud sõltuvalt klapi läbimõõdust ja katsemetoodika lähteülesandest. VAV-klappe on kahte läbimõõtu Ø125 mm ja Ø160 mm. Stendis olevat telgventilaatorit juhitakse kontrolleriiga 0...10 V signaaliga. Õhu vooluhulkade mõõtmiseks on kõikidele tsoonidele lisatud ultraheli õhu vooluhulgamõõttjad (Lindab FTMU Ø160 mm), mille mõõteviga tehase andmetel on ±5%. VAV-klappides on samuti õhu vooluhulgamõõttjad, mille mõõteviga on ±12...15%. VAV-klappides mõõdetakse rõhkude erinevust drosselava ees ja taga, mis võimaldab k-faktori abil arvutada klappi läbivat õhu vooluhulka. Erinevate juhtimisalgoritmide ehitamiseks kasutatakse programmeerimistarkvara CPT Tools 3.0.0-2.

4.3.1 Katsestend 2 aerodünaamiline arvutus ja kontrollmõõtmised

Hilisemate mõõtetulemuste sisendiks olevad süsteemi aerodünaamilised arvutused tehti MS Exceli keskkonnas. Vooluhulgad on saadud ventilaatori 70% ja 100% võimsuse juures. Seda tehti eeldusel, et tulemusi on parem võrrelda (need võimenduvad). Arvutustes on kasutatud projekteerimistarkvaras MagiCAD olevaid valemeid.

Torude hõõrderõhukao leidmisel erinevatele torulõikudele kasutatakse Colebrook-i valemit ja MS Exceli Goal Seek-i:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \times \lg \left(\frac{k}{d \times 3.71} + \frac{2.51}{Re \times \sqrt{\lambda}} \right) \quad (14)$$

$$Re = \rho \times v \times \frac{d}{\eta} = v \times \frac{d}{\nu} \quad (15)$$

$$\Delta p = \frac{\lambda}{d} \times 0.6 \times v^2 [Pa] \quad (16)$$

kus

λ - hõõrdetegur,

k - toru karedus (valtsplekk ümarkanalil 0,15),

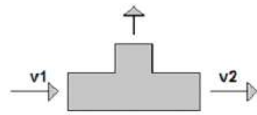
d - toru siseläbimõõt (m),

Re - Reynolds-i arv,

ν - õhu kinemaatiline viskoossus (+20°C) 0,00001511 (m²/s),

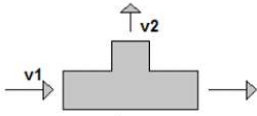
v - õhu kiirus (m/s).

Kolmikutes, üleminekutes ja põlvedes rõhukaod on arvatud alltoodud valemitega 17-22.

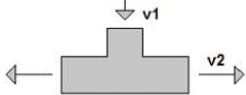


$$\Delta p = 0.025 \times v_2^2 + 0.25 \times c^2$$

$$c = \text{abs}(v_2 - (v_1 + 0.05 \times v_2))$$
(17)



$$\Delta p = 0.6 \times v_1^2 + 0.12 \times v_2^2$$
(18)



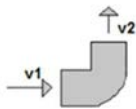
$$\Delta p = 0.65 \times v_1^2 + 0.12 \times v_2^2$$
(19)



$$\Delta p = 0.146 \times (v_2 - v_1)^{1.9}$$
(20)



$$\Delta p = 0.864 \times (v_1 - v_2)^{1.8}$$
(21)



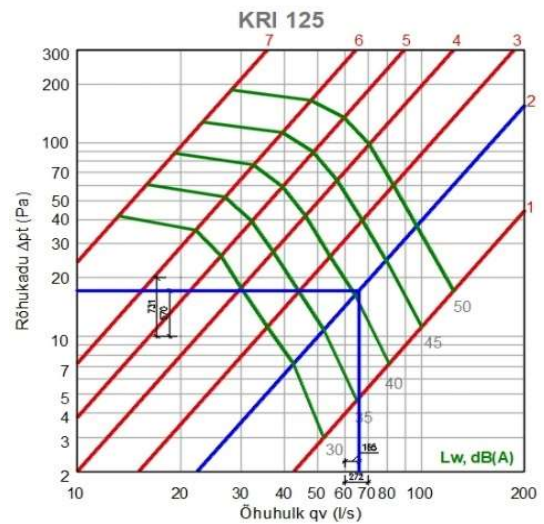
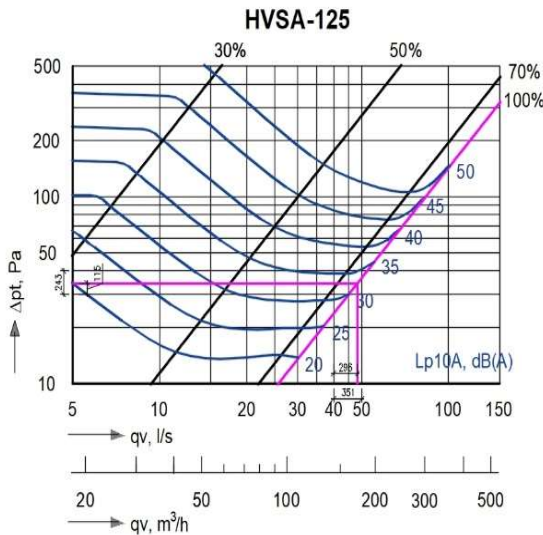
$$\Delta p = \left(\frac{-0.6}{6} \times \frac{r_c}{d} + 0.6 \right) \times \frac{\rho}{2} \times v^2$$

$$r_c = \tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) \times l$$
(22)

Torustiku dünaamilised rõhukaod leiti valemiga 23

$$\Delta p_{dyn} = \frac{\rho \times v^2}{2}$$
(23)

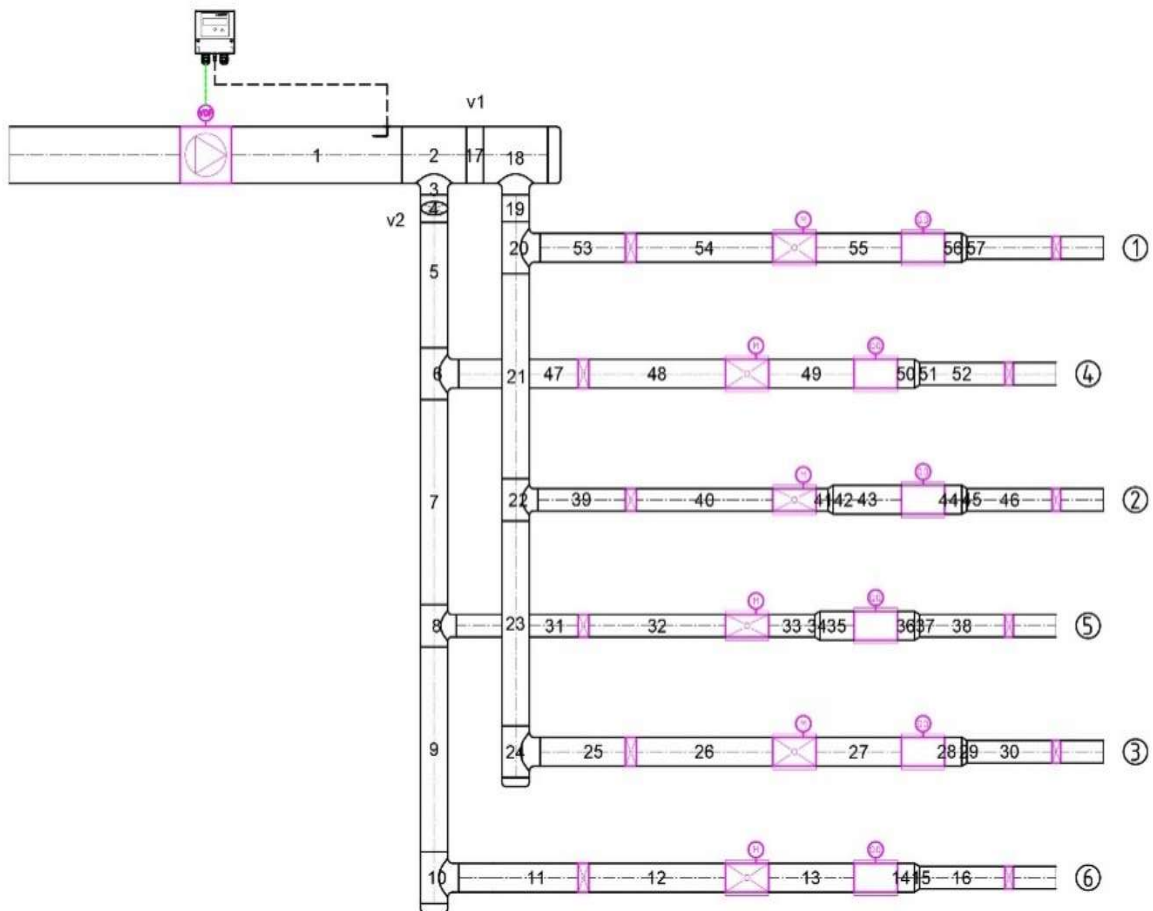
VAV-klappide rõhukadude leidmisel kasutatakse vastava tootja nomogramme, kus leitakse klapi avatuse ja vooluhulga järgi interpoleerimise teel rõhukadu.



Joonis 17 VAV-klapi nomogramm (vasakul) ja reguleerklapi nomogramm (paremal)

Reguleerklappide rõhukadude leidmisel kasutatakse tootja poolt antud nomogramme, kus leitakse seadearvu ja vooluhulga järgi interpoleerimise abil rõhukadu.

Aerodünaamilise arvutuse tegemiseks nummerdatakse ära kõik arvutuslõikude osad (joonis 18). Arvutuslõik on konstantse õhu vooluhulga ja ristlõike mõõtmetega kanalivõrgu osa.



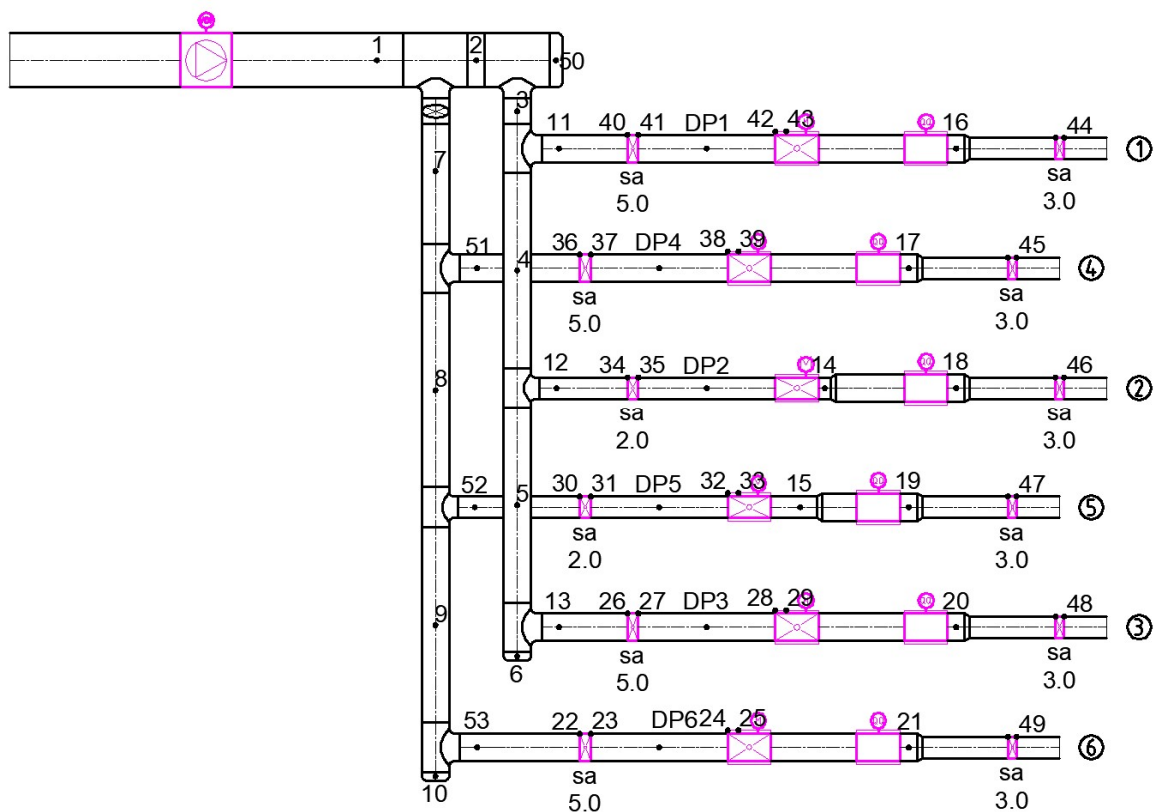
Joonis 18 Katsestend nr. 2 arvutuslõikude skeem

Arvutustele vastavad väljad on esitatud tabelis 3. Arvutuse põhieesmärk on süsteemi aerodünaamilise takistuse leidmine, et seda võrrelda tegelike mõõtmistulemustega. See annab ka võimaluse hinnata arvutusmeetodi täpsust ning saada tagasisidet mõõtmistulemuste usaldusväärsuse kohta. Selline võrdlemine võimaldab avastada võimalikke erinevusi teooria ja praktika vahel ning hinnata arvutuste usaldusväärsust erinevates tingimustes ja rakendustes.

Kui arvutustulemused erinevad oluliselt tegelikest mõõtmistulemustest, võib see viidata vajadusele täpsustada arvutusmeetodit. Samuti võib see näidata, et hoopis mõõteseade/seadmed on kalibreerimata, katki või valesti paigaldatud. Seega võimaldab võrdlus teooria ja praktika vahel parandada järeltulemuste tegemise usaldusväärsust ning tagada, et need vastaksid tegelikele situatsioonile võimalikult hästi.

Tegelike staatilise rõhu mõõtmistulemuste saamiseks puuritakse sobivatesse kohtadesse arvutuslõikude torudes väikesed avad ning teostatakse staatilise rõhu

mõõtmised. Lisaks mõõdetakse rõhku reguleerklappidest ja VAV-klappide mõõtetestest. Mõõtepunktid on esitatud joonisel 19.



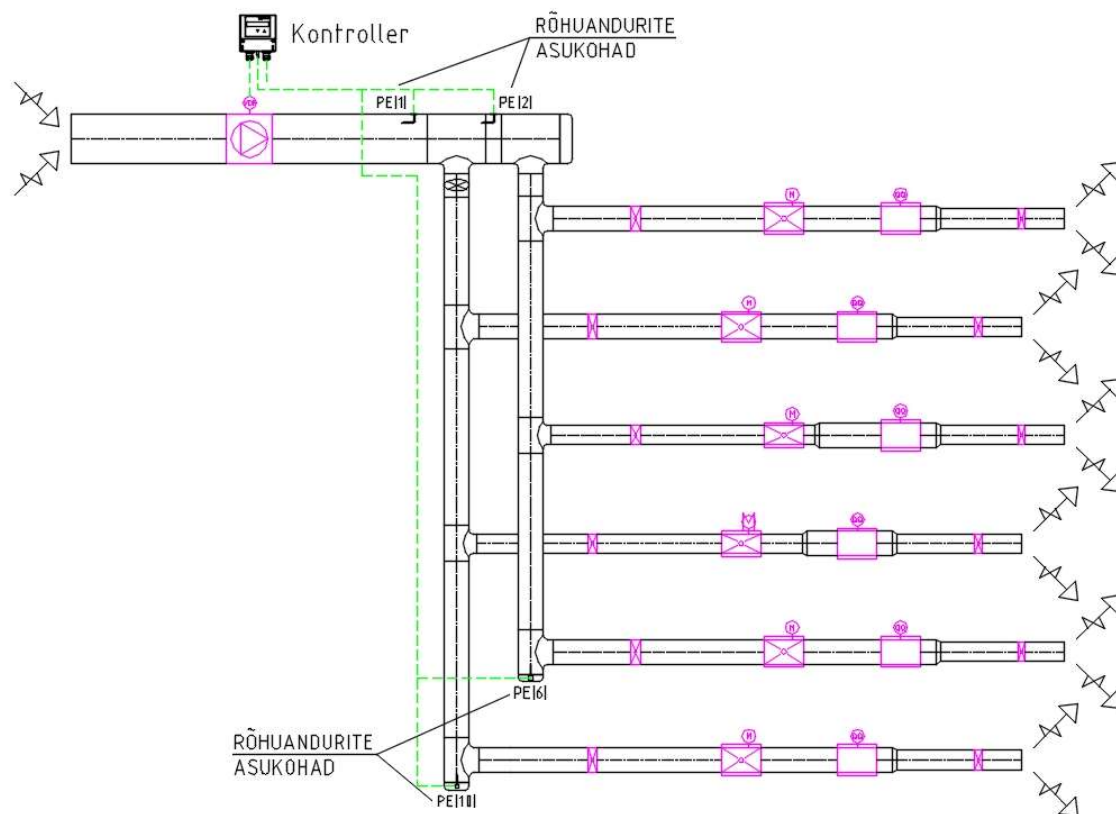
Joonis 19. Katsestend nr 2 mõõtepunktide skeem.

Mõõtmis- ja arvutustulemuste pinnalt tehakse otsused järgnevate katseseeriade osas.

4.3.2 Katsestend 2 konstantse staatilise rõhu järgi juhtimine

Levinumaid viise VAV-süsteemide juhtimiseks on staatilise rõhu järgi juhtimine, kus ventilaatori seaderõhuks võetakse kõige ebasoodsama kasutusprofiili õhu vooluhulkade tagamiseks vajaminev staatiline rõhk. Eelmises alapeatükis saadud andmete põhjal teame katsestendi piirväärtusi ning saame need edasises töös aluseks võtta.

Staatilise rõhu järgi juhtimise puhul on kirjanduse põhjal oluline ära määrata rõhuanduri õige asukoht. Kui andur paigaldada kohe peale sissepuhke ventilaatorit on oht, et ventilaatori tekitatud turbulentsed õhuvoolud segavad andurist stabiilsete lugemite saamist. Samuti võib mõõteandur näiteks suurte rõhukõikumiste tõttu kahjustada saada. Anduri paigutamine ventilaatorist kaugemale süsteemi harutorustiku peale peaks teoreetiliselt tagama saadud mõõtmistulemuste suurema stabiilsuse ja ühtlasema kvaliteedi [38]. Seetõttu tehakse kõik järgnevad katseseeriad läbi 4 erineva rõhuanduri asukohaga.



Joonis 20 Juhtimismeetodite alternatiivsed rõhuandurite asukohad

Hiljem andmete analüüsi käigus on võimalik otsustada, kas mõnel rõhuanduri asukohal on eeliseid või puuduseid. Katseseeriad on jagatud blokkideks, mille käigus logitakse EasyIQ kontrolleri õhu vooluhulgad (VAV-klapi ja FTMU ultraheli õhu vooluhulga mõõtjaga dubleeritult) ja rõhud harutorudes. Eraldi paigaldatakse ventilaatorile Hoboware loger ja ampermeeter, millega mõõdetakse ventilaatori voolutugevust.

1. katseseeria alguses on kõik VAV-klapid 100% lahti ning ventilaator on pandud konstantset rõhku (300 Pa) hoidma. Katseseeria käigus hakatakse klappe järjest sulgema. Sulgemise intervalliks on paar minutit. Oluline on see, et VAV-klapp jõuaks sulguda ja ventilaatori töö stabiliseeruda. Peale 1. seeria lõppu tõstetakse ventilaatori rõhuandur järgmisesse kohta ning korratakse lühendatud kujul 1. seeria katseid. Kokku on rõhuanduri asukohti 4.

Tabel 4 Staatilise rõhu järgi juhtimine VAV-klapid 100% avatud

Katse nr.	Rõhuanduri asukoht	VAV-1	VAV-2	VAV-3	VAV-4	VAV-5	VAV-6	Kirjeldus	
1	PE1	max	max	max	max	max	max	Kõik VAV-id lahti, reguleerklapid algasendis	Set1 @300Pa
2	PE1	0	max	max	max	max	max	reguleerklapid algasendis	
3	PE1	0	0	max	max	max	max	reguleerklapid algasendis	
4	PE1	0	0	0	max	max	max	reguleerklapid algasendis	
5	PE1	0	0	0	0	max	max	reguleerklapid algasendis	
6	PE1	0	0	0	0	0	max	reguleerklapid algasendis	
7	PE1	max	0	0	0	0	0	reguleerklapid algasendis	
8	PE2	max	max	max	max	max	max	Kõik VAV-id lahti, reguleerklapid algasendis	Set2 @300Pa
9	PE3	max	0	0	0	0	0	reguleerklapid algasendis	
10	PE4	0	0	0	0	0	max	reguleerklapid algasendis	
11	PE6	max	max	max	max	max	max	Kõik VAV-id lahti, reguleerklapid algasendis	Set3 @300Pa
12	PE7	max	0	0	0	0	0	reguleerklapid algasendis	
13	PE8	0	0	0	0	0	max	reguleerklapid algasendis	
14	PE10	max	max	max	max	max	max	Kõik VAV-id lahti, reguleerklapid algasendis	Set4 @300Pa
15	PE10	max	0	0	0	0	0	reguleerklapid algasendis	
16	PE10	0	0	0	0	0	max	reguleerklapid algasendis	

Katseeriade 5-8 juures on tsoonides kasutusel nõo tavakasutuse olukord ning õhukogused kõikides VAV-klappides 40 l/s. Rõhk hoitakse ikka konstantsena 300 Pa. Katseeriade vahel on väga oluline lasta süsteemil stabiliseeruda.

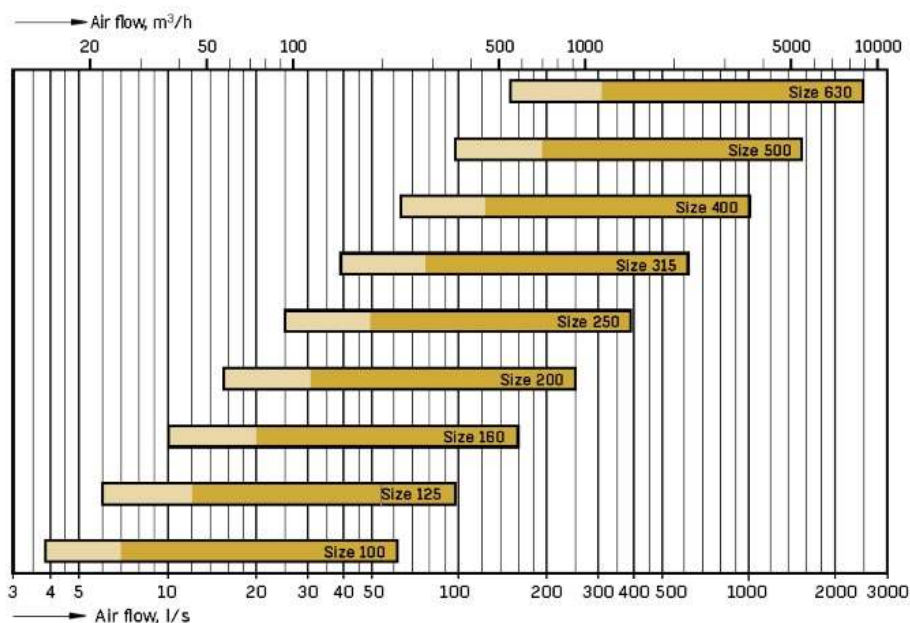
Tabel 5 Staatilise rõhu järgi juhtimine nominaalse õhu vooluhulgaga 40 l/s

Katse nr.	Rõhuanduri asukoht	VAV-1	VAV-2	VAV-3	VAV-4	VAV-5	VAV-6	Kirjeldus	
1	PE1	40	40	40	40	40	40	Kõik VAV-id 40l/s, reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	Set5 @300Pa
2	PE1	0	40	40	40	40	40	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	
3	PE1	0	0	40	40	40	40	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	
4	PE1	0	0	0	40	40	40	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	
5	PE1	0	0	0	0	40	40	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	
6	PE1	0	0	0	0	0	40	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	
7	PE1	40	0	0	0	0	0	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	
8	PE2	40	40	40	40	40	40	Kõik VAV-id 40l/s, reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	Set6 @300Pa
9	PE3	40	0	0	0	0	0	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	
10	PE4	0	0	0	0	0	40	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	
11	PE6	40	40	40	40	40	40	Kõik VAV-id 40l/s, reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	Set7 @300Pa
12	PE7	40	0	0	0	0	0	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	
13	PE8	0	0	0	0	0	40	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	
14	PE10	40	40	40	40	40	40	Kõik VAV-id 40l/s, reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	Set8 @300Pa
15	PE10	40	0	0	0	0	0	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	
16	PE10	0	0	0	0	0	40	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	

Katseeriade 9-12 juures on tsoonides kasutusel miinimum koormatuse olukord ning õhukogused kõikides VAV-klappides 10 l/s. Rõhk hoitakse ikka konstantsena 300 Pa.

Tabel 6 Staatilise rõhu järgi juhtimine min. Õhu vooluhulgaga 10 l/s

Katse nr.	Rõhuanduri asukoht	VAV-1	VAV-2	VAV-3	VAV-4	VAV-5	VAV-6	Kirjeldus	
1	PE1	10	10	10	10	10	10	Kõik VAV-id 40l/s, reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	Set9 @300Pa
2	PE1	0	10	10	10	10	10	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	
3	PE1	0	0	10	10	10	10	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	
4	PE1	0	0	0	10	10	10	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	
5	PE1	0	0	0	0	10	10	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	
6	PE1	0	0	0	0	0	10	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	
7	PE1	10	0	0	0	0	0	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	
8	PE2	10	10	10	10	10	10	Kõik VAV-id 40l/s, reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	Set10 @300Pa
9	PE3	10	0	0	0	0	0	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	
10	PE4	0	0	0	0	0	10	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	
11	PE6	10	10	10	10	10	10	Kõik VAV-id 10l/s, reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	Set11 @300Pa
12	PE7	10	0	0	0	0	0	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	
13	PE8	0	0	0	0	0	10	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	
14	PE10	10	10	10	10	10	10	Kõik VAV-id 10l/s, reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	Set12 @300Pa
15	PE10	10	0	0	0	0	0	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	
16	PE10	0	0	0	0	0	10	reguleerklapid - 1 tsoon avatud, 6 tsoon kinni	

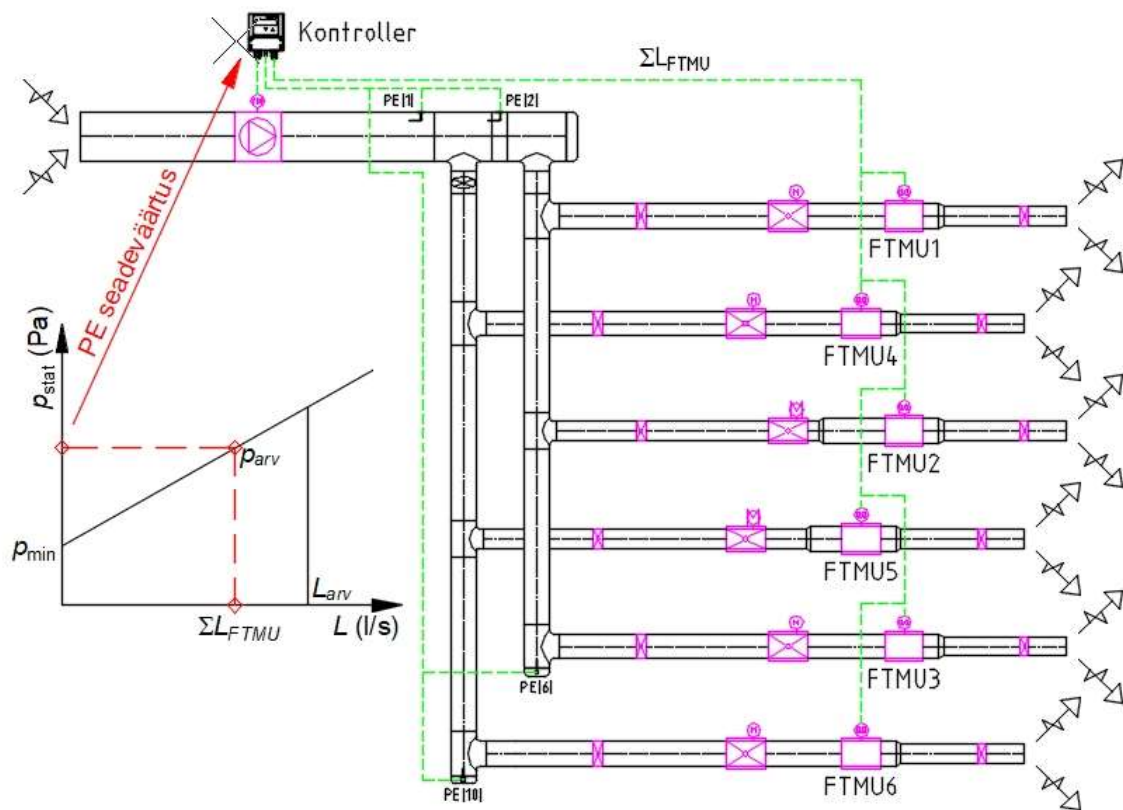


Joonis 21 HVSA VAV-klapi töövahemike diagramm. Kui õhu kiirus on alla 1 m/s $\pm 10\%$, siis mõõtmistäpsust ei saa garanteerida (helepruun ala).

Minimaalne vooluhulk 10 l/s on valitud meelega VAV-klapi tehase andmete miinimumväärtus, et saada teadmisi selle kohta, kuidas VAV-klapp töötab piirilukorras.

4.3.3 Katsestend 2 lineaarselt proportsionaalse rõhu järgi juhtimine

Antud alapeatükis käsitleme lineaarselt proportsionaalse rõhu järgi ventilaatori juhtimise meetodikat. Lineaarselt proportsionaalse rõhu järgi süsteemi juhtimine võib pigem tuttav olla kütte- ja jahutussüsteemide ringluspumpade juures, kuid miks ei võiks seda proovida rakendada ka VAV-süsteemide puhul, kus muutuvad õhu vooluhulgad tingivad vajaduse ventilaatori tootlikkust ja töö rõhku vähendada? Selle eelduseks on süsteemi piirväärtuste teadmine rõhu proportsioonide seadistamisel. Minimaalse rõhu p_{\min} seadepunktiks on vaja teada dikteeriva haru nõutud õhu vooluhulga tagamiseks vajaminevat rõhku. Maksimaalse rõhu p_{\max} saamiseks liidame arvutuslikud õhu vooluhulgad kokku ja leiame sobiva suuruse. Juhtalgoritm pandi kokku vabalt programmeeritavas EasyIQ kontrollerris.



Joonis 22 Lineaarse proportsionaalse rõhu järgi juhtimise skeem

Katseseeriade 13-16 juures on tsoonides kasutusel nõo tavakasutuse olukord ning õhukogused kõikides VAV-klappides 40 l/s. Rõhk hakkab aga õhukoguse vähenedes samuti alanema ning ülejäänud veel lahtiolevad VAV-klapid avanema. Katseseeriade käigus on väga oluline lasta süsteemil stabiliseeruda.

Tabel 7 Lineaarselt proportsionaalse rõhu järgi juhtimine nominaalse õhu vooluhulgaga 40 l/s

Katse nr.	Rõhuanduri asukoht	VAV-1	VAV-2	VAV-3	VAV-4	VAV-5	VAV-6	Kirjeldus	
1	PE1	40	40	40	40	40	40	Kõik VAV-id 40l/s, reguleerklapid algasendis	Set13 @prop Pa
2	PE1	0	40	40	40	40	40	reguleerklapid algasendis	
3	PE1	0	0	40	40	40	40	reguleerklapid algasendis	
4	PE1	0	0	0	40	40	40	reguleerklapid algasendis	
5	PE1	0	0	0	0	40	40	reguleerklapid algasendis	
6	PE1	0	0	0	0	0	40	reguleerklapid algasendis	
7	PE1	40	0	0	0	0	0	reguleerklapid algasendis	
8	PE2	40	40	40	40	40	40	Kõik VAV-id 40l/s, reguleerklapid algasendis	Set14 @prop Pa
9	PE3	40	0	0	0	0	0	reguleerklapid algasendis	
10	PE4	0	0	0	0	0	40	reguleerklapid algasendis	
11	PE6	40	40	40	40	40	40	Kõik VAV-id 40l/s, reguleerklapid algasendis	Set15 @prop Pa
12	PE7	40	0	0	0	0	0	reguleerklapid algasendis	
13	PE8	0	0	0	0	0	40	reguleerklapid algasendis	Set16 @prop Pa
14	PE10	40	40	40	40	40	40	Kõik VAV-id 40l/s, rreguleerklapid algasendis	
15	PE10	40	0	0	0	0	0	reguleerklapid algasendis	
16	PE10	0	0	0	0	0	40	reguleerklapid algasendis	

Katseseeriade 17-20 juures on tsoonides kasutusel minimaalse koormatuse olukord ning õhu vooluhulgad kõikides VAV-klappides seadistatakse 10 l/s. Rõhk muutub eeldatavasti selle katsekomplekti juures kõige vähem.

Tabel 8 Lineaarselt proportsionaalse rõhu järgi juhtimine min. õhu vooluhulgaga 10 l/s

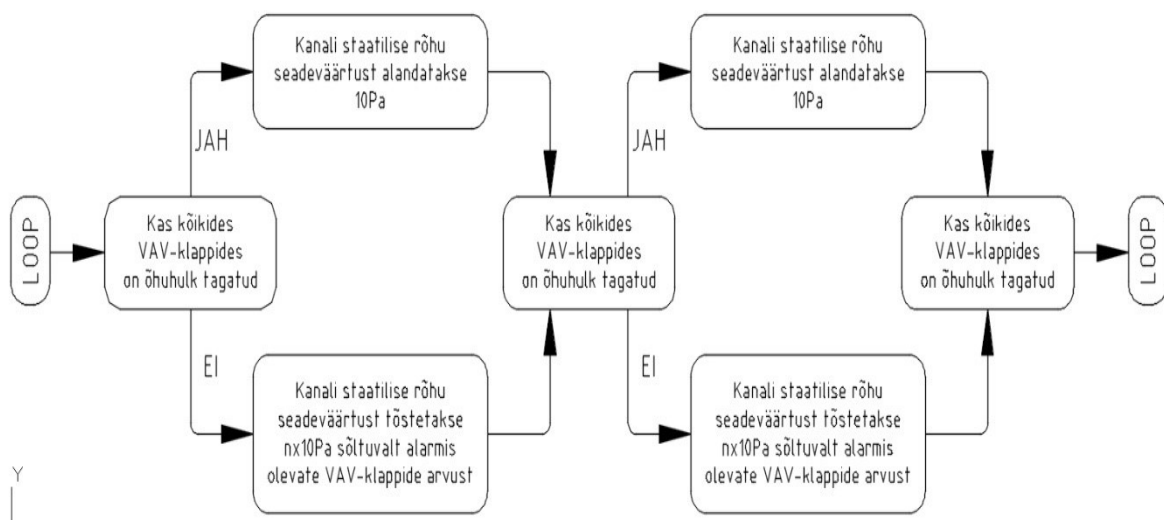
Katse nr.	Rõhuanduri asukoht	VAV-1	VAV-2	VAV-3	VAV-4	VAV-5	VAV-6	Kirjeldus	
1	PE1	10	10	10	10	10	10	Kõik VAV-id 10l/s, reguleerklapid algasendis	Set17 @prop Pa
2	PE1	0	10	10	10	10	10	reguleerklapid algasendis	
3	PE1	0	0	10	10	10	10	reguleerklapid algasendis	
4	PE1	0	0	0	10	10	10	reguleerklapid algasendis	
5	PE1	0	0	0	0	10	10	reguleerklapid algasendis	
6	PE1	0	0	0	0	0	10	reguleerklapid algasendis	
7	PE1	10	0	0	0	0	0	reguleerklapid algasendis	
8	PE2	10	10	10	10	10	10	Kõik VAV-id 10l/s, reguleerklapid algasendis	Set18 @prop Pa
9	PE3	10	0	0	0	0	0	reguleerklapid algasendis	
10	PE4	0	0	0	0	0	10	reguleerklapid algasendis	
11	PE6	10	10	10	10	10	10	Kõik VAV-id 10l/s, reguleerklapid algasendis	Set19 @prop Pa
12	PE7	10	0	0	0	0	0	reguleerklapid algasendis	
13	PE8	0	0	0	0	0	10	reguleerklapid algasendis	
14	PE10	10	10	10	10	10	10	Kõik VAV-id 10l/s, rreguleerklapid algasendis	Set20 @prop Pa
15	PE10	10	0	0	0	0	0	reguleerklapid algasendis	
16	PE10	0	0	0	0	0	10	reguleerklapid algasendis	

4.3.4 Katsestend 2 staatilise rõhu lähtestamise (SPR) järgi juhtimine

SPR juhtimisalgoritm on pandud kokku EasyIQ kontrolleri ning algoritm on koostatud lähtudes katsestend 2 ülesehitusest. Kuna katsestendis olevatel VAV-klappidel puudub klapiasendi tagasiside, siis klapi avatuse infot (nt 85...95% avatud) koostatava SPR-juhtimise algoritmis kasutada ei saa. Tagasisidena on võimalik kasutada ainult

mõõdetud õhu vooluhulka ja võrrelda seda etteantud seadepunktiga. Kui süsteemis on kõik VAV-klappide õhu vooluhulgad tagatud, võib teha rõhu lähtestamise.

Süsteemi stabiilse töötamise tagamiseks on mõistlik juhtimisalgoritmis defineerida tolerantsid, millal VAV-klapid loetakse nõ häires olevaks. Antud juhul kasutati kahte tingimust. Esiteks võrreldi mõõdetud õhu vooluhulga seadepunktiga ning veapiiriks anti $\pm 10\%$. Tingimus saab määravaks suuremate õhu vooluhulkade juures ning on samas suurusjärgus VAV-klapi tehase veamääraga. Kui aga õhu vooluhulgad on minimaalsed (nt 10l/s), ei taga 10% ääretingimus süsteemi stabiilsust. Selle jaoks lisatakse teise tingimuseks ± 5 l/s ning võrreldakse neid kahte omavahel. Suurem väärtus saadetakse otsustusprotsessis edasi. Et tagada tingimuste jaoks stabiilset sisendit, kasutatakse õhu vooluhulga andmete kogumisel teatud perioodi keskmist. See aitab süsteemi stabiilsusele oluliselt kaasa. Edasi tekib kaks valikut, kas õhu vooluhulgad on tagatud või ei ole. Kui on tagatud, siis algoritm alandab staatilise rõhu seadepunkti 10Pa võrra. Kui ei ole tagatud, tõstetakse rõhku $n \times 10$ Pa, kus n tähistab häires olevate VAV-klappide arv. Selline lähenemine reageerib kiiremini süsteemis toimuvatele muutustele. Edasi korratakse sama mustrit iga 1 minuti tagant. Kõiki tingimuste parameetreid on võimalik muuta lähtudes aluseks oleva ventilatsioonisüsteemi ülesehitusest. Kasutatavate VAV-klappide el. ajamite kiirus, projekteeritud vajaminevad õhu vooluhulgad, süsteemi kasutuskord jne.



Joonis 23 SPR juhtimise lihtsustatud tööõhimoete.

Katseseeriade 21-24 juures on tsoonides kasutusel nõ tavakasutuse olukord ning õhukogused kõikides VAV-klappides 40 l/s. Rõhk hakkab aga õhukoguse vähenedes samuti alanema ning ülejäänud veel lahtiolevad VAV-klapid järk-järgult avanema. Katseseeriade käigus on väga oluline lasta süsteemil stabiliseeruda.

Tabel 9 SPR-i järgi juhtimine nominaalse õhu vooluhulgaga 40 l/s

Katse nr.	Rõhuanduri asukoht	VAV-1	VAV-2	VAV-3	VAV-4	VAV-5	VAV-6	Kirjeldus	
1	PE1	40	40	40	40	40	40	Kõik VAV-id 40l/s, reguleerklapid algasendis	Set21 @spr Pa
2	PE1	0	40	40	40	40	40	reguleerklapid algasendis	
3	PE1	0	0	40	40	40	40	reguleerklapid algasendis	
4	PE1	0	0	0	40	40	40	reguleerklapid algasendis	
5	PE1	0	0	0	0	40	40	reguleerklapid algasendis	
6	PE1	0	0	0	0	0	40	reguleerklapid algasendis	
7	PE1	40	0	0	0	0	0	reguleerklapid algasendis	
8	PE2	40	40	40	40	40	40	Kõik VAV-id 40l/s, reguleerklapid algasendis	Set22 @spr Pa
9	PE3	40	0	0	0	0	0	reguleerklapid algasendis	
10	PE4	0	0	0	0	0	40	reguleerklapid algasendis	
11	PE6	40	40	40	40	40	40	Kõik VAV-id 40l/s, reguleerklapid algasendis	Set23 @spr Pa
12	PE7	40	0	0	0	0	0	reguleerklapid algasendis	
13	PE8	0	0	0	0	0	40	reguleerklapid algasendis	
14	PE10	40	40	40	40	40	40	Kõik VAV-id 40l/s, rreguleerklapid algasendis	Set24 @spr Pa
15	PE10	40	0	0	0	0	0	reguleerklapid algasendis	
16	PE10	0	0	0	0	0	40	reguleerklapid algasendis	

Katseeriade 25-28 juures on tsoonides kasutusel miinimum koormatuse olukord ning õhukogused kõikides VAV-klappides seadistatakse väärtusele 10 l/s. Ääritingimustest lähtuvalt on sellise süsteemi täpne ja stabiilne juhtimine kõige keerulisem.

Tabel 10 SPR-i järgi juhtimine min õhu vooluhulgaga 10 l/s

Katse nr.	Rõhuanduri asukoht	VAV-1	VAV-2	VAV-3	VAV-4	VAV-5	VAV-6	Kirjeldus	
1	PE1	10	10	10	10	10	10	Kõik VAV-id 10l/s, reguleerklapid algasendis	Set25 @spr Pa
2	PE1	0	10	10	10	10	10	reguleerklapid algasendis	
3	PE1	0	0	10	10	10	10	reguleerklapid algasendis	
4	PE1	0	0	0	10	10	10	reguleerklapid algasendis	
5	PE1	0	0	0	0	10	10	reguleerklapid algasendis	
6	PE1	0	0	0	0	0	10	reguleerklapid algasendis	
7	PE1	10	0	0	0	0	0	reguleerklapid algasendis	
8	PE2	10	10	10	10	10	10	Kõik VAV-id 10l/s, reguleerklapid algasendis	Set26 @spr Pa
9	PE3	10	0	0	0	0	0	reguleerklapid algasendis	
10	PE4	0	0	0	0	0	10	reguleerklapid algasendis	
11	PE6	10	10	10	10	10	10	Kõik VAV-id 10l/s, reguleerklapid algasendis	Set27 @spr Pa
12	PE7	10	0	0	0	0	0	reguleerklapid algasendis	
13	PE8	0	0	0	0	0	10	reguleerklapid algasendis	
14	PE10	10	10	10	10	10	10	Kõik VAV-id 10l/s, rreguleerklapid algasendis	Set28 @prop Pa
15	PE10	10	0	0	0	0	0	reguleerklapid algasendis	
16	PE10	0	0	0	0	0	10	reguleerklapid algasendis	

4.3.5 Katsestend 2 tulemuste kohaldamine näidissüsteemile

Paremaks tulemuste võrdlemiseks tehakse saadud katsetulemuste põhjal näidisarvutus ühe olemasoleva koolihoone ventilatsiooniseadme ventilaatorite elektrikasutusele. Leitakse erinevate juhtimismeetodite rakendamisel aastane elektrienergia tarbimine. Arvutuste tegemisel kasutatakse määruse „Hoone energiatõhususe arvutamise metodika“ abi. Haridushoone kasutusprofiil on esitatud tabelis 11.

Tabel 11 Haridushoone energiaarvutuse detailsed kasutusastmed

Haridushoone kasutusprofiil											
00:00–01:00	01:00–02:00	02:00–03:00	03:00–04:00	04:00–05:00	05:00–06:00	06:00–07:00	07:00–08:00	08:00–09:00	09:00–10:00	10:00–11:00	11:00–12:00
0	0	0	0	0	0	0	0	06	06	06	04
12:00–13:00	13:00–14:00	14:00–15:00	15:00–16:00	16:00–17:00	17:00–18:00	18:00–19:00	19:00–20:00	20:00–21:00	21:00–22:00	22:00–23:00	23:00–00:00
03	06	06	03	0	0	0	0	0	0	0	0

Ventilaatori rõhutõus Δp_v arvutatakse järgmise valemiga:

$$\Delta p_v = \Delta p_m + \Delta p_t \quad (24)$$

kus

Δp_m - ventilatsiooniseadme rõhulang (Pa),

Δp_t - torustiku rõhulang (Pa).

Ventilaatori elektrivõimsus P_v (W) arvutatakse järgmise valemiga:

$$P_v = \frac{\Delta p_v \times L}{\eta_{ft}} \quad (25)$$

kus

Δp_v - ventilaatori rõhutõus (Pa),

L - ventilaatori õhu vooluhulk (m^3/s),

η_{ft} - ventilaatori summaarne kasutegur, mis arvestab ventilaatori kasutegurit, rihmülekande kasutegurit, mootori kasutegurit ja võimalikku pöörlemiskiiruse reguleerimise kasutegurit.

Ventilatsiooniseadme, mille õhu vooluhulk on üle $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$, iga ventilaatori elektritarbimine arvutatakse eraldi. Ventilaatori elektritarbimine E_v (kWh/a) arvutatakse järgmise valemiga:

$$E_v = P_v \frac{\tau_d \tau_w}{24 t} \quad (26)$$

kus

P_v - ventilaatori elektrivõimsus (kW),

τ_d - seadme käidutundide arv (h) ööpäevas arvutuslikul õhu vooluhulgal,

τ_w - seadme käidupäevade arv (d) nädalas arvutuslikul õhu vooluhulgal,

t - arvutusperioodi pikkus 8760 (h).

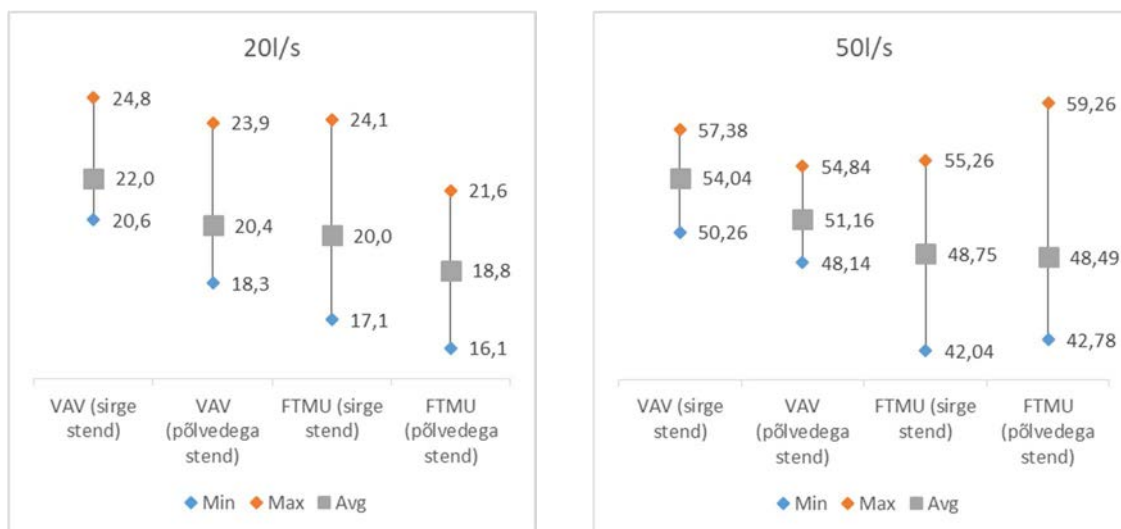
Arvestatud on 5 päevase õppenädalaga ja arvutuste lihtsustamiseks ei arvestata koolivaheaegadega.

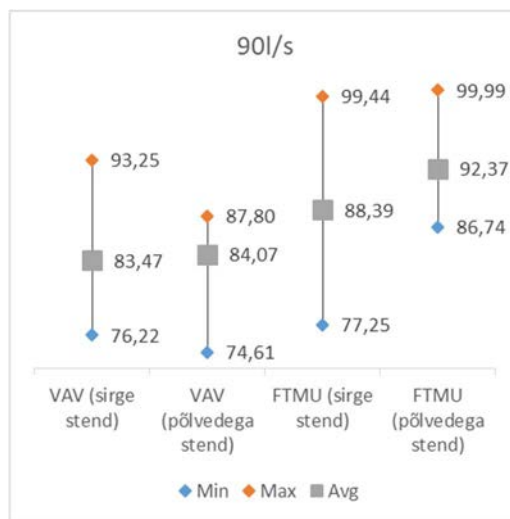
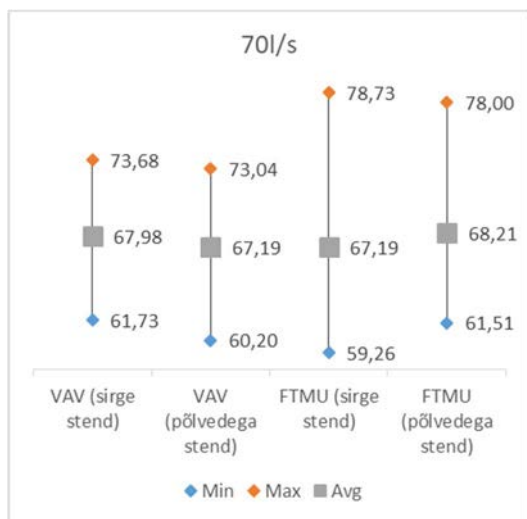
5 TULEMUSED JA ANALÜÜS

Antud peatükis esitatakse töö tulemused ning nende analüüs. Sisuliselt jaotub tulemuste ja analüüsi peatükk viieks. Esimeses alapeatükis antakse ülevaade laboristend 1 mõõtmistulemustest. Eelkõige püütakse vastust anda küsimusele, kas kasutatavate seadmetega kogutud andmestik on usaldusväärne ja kuidas erinevad VAV-süsteemi komponendid toimivad. Teises alapeatükis võrreldakse laboristend 2 aerodünaamilise arvutuse tulemusi kontroll-mõõtetulemustega. Kolmandas alapeatükis esitatakse laboristend 2-s tehtud konstantse staatilise rõhu järgi juhtimise meetodi katsetulemused ja hinnatakse sellise juhtimismeetodi otstarbekust. Neljandas alapeatükis esitatakse laboristend 2-ga tehtud lineaarselt muutuva proportsionaalse staatilise rõhu juhtimise meetodi katse-tulemused ja analüüsitakse süsteemi eeliseid ja puudusi. Viiendas alapeatükis esitatakse laboristend 2-ga tehtud SPR juhtimismeetodi katsetulemused ja analüüsitakse juhtimismeetodi positiivseid ning negatiivseid külgi võrreldes eelnevatega.

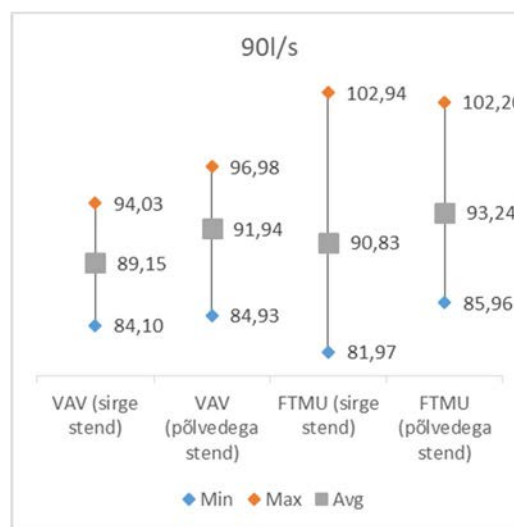
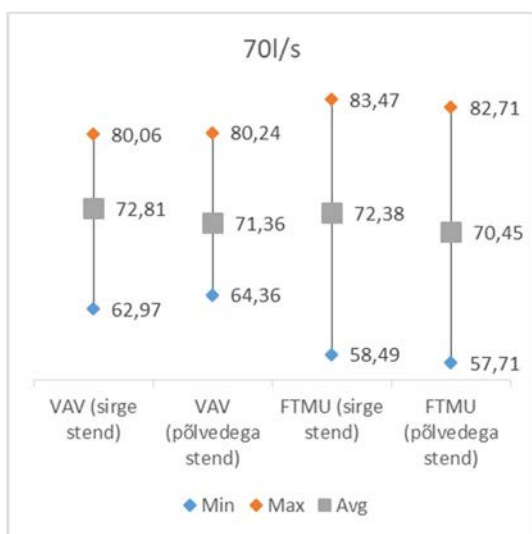
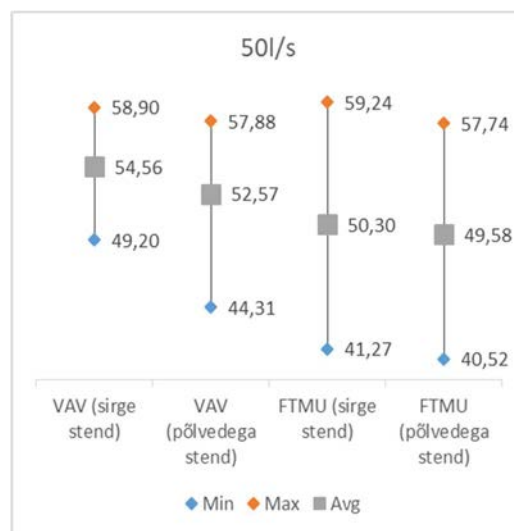
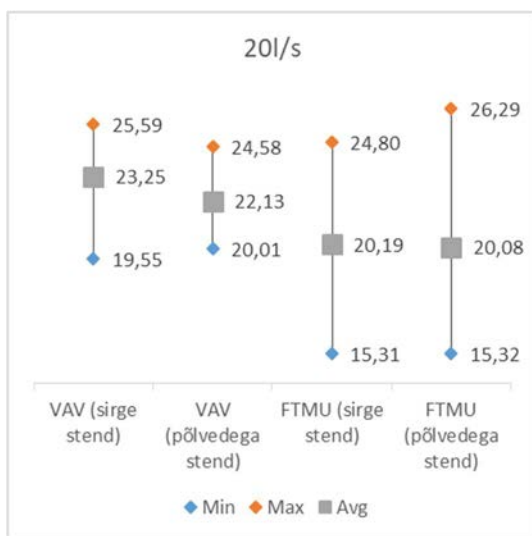
5.1 Katsestand 1 mõõtetulemused

Katsestandis 1 mõõdeti erinevate õhu vooluhulkadel (20 l/s, 50 l/s, 70 l/s, 90 l/s) ja takistustel nelja erinevat skeemi. Mõõtmiste andmestikku võrreldes ei saa otseselt öelda, kas näiteks põlvede paigutamine vahetult VAV-klapi ette, muudaks olulisel määral saadud tulemusi.





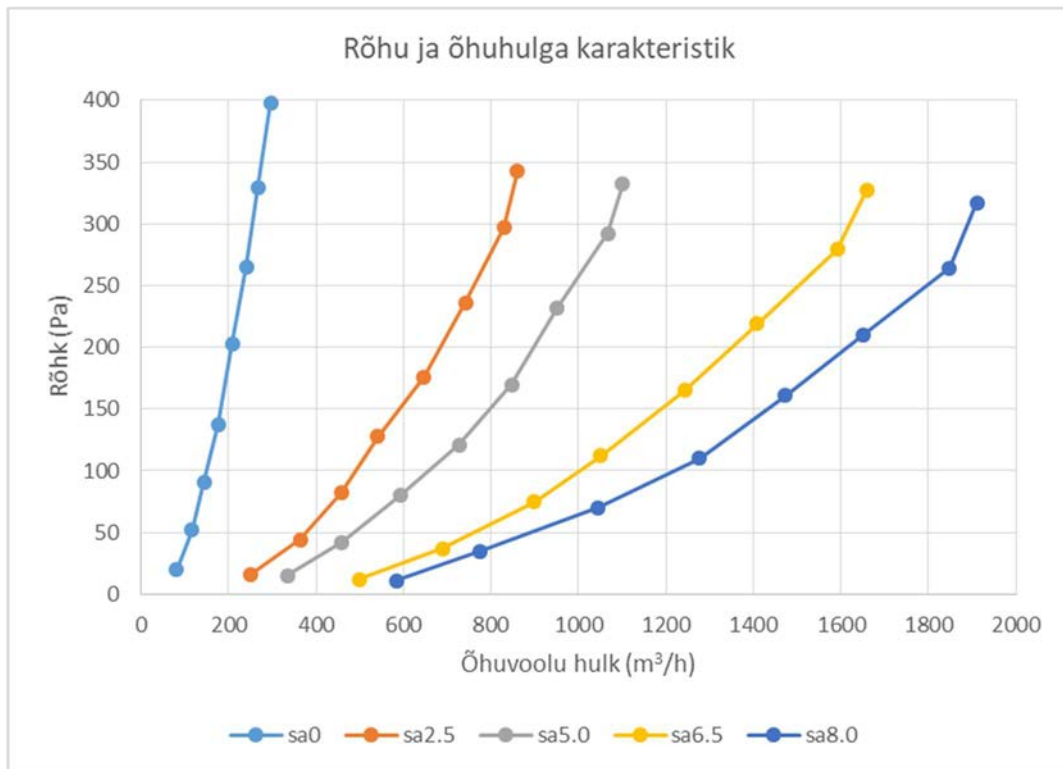
Joonis 24 Stend 1 sissepuhke seeriade õhu vooluhulkade (min, max, avg) tulemused



Joonis 25 Stend 1 väljatõmbe seeriade õhu vooluhulkade (min, max, avg) tulemused

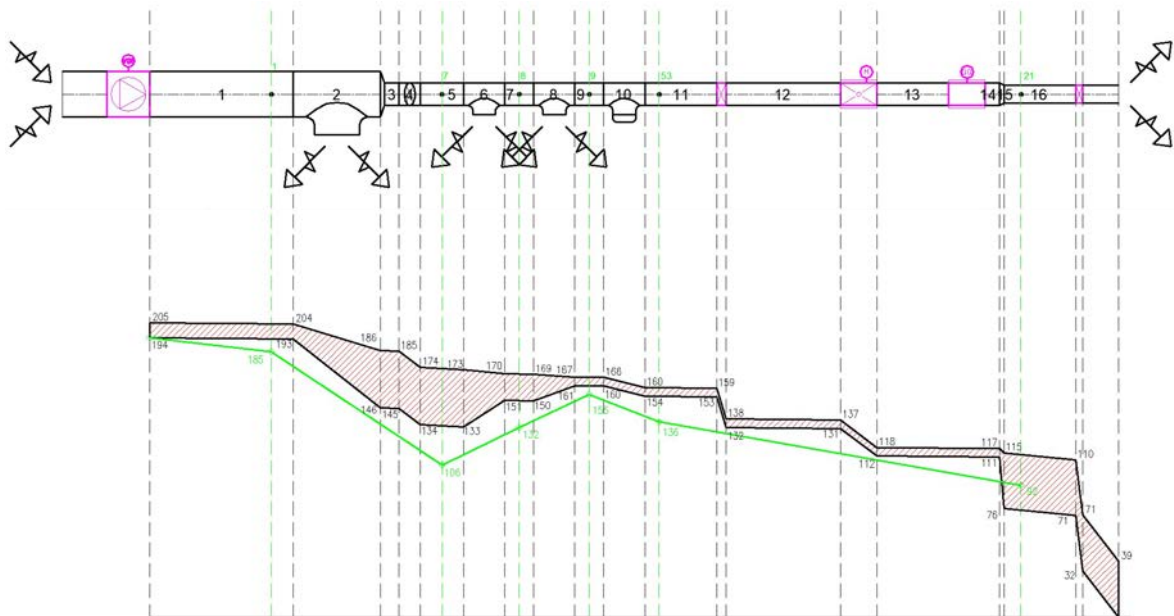
5.2 Katsestend 2 aerodünaamilise arvutuse ja mõõtetulemuste võrdlus

Katsestend 2-le tehti erinevate takistuste ja ventilaatori tootlikkuse mõõtmised, mille tulemusena koostati süsteemi karakteristik (joonis 32). Ventilaatori tootlikkus varieerus 30...100% vahel ja tsoonide reguleerklappide seadearve muudeti vahemikus 0.0...8.0.



Joonis 26 Katsestend 2 süsteemi karakteristik

Parema ülevaate saamiseks katsestendist tehti sellele aerodünaamiline arvutus ning mõõdeti tsoonides olevates mõõtepunktides staatilist rõhku ventilaatori tootlikkusel 70% ja 100%. Arvutatud väärtuste ja mõõdetud tulemuste põhjal koostati rõhuepüürid ja võrreldi arvutuslikke tulemusi mõõdetud väärtustega (joonisel 34 olev roheline joon). Epüüril on visuaalselt näha kogurõhu, dünaamilise rõhu ja staatilise rõhu muutused kolmikutes, põlvedes ja torustikus. Samuti on visuaalselt näha staatilise rõhu taastumine kolmikutes, kui õhuvoolukiirus (st dünaamiline rõhk) torustikus väheneb.

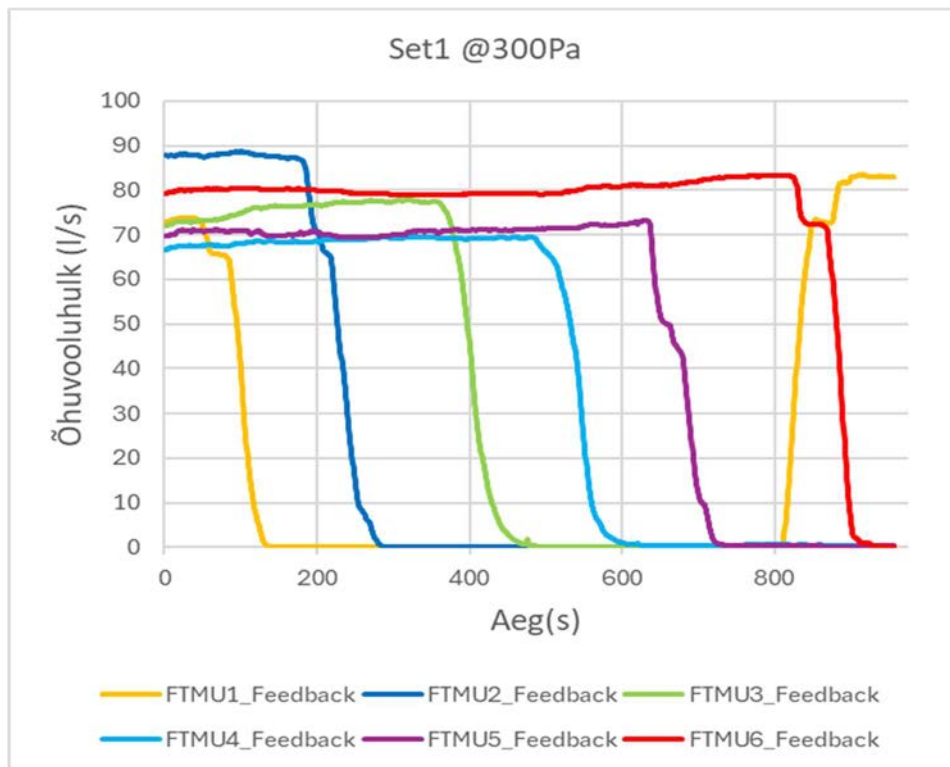


Joonis 27 Aerodünaamiliste arvutuste ja mõõtetulemuste graafiline võrdlus

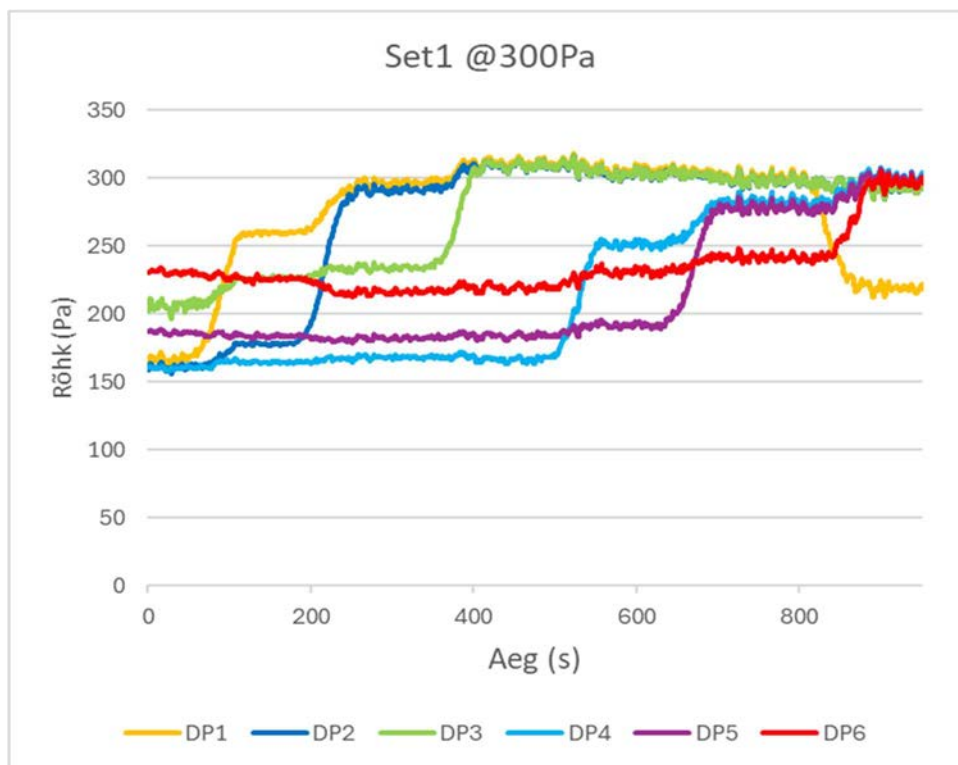
5.3 Konstantse staatilise rõhu juhtimismeetodi mõõtetulemused ja analüüs

Katseseeriade Set1 kuni Set12 kasutati süsteemi juhtimiseks konstantset rõhku (300 Pa) ja kolme erinevat õhu vooluhulka: max (VAV-klapp 100% avatud), 40 l/s ja 10 l/s. Lisaks suleti vastavalt katselegendile VAV-klappe ning fikseeriti muutused tsoonides olevates rõhuandurites ning ventilaatori voolutugevuses. Ka muudeti ventilaatori juhtimiseks vajaliku rõhuanduri asukohta süsteemis, et näha võimalikku mõju süsteemi töö stabiilsusele. Ventilaatori töö rõhu mõõtepunktid PE1, PE2, PE6, PE10 on ära näidatud, joonisel 20.

Set1.1-1.7 katseseeria käigus joonistub selgelt välja süsteemi aerodünaamika (Joonis 29), kus klappide sulgemisel koheselt muutub ka mõõdetud staatiline rõhk. Osades suletud VAV-klappidega tsoonides on mõõdetud rõhk isegi suurem kui ventilaatori seadepunkt 300 Pa, mis on seletatav dünaamilise rõhu komponendi puudumisega st õhu liikumise kiirus on peaaegu null ja kogurõhk võrdsustub mõõdetava staatilise rõhuga.

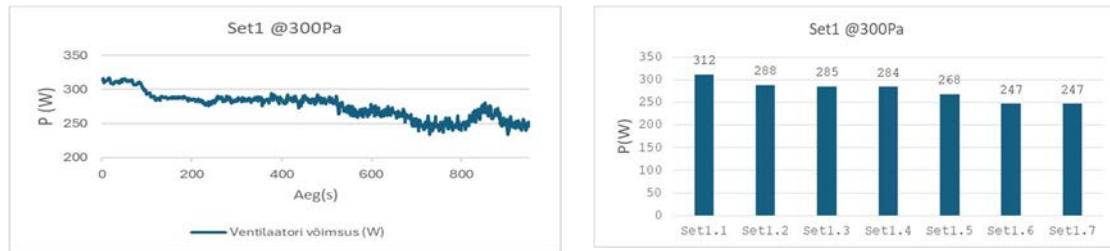


Joonis 28 Katseseeria Set1.1-1.7 õhu vooluhulkade diagramm



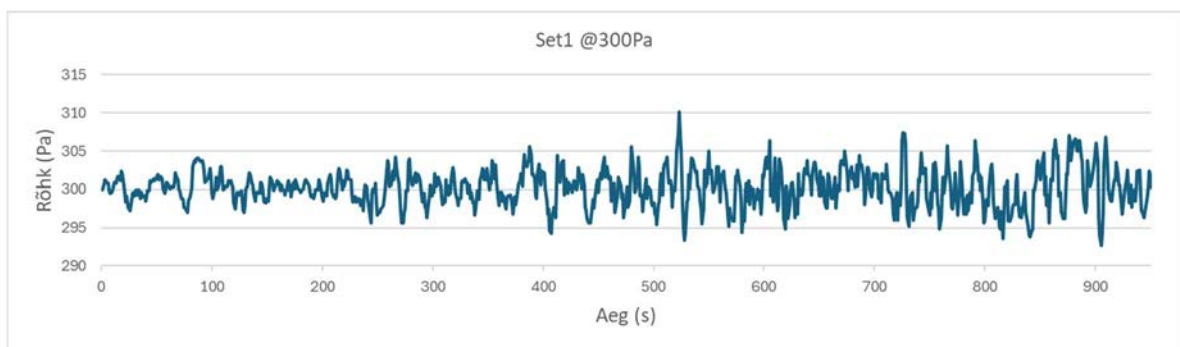
Joonis 29 Katseseeria Set1.1-1.7 staatiliste rõhkude diagramm

Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 312 W ja 247 W vahele. Seega õhu vooluhulga vähenedes töötas ka ventilaator madalamatel pööretel ning võimsustarve oli sõltuvalt VAV-klappide asendist kuni 20,8% väiksem.



Joonis 30 Set1.1-1.7 ventilaatori tarbitava võimsuse diagramm

Katseseeria Set1 puhul asus ventilaatori tööd juhtiv rõhuandur vahetult peale ventilaatorit ja ühe lähendusena oleks eeldanud suuremat töö rõhupunkti ümber kõikumist. Mõõdetud väärtused jäid samas vahemikku 293...310 Pa ja standardhälve oli 2,42.



Joonis 31 Set1.1-1.7 ventilaatori tööpunkti diagramm

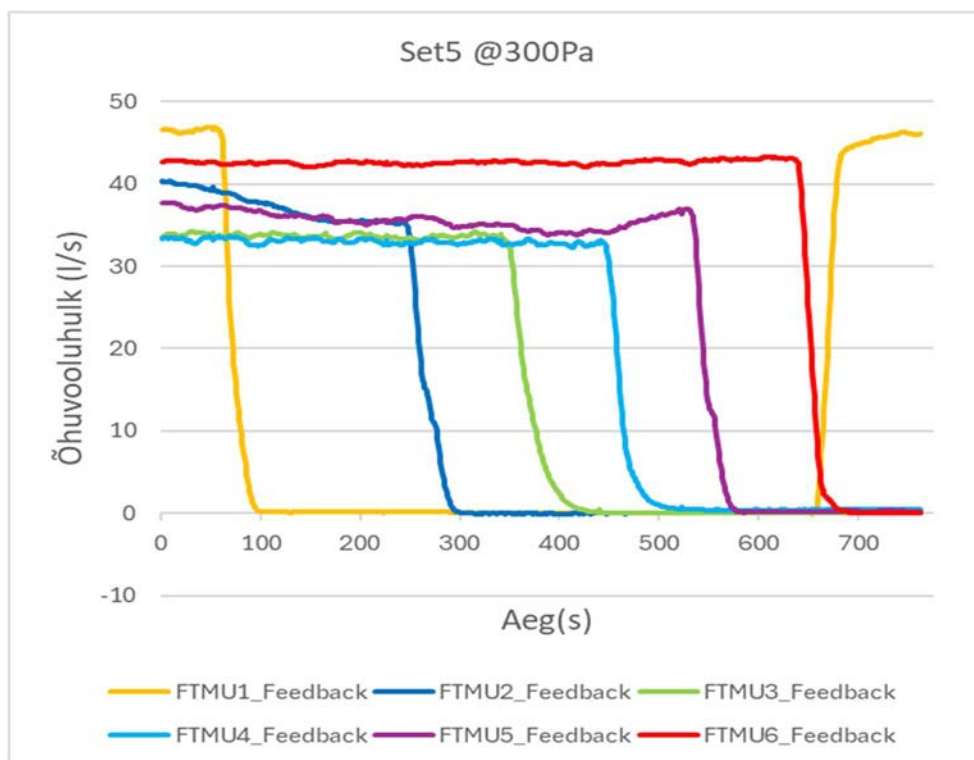
Set2 katseseerias tõsteti ventilaatorit juhtiv rõhuandur kaugemale süsteemi, kahe harutorustiku vahele mõõtepunkti PE2. Seejärel korraldati lühendatud kujul Set1 katseseeriat. Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 292 W ja 247 W vahele ning võimsustarve alanes väiksema õhu vooluhulga juures kuni 15,4%. Set2 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused jäid vahemikku 293...310 Pa ja standardhälve oli 3,00, mis on mõnevõrra suurem kui Set1 puhul. Seda saab seletada mõõtepunkti vahetus läheduses olevate haruliinide kolmikutega, milles võivad tekkida pöörangute ja õhukoguste muutuste tõttu turbulentsed õhuvoolud.

Set3 katseseerias paigutati ventilaatorit juhtiv rõhuandur veel kaugemale süsteemi, tsoone 1-3 teenindava harutorustiku kollektori otsa mõõtepunkti PE6. Seejärel viidi läbi Set2-ga sarnane katseseeria. Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 365 W ja 249 W vahele ja võimsustarve alanes väiksema õhu vooluhulga juures kuni 31,8%. Set3 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused jäid vahemikku 290...313 Pa ja standardhälve oli 4,03, mis on omakorda suurem kui Set1 ja Set2 puhul. Kuna rõhuanduri asukohaks on tsoonide 1-3 harutorustiku kollektori lõpukolmik, mis on ühest otsast pimedaks tehtud, siis võib seal eeldada õhu turbulentset liikumist.

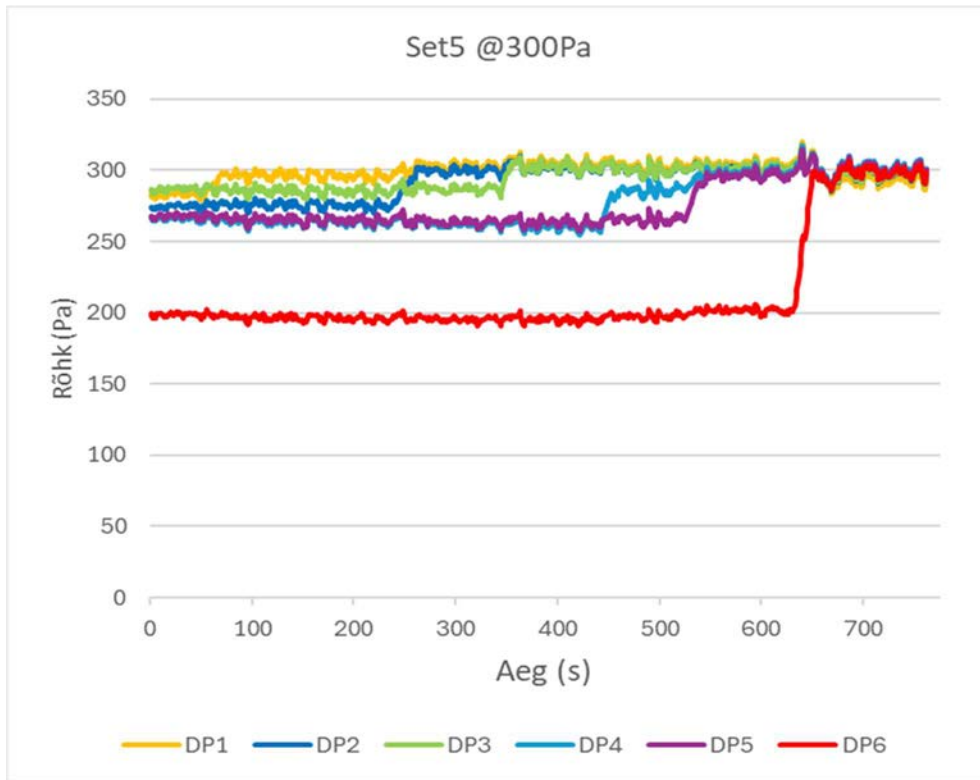
Konstantse rõhu ja max õhu vooluhulga järgi juhtimise viimases Set4 katseseerias tõsteti ventilaatorit juhtiv rõhuandur tsoone 4-6 teenindava harutorustiku kollektori otsa mõõtepunkti PE10. Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 380 W ja 250 W vahele ja võimsustarve alanes väiksema õhu vooluhulga juures kuni 34,2%.

Set4 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused jäid vahemikku 286...314 Pa ja standardhälve oli 4,54, mis on omakorda suurem kui Set1, Set2 ja Set3 puhul. Kuna rõhuanduri asukohaks on tsoonide 4-6 harutorustiku kollektori lõpukolmik, mis on ühest otsast pimedaks tehtud, siis võib seal sarnaselt PE6 mõõtepunktiga eeldada õhu turbulentsset liikumist.

Set5 katseseerias tõsteti ventilaatorit juhtiv rõhuandur tagasi mõõtepunkti PE1, mis asus vahetult ventilaatori järel. Lisaks sooviti tekitada olukord, kus üks tsoon oleks teistest oluliselt suurema takistusega ja teine tsoon jällegi väiksema takistusega. Seda selleks, et näha sellise konfiguratsiooni mõju kogu süsteemi toimimisele. Selleks muudeti 6. tsooni reguleerklappide asendid maksimaalselt kinnisteks (sa 0) ja 1. tsooni reguleerklappide asendid maksimaalselt avatuks (sa 8.0). Kui eelmistes katseseeriates olid VAV-klapid tööasendis 100% avatud, siis järgneva 4 seeria puhul kasutati väärtust 40 l/s. Ventilaatori töö rõhuks oli jätkuvalt 300 Pa. Joonisel 47 on hästi näha kinnise reguleerklapi poolt tekitatud suur rõhulang. Nelja VAV-klapi õhu vooluhulgad jäid lubatud veamäära ($\pm 15\%$) sisse, kahel klakil aga mitte. Tulemused olid vastavalt 16,4%, -1,0%, -15,0%, -17,0%, -7,4% ja 6,6%.

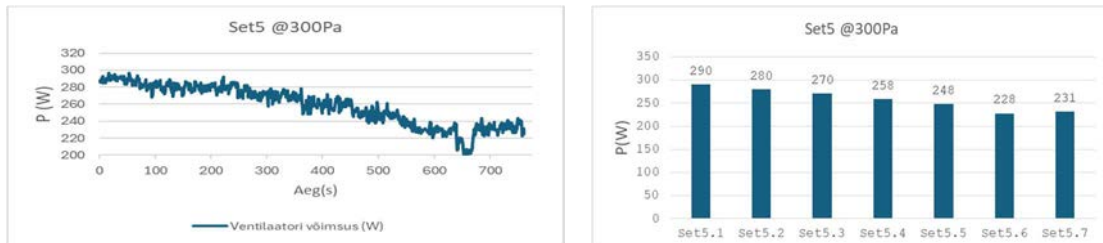


Joonis 32 Set5.1-5.7 õhu vooluhulkade diagramm



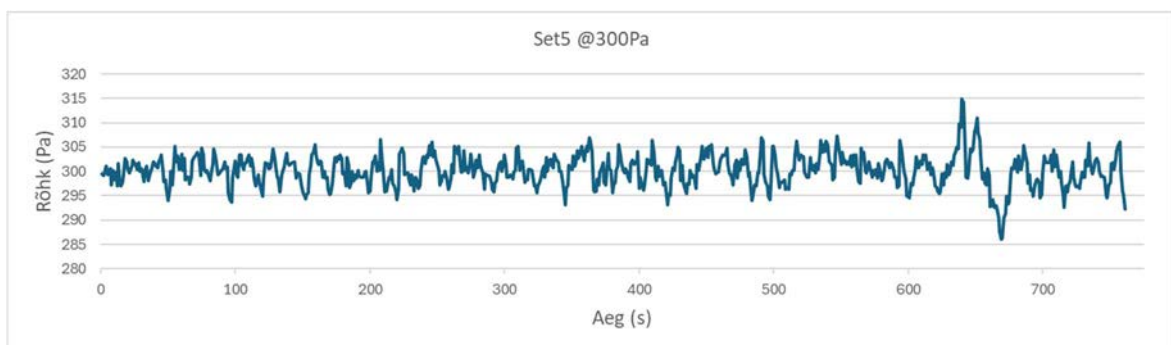
Joonis 33 Set5.1-5.7 staatiliste rõhkude diagramm

Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 290 W ja 231 W vahele ja võimsustarve alanes väiksema õhu vooluhulga juures 20,3%.



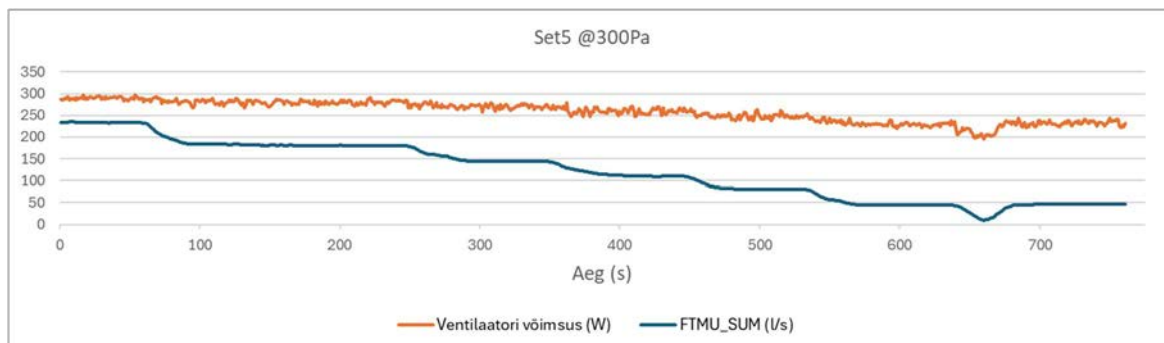
Joonis 34 Set5.1-5.7 ventilaatori tarbitava võimsuse diagramm

Set5 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused jäid vahemikku 286...314 Pa ja standardhälve oli 3,19.



Joonis 35 Set5.1-5.7 ventilaatori tööpunkti rõhu diagramm

Jooniselt 36 on näha, et konstantse staatilise rõhu juhtimisstrateegial on suhteliselt väike mõju ventilaatori energiatarbele. Võimsustarve vähenes 20,3%, samal ajal kui õhu vooluhulk vähenes 6 korda.



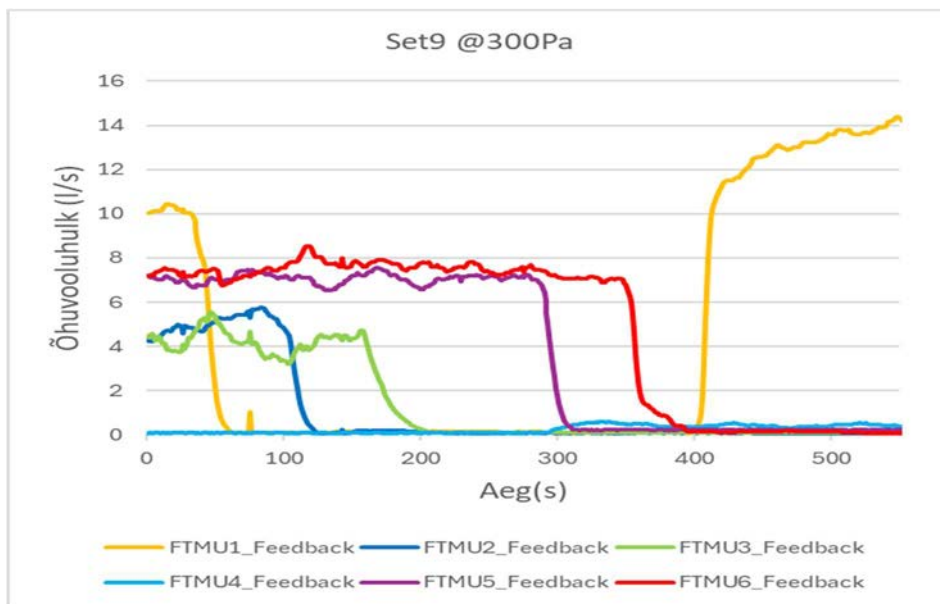
Joonis 36 Set5.1-5.7 ventilaatori võimsustarve ja õhu vooluhulga diagramm

Set6 katseseerias tõsteti ventilaatorit juhtiv rõhuandur kahe harutorustiku vahele mõõtepunkti PE2. Jällegi eristub tsoon 6 rõhukõver, mis on seotud reguleerklapi abil suure takistuse tekitamisega. Nelja VAV-klapi õhu vooluhulgad jäid lubatud veamäära ($\pm 15\%$) sisse, kahel klapi aga mitte. Tulemused olid vastavalt 15,8%, 1,6%, -19,1%, -10,9%, -5,0% ja 6,3%. Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 272 W ja 222 W vahele ja võimsustarve alanes väiksema õhu vooluhulga juures kuni 18,4%. Set6 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused jäid vahemikku 283...318 Pa ja standardhälve oli 4,05.

Set7 katseseerias tõsteti ventilaatorit juhtiv rõhuandur uuesti tsoone 1-3 teenindava harutorustiku kollektori otsa mõõtepunkti PE6. Nelja VAV-klapi õhu vooluhulgad jäid lubatud veamäära ($\pm 15\%$) sisse, kahel klapi aga mitte. Tulemused olid vastavalt 15,1%, -11,8%, -18,8%, -13,6%, -4,4% ja 5,3%. Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 293 W ja 223 W vahele ning võimsustarve alanes väiksema õhu vooluhulga juures kuni 23,9%. Set7 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused jäid vahemikku 289...315 Pa ja standardhälve oli 4,09, mis ei erine oluliselt eelnevate seeriaste tulemustest.

Set8 katseseerias tõsteti ventilaatorit juhtiv rõhuandur tsoone 4-6 teenindava harutorustiku kollektori otsa mõõtepunkti PE10. Nelja VAV-klapi õhu vooluhulgad jäid lubatud veamäära ($\pm 15\%$) sisse, kahel klapi aga mitte. Tulemused olid vastavalt 10,4%, -12,3%, -24,4%, -16,6%, -6,1% ja 6,6%. Ventilaatori võimsustarve jäi keskmiselt vahemikku 291 W ja 227 W vahele. Seega võimsustarve alanes väiksema õhu vooluhulga puhul kuni 22,0%. Set8 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused jäid vahemikku 287...315 Pa ja standardhälve oli 3,86.

Set9 katseseerias tõsteti ventilaatorit juhtiv rõhuandur taaskord mõõtepunkti PE1, mis asub vahetult ventilaatori järel. 1. ja 6. tsooni reguleerklappide asendid jäeti muutmata. Uueks õhu vooluhulgaks VAV-klappidel 10 l/s. Ventilaatori töö rõhuks jätkuvalt 300 Pa. Tulenevalt väikesest reguleeritava õhu kogusest ei joonistu nii selgelt välja tsoon 6 rõhukadu. Küll aga on selgelt näha VAV-klappide mitterahuldav töö ettenähtud õhu vooluhulga hoidmisel. Ainult VAV-klapp 1 suudab tagada õhu vooluhulka 10 l/s. Eraldi toon välja VAV-klapi 4, mis ei avane üldse. Teiste puhul jääb veamäär 25-60% vahele, mis ei ole samuti aktsepteeritav. Kindlasti mängib selles oma osa kõrge ventilaatori töö rõhu seadepunkt.

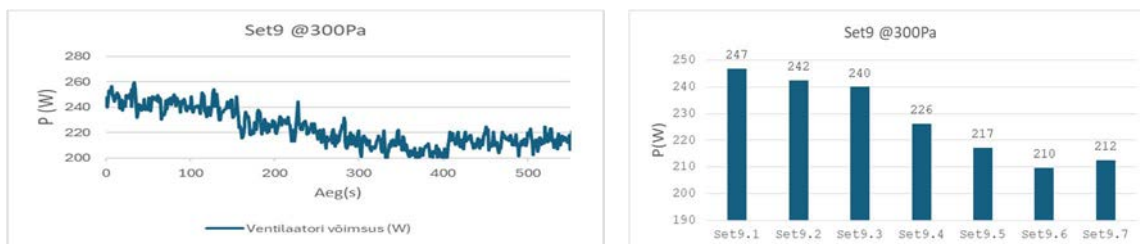


Joonis 37 Set9.1-9.7 õhu vooluhulkade diagramm



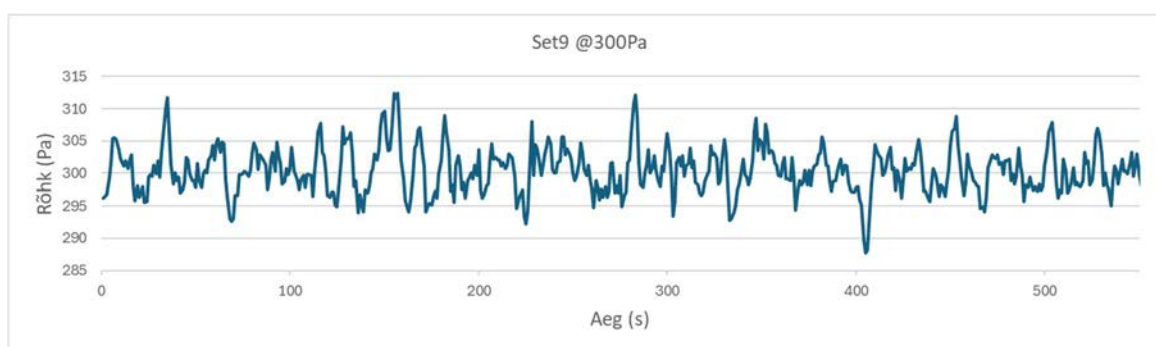
Joonis 38 Set9.1-9.7 staatiliste rõhkude diagramm

Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 247 W ja 212 W vahele ja võimsustarve alanes väiksema õhu vooluhulga juures kuni 14,2%.



Joonis 39 Set9.1-9.7 ventilaatori tarbitava võimsuse diagramm

Set9 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused jäid vahemikku 288...312 Pa ja standardhälve oli 3,56.



Joonis 40 Set9.1-9.7 ventilaatori tööpunkti rõhu diagramm

Set10 katseseerias tõsteti ventilaatorit juhtiv rõhuandur kahe harutorustiku vahele mõõtepunkti PE2. Õhu vooluhulkade reguleerimisega ei tule süsteem jätkuvalt toime. VAV-klapp 4 jääb täiesti suletuks ja VAV-klapp 2 veamäär on 80%. Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 230 W ja 203 W vahele. Seega võimsustarve alanes väiksema õhu vooluhulga puhul 11,7%. Set10 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused jäid vahemikku 290...313 Pa ja standardhälve oli 3,98.

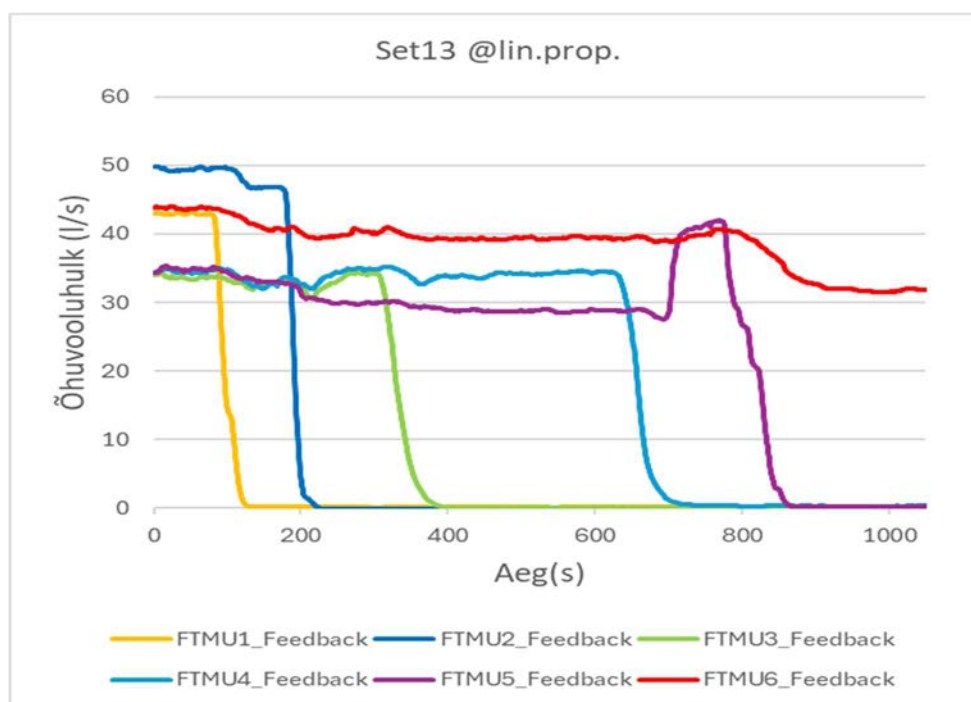
Set11 katseseerias tõsteti ventilaatorit juhtiv rõhuandur tsoone 1-3 teenindava harutorustiku kollektori otsa mõõtepunkti PE6. Sarnaselt Set9 ja Set10 katseseeriatega ei avane VAV-klapp 4 üldse ja teiste klappide veamäär kõigub 8-58% vahel. Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 239 W ja 201 W vahele ja võimsustarve alanes väiksema õhu vooluhulga juures kuni 15,9%. Set11 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused jäid vahemikku 291...323 Pa ja standardhälve oli 4,27.

Set12 katseseerias paigaldati ventilaatorit juhtiv rõhuandur tsoone 4-6 teenindava harutorustiku kollektori otsa mõõtepunkti PE10. Nelja VAV-klapi õhu vooluhulgad jäid lubatud veamäärade ($\pm 15\%$) sisse, kahel klakil aga mitte. VAV-klapp 4 jääb täiesti suletuks ja ainult VAV-klapp 5 veamäär on mõistlik so 4,1%. Ülejäänutel kõikus see

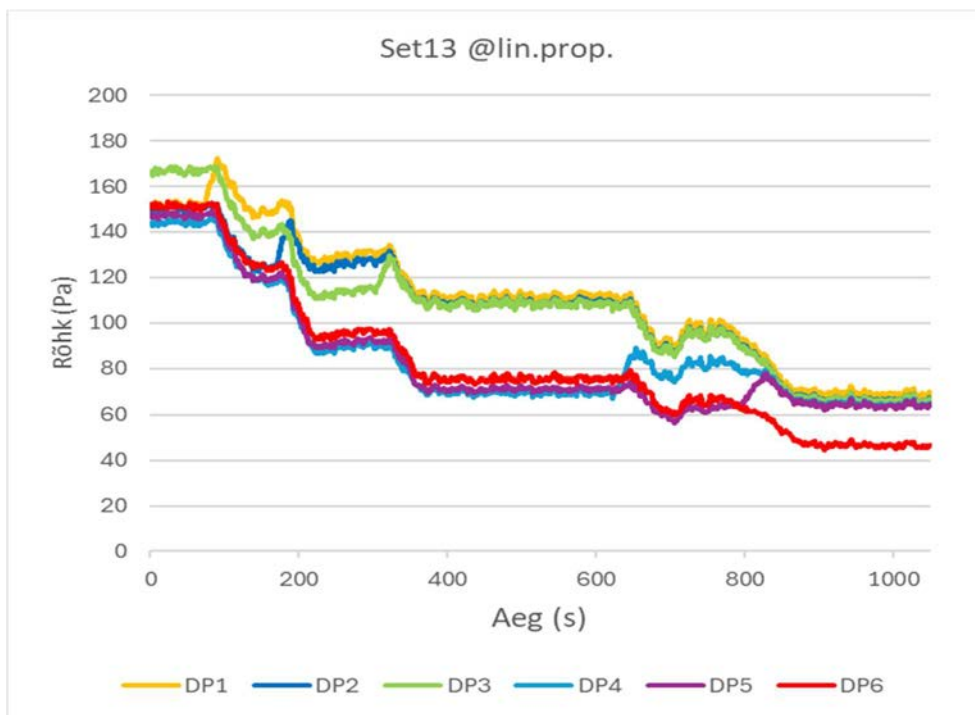
22,3...56,2% vahel. Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 237 W ja 197 W vahele ning võimsustarve alanes väiksema õhu vooluhulga juures kuni 16,9%. Set12 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused olid vahemikus 291...325 Pa ja standardhälve 4,36.

5.4 Lineaarselt proportsionaalse staatilise rõhu juhtimismeetodi mõõtetulemused ja analüüs

Set13 katseseerias lähtuti ventilatsioonisüsteemi juhtimisel lineaarselt proportsionaalse staatilise rõhu järgi juhtimisest. Plaan oli jätkata ühe suure ja ühe väikese takistusega tsooni konfiguratsiooniga, kuid seda ei tehtud, vaid taastati süsteemi esialgne seadistus võrdsete tsooni takistustega. Põhjuseks asjaolu, et kui süsteemis on üks suure takistusega tsoon, siis alumine seaderõhu piir jääb lähedaseks ülemisele ja juhtimisloogika ei oma mingit efekti. Rõhuandur paigaldati mõõtepunkti PE1 ja VAV-klappide seadevääruks 40l/s. Nelja VAV-klapi õhu vooluhulgad jäid lubatud veamäära ($\pm 15\%$) sisse, kahel klapil aga mitte. Tulemused olid vastavalt 7,3%, 24,7%, -16,3%, -14,1%, -13,0% ja 9,2%.



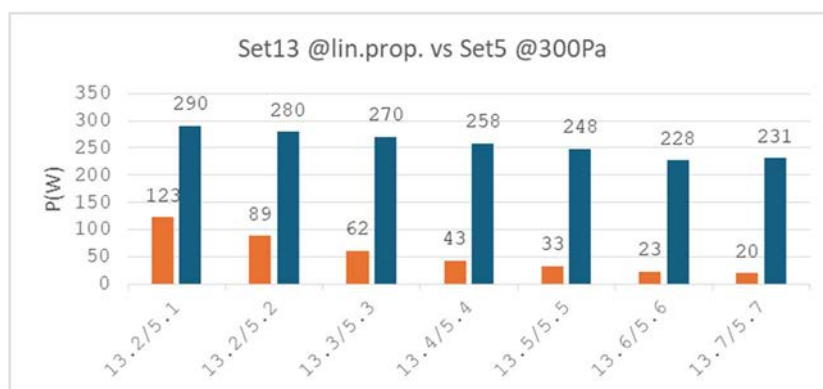
Joonis 41 Set13.1-13.7 õhu vooluhulkade diagramm



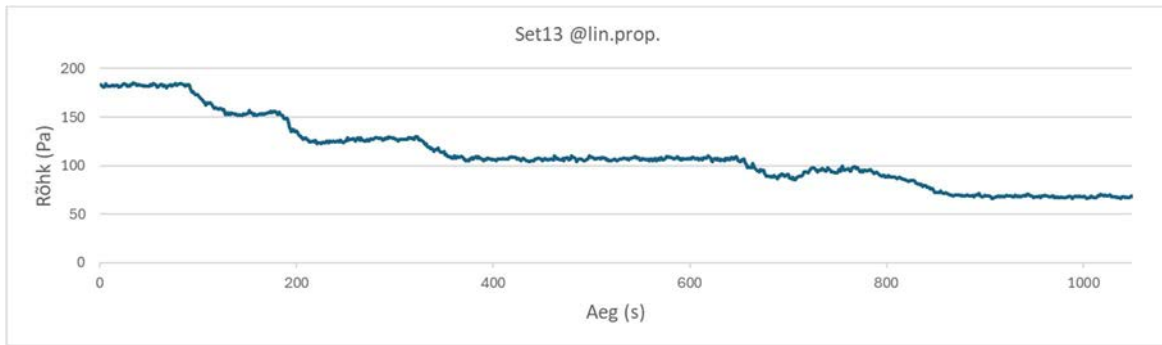
Joonis 42 Set13.1-13.7 staatiliste rõhkude diagramm

Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 123 W ja 20 W vahele ja võimsustarve alanes väiksema õhu vooluhulga juures kuni 83,7%. Pannes kõrvale konstantse staatilise rõhu järgi juhtimise tulemused, näeme, et võimsustarve erinevus sõltuvalt töös olevate klappide arvust ja kõigub 2,4...11,6 korrani.

Set13 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused jäid vahemikku 185...48 Pa.

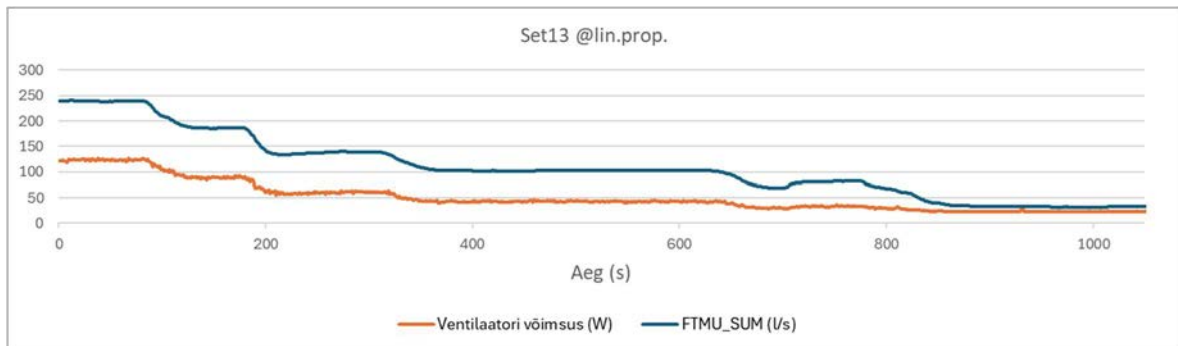


Joonis 43 Set13 ja Set5 ventilaatori tarbitava võimsuse diagramm



Joonis 44 Set13.1-13.7 ventilaatori tööpunkti rõhu diagramm

Jooniselt 45 on näha, et lineaarselt proportsionaalsel rõhu juhtimisstrateegia puhul on õhukoguse vähenemisel tugev mõju ventilaatori võimsustarbele. Võimsustarve vähenes 83,7%, samal ajal kui õhu vooluhulk vähenes 6 korda.



Joonis 45 Set13.1-13.7 ventilaatori võimsustarve ja õhu vooluhulga diagramm

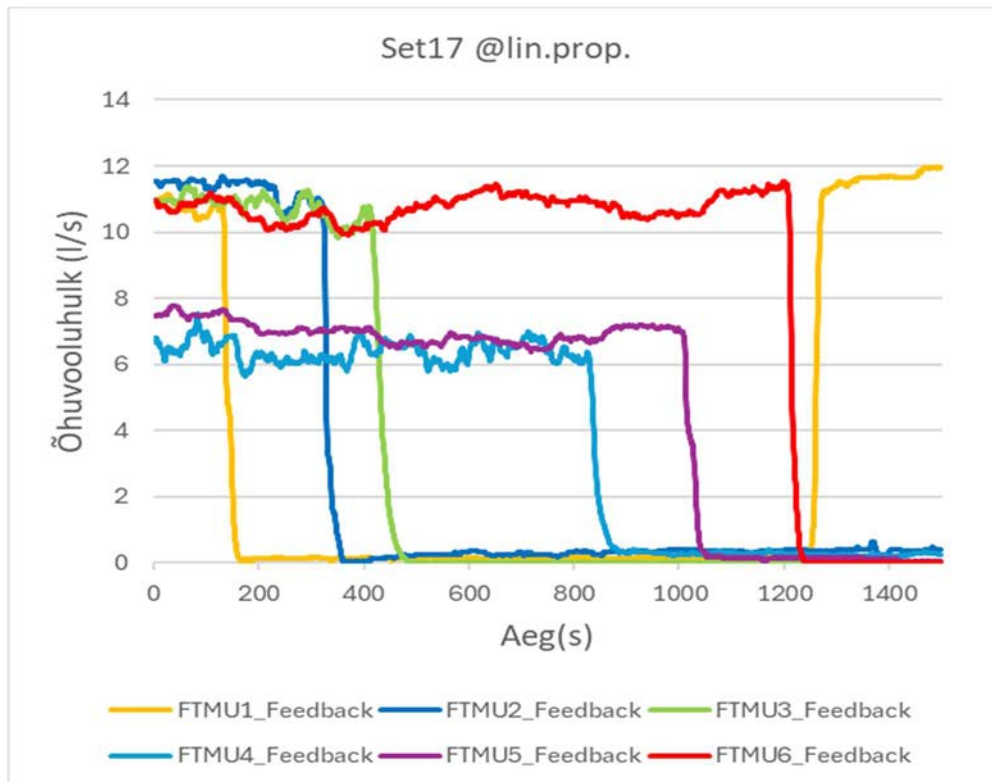
Set14 katseseerias tõsteti ventilaatorit juhtiv rõhuandur kahe harutorustiku vahele mõõtepunkti PE2. Nelja VAV-klapi õhu vooluhulgad jäid lubatud veamäära ($\pm 15\%$) sisse, kahel klakil aga mitte. Tulemused olid vastavalt 4,1%, 19,7%, -13,8%, -16,0%, -11,9% ja 6,8%. Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 106 W ja 24 W vahele. Seega võimsustarve alanes väiksema õhu vooluhulga juures kuni 77,4%. Set14 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused jäid vahemikku 67...178 Pa. Kõrvutades konstantse staatilise rõhu järgi juhtimise tulemustega on võimsuse tarbe erinevus sõltuvalt töös olevate VAV-klappide arvust 2,6...9,6 korda.

Set15 katseseerias tõsteti ventilaatorit juhtiv rõhuandur tsoone 1-3 teenindava harutorustiku kollektori otsa mõõtepunkti PE6. Nelja VAV-klapi õhu vooluhulgad jäid lubatud veamäära ($\pm 15\%$) sisse, kahel klakil aga mitte. Tulemused olid vastavalt 8,8%, 20,7%, -16,3%, -15,0%, -8,9% ja 3,9%. Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 124 W ja 24 W vahele. Seega võimsustarve alanes väiksema õhu vooluhulga juures 80,6%. Set15 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused jäid vahemikku 67...179 Pa. Võrreldes konstantse staatilise rõhu järgi juhtimise tulemusi lineaarselt proportsionaalse juhtimise tulemustega on

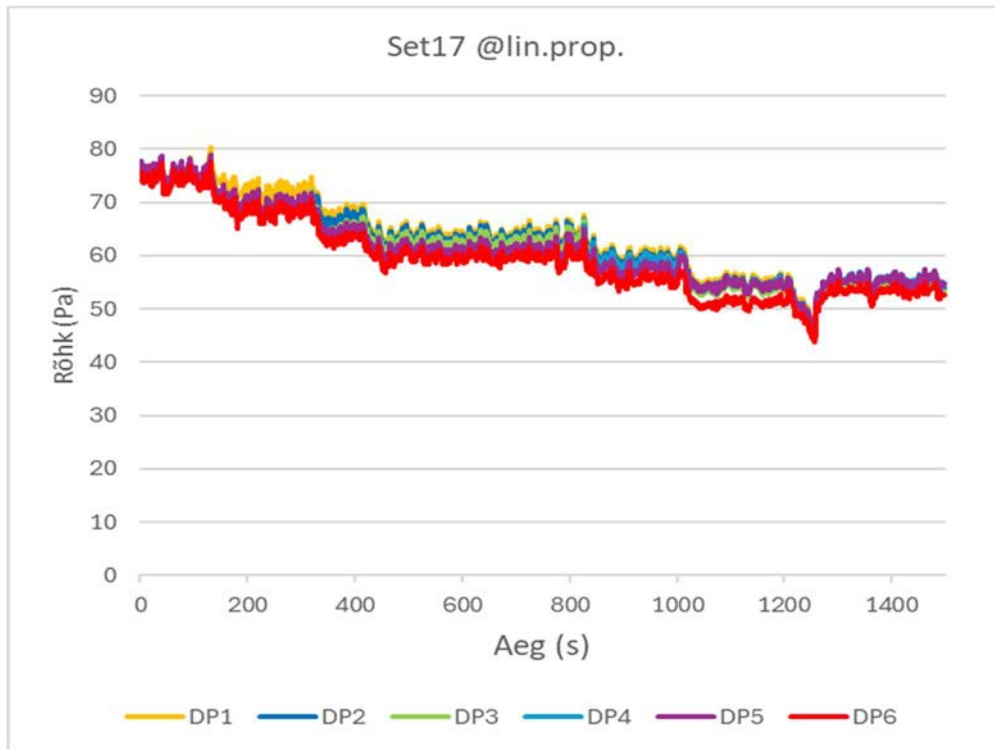
ventilaatori võimsustarbe erinevus sõltuvalt töös olevate VAV-klappide arvust 2,4...9,5 korda.

Set16 katseseerias tõsteti ventilaatorit juhtiv rõhuandur tsoone 4-6 teenindava harutorustiku kollektori otsa mõõtepunkti PE10. Viie VAV-klapi õhu vooluhulgad jäid lubatud veamäära ($\pm 15\%$) sisse, ühe klapi oma aga mitte. Tulemused olid vastavalt 7,8%, 28,6%, -13,5%, -12,7%, -11,6% ja 6,9%. Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 116 W ja 24 W vahele. Seega võimsustarve alanes väiksema õhu vooluhulga juures kuni 79,3%. Set16 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused jäid vahemikku 67...181 Pa. Kõrvutades konstantse staatilise rõhu järgi juhtimise tulemustega on võimsustarbe erinevus sõltuvalt töös olevate VAV-klappide arvust 2,5...9,5 korda.

Set17 katseseerias paigaldati ventilaatorit juhtiv rõhuandur mõõtepunkti PE1 ja VAV-klappide seadevääruks 10 l/s.

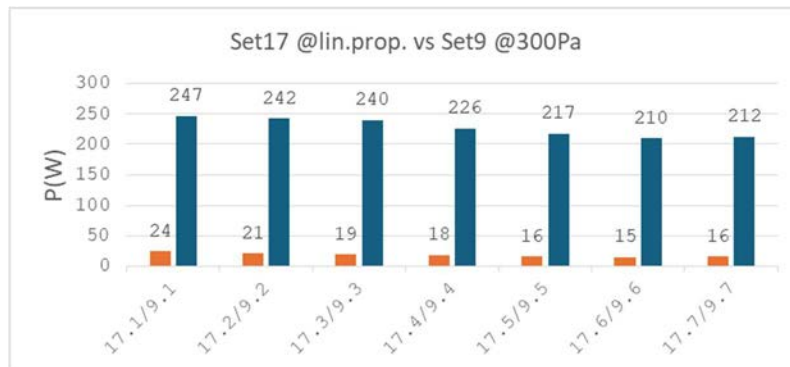


Joonis 46 Set17.1-17.7 õhu vooluhulkade diagramm



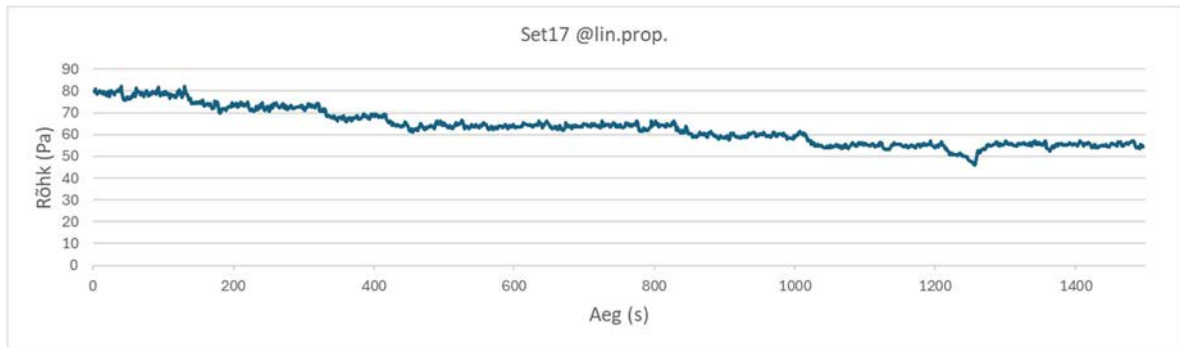
Joonis 47 Set17.1-17.7 staatiliste rõhkude diagramm

Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 24 W ja 15 W vahele. ning võimsustarve alanes väiksema õhu vooluhulga juures kuni 37,5%. Võrreldes konstantse staatilise rõhu järgi juhtimise tulemustega on võimsustarve erinevus sõltuvalt töös olevate VAV-klappide arvust 10,3...14 korda.



Joonis 48 Set17 ja Set9 ventilaatori tarvitava võimsuse diagramm

Lineaarselt proportsionaalse juhtimise puhul jäi ventilaatori tööõhu seadepunkt 46 Pa ja 82 Pa vahele. Seoses seadepunkti alla toomisega paranes oluliselt VAV-klappides etteantud õhu vooluhulga tagamise täpsus. Antud katseseerias on VAV-klapil 4 puudu 33,7% ja VAV-klapil 5 24,8% nõutud õhu vooluhulgast. Ülejäänud VAV-klappide tulemused mahuvad lubatud veamäära ($\pm 15\%$) sisse.



Joonis 49 Set17.1-17.7 ventilaatori tööpunkti rõhu diagramm

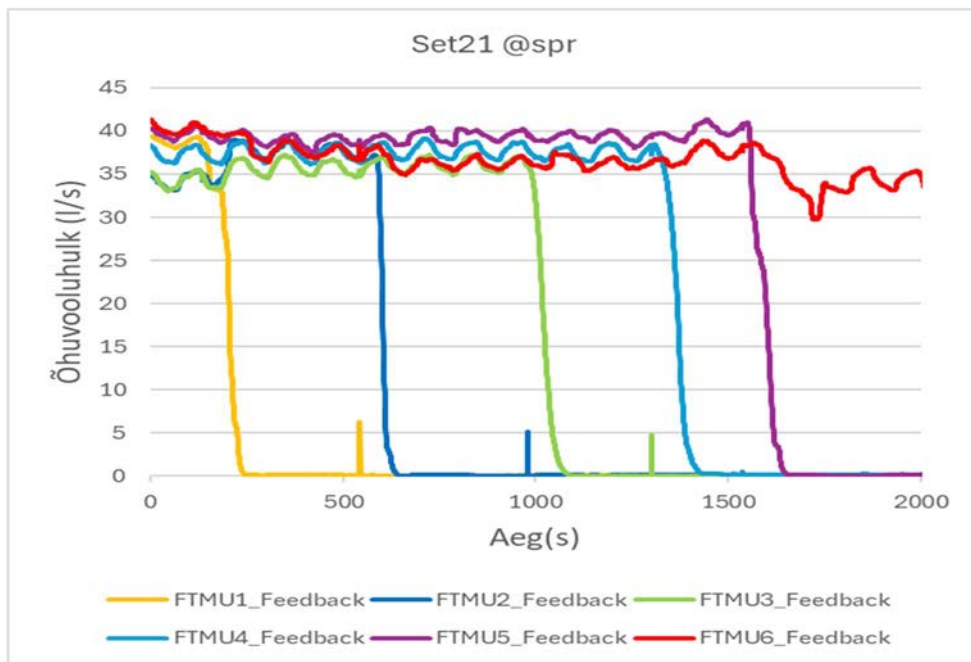
Set18 katseseerias tõsteti ventilaatorit juhtiv rõhuandur kahe harutorustiku vahele mõõtepunkti PE2. Nelja VAV-klapi õhu vooluhulgad jäid lubatud veamäära ($\pm 15\%$) sisse, kahel klakil aga mitte. Tulemused olid vastavalt $-1,2\%$, $16,2\%$, $8,5\%$, $-14,5\%$, $-33,2\%$ ja $-6,1\%$. Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 24 W ja 15 W vahele ja võimsustarve alanes väiksema õhu vooluhulga juures $37,5\%$. Set18 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused jäid vahemikku 47...83 Pa. Kõrvutades saadud tulemusi konstantse staatilise rõhu järgi juhtimise tulemustega on võimsustarve erinevus sõltuvalt töös olevate VAV-klappide arvust 9,9...13,5 korda.

Set19 katseseerias tõsteti ventilaatorit juhtiv rõhuandur tsoone 1-3 teenindava harutorustiku kollektori otsa mõõtepunkti PE6. Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 26 W ja 15 W vahele ja võimsustarve alanes väiksema õhu vooluhulga juures kuni $42,3\%$. Set19 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused jäid vahemikku 46...84 Pa. Antud katseseerias suutis ainult VAV-klapp 1 mahtuda lubatud piirmäära sisse so $-10,8\%$. Teiste VAV-klappide puhul olid tulemused vastavalt $-18,6\%$, $-15,5\%$, $34,4\%$ ja $28,3\%$. Võrreldes konstantse staatilise rõhu järgi juhtimis strateegia tulemustega on võimsustarve erinevus sõltuvalt töös olevate VAV-klappide arvust 9,2...13,5 korda.

Set20 katseseerias paigaldati ventilaatorit juhtiv rõhuandur tsoone 4-6 teenindava harutorustiku kollektori otsa mõõtepunkti PE10. Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 26 W ja 15 W vahele ning võimsustarve alanes väiksema õhu vooluhulga juures $42,3\%$. Set20 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused jäid vahemikku 46...83 Pa. Set20 katseseerias hoidsid kolm VAV-klappi nõutud õhu vooluhulka so klapid 2, 3, 4 vastavalt $-5,8\%$, $-8,8\%$ ja $5,4\%$. Klappid 1 ja 5 tulemused olid $-16,4\%$ ja $27,1\%$. Kõrvutades saadud tulemusi konstantse staatilise rõhu järgi juhtimise tulemustega on võimsustarve erinevus sõltuvalt töös olevate VAV-klappide arvust 9,1...13,2 korda.

5.5 SPR juhtimismeetodi mõõtetulemused ja analüüs

Set21 katseseerias kasutati ventilatsioonisüsteemi juhtimisel staatilise rõhu lähtestamise strateegiat. Sarnaselt lineaarselt proportsionaalse juhtimismeetodiga jäeti tsoonidele samad takistused, et hiljem oleks parem saadud andmeid võrrelda. Rõhuanur paigaldati mõõtepunkti PE1 ja VAV-klappide seadevääruks 40 l/s. Vastavalt meetodikale hakati rõhu tööpunkti süsteemis kas alandama või ka tõstma, sõltuvalt VAV-klappidelt saadud infost. Õhu vooluhulkade ja staatiliste rõhkude diagrammilt on selgesti eristatavad nõ astmed mis on tingitud rõhu astmelisest muutumisest.

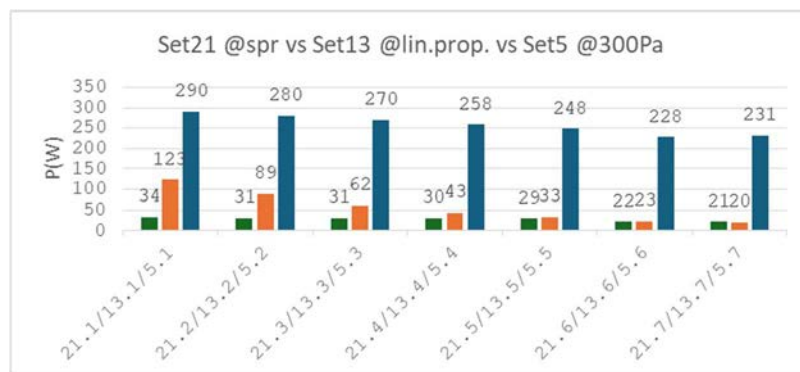


Joonis 50 Set21.1-21.7 õhu vooluhulkade diagramm



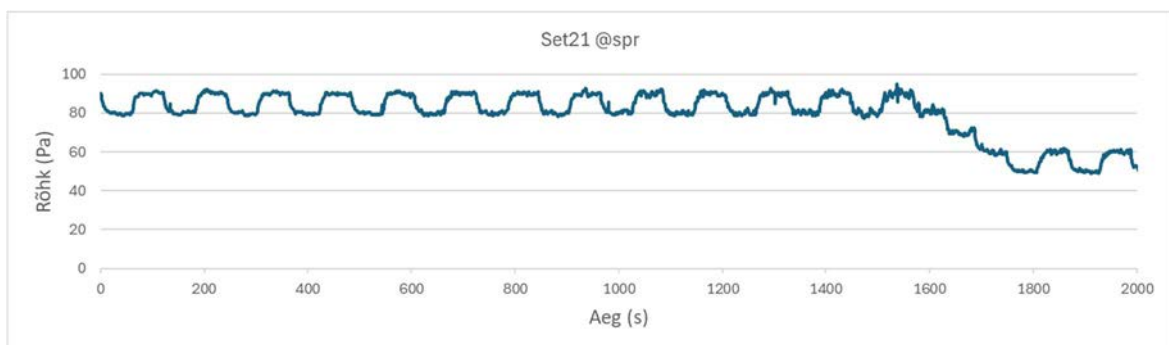
Joonis 51 Set21.1-21.7 staatiliste rõhkude diagramm

Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 34 W ja 21 W vahele ja võimsustarve alanes väiksema õhu vooluhulga juures kuni 38,2%. Suurematel õhu vooluhulkadel on võimsuste astmed selgesti eristatavad samas kui väiksemate õhu vooluhulkadel (1 VAV-klapp 40 l/s) astmeid enam eristada ei ole võimalik. Kõrvutades saadud tulemusi konstantse staatilise rõhu ja lineaarselt proportsionaalse staatilise rõhu järgi juhtimise tulemustega on võimsustarve erinevus suur. Konstantse staatilise rõhuga võrreldes jääb võimsustarve erinevus vahemikku 8,5...11 korda. Lineaarselt proportsionaalse staatilise rõhuga juhtimismeetodiga on erinevus kuni 3,6 korda. Vahe proportsionaalse juhtimisega tekib seetõttu, et staatilise rõhu lähtestamise meetodil ei ole kriitilise tsooni õhu vooluhulka tagavat miinimumrõhu ääritingimust.



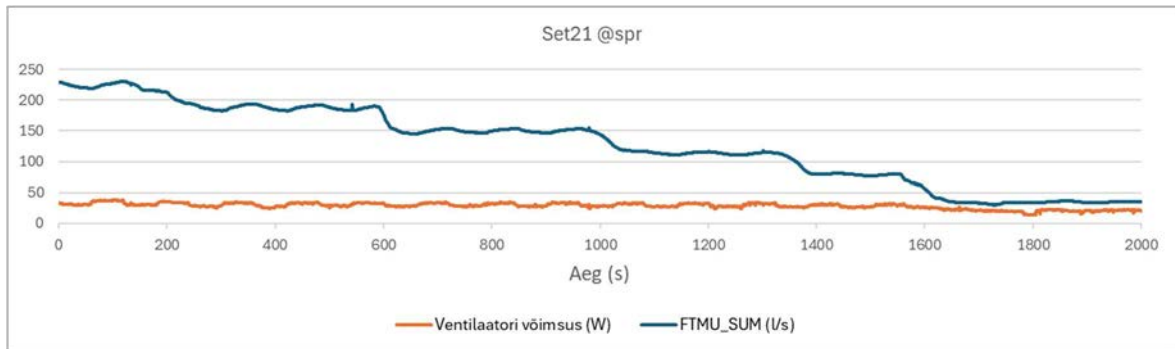
Joonis 52 Set21, Set13 ja Set5 ventilaatori tarbitava võimsuse diagramm

Seoses seadepunkti maksimaalse alandamisega paranes nii nagu lineaarselt proportsionaalse juhtimise puhul VAV-klappides etteantud õhu vooluhulga tagamise täpsus. Antud katseseerias on jäid kõik VAV-klapid lubatud veamäära ($\pm 15\%$) sisse. Tulemused olid vastavalt -3,2%, -14,3%, -14,2%, -6,6% ja 0,8%.



Joonis 53 Set21.1-21.7 ventilaatori tööpunkti rõhu diagramm

Jooniselt 54 on näha, et staatilise rõhu lähtestamise juhtimisstrateegia puhul on õhukoguse vähenemisel keskmine mõju ventilaatori võimsustarbele. Võimsustarve vähenes 38,2%, samal ajal kui õhu vooluhulk vähenes 6 korda, näidates juhtimismeetodi suhtelist efektiivsust.



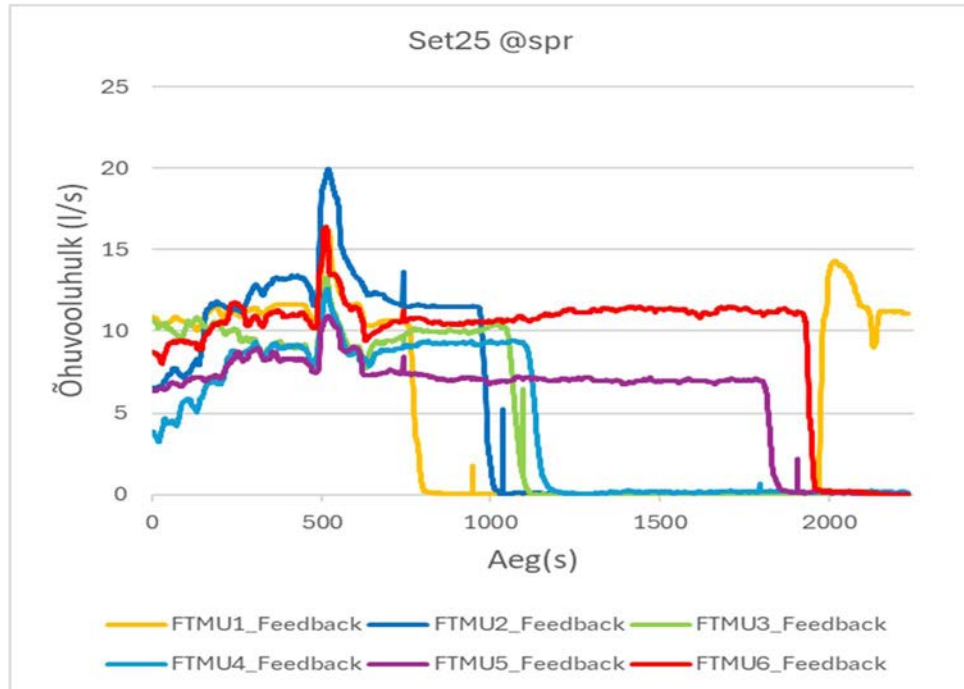
Joonis 54 Set21.1-21.7 ventilaatori võimsustarbe ja õhu vooluhulga diagramm

Set22 katseseerias paigaldati ventilaatorit juhtiv rõhuandur kahe harutorustiku vahele mõõtepunkti PE2. Kõikide VAV-klappide õhu vooluhulgad jäid lubatud veamäära ($\pm 15\%$) sisse. Tulemused olid vastavalt $-7,5\%$, $-4,8\%$, $-12,9\%$, $-10,6\%$, $2,5\%$ ja $1,3\%$. Ventilaatori võimsustarbe jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 38 W ja 20 W vahele ja vähenes väiksema õhu vooluhulga juures kuni 47,4%. Set22 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused olid vahemikus 48...112 Pa. Konstantse staatilise rõhuga võrreldes jäi võimsustarbe erinevus vahemikku 7,2...11,1 korda. Lineaarselt proportsionaalse staatilise rõhuga juhtimismeetodiga oli erinevus kuni 2,8 korda.

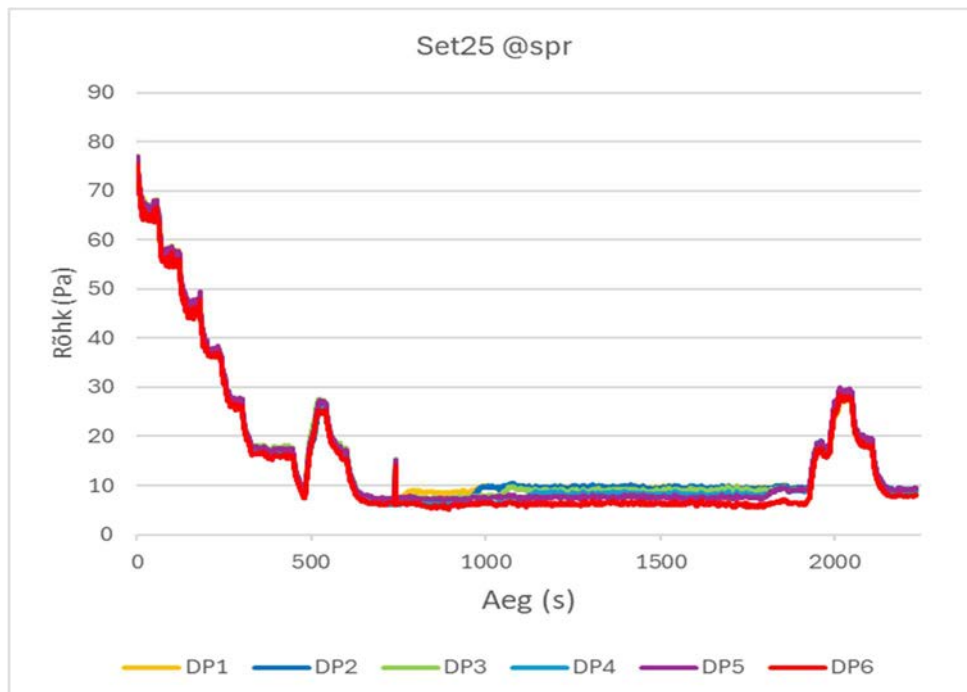
Set23 katseseerias pandi ventilaatorit juhtiv rõhuandur tsoone 1-3 teenindava harutorustiku kollektori otsa mõõtepunkti PE6. Kõikide VAV-klappide õhu vooluhulgad jäid lubatud veamäära ($\pm 15\%$) sisse. Tulemused olid vastavalt $-8,6\%$, $1,5\%$, $-14,2\%$, $-10,8\%$, $-5,0\%$ ja $0,6\%$. Ventilaatori võimsustarbe jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 48 W ja 110 W vahele ning alanes väiksema õhu vooluhulga juures kuni 56,4%. Set23 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused jäid vahemikku 22...39 Pa. Konstantse staatilise rõhuga võrreldes oli võimsustarbe erinevus 7,5...10,4 korda ja lineaarselt proportsionaalse staatilise rõhuga juhtimismeetodiga kuni 3,2 korda.

Set24 katseseerias tõsteti ventilaatorit juhtiv rõhuandur tsoone 4-6 teenindava harutorustiku kollektori otsa mõõtepunkti PE10. Kõik VAV-klappide õhu vooluhulgad peale VAV-klapi 3 jäid lubatud veamäära ($\pm 15\%$) sisse. Tulemused olid vastavalt $-8,2\%$, $0,5\%$, $-15,6\%$, $-11,8\%$, $-6,9\%$ ja $4,0\%$. Ventilaatori võimsustarbe jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 40 W ja 21 W vahele. Seega võimsustarbe alanes väiksema õhu vooluhulga juures kuni 47,5%. Set24 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused jäid 39...102 Pa vahele. Konstantse staatilise rõhuga võrreldes oli võimsustarbe erinevus 7,3...11,1 korda ja lineaarselt proportsionaalse staatilise rõhuga juhtimismeetodiga kuni 2,9 korda.

Set25 katseseerias paigaldati ventilaatorit juhtiv rõhuandur kahe harutorustiku vahele mõõtepunkti PE2. Poolte VAV-klappide õhu vooluhulgad jäid lubatud veamäära ($\pm 15\%$) sisse, ülejäänutel aga mitte. Tulemused olid vastavalt 16,0%, 36,2%, -6,3%, -8,8%, -15,8% ja 12,6%.



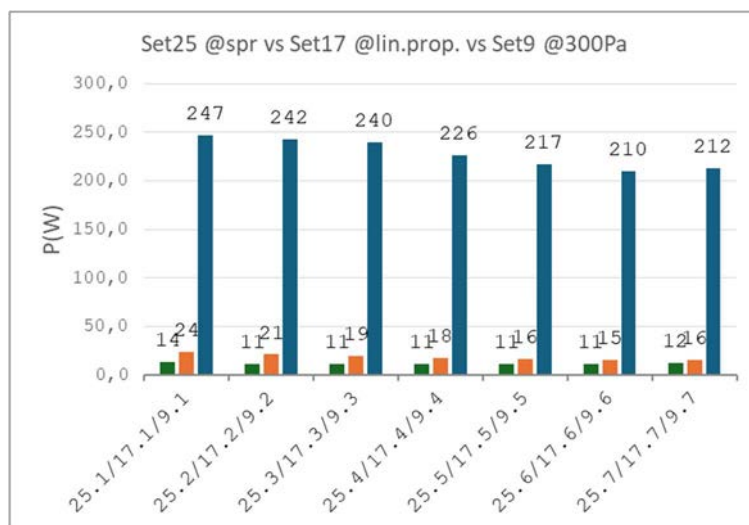
Joonis 55 Set25.1-25.7 õhu vooluhulkade diagramm



Joonis 56 Set25.1-25.7 staatiliste rõhkude diagramm

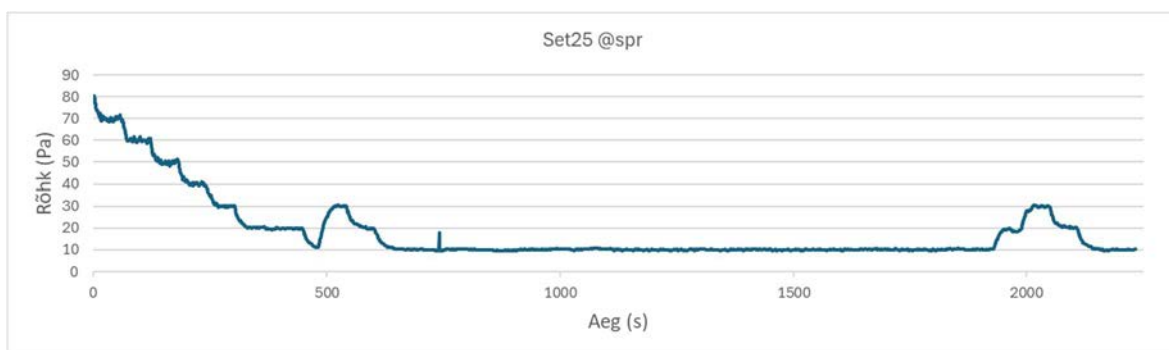
Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 13,6 W ja 11,1 W vahele ja võimsustarve alanes väiksema õhu vooluhulga juures 18,4%. Konstantse

staatilise rõhuga võrreldes jäi võimsustarve erinevus vahemikku 18,2...19,5 korda. Lineaarselt proportsionaalse staatilise rõhuga juhtimismeetodiga on erinevus kuni 1,8 korda.



Joonis 57 Set25, Set17 ja Set9 ventilaatori tarvitava võimsuse diagramm

Set4 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused jäid vahemikku 80...10 Pa.



Joonis 58 Set25.1-25.7 ventilaatori tööpunkti rõhu diagramm

Set26 katseseerias paigaldati ventilaatorit juhtiv rõhuandur kahe harutorustiku vahele mõõtepunkti PE2. Poolte VAV-klappide õhu vooluhulgad jäid lubatud veamäära ($\pm 15\%$) sisse, pooled aga mitte. Tulemused olid vastavalt 6,6%, 24,7%, -10,4%, -16,3%, -19,8% ja 7,8%. Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 13 W ja 11,1 W vahele ning võimsustarve alanes väiksema õhu vooluhulga juures 14,5%. Set26 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused jäid vahemikku 10...41 Pa. Konstantse staatilise rõhuga võrreldes jäi võimsustarve erinevus 18,3 korda. Lineaarselt proportsionaalse staatilise rõhuga juhtimismeetodiga on erinevus kuni 1,4...1,8 korda.

Set27 katseseeria katseseerias tõsteti ventilaatorit juhtiv rõhuandur tsoone 1-3 teenindava harutorustiku kollektori otsa mõõtepunkti PE6. Poolte VAV-klappide õhu

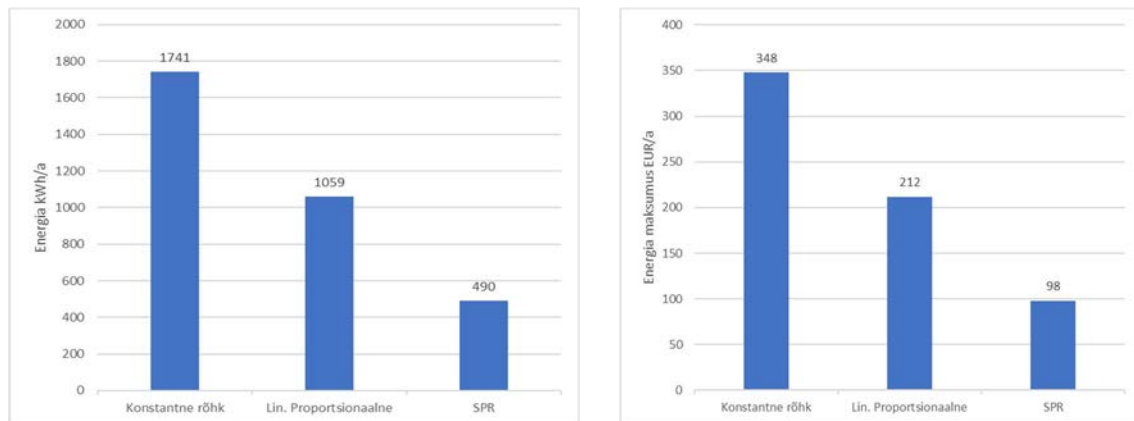
vooluhulgad jäid lubatud veamäära ($\pm 15\%$) sisse, pooled aga mitte. Tulemused olid vastavalt 6,6%, 24,7%, -10,4%, -16,3%, -19,8% ja 7,8%. Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 11 W ja 12,2 W vahele. Seega võimsustarve alanes väiksema õhu voluhulga juures kuni 9,8%. Set27 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused jäid vahemikku 10...20 Pa. Ventilaatori tööpunkti diagrammi pealt joonistub poole katse peal 20Pa suurune tõus. Selle põhjustas VAV-klapp 6 ja VAV-klapp 1 korruga häiresse minek. Klapp 6 pidi kinni minema ja klapp 1 avanema. Summaarne õhu voluhulk aga jäi samaks so 10l/s. See viitab juhtimisalgoritmi nõrgale kohale. Ehk et kui klapid muudavad samaaegselt oma õhu voluhulkasid, võivad tekkida moonutused ventilaatori tööõhus. Konstantse staatilise rõhuga võrreldes jäi võimsustarve erinevus 18,3...19,5 korda. Lineaarselt proportsionaalse staatilise rõhuga juhtimismeetodiga on erinevus 1,4 korda.

Set28 katseseeria katseseerias tõsteti ventilaatorit juhtiv rõhuandur tsoone 4-6 teenindava harutorustiku kollektori otsa mõõtepunkti PE10. Poolte VAV-klappide õhu voluhulgad jäid lubatud veamäära ($\pm 15\%$) sisse, pooled aga mitte. Tulemused olid vastavalt 11,2%, 27,4%, -8,9%, -11,6%, -20,4% ja 5,4%. Ventilaatori võimsustarve jäi sõltuvalt klappide asendist keskmiselt 11,3 W ja 11,6 W vahele ning võimsustarve alanes väiksema õhu voluhulga juures 2,6%. Set28 ventilaatori tööd juhtiva rõhuanduri mõõdetud väärtused jäid vahemikku 10...40 Pa. Poole katse peal tekkis olukord, kus VAV-klapp 6 pidi sulguma ja VAV-klapp 1 avanema. Juhtimisalgoritm tegi esimese otsuse rõhku muuta täpselt sel momendil, kui VAV-klapp 6 oli kinni minemas ja teise otsuse kui VAV-klapp 1 avanemas. Tekkis omamoodi võimendus, kus kaks korda järjest tõsteti rõhku kokku 20 Pa, kuigi selle järgi vajadus puudus sest summaarne õhu voluhulk jäi samaks so 10 l/s. Konstantse staatilise rõhuga võrreldes jäi võimsustarve erinevus 17,1...20,4 korda. Lineaarselt proportsionaalse staatilise rõhuga juhtimismeetodiga on erinevus 2,2 korda.

5.6 Näidishoone ventilaatorite energiatarve

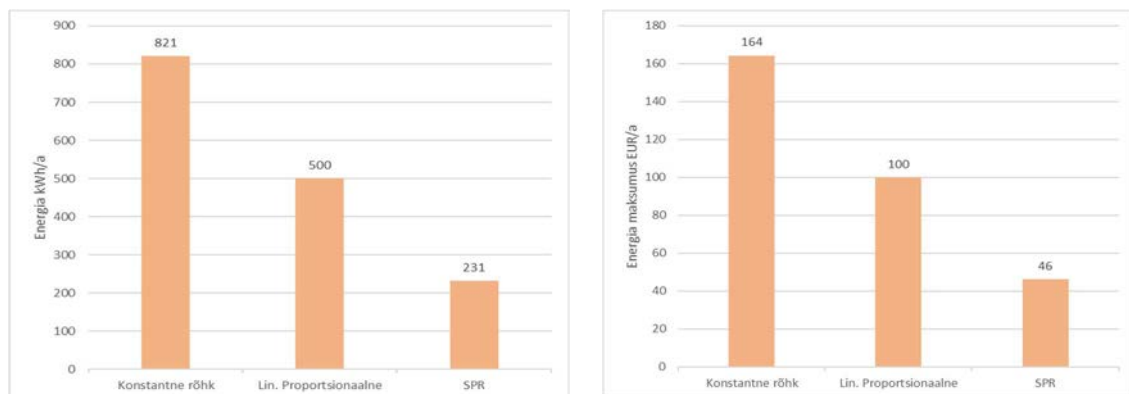
Õppehoone ventilatsiooniseadme SV1 arvutuslik tootlikkus $L = 1,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Süsteemi juhitakse konstantse staatilise rõhu järgi. Seadme takistus Δp_m oli sissepuhkel ja väljatõmbel 450 Pa. Nii sissepuhke kui ka väljatõmbetorustiku takistus Δp_t on 200 Pa. Seega ventilaatorite rõhutõus Δp_v on 650 Pa. Ventilaatorite kasuteguriks on tehase andmetel $\eta = 0,64$. Energia arvutustel lähtuti on 5 päevasest õppenädalast ja lihtsustamiseks ei arvestatud koolivaheaegadega. Õppehoonele vastavast kasutusprofiilist lähtuvalt saadi ventilaatorite energiatarbimiseks kokku 1741 kWh/a. Kui rakendada ventilatsiooniseadme juhtimisel aga lineaarselt proportsionaalset

juhtimismeetodit, siis alaneb energiatarve 1059 kWh/a. Staatilise rõhu lähtestamise strateegia kasutamise korral on energiatarve 490 kWh/a.



Joonis 59 Elektrienergia võrdlusdiagramm ($L = 1,6\text{m}^3/\text{s}$)

Arvestades, et 1 MWh elektrienergia hind on ca 200 EUR/MWh, siis tuleks konstantse staatilise rõhu järgi juhtimise asendamisel lineaarselt proportsionaalse rõhu järgi juhtimisega 39,2% sääst ning staatilise rõhu lähtestamise strateegiat kasutades 71,8% kokkuhoidu. Lisaks saab välja tuua, et eelnevalt vaadeldud ventilatsioonisüsteemile sarnase süsteemi õhuvooluhulga $1\text{ m}^3/\text{s}$ puhul on erinevate juhtimisstrateegiatega puhul tulemused järgmised.



Joonis 60 Elektrienergia võrdlusdiagramm ($L = 1,0\text{m}^3/\text{s}$)

Konstantse staatilise rõhu järgi juhtides on elektri energia kulu 821 kWh/a. Lineaarselt proportsionaalse juhtimismeetodi puhul 500 kWh/a ja staatilise rõhu lähtestamise strateegia kasutamise korral 231 kWh/a.

6 JÄRELDUSED

Erinevate juhtimisstrateegiate kasutamine omab suurt mõju ventilaatori võimsustarbele. Peamisteks probleemideks osutusid VAV-ventilatsioonisüsteemi õhu vooluhulkade täpse reguleerimise ning süsteemi optimeerimisega seotud küsimused.

Konstantse rõhu järgi juhtimine väikestel õhu vooluhulkadel (10 l/s) võib muutuda problemaatiliseks, sest kõrge staatilise rõhu (300 Pa) tööpunkti tingimustes ei suuda VAV-klapp stabiilselt tagada etteantud õhu vooluhulka. Veamäär jäi sellistel tingimustel 25-100% vahele. See on seotud klapi asendiga, mis kõrge staatilise rõhu ja väikese nõutud õhu vooluhulga tõttu on peaaegu suletud. Seega on vaja tööpunkti allapoole tuua, mida sisuliselt tehti lineaarselt proportsionaalse staatilise rõhu ja staatilise rõhu lähtestamise juhtimismeetoditega. Nende meetoditega avanes VAV-klapp rohkem ning õhu vooluhulga tagamise täpsus oluliselt suurenes.

Lineaarselt proportsionaalse staatilise rõhu juhtimismeetodi puhul jäi minimaalse õhu vooluhulga (10 l/s) katseseerias veamäär 5,4%...27,1% vahele ning staatilise rõhu lähtestamise juhtimisstrateegiatega katseseeria juures 5,4%...27,4% vahele. Madalama staatilise rõhu puhul on nõutud väikese õhu vooluhulga tagamine täpsem ja realistlikum. Nominaalsete õhu vooluhulkade (40 l/s) katseseeriates oli staatilise rõhu (300 Pa) tööpunkti tingimustes VAV-klappide mõõdetud veamäär 1,0%...24,4% vahel. Samad numbrid lineaarselt proportsionaalse staatilise rõhu juhtimismeetodiga tulid 4,1%...28,6% ja staatilise rõhu lähtestamise juhtimismeetodiga 0,6%...15,6%. Siiski on üllatav suhteliselt suur VAV-klappide reguleerimistäpsuse varieeruvus. Ja kuna kõikumine toimub mõlemale poole ja ei ole seotud konkreetse VAV-klapiga, on keeruline ühest vastust anda. See võib olla seotud VAV-klapi paiknemisega süsteemis, mingi mehaanilise eripäraga või ka seadistuste piirväärtuste sisestamise veaga.

Lineaarselt proportsionaalse staatilise rõhu juhtimisstrateegia katseseeriatega puhul sai kohe katseseeriatega alguses selgeks, et ühe suure ja ühe väikese takistusega tsooni konfiguratsiooniga jätkata pole mõistlik ja taastati süsteemi esialgne seadistus võrdsete tsooni takistustega. Põhjuseks asjaolu, et kui süsteemis on üks suure takistusega tsoon, tõstab see alumise seaderõhu miinimum piirväärtuse sarnaseks ülemise maksimaalse rõhu piirväärtusele.

Staatilise rõhu lähtestamise ääritingimustel on suur mõju süsteemi stabiilsusele. Kui ääritingimusi muuta kas liiga väikseks või ka liiga suureks, võib süsteem muutuda ebastabiilseks või mitte täita tsooni õhu vooluhulgale etteantud tingimust. Tolerantsideks on alarmi genereerimise kaks ääritingimust: protsent nõutud õhu vooluhulgast ($\pm 10\%$) ja fikseeritud lubatav eksimine õhu vooluhulgast liitrites (± 5 l/s). Probleem tekib väiksemate õhu vooluhulkade juures, kus näiteks seadearvude 10-15 l/s

juures moodustab teine ääritingimus eksimise vaates isegi kuni 50% nõutavast õhu kogusest. Samas kui muuta seadearvu $\pm 1,5$ l/s, mis on tehase poolt lubatud VAV-klapi määramatuse piires, hakkab süsteem tööõhuga üles-alla varieerima. Lisaks tekitab anomaaliaid VAV-klappide üheaegne tööasendi muutmine ja seda eriti olukorras, kus osad klapid sulguvad ning osad avanevad.

Katseskeemides kasutati 4 erinevat rõhuanduri asukohta, et aru saada, kas mingil asukohal on eeliseid või vastupidi hoopis puuduseid. Antud katseseeriade pinnalt ei ole võimalik esile tuua mõne anduri asukoha eelist või puudust, mis oleks süsteemi tööd nähtavalt mõjutanud.

KOKKUVÕTE

Antud magistritöö keskendub alternatiivsete juhtimismeetodite mõjule ventilaatori energiakasutusele. Samuti on tähelepanu fookuses VAV-ventilatsioonisüsteemi reguleerimise täpsusega ning stabiilsusega seotud küsimused. Tihti juhitakse VAV-ventilatsioonisüsteeme konstantse staatilise rõhu järgi. Mis aga juhtub, siis kui tsoonid vajavad väiksemaid õhu vooluhulkasid?

Antud teema uurimiseks koostati laboris 2 stendi: 1 ja 6 tsooniga. Koostati süsteemi karakteristikud (so maksimaalne tööpiirkond), mille alusel pandi paiga kasutusprofiilid. Esimesel juhul kasutati väärtuseid, mis on sarnased nominaalsetele projekteerimisväärtustele. Teisel juhul kasutati miinimum väärtuseid. Omavahel võrreldi kolme erinevat juhtimisstrateegiat: konstantse staatilise rõhu järgi juhtimist, lineaarselt proportsionaalse staatilise rõhu järgi juhtimist ning staatilise rõhu lähtestamise järgi juhtimist. Tulemuste analüüs keskendus erinevate juhtimismeetodite eripäradele ja ventilaatori võimsustarbele. Konstantse rõhu järgi juhtimine väikestel õhu vooluhulkadel (10 l/s) võib olla problemaatiline, sest kõrge staatilise rõhu tingimustes ei suuda VAV-klapp tagada etteantud õhu vooluhulka. Seoses klapi minimaalse avatusega puudub reguleerimistäpsus. Veamäär jäi 25-100% vahele, mis ei ole aktsepteeritav. Lineaarselt proportsionaalse staatilise rõhu juhtimisstrateegiat on kohane kasutada süsteemides, millel puuduvad suure takistusega süsteemi osad (dikteeriv haru), sest see viib minimaalse rõhu ääritingimuse sarnaseks maksimaalse rõhu ääritingimusega. Staatilise rõhu lähtestamise juhtimismeetodi puhul seadistatakse rõhku järk-järgult põhinedes VAV-klapi tagasisidele. Tagasisideks on etteantud õhu vooluhulga saavutamise või mittesaavutamise. Süsteemi reageerimiskiirus erinevates olukordades on seotud juhtalgoritmi ääritingimustega, mis määravad ära rõhu tõstmise ja alandamise sammu ja kiiruse. Tihti nõuab suure õhu vooluhulga muutmine või ka paralleelselt paljude klappide samaaegne töö uue tasakaalupunkti saavutamiseks mitmeid iteratsioone. Samuti on oluline iteratsioonide kiirus ning samaaegselt asendit muutvate VAV-klappide arv. Mõõtmised kinnitavad ventilaatori võimsustarbe vähenemist lineaarselt proportsionaalse juhtimise ja staatilise rõhu lähtestamise strateegia puhul võrreldes staatilise rõhu järgi juhtimisega isegi 15 kuni 20 korda. Lineaarselt proportsionaalse juhtimise võrdlemisel staatilise rõhu lähtestamise strateegiaga tekib vahe sisse suuremate õhu vooluhulkade juures, kus võimsustarbe erinevus oli ca 4 korda. Väikeste õhu vooluhulkade juures muutus erinevus olematuks.

Kokkuvõtteks võib öelda, et tuleks igal juhul eelistada VAV-ventilatsioonisüsteemi juhtimisel konstantse staatilise rõhu järgi juhtimisele lineaarselt proportsionaalse staatilise rõhu järgi juhtimist või staatilise rõhu lähtestamise järgi juhtimist. Samuti

võiks mõelda juba olemasolevate konstantse staatilise rõhu järgi juhitavate VAV-süsteemide ümberehitamisele/seadistamisele.

Antud töös esitati VAV-ventilatsioonisüsteemide juhtimisemeetodite osas esmased tulemused. Tulemuste valideerimiseks tuleks sooritada lisamõõtmisi, muutes paralleelselt juhtimisalgoritmide ääritingimusi. Näiteks lineaarselt proportsionaalse juhtimismeetodi miinimum ääritingimuse täpsem seadistus. Või staatilise rõhu lähtestamise juhtalgoritmi täiustamine selliselt, et korruga saaks õhu vooluhulga seadepunkti muuta ainult piiratud koguses VAV-klappidel. See annaks võimaluse laiemalt hinnata tehtud mõõtmiste täpsust, aga ka täiustada juhtalgoritme ja alandada veelgi ventilaatori võimsustarvet. Lisaks võiks mõelda veel mõne juhtalgoritmi kaasamise võrdlustabelisse. Näiteks ajakeskmise juhtimisstrateegia kasutamine VAV-ventilatsioonisüsteemides.

SUMMARY

This master's thesis focuses on the impact of alternative control methods on fan energy consumption in Variable Air Volume (VAV) ventilation systems. Attention is also given to issues related to the precision and stability of regulating VAV ventilation systems. VAV ventilation systems are often controlled based on constant static pressure. However, what happens when zones require lower air flow rates?

To investigate this topic, two setups were constructed in the laboratory: one with 1 zone and another with 6 zones. The system characteristics (maximum operating range) were established to set usage profiles. In the first case, values similar to nominal design values were used, while in the second case, minimum values were applied. Three different control strategies were compared: control based on constant static pressure, control based on linearly proportional static pressure, and control based on static pressure reset. The analysis of the results focused on the characteristics of different control methods and fan power consumption.

Controlling based on constant static pressure at low air flow rates (10 l/s) can be problematic because at high static pressure conditions, the VAV damper cannot achieve the specified airflow. Due to the minimum damper opening, there is a lack of control precision, with error rates ranging from 25% to 100%, which is unacceptable. The strategy of linearly proportional static pressure control is suitable for systems without high-resistance system parts (dictating branch), as it aligns the minimum pressure condition with the maximum pressure condition. In the case of static pressure reset control, pressure is gradually adjusted based on the feedback from VAV damper, with the feedback being the achievement or non-achievement of the specified airflow. The response time of the system in different situations depends on the boundary conditions of the control algorithm, which determine the step and speed of pressure increase and decrease.

Often, achieving a large change in airflow or simultaneously operating many dampers to reach a new equilibrium point requires multiple iterations. The speed of iterations and the number of simultaneously adjusting VAV dampers are also important. Measurements confirm a decrease in fan power consumption with linearly proportional control and static pressure reset control compared to control based on constant static pressure, by as much as 15 to 20 times. However, a discrepancy arises when comparing linearly proportional control with static pressure reset control, particularly at higher airflow rates, where the difference in power consumption was approximately 4 times. At lower airflow rates, the difference became negligible.

In conclusion, controlling VAV ventilation systems based on linearly proportional static pressure or static pressure reset should be preferred over constant static pressure control. Additionally, consideration should be given to retrofitting or adjusting existing VAV systems currently controlled based on constant static pressure.

This study presents initial results regarding the control methods of VAV ventilation systems. To validate the results, additional measurements should be conducted, while simultaneously adjusting the boundary conditions of the control algorithms. For example, fine-tuning the minimum boundary condition of the linearly proportional control method or enhancing the static pressure reset control algorithm to allow for changing the airflow setpoint on a limited number of VAV dampers simultaneously. This would enable a broader assessment of measurement accuracy and further improvement of control algorithms, thus reducing fan power consumption. Furthermore, the inclusion of additional control algorithms in the comparison table, such as the use of Time Average Ventilation (TAV) control strategy in VAV ventilation systems, could be considered.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] H. B. Awbi, „Ventilation for Good Indoor Air Quality and Energy Efficiency“, *Energy Procedia*, kd 112, lk 277–286, märts 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1098.
- [2] E. Simons, S.-A. Hwang, E. F. Fitzgerald, C. Kielb, ja S. Lin, „The Impact of School Building Conditions on Student Absenteeism in Upstate New York“, *Am. J. Public Health*, kd 100, nr 9, lk 1679–1686, sept 2010, doi: 10.2105/AJPH.2009.165324.
- [3] M. Kiil, R. Simson, K. V. Vösa, A. Mikola, M. Thalfeldt, ja J. Kurnitski, „Respiratory infection risk based ventilation and room conditioning design method with year-round thermal comfort control in modern office buildings“, *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, aug 2022, lk 05008. doi: 10.1051/e3sconf/202235605008.
- [4] J. Kurnitski, M. Murdvee, T.-A. Kõiv, M. Teichmann, *Sisekliima, õpitulemus, tööväljakus*. Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2015.
- [5] P. MacNaughton, J. Pegues, U. Satish, S. Santanam, J. Spengler, ja J. Allen, „Economic, Environmental and Health Implications of Enhanced Ventilation in Office Buildings“, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, kd 12, nr 11, Art. nr 11, nov 2015, doi: 10.3390/ijerph121114709.
- [6] P. Anand, C. Sekhar, D. Cheong, M. Santamouris, ja S. Kondepudi, „Occupancy-based zone-level VAV system control implications on thermal comfort, ventilation, indoor air quality and building energy efficiency“, *Energy Build.*, kd 204, lk 109473, dets 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109473.
- [7] C. Camarasa, L. K. Kalahasthi, ja L. Rosado, „Drivers and barriers to energy-efficient technologies (EETs) in EU residential buildings“, *Energy Built Environ.*, kd 2, nr 3, lk 290–301, juuli 2021, doi: 10.1016/j.enbenv.2020.08.002.
- [8] M. Economidou, V. Todeschi, P. Bertoldi, D. D’Agostino, P. Zangheri, ja L. Castellazzi, „Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings“, *Energy Build.*, kd 225, lk 110322, okt 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110322.
- [9] T. E. Cappellin, „# VAV Systems- What Makes Them Succeed? What Makes Them Fail?“.
- [10] S. Englander, „Ventilation Control for Energy Conservation: Digitally Controlled Terminal Boxes and Variable Speed Drives“, 1990. doi: 10.13140/2.1.1131.7761.
- [11] M. Hydeman, S. Taylor, J. Stein, E. Kolderup, ja T. Hong, *Advanced Variable Air Volume System Design Guide*. 2003.
- [12] R. J. Rose ja W. L. Kopko, „A Novel Method for Resetting Duct Static Pressure for Variable Air Volume Systems“.
- [13] C. Koulani, C. Hviid, ja S. Terkildsen, „Optimized damper control of pressure and airflow in ventilation systems“, *10th Nord. Symp. Build. Phys.*, lk 822–829, jaan 2014.
- [14] B. Rismanchi, J. M. Zambrano, B. Saxby, R. Tuck, ja M. Stenning, „Control Strategies in Multi-Zone Air Conditioning Systems“, *Energies*, kd 12, nr 3, Art. nr 3, jaan 2019, doi: 10.3390/en12030347.
- [15] S. Kaam, P. Raftery, H. Cheng, ja G. Paliaga, „Time-averaged ventilation for optimized control of variable-air-volume systems“, *Energy Build.*, kd 139, lk 465–475, märts 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.11.059.
- [16] W. Wu *et al.*, „Diffuse ceiling ventilation for buildings: A review of fundamental theories and research methodologies“, *J. Clean. Prod.*, kd 211, lk 1600–1619, veebr 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.148.
- [17] Enno Abel, Hendrik Voll, Teet Tark, Priit Pikk, Raul Daniel, *Hoonete energiatarve ja sisekliima*. EKVÜ, 2022.
- [18] P. Šujanová, M. Rychtáriková, T. Sotto Mayor, ja A. Hyder, „A Healthy, Energy-Efficient and Comfortable Indoor Environment, a Review“, *Energies*, kd 12, nr 8, Art. nr 8, jaan 2019, doi: 10.3390/en12081414.
- [19] Herman Behls, *Duct systems design guide*. ASHRAE, 2020. [Online]. Available at: <https://hvacsimplified.in/wp-content/uploads/2021/09/ASHRAEs-Duct-System-Design-Guide.pdf>

- [20] S. T. Taylor, „VAV System Duct Main Design.“, *ASHRAE J.*, kd 61, nr 4, lk 54–59, apr 2019.
- [21] G. Wei, D. E. Claridge, Y. Sakuri, ja M. Liu, „Improved Air Volume Control Logic for VAV Systems“, 2000, Vaadatud: 17. mai 2024. [Online]. Available at: <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/6793>
- [22] W. Cory, *Fans and Ventilation: A Practical Guide*. Elsevier, 2010.
- [23] I. M. Shapiro, *Energy Audits and Improvements for Commercial Buildings*. John Wiley & Sons, 2016.
- [24] H. B. Awbi, *Ventilation Systems: Design and Performance*. Psychology Press, 2008.
- [25] X. Xu, S. Wang, Z. Sun, ja F. Xiao, „A model-based optimal ventilation control strategy of multi-zone VAV air-conditioning systems“, *Appl. Therm. Eng.*, kd 29, nr 1, lk 91–104, jaan 2009, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.02.017.
- [26] N. Torabi, H. B. Gunay, W. O’Brien, ja T. Barton, „Common human errors in design, installation, and operation of VAV AHU control systems – A review and a practitioner interview“, *Build. Environ.*, kd 221, lk 109333, aug 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109333.
- [27] S. Kalaiselvam, S. V. Vidhya, S. Iniyan, ja A. A. Samuel, „Comparative Energy Analysis of a Constant Air Volume (CAV) System and a Variable Air Volume (VAV) System for a Software Laboratory“, *Int. J. Vent.*, kd 5, nr 2, lk 229–237, sept 2006, doi: 10.1080/14733315.2006.11683740.
- [28] Y. Liang, Q. Meng, ja S. Chang, „Fault diagnosis and energy consumption analysis for variable air volume air conditioning system: a case study“, *Procedia Eng.*, kd 205, lk 834–841, jaan 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.021.
- [29] S. Wu ja J.-Q. Sun, „Cross-level fault detection and diagnosis of building HVAC systems“, *Build. Environ.*, kd 46, nr 8, lk 1558–1566, aug 2011, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.01.017.
- [30] J. Zhang *et al.*, „A Review of Static Pressure Reset Control in Variable Air Volume Air Condition System“, *Procedia Eng.*, kd 121, lk 1844–1850, jaan 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.09.165.
- [32] A. Visioli, *Practical PID Control*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [33] G. S. Okochi ja Y. Yao, „A review of recent developments and technological advancements of variable-air-volume (VAV) air-conditioning systems“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, kd 59, lk 784–817, juuni 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.328.
- [34] G. Zucker, A. Sporr, A. Garrido-Marijuan, T. Ferhatbegovic, ja R. Hofmann, „A ventilation system controller based on pressure-drop and CO2 models“, *Energy Build.*, kd 155, lk 378–389, nov 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.09.041.
- [35] „ASHRAE Guideline 36-2018, High-Performance Sequences of Operation for HVAC Systems“. ASHRAE, 2018.
- [36] T. Darure, J. J. Yamé, ja F. Hamelin, „Fault-adaptive control of VAV damper stuck in a multizone building“, *2016 3rd Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol)*, sept 2016, lk 170–176. doi: 10.1109/SYSTOL.2016.7739746.
- [37] X. Li, T. Zhao, P. Fan, ja J. Zhang, „Rule-based fuzzy control method for static pressure reset using improved Mamdani model in VAV systems“, *J. Build. Eng.*, kd 22, lk 192–199, märts 2019, doi: 10.1016/j.jobe.2018.12.005.
- [38] F. Engdahl ja A. Svensson, „Pressure controlled variable air volume system“, *Energy Build.*, kd 35, nr 11, lk 1161–1172, dets 2003, doi: 10.1016/j.enbuild.2003.09.009.