



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**VENTILATSIOONISEADMETE
SOOJUSTAGASTITE EFEKTIIVSUS, SELLE
HINDAMINE NING MÕJU ENERGIAKASUTUSELE**

**VENTILATION HEAT RECOVERY EFFICIENCY, ITS
ESTIMATION AND IMPACT ON ENERGY CONSUMPTION**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Andres Tukia

Üliõpilaskood 096114EAKI

Juhendaja(d) Tuule Mall Kull, nooremteadur
Alo Mikola, nooremteadur

Tallinn 2020

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.

"....25..."mai..... 2020

Autor: Andres Tukia

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....25..."mai..... 2020

Juhendajad: Tuule Mall Kull

Alo Mikola

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Andres Tukia (sünnikuupäev: 02.04.1988)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Ventilatsiooniseadmete soojustagastite efektiivsus ning selle mõju energiakasutusele“,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendajad on Tuule Mall Kull ja 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)*

25.05.2020

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Andes Tukia, 096114EAKI

Õppekava, peeriala: EAKI02/09, Hoonete sisekliima ja veetehnika

Juhendaja(d): nooremteadur, Tuule Mall Kull, 53450738

nooremteadur, Alo Mikola, 56647035

Konsultant: puudub

Lõputöö teema:

Ventilatsiooniseadmete soojustagastite efektiivsus, selle hindamine ning mõju energiakasutusele

Ventilation heat recovery efficiency, its estimation and impact on energy consumption

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Soojustagastite toimimise analüüsimine vastavalt mõõdetud temperatuuri ja õhuvooluhulga parameetritele
2. Vigade ja ebaefektiivsuste tuvastamine soojustagastite töös
3. Soojustagastite korrasoleku automaatse hindamise algoritmide väljatöötamine
4. Soojustagastites ilmnevate probleemide mõju ventilatsiooniagregaatide energiatõhususele

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Erinevat tüüpi soojustagastite toimimise analüüsimine vastavalt mõõdetud temperatuuridele ja õhuvooluhulkadele	19.04.2020
2.	Vigade ja ebaefektiivsuste tuvastamine soojustagastite töös	01.05.2020
3.	Soojustagastite korrasoleku automaatse hindamise algoritmide väljatöötamine	10.05.2020
4.	Soojustagastites ilmnevate probleemide mõju ventilatsiooniagregaatide energiatõhususele	20.05.2020

Töö keel: Eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "25" mai 2020 a

Üliõpilane: Andres Tukia "25" mai 2020 a
/allkirjastatud digitaalselt/

Juhendaja: Tuule Mall Kull "25" mai 2020 a
/allkirjastatud digitaalselt/

Juhendaja: Alo Mikola "25" mai 2020 a
/allkirjastatud digitaalselt/

Programmijuht: Martin Thalfeldt "25" mai 2020 a
/allkirjastatud digitaalselt/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	7
Lühendite ja tähiste loetelu.....	8
SISSEJUHATUS	11
1. TEOREETILISED ALUSED	13
1.1 Soojustagastid.....	13
1.1.1 Plaatsoojustagasti	14
1.1.2 Vahesoojuskandjaga soojustagasti	16
1.1.3 Rootorsoojustagasti.....	17
1.2 Soojustagastite efektiivsus.....	18
1.2.1 Tsentraalsete ventilatsiooniseadmete soojustagastite testimine vastavalt standardile EVS-EN 308:2000	25
1.2.2 Soojustagastite temperatuuri suhtarvu esitamine hoone automaatikasüsteemis	28
1.3 Soojustagastite mõju ventilatsiooniseadmes tarbitavale soojusenergiale	28
1.4 Varasemad uurimused ja uurimisvajadus	31
2. METOODIKA.....	33
2.1 Objektide ülevaade	33
2.2 Kasutatavad andmed.....	36
2.3 Temperatuuri suhtarvu analüüsi meetodid.....	37
2.4 Meetod temperatuuri suhtarvu mõju leidmiseks seadme energiakasutusele	38
2.5 NTU meetodika rakendamine.....	39
3. TEMPERATUURI SUHTARVUD.....	41
3.1 Plaatsoojusvahetiga ventilatsiooniseade SV10.....	41
3.2 Vahesoojuskandjaga soojusvahetiga ventilatsiooniseade 333TK	45
3.3 Rootorsoojusvahetiga ventilatsiooniseade 323TK.....	49
3.4 NTU meetodi tulemused.....	53
3.5 Soojustagastite efektiivsuse arvutamise meetodika	58
4. TEMPERATUURI SUHTARVU MÕJU ENERGIAKASUTUSELE.....	59
4.1 Analüüsi käik ja valideerimine.....	59
4.2 Temperatuuri suhtarvu mõju soojusenergiakasutusele Viru Keskuse ventilatsiooniseadme 323 näitel.....	60
4.3 Temperatuuri suhtarvu mõju kestusgraafikul seadme SV10 näitel	62
KOKKUVÕTE	64
SUMMARY.....	66
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	68
LISAD	70

Lisa 1 – Ventilatsiooniseadmes SV10 paikneva plaatsoojustagasti väljatrükk.....	71
Lisa 2 – Temperatuuri suhtarvu leidmine Siemensi kontrolleriis.....	72
Lisa 3 – Väljavõtted koostatud arvutustabelist.....	73

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema on valitud selliselt, et see panustaks Tallinna Tehnikaülikooli ning Ruut8 OÜ ühisprojekti „Masinõppel ja reeglipõhisel veatuvastusel põhinevad automaatsed meetodid ventilatsiooniseadmete efektiivsuse suurendamiseks“ valmimisse. Tegemist on Sihtasutuse Archimedes poolt toetava projektiga, mille üheks eesmärgiks on meetoodika välja töötamine ventilatsiooniseadmete soojustagastuse mehaanilise korrasoleku automaatseks hindamiseks.

Töö valmimiseks kasutatud andmed pärinevad erinevate hoonete automaatikasüsteemide logifailidest. Kaks peamist uurimisobjekti olid Tallinna Tehnikaülikooli pereühiselamu (Akadeemia tee 5a) ning Viru Keskus (Viru väljak 4). Andmete kogumisele aitasid kaasa nii ülikooli personal kui ka Ruut8 OÜ meeskond.

Töö valmimise osas soovin tänu avaldada kõigile, kes olid vähemal või suuremal määral antud protsessiga seotud.

Lühendite ja tähiste loetelu

h_{et}^{sp} – sissepuhkeõhu soojussisaldus enne soojustagastit, kJ/kg_{kõ}

h_{et}^{vt} – väljatõmbeõhu soojussisaldus enne soojustagastit, kJ/kg_{kõ}

h_{pt}^{sp} – sissepuhkeõhu soojussisaldus peale soojustagastit, kJ/kg_{kõ}

t_{et}^{sp} – sissepuhkeõhu temperatuur enne soojustagastit, °C

t_{et}^{vt} – väljatõmbeõhu temperatuur enne soojustagastit, °C

t_{pt}^{sp} – sissepuhkeõhu temperatuur peale soojustagastit, °C

t_{pt}^{vt} – väljatõmbeõhu temperatuur peale soojustagastit, °C

$t_{sp}^{seadepunkt}$ – sissepuhkeõhu temperatuuri seadepunkt, °C

x_{et}^{sp} – sissepuhkeõhu niiskussisaldus enne soojustagastit, g/kg_{kõ}

x_{et}^{vt} – väljatõmbeõhu niiskussisaldus enne soojustagastit, g/kg_{kõ}

x_{pt}^{sp} – sissepuhkeõhu niiskussisaldus peale soojustagastit, g/kg_{kõ}

A – soojusvaheti pindala, m²

C – soojuserivõimsus, kW/K

C_{max} – kõrgem kahe õhuhulga soojuserivõimsusest, kW/K

C_{min} – madalam kahe õhuvooluhulga soojuserivõimsusest, W/K

C_r – kahe õhuhulga madalama ning kõrgema soojuserivõimsuse suhe

c_{δ} – õhu soojusmahtuvus, kJ/(kg*K)

$c_{\delta,sp}$ – sissepuhkeõhu soojusmahtuvus, kJ/(kg*K)

$c_{\delta,vt}$ – väljatõmbeõhu soojusmahtuvus, kJ/(kg*K)

L – õhu mahuline vooluhulk, m³/s

L_m – õhu massivooluhulk, kg/s

$L_{m,min}$ – väiksem sissepuhke ja väljatõmbe massivooluhulkadest, kg/s

$L_{m,sp}$ – sissepuhkeõhu massivooluhulk, kg/s

$L_{m,vt}$ – väljatõmbeõhu massivooluhulk, kg/s

NTU – number of transfer units või eesti keelselt näiteks soojusülekanne ühikute arv

NTU_{corr} – korrigeeritud NTU väärtus

p_a – veeauru osarõhk, Pa

q – tegelik soojusülekanne võimsus soojusvahetis, kW

Q – tunnis kasutatav energiahulk, kWh

q_{max} – maksimaalne võimalik soojusülekanne võimsus soojusvahetis, kW

q_{sp} – tegelik soojusvaheti soojusülekanne võimsus sissepuhke järgi, kW

$Q_{tagastiga}$ – soojustarbimine soojustagastiga olukorras, kWh/a

$Q_{tagastita}$ – soojustarbimine, kui soojustagastit ei oleks olnud, kWh/a

q_{vt} – tegelik soojusvaheti soojusülekanne võimsus väljatõmbe järgi, kW

SP_{et} – sissepuhkeõhu parameeter enne soojustagastit, °C

SP_{pt} – sissepuhkeõhu parameeter peale soojustagastit, °C

T – õhu temperatuur, K

t_1 – õhu algtemperatuur, °C

t_2 – õhu lõpptemperatuur, °C

$t_{vö,crit}$ – välistemperatuur, millest alates lisakütet ei vajata, °C

U – soojusvaheti soojuslähikandetegur, W/m²*K

VT_{et} – väljatõmbeõhu parameeter enne soojustagastit, °C

VT_{pt} – väljatõmbeõhu parameeter peale soojustagastit, °C

Δt_{max} – maksimaalne võimalik temperatuurimuutus, °C

ε – soojustagasti efektiivsus, -

ε_{corr} – korrigeeritud soojustagasti deklareeritud efektiivsus, -

$\varepsilon_{deklareeritud}$ – soojustagasti tootja poolt deklareeritud efektiivsus, -

η_a – soojustagasti aastane kasutegur

η_h – hetkeline soojuslik kasutegur sissepuhke järgi

η_{sp} – soojustagasti hetkeline kasutegur sissepuhke järgi

$\eta_{t,sp}$ – hetkeline temperatuuri suhtarv sissepuhke järgi

$\eta_{t,sp,corr}$ – õhuhulkadega korrigeeritud temperatuuri suhtarv sissepuhke järgi

$\eta_{t,vt}$ – hetkeline temperatuuri suhtarv väljatõmbe järgi

$\eta_{t,vt,corr}$ – õhuhulkadega korrigeeritud temperatuuri suhtarv väljatõmbe järgi

η_{vt} – soojustagasti hetkeline kasutegur väljatõmbe järgi

η_x – hetkeline niiskuslik kasutegur sissepuhke järgi

ρ_{δ} – niiske õhu tihedus antud temperatuuril, kg/m³

Φ – lisasoojenduseks vajalik keskmine võimsus tunnis, kW

SISSEJUHATUS

Euroopa Liidu üheks keskseks tegevusvaldkonnaks olnud jätkusuutvama energia- ja kliimapoliitika välja töötamine. Viimasel toetusperioodil (2014-2020) suunati märkimisväärne hulk finantsvahendeid erinevatesse toetusmeetmetesse, mille peamiseks eesmärgiks oli üleüldise ressursitõhususe suurendamine.

Eestis oli üheks selliseks meetmeks „Ettevõtete ressursitõhusus“ [1]. Selle kogumaht oli 202 miljonit eurot, millest 101 miljonit eurot olid Euroopa Liidu vahendid.

Üheks oluliseks ressursiks on energia, mille säästmise lahenduste välja töötamisega liikmesriigid tegelevad. Eestis on selles valdkonnas peamiseks eestvedajaks olnud Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium. Nende poolt on muuhulgas välja töötatud erinevad nõuded hoonete energiatõhususele ning on koostatud ka abimaterjalid eesmärkide lihtsamaks saavutamiseks [2].

Hoonete energiavajadus moodustab olulise osa Euroopa energiabilansist, selle osakaal on ca 40% [3]. Kasutatavate fossiilkütuse mahu ning CO₂ heitmete vähendamiseks on järjest suuremat tähelepanu pööratud sisekliima tagamise süsteemide renoveerimisele ning energiatõhusamaks muutmisele. Üheks oluliseks energiasäästumeetmeks on soojustagasti rakendamine hoonete sissepuhke- ja väljatõmbeventilatsioonis. Vastavalt hoonete energiatõhususe miinimumnõuete määrusele on see Eestis kohustuslik [4]. Soojustagasti peamiseks eesmärgiks on ruumidest välja tõmmatava sooja õhu energia üle kandmine külmale sissepuhkeõhule. Suvises olukorras, kus ruumis olev õhk on jahedam kui väljas, on soojustagastit võimalik kasutada sissepuhkeõhu jahutamiseks.

Soojustagastite efektiivsuse iseloomustamiseks ning nende omavaheliseks võrdlemiseks kasutatakse soojustagasti temperatuuri suhtarvu mõistet. Selle abil on võimalik hinnata, kui suure osa energiast suudab süsteem tagastada. Andmete võrreldavuse eesmärgil on soojustagastite testimise protsess standardiseeritud ning erinevad valmistajad peavad oma toodet iseloomustava kasuteguri tooma välja samadel tingimustel. Ühepereelamutele mõeldud sundventilatsioonisüsteemide soojustagasteid testitakse vastavalt standardile EVS-EN 13141-7:2010, muude ventilatsiooniseadmete soojustagasteid testitakse vastavalt standardile EVS-EN 308:2000. Standardis EVS:EN 308:2000 kehtestatud tingimuste kohaselt testitakse soojustagastit enamasti nõ. kuivas olukorras, väljatõmbeõhu kastepunkti temperatuur peab olema madalam, kui soojustagastisse siseneva õhu temperatuur, see tagab olukorra, kus kondenseerumist soojusvahetis ei toimu.

Madalenergia- ja liginullenergiahoonete puhul on äärmiselt oluline hoonete tehnosüsteemide töö pidev jälgimine ning optimeerimine. See aitab operatiivselt avastada ning kõrvaldada ebakõlasid, mis võivad oluliselt mõjutada hoone energiatarvet. Liginullenergiahoonete korral on hoone energiatarve viidud nii madalaks, et mingi tõrkega seotud täiendav tarbimine võib bilansiliselt moodustada märgatava osa. Ülevaate saamiseks on osade hoonete automaatikasüsteemidesse lisatud tehnosüsteemide tööparameetreid jälgida võimaldavad moodulid. Ventilatsioonisüsteemide puhul on muude näitajate hulgas üldjuhul väljatoodud ka soojustagastite hetkelised temperatuurisuhtarvud. Nende väärtuste abil on võimalik anda esmane hinnang sellele, kas soojustagasti on töökorras või mitte. Et kuvatavat väärtust õigesti tõlgendada, on vaja mõista selle sisu, olenevalt objektist võivad rakenduses kuvatud väärtused olla leitud/arvutatud erineval moel. Energiasäästu seisukohalt on tähtis, et automaatikasüsteemis esitatud väärtus oleks korrektne, sellisel juhul on võimalik tehnosüsteeme hooldavale meeskonnale anda aegsasti info selle kohta, et soojustagasti ei tööta efektiivselt ning on vaja teostada ülevaatus objektil.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on hinnata, millise kvaliteediga on hoonete automaatikasüsteemides esitatavad hetkelised temperatuuri suhtarvud, kas nende arvutuskäik on korrektne ja milliseid parandeid on sisse viidud. Töö käigus uuriti, milliseid andmeid on korrektse temperatuuri suhtarvu arvutuste jaoks minimaalselt vaja, kus peaksid paiknema andmete kogumiseks vajalikud andurid, milliste parameetrite juures arvutatud väärtused on võrreldavad tootja poolt deklareeritud temperatuuri suhtarvuga ning kui palju mõjutab erinevate arvutusvalemite kasutamine saadud väärtuseid. Töö käigus uuriti kolme erinevat tüüpi soojustagastiga ventilatsiooniseadet – plaatsoojusvahetiga, rootorsoojusvahetiga ja vahesoojuskandjaga soojustagastiga ventilatsiooniseadet.

Magistritöö täiendavaks eesmärgiks on välja töötada arvutusmetoodika, millega saab lihtsustatud moel hinnata ventilatsiooniseadmes raisatava soojusenergia kogust olukordades, kus soojustagasti kasutegur on madalam nominaalsest. Saadud tulemuste põhjal on võimalik arvutada soojustagasti ebaefektiivsusest tingitud täiendav rahakulu valitud ajaperioodi kohta. See omakorda aitab vajalikele parendustöödele välja arvutada ligikaudse tasuvusaja. Leitud lahendus soovitakse kasutusele võtta ettevõtte Ruut8 OÜ poolt loodud tehnosüsteemide jälgimise/optimeerimise tarkvaras.

Võtmesõnad: soojustagasti, temperatuuri suhtarv, õhuhulkadega korrigeerimine, NTU, ventilatsioon, energiakulu, magistritöö

1. TEOREETILISED ALUSED

1.1 Soojustagastid

Soojustagastid kannavad ilmset soojust (mõnikord ka varjatud soojust) väljatõmbeõhult sissepuhkeõhule. Sellega seoses vähendatakse soojuskadu ventilatsioonisüsteemides ja energiavajadust külma välisõhu soojendamiseks. Kui välisõhk on soojem kui väljatõmmatav õhk, siis võimaldab soojustagasti sissepuhkeõhku ka jahutada, mis jällegi vähendab kulutusi sissepuhkeõhu jahutamisele. [5]

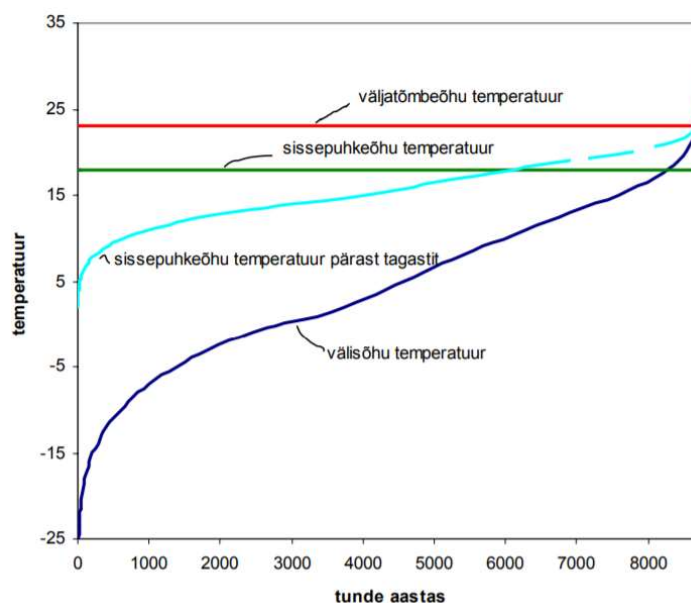
Soojustagasti peamiseks komponendiks on soojusvaheti. Soojustagastid jagatakse kahte gruppi, regeneratiivsed ja rekuperatiivsed [6].

Regeneratiivsed soojusvahetid kasutavad energia ülekandmiseks soojust akumulatsioonivahendite pindasid, mis on tavaliselt metallist. Läbi soojusvaheti suunatakse kordamööda sissepuhke- ning väljatõmbeõhku, millest tulenevalt kantakse soojus ühelt teiselt. Need soojusvahetid võimaldavad ka niiskuse ülekannet. Esineda võib soovimatu leke sissepuhke- ning väljatõmbeõhu vahel, 2-4% väljatõmbeõhust võib sattuda sissepuhkeõhku. Leket on võimalik vähendada ventilaatorite oskusliku paigutusega seadmes. Ventilaatorid peaksid olema paigutatud selliselt, et rõhkudest tulenevalt on leke sissepuhkepoolelt väljatõmbepoolele. Üheks levinuimaks näiteks on rootorsoojustagasti. [5]

Rekuperatiivsete soojusvahetite korral kantakse energia üle kas soojust juhtiva eralduspinna (plaatsoojusvaheti või toru-torus soojusvaheti) või vedeliku abil (vahesoojuskandjaga soojustagasti). Seda tüüpi soojustagastite puhul on õhuvoolud üksteisest eraldatud ning teoreetiliselt õhuhulgad üksteisega seguneda ei saa. Praktikas esineb plaatsoojustagastitel siiski 1-3 %-line segunemine seoses sisemiste leketega. [5]

Õigesti dimensioneeritud, hooldatud ning kõrge efektiivsusega soojustagastussüsteem tasub ära mõne aastaga. Seda seoses vähenenud kuludega ventileerimisele ning ruumide kütmisele. Tasuvusaeg on lühem, kui väljatõmbeventilaator asub enne soojustagastit, see võimaldab osaliselt tagastada ka ventilaatori mootori poolt toodetud soojusenergia. Ruumide üle kütmise vältimiseks peaks olema võimalik soojustagastuse efektiivsust soojal ajal vähendada. [5]

Soojustagasti võimaldab vähendada õhu täiendavaks soojendamiseks vajalikku energiakogust. Selle illustreerimiseks on järgneval joonisel 1.1 esitatud ventilatsioonisüsteemi temperatuurid kestuskõveral.



Joonis 1.1 Soojustagastiga ventilatsioonisüsteemi temperatuurid kestuskõveral [6]

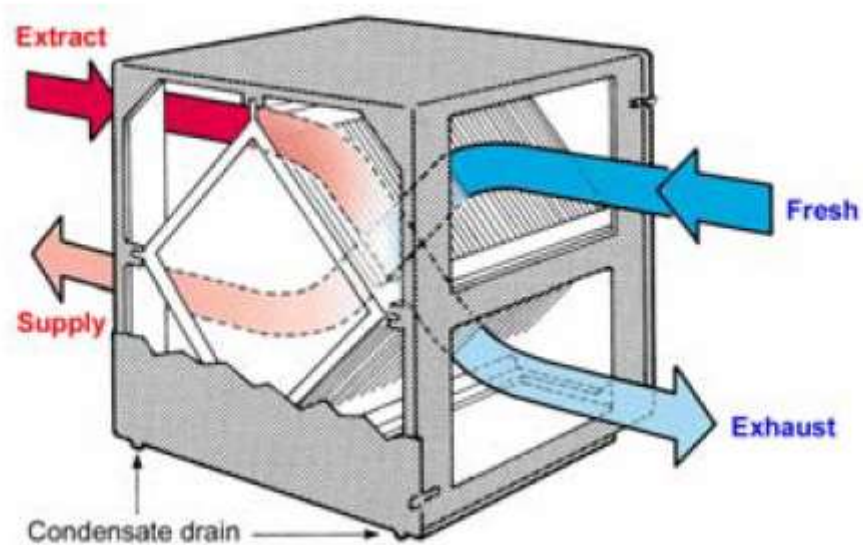
Pindala, mis on piiratud välisõhu temperatuuri joonega, sissepuhkeõhu temperatuuri joonega ning joonega, mis iseloomustab sissepuhkeõhu temperatuuri pärast soojustagastit iseloomustab soojustagastist saadavat aastast soojustarbimist. Pindala, mis on piiratud sissepuhkeõhu temperatuuri joonega pärast soojustagastit ning sissepuhkeõhu temperatuuri joonega kajastab aastast kalorifeeri soojustarbimist. Vaadeldud pindalade summa illustreerib ventilatsiooniseadme aastast soojustarbimist olukorras, kus soojustagasti puudub. [6]

Joonisele 1.1 tuginedes saab öelda, et soojustagasti ekspluatatsioonieagne korrasolek on äärmiselt tähtis, vastasel juhul suureneb kütmiseks vajalik energiakogus märgatavalt.

Järgnevates alapeatükkides antakse ülevaade kolmest põhilisest soojustagasti tüübist.

1.1.1 Plaatsoojustagasti

Plaatsoojustagasti on enimlevinud soojustagasti tüüp, mis on oma nime saanud tulenevalt soojusvaheti ülesehitusest. Seade koosneb õhukestest plaatidest, mis on üksteise külge ühendatud moel, mis võimaldab õhul plaatide vahel liikuda. Plaadid võivad olla nii siledad kui ka lainetusega. Protsessi käigus kantakse energia väljatõmmatavalt õhult sissepuhutavale õhule. Joonisel 1.2 on näidatud plaatsoojusvaheti põhimõtteline ülesehitus. [7]



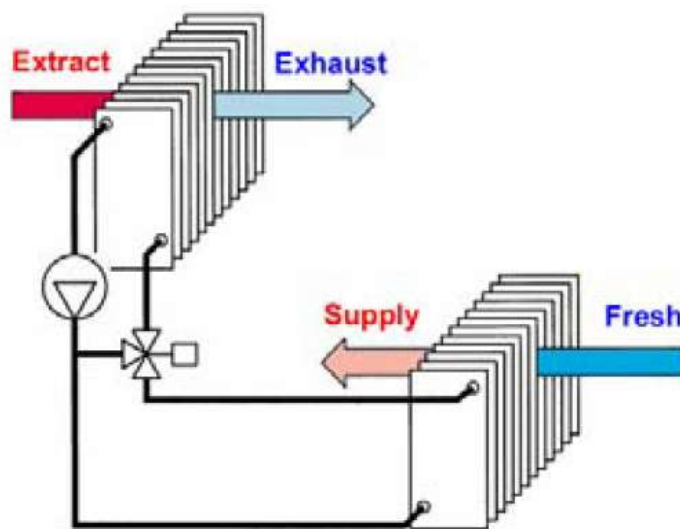
Joonis 1.2 Plaatsoojustagasti põhimõtteline skeem [5]

Oma ülesehituselt jagunevad need vastuvoolu ja ristivoolu plaatsoojustagastiteks [8]. Plaatsoojustagastite ilmse soojuse (ehk soojuse, mille mõjul tõuseb õhutemperatuur) efektiivsus jääb tüüpiliselt vahemikku 50-80%. Tulenevalt sellest, et õhuvoolud on üksteisest eraldatud, ei esine niiskuse ülekannet. Varjatud soojuse ülekanne on võimalik juhul, kui soojustagastis toimub õhust veeauru välja kondenseerumine (olukorras, kus soojusvaheti pinnatemperatuur on madalam kui õhu kastepunkti temperatuur) ja veeauru kondenseerumisel vabanenud soojusenergia kantakse soojusülekande teel sissepuhke poolele ilmse soojuse kujul. [9]

Madalatel välisõhutemperatuuridel võib tekkida olukord, kus õhust välja kondenseerunud veeaur jääb. See juhtub olukorras, kus soojusvaheti pinnatemperatuur langeb alla 0°C . Soojusvaheti jäätumise korral suureneb rõhulang ning väheneb soojustagasti efektiivsus. Kondenseerumise ja jäätumise vältimiseks on soojustagastitel kasutusel möödaviigukanalid, mille avamist juhitakse reguleerklappidega. Need võimaldavad osa või kogu külma õhu soojusvahetist mööda juhtida. Olukorras, kus soojusvaheti on jäätunud, suunatakse sellest läbi vaid soe väljatõmbeõhk, mis sulatab jää ning loob võimaluse seadme normaalseks opereerimiseks. Möödaviiguklappidega on võimalik reguleerida ka soojustagasti efektiivsust. [9]

1.1.2 Vahe-soojuskandjaga soojustagasti

Vahe-soojuskandjaga soojustagasti kasutab tavapäraselt kahte eraldiseisvat kalorifeeri, millest üks paikneb sissepuhkekanalis ning teine väljatõmbekanalil. Kalorifeeride vahele on paigaldatud torustik, mille sees voolab pumba poolt liigutatav soojuskandja. Selline süsteem võib tööks vajada paisupaaki, kuna soojuskandja maht sõltub selle temperatuurist. Joonisel 1.3 on näidatud vahe-soojuskandjaga soojusvaheti põhimõtteline skeem. [7]



Joonis 1.3 Vahe-soojuskandjaga soojustagasti põhimõtteline skeem [6]

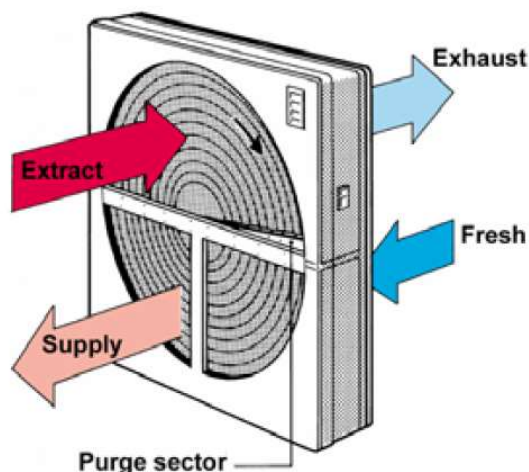
Vahe-soojuskandjaga soojustagasti eeliseks on see, et sissepuhke- ning väljatõmbekanalid ei pea paiknema kõrvuti. Selle süsteemi puhul puudub oht õhuvoolude segunemiseks. Seda tüüpi soojustagasti peamiseks puuduseks on täiendava soojuskandja kasutamise kaasnõu süsteemi madalam kasutegur. Täiendavaks kuluks on ka pumba poolt tarvitatav elektrienergia. Tavapäraselt jääb vahe-soojuskandjaga soojustagasti efektiivsus vahemikku 45-65%. [7]

Vahe-soojuskandjaga soojusvahetit on võimalik kasutada ka juhtudel, kus mitme väljatõmbesüsteemi soojus kantakse üle ühele sissepuhkesüsteemile. Näiteks sobib see haiglatesse, kus on mitmed väljatõmbesüsteemid (palatid, üldruumid jms).

Süsteem on sesoonselt pööratava soojusvoo suunaga, olenevalt temperatuuritingimustest on võimalik sissepuhkeõhku kas eelsoojendada või eeljahutada [10].

1.1.3 Rotorsoojustagasti

Rotorsoojustagasti peamiseks komponendiks on pöörlev silinder, mille sees on väiksed, alumiiniumist kanalid [3]. Konkreetsetel ajahetkedel paikneb pool silindrit väljatõmbekanalid ja teine pool sissepuhkekanalis. Talvise olukorras soojendab väljatõmbeõhk rotorsoojusvaheti ühe poole üles, mis see järel pöörduv külmale, sissepuhke poolele. Seal kandub soojus välisõhule. Joonisel 1.4 on näidatud rotorsoojustagasti põhimõtteline skeem.



Joonis 1.4 Rotorsoojustagasti põhimõtteline skeem [5]

Rotorsoojustagastid jagunevad hügrokoopseteks ja mittehügrokoopseteks. Hügrokoopse soojustagasti puhul on kanalid kaetud spetsiaalse pinnakattega, mis suurendab niiskuse ülekannet väljatõmbe- ja sissepuhkeõhu vahel [3].

Rotorsoojustagasti puhul on tähtsaks parameetrikus selles paiknevate kanalite pindala. Seda tüüpi soojustagasti efektiivsus võib olla 85% ja enamgi. Tulenevalt kondenseerumisest võimaldavad rotorsoojustagastid ka niiskuse ülekannet (nii hügrokoopset kui ka mittehügrokoopset). Külmas kliimas aitab täiendav niiskuse ülekandumine vältida väga madalat suhtelist niiskust sissepuhkeõhus. [3]

Rotorsoojustagasti puuduseks on väljatõmbeõhu osaline tagastamine sissepuhkeõhku. Ilma puhastussektorita soojustagasti korral võib tagastuv väljatõmbeõhk moodustada 2-4% sissepuhkeõhust. Puhastussektoriga seadmete korral võib tagastuse määr jääda alla 1% [5]. Tulenevalt õhuvoolude segunemisest ei ole soovitatav rotorsoojustagastit kasutada kohtades, kus väljatõmbeõhus võib esineda baktereid, viiruseid, lõhnu või muid häirivaid tegureid.

Rotorsoojustagasti efektiivsust reguleeritakse selle pöörlemise kiirusega [7].

1.2 Soojustagastite efektiivsus

Soojustagasti kasutegurit saab avaldada erinevate õhuparameetrite kohta. Samuti on võimalik leida erinevaid ajaperioode iseloomustavaid suuruseid. Praktikas on kasutusel mõisted hetkeline kasutegur ja aastane kasutegur [6].

Soojustagasti hetkelisi kasutegureid saab arvutada nii sissepuhkeõhu parameetrite kui ka väljatõmbeõhu parameetrite järgi. Eksituste vältimiseks esitatakse kasutegurid üldjuhul sissepuhke järgi, kuna need on olulised soojustagasti ning küttekalorifeeri dimensioneerimisel.

Teoreetiliselt peaksid sissepuhkeõhu ning väljatõmbeõhu järgi arvatud temperatuuri suhtarvud olema võrdsed. Praktikas esineb seda aga harva, tavapäraselt on sissepuhkeõhu järgi leitud tulemused kõrgemad. Arvutustulemuste erinevus võib sõltuda mitmetest asjaoludest. Olenevalt temperatuuriandurite asukohast võib tulemustes kajastuda ka temperatuuri tõus sissepuhke- või väljatõmbeventilaatoris, ventilatsiooniseadmes võib esineda lekkeid, õhuhulgad ei pruugi olla võrdsed, võib esineda kondenseerumise mõju ning samuti mõjutab saadud tulemusi ka õhu soojenemine ventilatsiooniseadme korpuses. [11]

Soojustagasti hetkeline kasutegur sissepuhkeõhu järgi võrdub jagatisega, kus jagatavaks on sissepuhkeõhu mingi parameetri muut soojustagastis ja jagajaks on sama parameetri vahe väljatõmbe õhus enne soojustagastit ja sissepuhke õhus enne soojustagastit. Seda arvutuskäiku iseloomustab valem 1.1 [6]:

$$\eta_{sp} = \frac{SP_{pt} - SP_{et}}{VT_{et} - SP_{et}} \quad (1.1)$$

kus η_{sp} - soojustagasti hetkeline kasutegur sissepuhke järgi

SP_{pt} - sissepuhkeõhu parameeter peale soojustagastit, °C

SP_{et} - sissepuhkeõhu parameeter enne soojustagastit, °C

VT_{et} - väljatõmbeõhu parameeter enne soojustagastit, °C

Soojustagasti hetkeline kasutegur väljatõmbe järgi võrdub jagatisega, kus jagatavaks on väljatõmbeõhu mingi parameetri muut soojustagastis ja jagajaks on sama parameetri vahe väljatõmbeõhus enne soojustagastit ja sissepuhkeõhus enne soojustagastit. Seda arvutuskäiku iseloomustab järgnev valem 1.2:

$$\eta_{vt} = \frac{VT_{et} - VT_{pt}}{VT_{et} - SP_{et}} \quad (1.2)$$

kus η_{vt} – soojustagasti hetkeline kasutegur väljatõmbe järgi

VT_{pt} – väljatõmbeõhu parameeter peale soojustagastit, °C

Enim levinud soojustagastites toimub peamiselt ilmse soojuse vahetus, see tähendab, et parameetriks on temperatuur. Soojustagasti temperatuuri suhtarv sissepuhke järgi on avaldatav järgneva valemiga [6]

$$\eta_{t,sp} = \frac{t_{pt}^{sp} - t_{et}^{sp}}{t_{et}^{vt} - t_{et}^{sp}} \quad (1.3)$$

kus $\eta_{t,sp}$ – hetkeline temperatuuri suhtarv sissepuhke järgi

t_{pt}^{sp} – sissepuhkeõhu temperatuur peale soojustagastit, °C

t_{et}^{sp} – sissepuhkeõhu temperatuur enne soojustagastit, °C

t_{et}^{vt} – väljatõmbeõhu temperatuur enne soojustagastit, °C

Soojustagasti hetkeline temperatuuri suhtarv väljatõmbe järgi on avaldatav valemiga 1.4:

$$\eta_{t,vt} = \frac{t_{et}^{vt} - t_{pt}^{vt}}{t_{et}^{vt} - t_{et}^{sp}} \quad (1.4)$$

kus $\eta_{t,vt}$ – hetkeline temperatuuri suhtarv väljatõmbe järgi

t_{et}^{vt} – väljatõmbeõhu temperatuur enne soojustagastit, °C

t_{pt}^{vt} – väljatõmbeõhu temperatuur peale soojustagastit, °C

Kui soojustagastis toimub lisaks ilmse soojuse vahetusele ka varjatud soojuse ehk niiskuse vahetus, siis saab õhu parameetriks olla kas niiskussisaldus x või soojussisaldus h . Sellisel juhul on sissepuhke järgi arvutades hetkeline niiskuslik kasutegur arvutatav valemiga 1.5 [6]:

$$\eta_x = \frac{x_{pt}^{sp} - x_{et}^{sp}}{x_{et}^{vt} - x_{et}^{sp}} \quad (1.5)$$

kus η_x – hetkeline niiskuslik kasutegur sissepuhke järgi

x_{pt}^{sp} – sissepuhkeõhu niiskussisaldus peale soojustagastit, g/kg_{kõ}

x_{et}^{sp} – sissepuhkeõhu niiskussisaldus enne soojustagastit, g/kg_{kõ}

x_{et}^{vt} – väljatõmbeõhu niiskussisaldus enne soojustagastit, g/kg_{kõ}

Hetkeline soojuslik kasutegur sissepuhke järgi on leitav valemiga 1.6 [6]:

$$\eta_h = \frac{h_{pt}^{sp} - h_{et}^{sp}}{h_{et}^{vt} - h_{et}^{sp}} \quad (1.6)$$

kus η_h – hetkeline soojuslik kasutegur sissepuhke järgi

h_{pt}^{sp} – sissepuhkeõhu soojussisaldus peale soojustagastit, kJ/kg_{kõ}

h_{et}^{sp} – sissepuhkeõhu soojussisaldus enne soojustagastit, kJ/kg_{kõ}

h_{et}^{vt} – väljatõmbeõhu soojussisaldus enne soojustagastit, kJ/kg_{kõ}

Eelevalt kirjeldatud valemid on kasutatavad olukorras, kus soojusvaheti sissepuhke- ja väljatõmbepoolel olevad õhu massivooluhulgad on võrdsed. Olukorras, kus õhu massivooluhulgad on erinevad, tuleb arvutustesse sisse viia sellega seotud parand. Õhu massivooluhulga leidmiseks on vajalik teada õhu mahuvooluhulka ning tihedust, seejärel on massivooluhulk leitav valemiga 1.7 [12]:

$$L_m = L * \rho_{\delta} \quad (1.7)$$

kus L_m – õhu massivooluhulk, kg/s

L – õhu mahuline vooluhulk, m³/s

ρ_{δ} – niiske õhu tihedus antud temperatuuril, kg/m³

Niiske õhu tihedust saab vaadata kui kuiva õhu ja veeauru tiheduste summat [12]. Järgnevas valemis on esimene liidetav kuiva õhu komponent ja teine liidetav on veeauru komponent. Niiske õhu tihedus antud temperatuuril on võimalik leida valemiga 1.8 [12]:

$$\rho_{\delta} = \frac{353}{T} - \frac{1,32 * 10^{-3} * p_a}{T} \quad (1.8)$$

kus T – õhu temperatuur, K

p_a – veeauru osarõhk, Pa

Valemist 1.8 on näha, et niiske õhu tihedus on väiksem kui kuival õhul, seda põhjusel, et veeauru molaarmass on väiksem kuiva õhu molaarmassist. Valemi teise liikme osakaal on kuni 0,75%, sellest tulenevalt tehakse praktilistes arvutustes lihtsustus, et niiske õhu tihedus on võrdne kuiva õhu tihedusega. Seega niiske õhu tihedus leitakse valemiga 1.9 [12]:

$$\rho_0 \approx \frac{353}{T} \quad (1.9)$$

Käesolevas magistritöös pööratakse enim tähelepanu soojustagastite temperatuuri suhtarvu analüüsimisele. Järgnevalt on välja toodud õhuhulkadega korrigeeritud temperatuuri suhtarvu arvutusvalemid nii sissepuhke kui ka väljatõmbe järgi.

Õhuhulkadega korrigeeritud temperatuuri suhtarv sissepuhke järgi avaldub valemiga 1.10 [3]:

$$\eta_{t,sp,corr} = \frac{t_{pt}^{sp} - t_{et}^{sp}}{t_{et}^{vt} - t_{et}^{sp}} * \frac{L_{m,sp}}{L_{m,vt}} \quad (1.10)$$

kus $\eta_{t,sp,corr}$ – õhuhulkadega korrigeeritud temperatuuri suhtarv sissepuhke järgi

$L_{m,sp}$ – sissepuhkeõhu massivooluhulk, kg/s

$L_{m,vt}$ – väljatõmbeõhu massivooluhulk, kg/s

Õhuhulkadega korrigeeritud temperatuuri suhtarv väljatõmbe järgi leitakse valemiga 1.11 [3]:

$$\eta_{t,vt,corr} = \frac{t_{et}^{vt} - t_{pt}^{vt}}{t_{et}^{vt} - t_{et}^{sp}} * \frac{L_{m,vt}}{L_{m,sp}} \quad (1.11)$$

kus $\eta_{t,vt,corr}$ – õhuhulkadega korrigeeritud temperatuuri suhtarv väljatõmbe järgi

Soojustagasti aastane kasutegur on leitav valemiga 1.12 [6]:

$$\eta_a = 1 - \frac{Q_{tagastiga}}{Q_{tagastita}} \quad (1.12)$$

kus η_a – soojustagasti aastane kasutegur

$Q_{tagastiga}$ – soojustarbimine soojustagastiga olukorras, kWh/a

$Q_{tagastita}$ – soojustarbimine, kui soojustagastit ei oleks olnud, kWh/a

Üheks täiendavaks soojustagastite efektiivsuse hindamise meetodiks on NTU meetod. Lühend pärineb inglise keelsetest sõnadest *number of transfer units*. NTU-d defineeritakse kui soojusvaheti kogu konduktantsi ja madalama soojuserivõimsuse suhet. See on leitav järgmise valemiga [13]:

$$NTU = \frac{U * A}{C_{min}} \quad (1.13)$$

kus NTU – number of transfer units või eesti keelselt näiteks soojusülekandeühikute arv

U – soojusvaheti soojusläbikandetegur, $W/m^2 * K$

A – soojusvaheti pindala, m^2

C_{min} – madalam kahe õhuvooluhulga soojuserivõimsusest, W/K

NTU meetodi järgi leitakse soojustagasti efektiivsus järgmise valemiga [13]:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} \quad (1.14)$$

kus ε – soojustagasti efektiivsus, -

q – tegelik soojusülekandevõimsus soojusvahetis, kW

q_{max} – maksimaalne võimalik soojusülekandevõimsus soojusvahetis, kW

Maksimaalseks võimalikuks soojusvõimsuseks (q_{max}) loetakse olukorda, kus madalama soojuserivõimsusega õhuhulk läbib maksimaalse temperatuurimuutuse. See on leitav järgmiselt [13]:

$$q_{max} = C_{min} * \Delta t_{max} \quad (1.15)$$

kus Δt_{max} – maksimaalne võimalik temperatuurimuut, $^{\circ}C$

Soojuserivõimsus mõlema õhuhulga kohta on leitav järgmise valemiga [13].

$$C = c_{\delta} * L_m \quad (1.16)$$

kus C – soojuserivõimsus, kW/K

c_{δ} – õhu soojusmahtuvus, $kJ/(kg^{\circ}C)$

L_m – õhu massivooluhulk, kg/s

Maksimaalseks temperatuurimuuduks on sooja õhu sisenemistemperatuuri ning külma õhu sisenemistemperatuuri vahe [13]. Ventilatsiooniseadmete soojustagastite puhul on nendeks väljatõmbeõhu temperatuur enne soojustagastit ja sissepuhkeõhu temperatuur enne soojustagastit. Maksimaalne vedeliku temperatuurimuut on leitav järgneva valemiga.

$$\Delta t_{max} = t_{et}^{vt} - t_{et}^{sp} \quad (1.17)$$

kus t_{et}^{vt} - väljatõmbeõhu temperatuur enne soojustagastit, °C

t_{et}^{sp} - sissepuhkeõhu temperatuur enne soojustagastit, °C

Soojustagasti efektiivsuse hindamisel lähtutakse sellest õhuhulgast, mille soojuserivõimsus on madalam. Valemis 1.14 olevad väärtused q ja q_{max} leitakse sama õhuhulga kohta. Kui valemis 1.16 leitud väärtus on madalam väljatõmbeõhu kohta, siis leitakse efektiivsus väljatõmbe järgi, vastasel juhul sissepuhke järgi. Tegelik soojusülekandevõimsus soojusvahetis (q) sissepuhke järgi on leitav järgmiselt.

$$q_{sp} = L_{m,sp} * c_{\delta,sp} * (t_{pt}^{sp} - t_{et}^{sp}) \quad (1.18)$$

kus q_{sp} - tegelik soojusvaheti soojusülekandevõimsus sissepuhke järgi, kW

$c_{\delta,sp}$ - sissepuhkeõhu soojusmahtuvus, kJ/(kg*K)

Tegelik soojusülekandevõimsus soojusvahetis (q) väljatõmbe järgi on leitav järgmiselt.

$$q_{vt} = L_{m,vt} * c_{\delta,vt} * (t_{et}^{vt} - t_{pt}^{vt}) \quad (1.19)$$

kus q_{vt} - tegelik soojusvaheti soojusülekandevõimsus väljatõmbe järgi, kW

$c_{\delta,vt}$ - väljatõmbeõhu soojusmahtuvus, kJ/(kg*K)

Valemite 1.14-1.19 abil leitakse mõõdetud andmetel tuginevad tegelikud efektiivsused. Soojustagasti töö hindamiseks tuleb neid võrrelda soojustagasti tootja poolt deklareeritud väärtusega. Deklareeritud väärtus on üldjuhul esitatud olukorra kohta, kus sissepuhke ning väljatõmbe poolel liikuvate õhuvoolude massivoolumulgad on võrdsed. NTU meetodi abil on võimalik vastavalt õhu massivoolumulkade erinevusele korrigeerida tootja poolt esitatud deklareeritud väärtust. Käesolevas töös kasutatakse korrigeerimiseks valemid, mis on välja töötatud vastuvoolu tüüpi soojustagastite jaoks. Korrigeeritud deklareeritud efektiivsus leitakse valemiga 1.20 [13].

$$\varepsilon_{corr} = \frac{1 - e^{-NTU*(1-C_r)}}{1 - C_r * e^{-NTU*(1-C_r)}} \quad (1.20)$$

kus ε_{corr} – korrigeeritud soojustagasti deklareeritud efektiivsus, -

C_r – kahe õhuhulga madalama ning kõrgema soojuserivõimsuse suhe

Väärtus C_r on leitav järgmiselt [13].

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (1.21)$$

kus C_{max} – kõrgem kahe õhuhulga soojuserivõimsusest, kW/K

Olukorras $C_r=1$, on soojustagastit iseloomustav tegur NTU leitav järgmise valemiga [13].

$$NTU = \frac{\varepsilon_{deklareeritud}}{1 - \varepsilon_{deklareeritud}} \quad (1.22)$$

kus $\varepsilon_{deklareeritud}$ – soojustagasti tootja poolt deklareeritud efektiivsus, -

Olukorras $C_r \neq 1$, on soojustagastit iseloomustav tegur NTU leitav järgmise valemiga [13].

$$NTU_{corr} = \frac{1}{C_r - 1} * \ln \left(\frac{\varepsilon_{deklareeritud} - 1}{\varepsilon_{deklareeritud} * C_r - 1} \right) \quad (1.23)$$

kus NTU_{corr} – korrigeeritud NTU väärtus

Olukorras, kus $C_r=1$, on soojustagasti efektiivsus võimalik leida järgmiselt [13].

$$\varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU} \quad (1.24)$$

2018. aasta esimesest jaanuarist alates on Eestis nõutud, et sissepuhke-väljatõmbe ventilatsiooniseadmetes paiknevate soojustagastite temperatuuri suhtarvud oleksid vähemalt:

- 0.63 vahesoojuskandjaga soojustagastite puhul
- 0.73 muude soojustagastite puhul [14]

Käesolevas peatükis esitatud erinevate meetodite nimekiri ei ole lõplik. Tootekatalooge ning muid soojustagasteid kirjeldavaid dokumente uurides on võimalik leida, et esitatakse ka muud tüüpi kasutegureid, näiteks selliseid, kus on arvesse võetud ka ventilaatorite poolt tekitatud temperatuuritõus jms. Sellest tulenevalt on äärmiselt oluline aru saada presenteeriva väärtuse sisust, vastasel juhul ei ole võimalik seadmeid omavahel võrrelda.

1.2.1 Tsentraalsete ventilatsiooniseadmete soojustagastite testimine vastavalt standardile EVS-EN 308:2000

Soojustagastite efektiivsuse esitamiseks on praktikas kasutusel mitmeid erinevaid suhtarve, mis raskendavad erinevate valmistajate toodangu omavahelist võrdlemist. Selle probleemi lahendamiseks on välja töötatud standard EVS-EN 308:2000 („Soojusvahetid. Talitusandmete kindlaksmääramise toimingud õhk-õhk tüüpi soojuse ja lõõrigaaside soojuse korduskasutuseseadmete puhul“), kus kirjeldatakse millistel tingimustel tuleb tsentraalsetes ventilatsiooniseadmetes kasutatavaid soojustagasteid testida.

Nimetatud standardis on soojustagastid jaotatud viite gruppi:

- Grupp 1- Rekuperatiivsed soojustagastid
- Grupp 2a- Vahe-soojuskandjaga soojusvahetid, kus ei toimu soojuskandja faasimuutust
- Grupp 2b- Vahe-soojuskandjaga soojusvahetid, kus toimub soojuskandja faasimuutus (nt heat pipe)
- Grupp 3a- Regeneratiivne soojusvaheti, mitte hügrokoopne
- Grupp 3b- Regeneratiivne soojusvaheti, hügrokoopne

Standard kirjeldab järgmiste parameetrite testimist:

- Väline õhuleke
- Väljatõmbeõhu leke sissepuhkesse gruppidesse 1, 2a ja 2b kuuluvatel seadmetel
- Väljatõmbeõhu üle kandumine sissepuhkesse gruppidesse 3a ja 3b kuuluvatel seadmetel
- Temperatuuri- ja niiskussuhtarvud **sissepuhke** järgi

- Rõhulangud sissepuhke- ja väljatõmbepool

Käesoleva töö raames on oluline temperatuuri suhtarvu leidmise meetodika. Selle käigus mõõdetakse valemis 1.3 vajaminevaid temperatuure seitsmel erineval õhu massivooluhulga kombinatsioonil sõltuvalt nominaalsest massivooluhulgast.

Tabel 1.1 Testimisel kasutatavad õhu massivooluhulgad [15]

	1	2	3	4	5	6	7
$L_{m,sp}$	Nominaal	0,67*nominaal	1,5*nominaal	0,67*nominaal	Nominaal	Nominaal	1,5*nominaal
$L_{m,vt}$	Nominaal	Nominaal	Nominaal	0,67*nominaal	0,67*nominaal	1,5*nominaal	1,5*nominaal

Lisaks õhuhulkadele on ette antud ka soojustagastisse sisenevate õhuvoolude temperatuurid. Soojustagasteid testitakse kahes olukorras, ühel juhul kondensatsiooni ei esine (kuiv), teisel juhul toimub ka kondenseerumine (märg). Tabelites 1.2 ja 1.3 on välja toodud testimisel kasutatavad õhuparameetrid.

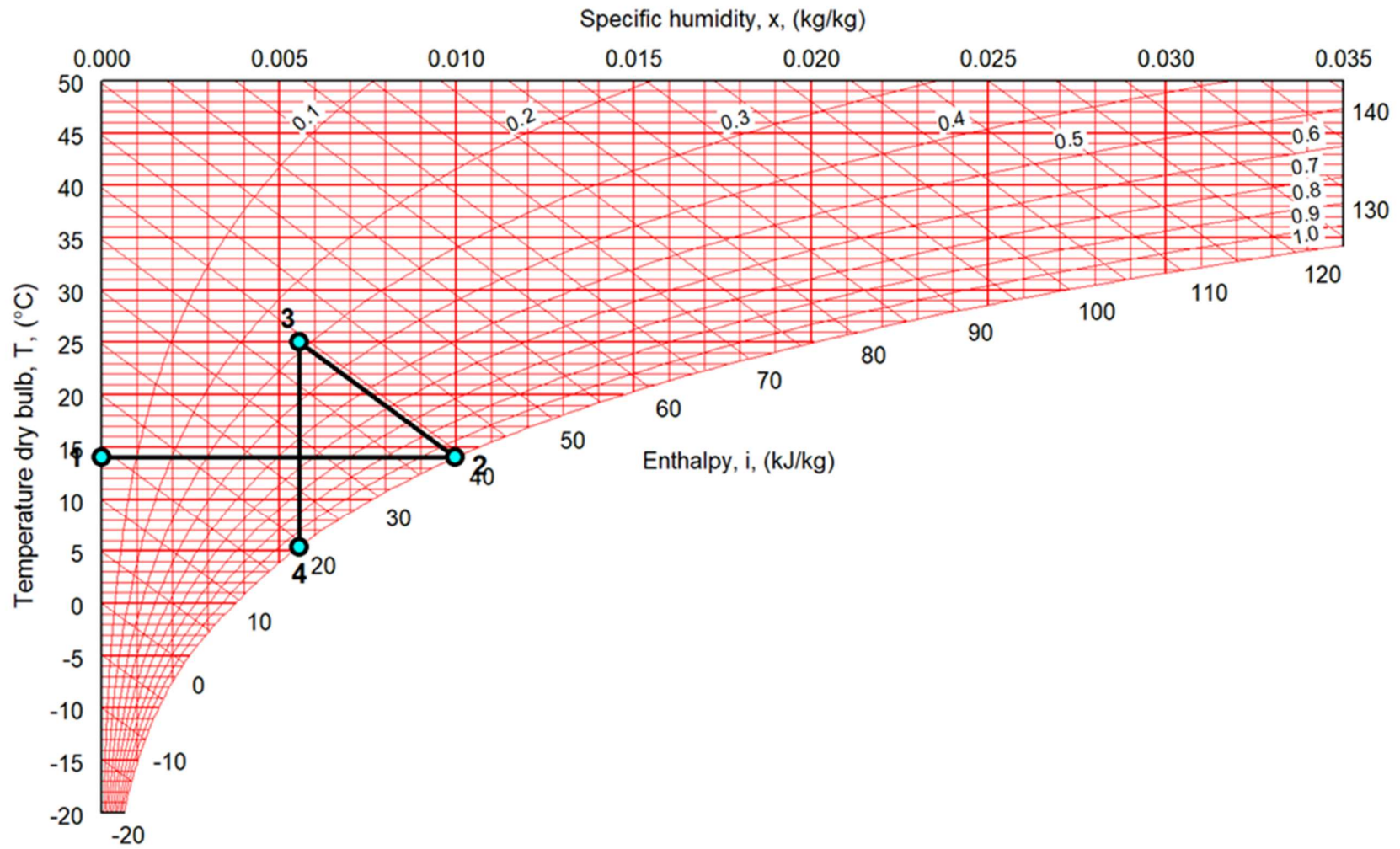
Tabel 1.2 Soojustagastite testimisel kasutatava õhu parameetrid [15]

Soojustagasti kategooria	1, 2a, 2b, 3a	3b
Väljatõmbeõhu temperatuur		
Kuiva termomeetri näit	25 °C	25 °C
Märja termomeetri näit	<14 °C	18 °C
Õhuvõtu temperatuur		
Kuiva termomeetri näit	5 °C	5 °C
Märja termomeetri näit		3 °C

Tabel 1.3 Täiendavate testimiste õhu parameetrid, kui soojustagasteid kasutatakse kütteks [15]

Soojustagasti kategooria	1, 2a, 2b	
Väljatõmbeõhu temperatuur		
Kuiva termomeetri näit	25 °C	15 °C ¹⁾
Märja termomeetri näit	18 °C	10 °C ¹⁾
Õhuvõtu temperatuur		
Kuiva termomeetri näit	5 °C	
Märja termomeetri näit	-15 °C ¹⁾	
¹⁾ Täiendavad testid külmades kliimades		

Joonisel 1.5 on osaliselt näidatud soojustagastite kategooriate 1, 2a, 2b, ja 3a kuiva olukorra testimiseks kasutatavate õhuvoolude parameetrid (vastavad tabelis 1.2 toodud väärtustele). Punkt 3 iseloomustab väljatõmbeõhku, mille kuiva termomeetri näit on 25 °C ning märja termomeetri näit 14 °C. Graafikult on loetav, et sellise õhu kastepunktitemperatuur on ligikaudu 5 °C (arvutuslikult 5.11 °C). Vastavalt tabelis 1.2 toodud tingimustele peab sissepuhke poolelt siseneva õhu kuiva termomeetri temperatuur olema 5 °C. Eelnevale tuginedes saab öelda, et kuivas olukorras kondenseerumine puudub või see on minimaalne.



Joonis 1.5 Tabelis 1.2 toodud testimise parameetrid soojustagastite kategooriatele 1, 2a, 2b ja 3a Mollieri diagrammil

Nii kuiva kui ka märja olukorra testimise tulemused dokumenteeritakse ning esitatakse kinnitamiseks. Käesoleva magistritöö lisas 1 on illustreerimiseks esitatud Akadeemia tee 5a paikneva ventilatsiooniseadme SV10 tehniline spetsifikatsioon, kus on välja toodud selles seadmes paikneva soojustagasti temperatuuri suhtarv ehk kuiv efektiivsus vastavalt standardile EVS-EN 308:2000.

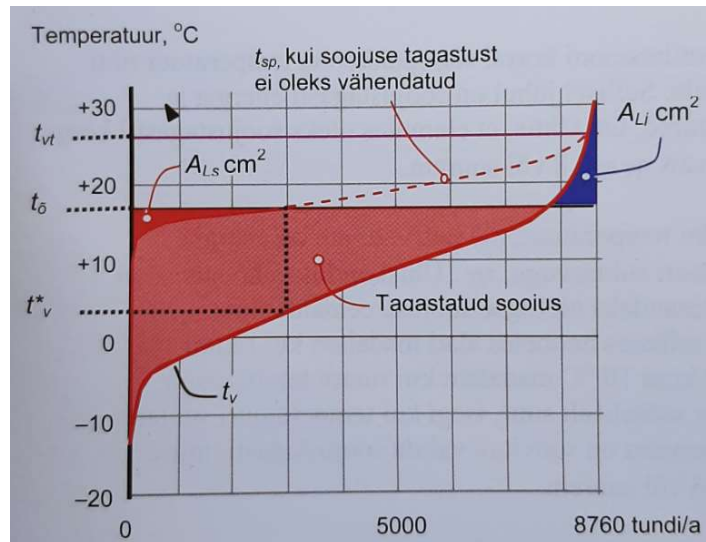
1.2.2 Soojustagastite temperatuuri suhtarvu esitamine hoone automaatikasüsteemis

Olenevalt hoonesse paigaldatud tehnosüsteemide automatiseerituse tasemest võib olla võimalik jälgida nende toimimist iseloomustavaid parameetreid. Ventilatsiooniseadmete kohta on tavapäraselt võimalik jälgida nii erinevaid temperatuure, õhuhulkasid kui ka efektiivsusnäitajaid. Muuhulgas on üldiselt välja toodud ka soojustagasti hetkeline temperatuuri suhtarv.

Olenevalt olukorrast võib visualiseeritav näit olla leitud kas sissepuhkeõhu või väljatõmbeõhu parameetrite järgi. Lisaks eelnevale on oluline aru saada, kas kuvatav näit on õhu massivooluhulkadega korrigeeritud või mitte. Et kuvatavat informatsiooni õigesti tõlgendada, tuleks võimaluse korral automaatikasüsteemi (või kontrolleri) juhendist leida seda teemat selgitav peatükk. Käesoleva töö lisas 2 on illustreerimiseks esitatud väljavõtte Siemensi kontrolleri juhendist. Sellest on näha, et temperatuuri suhtarvu saab leida nii sissepuhke- kui ka väljatõmbeõhu järgi, aga puudub võimalus õhu massivooluhulkadega korrigeerimiseks.

1.3 Soojustagastite mõju ventilatsiooniseadmes tarbitavale soojusenergiale

Ventilatsiooniseadmetes tarbitakse soojusenergiat eesmärgiga soojendada külm välisõhk temperatuurini, mis on sobilik sissepuhkeks teenindatavatesse ruumidesse. Õhu soojendamiseks vajalik energia saadakse üldjuhul soojustagastist ning küttekalorifeerist. Õhu soojendamiseks vajalikku energiakogust on hea visualiseerida kestvusgraafikuna. Joonisel 1.6 on kujutatud 8760 tundi aastas töötava ventilatsioonisüsteemi energiakasutus.



Joonis 1.6 Ventilatsioonisüsteemi energiakasutus [16]

Joonisel määrab roosaga näidatud kujundi pindala soojustagasti poolt tagastatava soojushulga ning punasega näidatud kujundi pindala lisakütteks kuluva soojushulga. Lisaks on joonisel sinisega näidatud ka jahutuseks kuluv energiahulk ning eraldi joonena on välja toodud sissepuhkeõhu temperatuur pärast soojustagastit. Graafikult on näha, et soojustagasti peab täisvõimsusel töötama vaid olukordades, kus välisõhu temperatuur on madalam kui t_v^* . Kui soojustagasti töötaks täisvõimsusel ka kõrgema välisõhu temperatuuri korral, siis ületaks sissepuhkeõhu temperatuur pärast soojustagastit sissepuhkeõhu temperatuuri seadeväärtust. Joonis 1.6 illustreerib soojustagasti olulisust ventilatsiooniseadmes tarbitava soojusenergia säästmisel.

Ventilatsiooniseadmes kasutatavat soojusenergiat on võimalik leida kasutades valemeid 1.25-1.29.

Vajalik võimsus õhu soojendamiseks ventilatsiooniseadmes leitakse valemiga 1.25 [12].

$$\Phi = c_{\delta} * L_m * (t_2 - t_1) \quad (1.25)$$

kus Φ – soojusvõimsus, kW

c_{δ} – õhu erisoojus, kJ/kg °C

L_m – õhu massivooluhulk, kg/s

t_2 – õhu lõpptemperatuur, °C

t_1 – õhu algtemperatuur, °C

Lisakütte vajadus sõltub soojustagasti efektiivsusest. Mida kõrgem on soojustagasti efektiivsus, seda kõrgem on sissepuhkeõhu temperatuur peale soojustagastit (kui muud parameetrid ei muutu), sellest tulenevalt väheneb lisakütte vajadus.

Leidmaks soojustagasti efektiivsuse muudu energeetilist mõju ventilatsioonisüsteemile, tuleb leida vajaliku lisakütte võimsus erinevate soojustagasti temperatuuri suhtarvude juures. Selle jaoks sisestatakse valemisse 1.25 sissepuhkeõhu temperatuuri seadeväärtuse ning sissepuhkeõhu temperatuuri pärast soojustagastit:

$$\Phi = c_{\delta} * L_m * (t_{sp}^{seadepunkt} - t_{pt}^{sp}) \quad (1.26)$$

kus $t_{sp}^{seadepunkt}$ – sissepuhkeõhu temperatuuri seadepunkt, °C

t_{pt}^{sp} – sissepuhkeõhu temperatuur pärast soojustagastit, °C

Sissepuhkeõhu temperatuur peale soojustagastit on leitav valemiga 1.27:

$$t_{pt}^{sp} = \eta_{t,sp,corr} * (t_{et}^{vt} - t_{et}^{sp}) + t_{et}^{sp} \quad (1.27)$$

kus $\eta_{t,sp,corr}$ – õhuhulkadega korrigeeritud, sissepuhke järgi leitud temperatuuri suhtarv

t_{et}^{vt} – väljatõmbeõhu temperatuur enne soojustagastit, °C

t_{et}^{sp} – sissepuhkeõhu temperatuur enne soojustagastit, °C

Tunnis kasutava energiakoguse saab leida järgmise valemiga:

$$Q = \Phi * 1h \quad (1.28)$$

kus Q – tunnis kasutatav energiahulk, kWh

Φ – lisasoojenduseks vajalik keskmine võimsus tunnis, kW.

Potentsiaalne energiakulu või -sääst on erinevate temperatuurisuhtarvude juures leitud energiakoguste vahe. Oluline on märkida, et lisakütet vajatakse ainult teatud välistemperatuurini, see on võimalik välja arvutada järgmise valemiga [16]:

$$t_{v\delta,crit} = \frac{1}{1 - \eta_{t,sp}} * [t_{sp}^{seadepunkt} - (\eta_{t,sp} * t_{et}^{vt})] \quad (1.29)$$

kus $t_{v\delta,crit}$ – välistemperatuur, millest alates lisakütet ei vajata, °C

Energiakulude võrdlemisel tuleb vaadelda vaid seda perioodi, kus sissepuhkeõhu temperatuur peale soojustagasti on madalam kui sissepuhkeõhu temperatuuri seadeväärtus. Vastasel juhul saadakse moonutatud tulemus.

1.4 Varasemad uurimused ja uurimisvajadus

Magistritöö üheks eesmärgiks on uurida, millist mõju omab soojustagasti temperatuuri suhtarvule õhuhulkade erinevine sissepuhke ja väljatõmbepool. Järgnevalt on toodud ülevaade varasematest teadustöödest, kus antud temaatikat uuritud on.

S. Caillou [11] uuris, millised on erinevused sissepuhke ja väljatõmbe järgi leitud temperatuuri suhtarvude vahel. Analüüsi käigus selgus, et erinevus sõltub peamiselt õhuleketest seadmes, ventilaatori tööst tingitud õhutemperatuuri tõusust, õhuhulkade erinevusest ning õhu soojenemisest seadme korpuses. Täiendavalt leiti, et nimetatud põhjused pigem suurendavad sissepuhke järgi leitud väärtust ning vähendavad väljatõmbe järgi leitud väärtust. Uuringus tõstetakse esile ka seda, et Belgias on välja töötatud meetodika, mille järgi esitatakse soojustagasti efektiivsusnäitaja kui sissepuhke ning väljatõmbe järgi leitud näitajate keskmine.

Ø. Rønneseth [17] on oma uurimuses välja toonud, et Norras peab uute hoonete ehitamisel kasutama ventilatsiooniseadmeid, millede soojustagastite temperatuuri suhtarvud on vähemalt 0.8, vastasel juhul ei vasta lahendus nõetele. Lisaks on olulise informatsioonina esitatud, et reaalsed mõõtmistulemused on andnud aga tulemusi, mis on 10-30% madalamad deklareeritud väärtustest. Ekstreemsetel juhtudel on soojustagasti temperatuuri suhtarv olnud mõõtmisandmetele tuginedes vaid 0.1. Artiklis pööratakse erilist tähelepanu sellele, et õhuhulkadega korrigeerimise suurimaks kitsaskohaks on õhuhulkade korrektne mõõtmine. Kokkuvõtlikult tuuakse välja, et soovitatav meetod õhuhulkade mõõtmisel on ultraheliseadmete kasutamine.

Y. Choi [18] uuris, millised on erinevused hoonete simuleerimisel kasutatava ning tegeliku temperatuuri suhtarvu vahel. Töö käigus sooritati pikaajalisi mõõtmisi, mille tulemusel leiti, et sõltuvalt temperatuuride vahest olid ilmse soojuse järgi leitud temperatuuri suhtarvud reaalsetel objektidel vahemikus 0.3-0.65. Järgmise sammuna sooritati simulatsioonarvutus, mille eesmärgiks oli hinnata objekti kütteenergiavajadust sõltuvalt ventilatsiooniseadme temperatuuri suhtarvust. Esimesel juhul kasutati temperatuuri suhtarvu konstantsena, teisel juhul muutuvana. Arvutustulemused näitasid, et muutuva suhtarvu korral oli kütteenergia vajadus 69% suurem. Kokkuvõtlikult tuuakse välja, et simuleerimisel on soovitatav kasutada muutuvat soojustagasti temperatuuri suhtarvu, vastasel juhul saadakse ebakorrektsed tulemused.

A.B Johnson [19] uuris, kuidas sõltub temperatuuri suhtarvu arvutustulem andmete kvaliteedist/määramatusest. Eelkõige pöörati tähelepanu sellele, kuidas õhutemperatuuri võib sõltuvalt mõõtmiskohast õhukanali ristlõikes erineda. Suurimaks erinevuseks saadi 4 °C, paljudes kanalites jäi erinevus alla 0.1 °C. Töö tulemusel leiti, et väikseima määramatusega temperatuuri suhtarvu leidmiseks tuleks rootorsoojustagasti korral keskmistada viimase neljateistkümne päeva arvutustulemused. Sellisel juhul saadi tulemuseks 0.74±0.08.

A. Merzkirch [20] viis Luksemburgis läbi 20 tsentraalse ja 60 korteripõhise ventilatsiooniseadme uuringu. Töö tulemusel leiti, et tsentraalsete ventilatsiooniagregaatide soojustagastuse temperatuuri suhtarv jäi vahemikku 0.65±0.24, see on oluliselt madalam kui tootja poolt deklareeritud väärtus. Selles artiklis välja toodud tulemusi ei ole õhuhulkadega korrigeeritud.

Uuringutes [17] ja [18] on sissepuhke järgi leitud temperatuuri suhtarvu õhuhulkadega korrigeerimiseks kasutatud järgmist põhimõttelist valemit:

$$\eta_{t,sp} = \frac{t_{pt}^{sp} - t_{et}^{sp}}{t_{et}^{vt} - t_{et}^{sp}} * \frac{L_{m,sp}}{L_{m,min}} \quad (1.30)$$

kus $L_{m,min}$ – väiksem sissepuhke ja väljatõmbe massivooluhulkadest

Valemi 1.30 eripäraks on see, et temperatuuride järgi leitud väärtuse korrigeerimine toimub vaid ühes suunas. Kui sissepuhke õhuhulk on suurem kui väljatõmbe õhuhulk, siis korrigeeritakse arvutustulemit suuremaks. Kui aga väljatõmbes olev õhuhulk on suurem kui sissepuhkes olev õhuhulk, siis temperatuuri suhtarvu madalamaks ei korrigeerita.

Ülal viidatud uuringud on näidanud, et soojustagastite tegelik temperatuuri suhtarv on üldjuhul deklareeritust madalam, mis omakorda omab olulist mõju ventilatsiooniseadmete energiakasutusele. Käesolevas töös uuritakse seega, millist mõju arvutustulemustele omab erinevate meetodite kasutamine ning kui suur on potentsiaalne energiakokkuhoid valitud objektidel. Näitena lisatakse ka Belgias kasutusel oleva meetodi tulemused uuritavatel objektidel.

2. METOODIKA

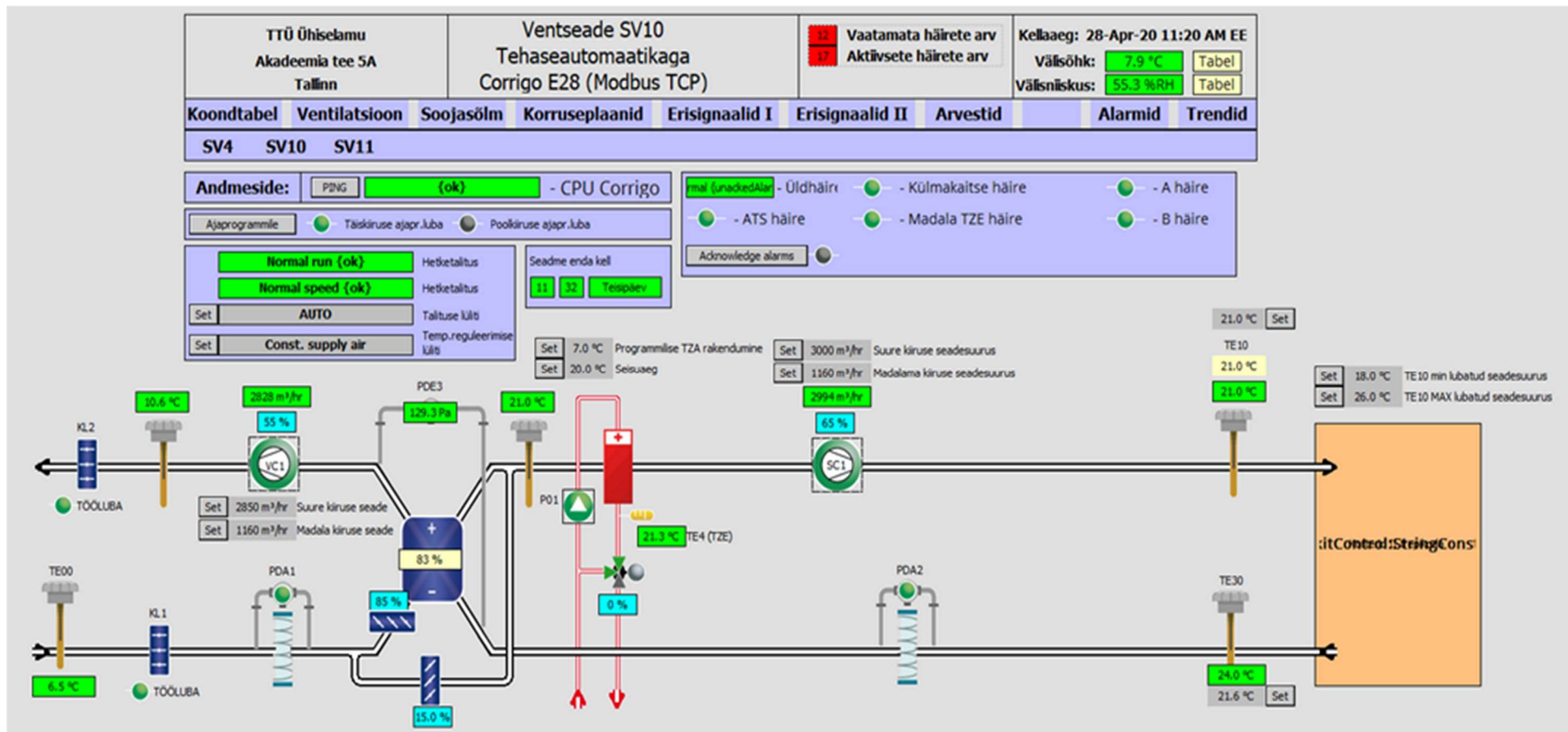
2.1 Objektide ülevaade

Järgnevalt on antud ülevaade uuritud ventilatsiooniseadmetest. Töö käigus ei ole nimetatud seadmeid autori poolt objektile üle vaadatud.

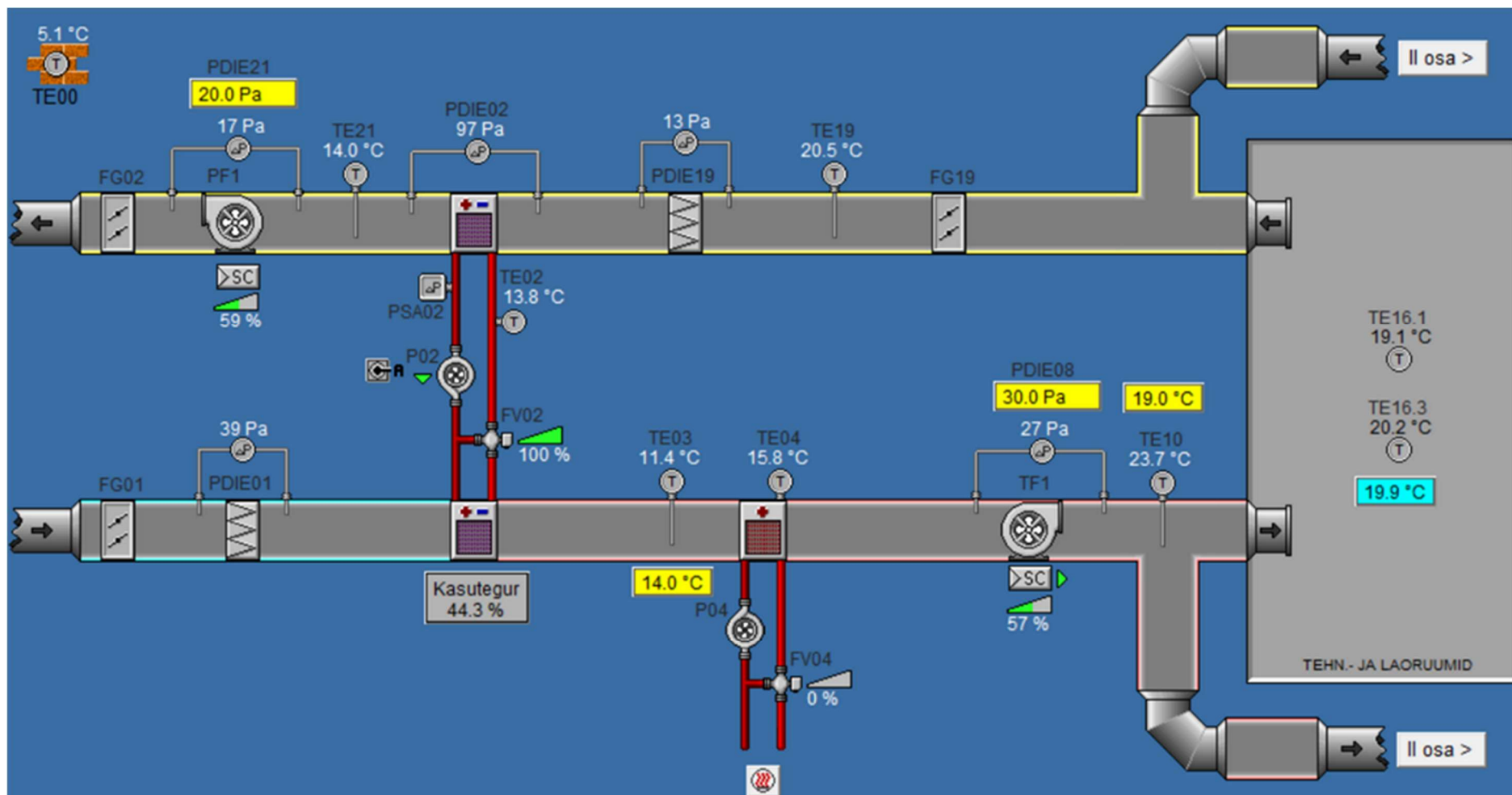
Plaatsoojustagastiga ventilatsiooniseadme uurimisel valiti objektiks Akadeemia tee 5a paiknev Tallinna Tehnikaülikooli pereühiselamu teise trepikoja kortereid teenindav tsentraalne ventilatsiooniseade SV10. Seadme tootja on Systemair ning selle mudelinimetus on DVCompact20, selle nominaalne õhuvooluhulk nii sissepuhkes kui ka väljatõmbes on 1,2 m³/s. Põhimõtteskeem on esitatud joonisel 2.1.

Vahesoojuskandjaga ventilatsiooniseadme uurimisel valiti objektiks Viru Keskuse tehnilisi- ja laoruume teenindav ventilatsiooniseade 333TK. Tegemist on Fläktwoods'i seadmega, mille nominaalne sissepuhkeõhu vooluhulk on 1,3 m³/s ja väljatõmbeõhu vooluhulk on 1,0 m³/s. Joonisel 2.2 on esitatud seadme põhimõtteline skeem hoone automaatikasüsteemis.

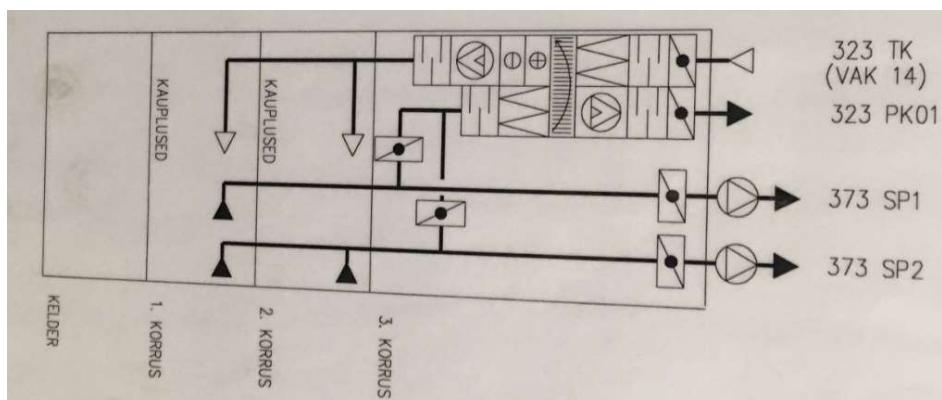
Roorsoojustagastiga ventilatsiooniseadme uurimisel valiti objektiks Viru Keskuse kaupluseruume ning lõunatiiba teenindav Fläktwoods'i seade 323TK, mille nominaalne sissepuhkeõhu vooluhulk on 7,5 m³/s ja väljatõmbeõhu vooluhulk on 7,0 m³/s. Joonisel 2.3 on esitatud seadme põhimõtteline skeem.



Joonis 2.1 Ventilatsiooniseadme SV10 visualiseering hoone automaatikasüsteemis



Joonis 2.2 Seadme 333TK põhimõtteline skeem



Joonis 2.3 Seadme 323TK põhimõtteline skeem

2.2 Kasutatavad andmed

Käesoleva magistritöö raames uuritud objektidel on kasutusele võetud hoone automaatikasüsteemid, kuhu on visualiseeritud tehnosüsteemide töö jälgimist võimaldavad moodulid. Ventilatsiooniseadmete kohta on võimalik jälgida temperatuure, õhuhulkasid, soojustagastite efektiivsusnäitajaid jms. Joonistel 2.1 ja 2.2 on näitena toodud Akadeemia tee 5a ventilatsiooniseadme SV10 ning Viru Keskuse ventilatsiooniseadme 333TK visualiseeringud hoone automaatikasüsteemis.

Joonisel 2.1 on soojustagasti juures kuvatud näitaja 83%, see iseloomustab selle hetkelist temperatuuri suhtarvu, õhu massivooluhulkade erinevust ei ole arvesse võetud. Ka lõputöö raames uuritud teiste objektide puhul kuvati korrigeerimata näitu. Tulenevalt teadmisest, et soojustagasti ja selle korrasolek on energiasäästu seisukohalt äärmiselt olulised, oleks mõistlik visualiseerida korrektne väärtus. See aitab vältida olukorda, kus visualiseeritud andmete järgi tundub seade töökorras olevat, aga tegelikult vajab soojustagasti hooldust.

Akadeemia tee 5a paikneva seadme SV10 analüüsimisel kasutatud andmed pärinevad hoone automaatikasüsteemi trendide koostamise moodulist.

Analüüsitavaks perioodiks oli 2019. aasta, andmed on keskmistatud 15 minutilise sammuga. Soojustagasti töö hindamiseks ning erinevate temperatuuri suhtarvude arvutamiseks on kasutatud järgnevaid andmeid: välisõhu temperatuur, sissepuhke temperatuur peale soojustagastit, sissepuhkeõhu temperatuur, väljatõmbe temperatuur, väljaviske temperatuur, sissepuhkeõhu mahuline vooluhulk, väljatõmbeõhu mahuline vooluhulk, soojustagasti olek (0-100%).

Viru Keskuses paikneva seadme 333TK analüüsimisel kasutatud andmed pärinevad ettevõtte Ruut8 OÜ andmebaasist. Analüüsitavaks perioodiks oli 13.02.2019-28.01.2020, andmed on esitatud 15 minutilise sammuga. Soojustagasti töö hindamiseks ning erinevate hetkeliste temperatuuriliste efektiivsuste arvutamiseks on kasutatud järgnevaid andmeid: välisõhu temperatuur, sissepuhke temperatuur peale soojustagastit, sissepuhkeõhu temperatuur, väljatõmbe temperatuur, väljaviske temperatuur, sissepuhkeventilaatori rõhuvahe ja k-arv, väljatõmbeventilaatori rõhuvahe ja k-arv, soojustagasti ringluspumba kiirus (0-100%).

Viru Keskuses paikneva seadme 323TK analüüsimisel kasutatud andmed pärinevad ettevõtte Ruut8 OÜ andmebaasist. Analüüsitavaks perioodiks oli 11.03.2019-28.01.2020, andmed on esitatud 15 minutilise sammuga. Soojustagasti töö hindamiseks ning erinevate hetkeliste temperatuuriliste efektiivsuste arvutamiseks on kasutatud järgnevaid andmeid: välisõhu temperatuur, sissepuhke temperatuur peale soojustagastit, sissepuhkeõhu temperatuur, väljatõmbe temperatuur, väljaviske temperatuur, sissepuhkeõhu mahuline vooluhulk, väljatõmbeõhu mahuline vooluhulk, rootorsoojustagasti kiirus (0-100%).

Temperatuuri suhtarvude analüüsi käigus on andmeid osaliselt filtreeritud. Selle peamiseks eesmärgiks oli see, et leitud väärtused kirjeldaksid olukorda, kus soojustagasti töötab oma normaalses olukorras. Vaadeldud on neid ajaperioode, kus soojustagasti olek oli 100% (ehk plaatsoojustagastil möödaviiguklapp suletud, vahesoojusandjaga soojusvahetil pumba kiirus 100% ja rootorsoojusvahetil pöörlemiskiirus 100%), õhuvooluhulgad nii sissepuhke- kui ka väljatõmbepoolel olid vähemalt 1/3 nominaalsest väärtusest ja välistemperatuur oli madalam kui 15°C. Soojustagasti efektiivsusele ei ole võimalik anda adekvaatset hinnangut olukorras, kus see töötab näiteks võimusel 50%. Tootja poolt esitatud andmetega võrdlemiseks on vajalik soojustagasti temperatuuri suhtarv leida nominaalses olekus.

2.3 Temperatuuri suhtarvu analüüsi meetodid

Analüüsi käigus uuriti kolme tüüpi soojustagastiga ventilatsiooniseadmete erinevaid temperatuuri suhtarve.

Leiti järgmised näitajad:

- Temperatuuri suhtarvud nii sissepuhke kui ka väljatõmbe järgi, õhuhulkadega korrigeerimata.

- Temperatuuri suhtarvud nii sissepuhke kui ka väljatõmbe järgi, õhuhulkadega korrigeeritud. Õhu massivooluhulga leidmisel õhu tihedusena kasutatud $1,2 \text{ kg/m}^3$
- Temperatuuri suhtarvud nii sissepuhke kui ka väljatõmbe järgi, õhuhulgad korrigeeritud. Õhu massivooluhulga leidmisel õhu tihedusena kasutatud arvutuslikku tihedust vastavalt tegelikule temperatuurile.

Seejärel võrreldi saadud tulemusi deklareeritud väärtustega ning anti hinnang sellele, kas ja kui suure osa ajast töötab seade madalamal efektiivsusel.

2.4 Meetod temperatuuri suhtarvu mõju leidmiseks seadme energiakasutusele

Leides erinevate temperatuuri suhtarvude juures sissepuhkeõhu temperatuurid peale soojustagastit, on võimalik valemiga 1.26 leida lisakütteks vajalikud võimsused. Seejärel saab lähtudes vajalikust võimsusest ning perioodi ajalisest kestvusest hinnata seda, kuidas temperatuuri suhtarv mõjutab tarbitava energia kogust. Energeetilise muudu hindamisel on oluliseks muutujaks sissepuhkeõhu temperatuur enne soojustagastit ehk üldistatult öeldes välistemperatuur. Kasutades väliskliima andmetena möödunud perioodi temperatuure iga tunni kohta (näiteks möödunud aasta), saab antud meetodikat kasutades tunni kaupa hinnata, kui palju väiksem või suurem oleks võinud konkreetse seadme energiakulu olla. Kui on aga soov ligikaudselt ennustada, millist mõju tuleviku energiakasutusele omavad erinevate temperatuuri suhtarvudega soojustagastid, siis saab välistemperatuurina kasutada Eesti energiaarvutuse baasaasta kliimas välja toodud välistemperatuure. [21]

Energiakasutuse hindamiseks koostati käesoleva magistritöö raames arvutustabel, millega on võimalik leida lisakütteks kuluv soojusenergiahulk konkreetse ventilatsiooniseadme kohta. Arvutustabeli koostamise aluseks valiti Akadeemia tee 5a paiknev ventilatsiooniseade SV10, kuna selle ventilatsiooniagregaadi kohta on teada tarbitud soojusenergia kogus uuritava perioodil (2019. a).

Esmalt leiti ventilatsiooniseadme arvutuslik aastane soojusenergia tarbimine ning seejärel kõrvutati seda realselt mõõdetud tulemusega. Arvutustulemuse kalibreerimiseks oli vajalik korrigeerida (vähendada) valemis 1.25 esitatud temperatuuride vahet. Käesoleval juhul oli see õigustatud, kuna mõõtmisandmed sisaldasid ka temperatuuritõusu ventilatsiooniseadme sissepuhkeventilaatoris ning korpuses. Järgmise sammuna leiti arvutuslikud aastased soojusenergiatarbimised

olukordades, kus seadme soojustagasti temperatuuri suhtarv oleks kas kõrgem või madalam. Arvutuslikult vaadeldi olukordasid, kus efektiivsus muutus vahemikus -10 kuni +10 protsendipunkti.

Seejärel koostati Eesti energiaarvutuse baasaasta [21] kliimafailile tuginedes arvutusmudel, mis vastavalt etteantud sisendinformatsioonile arvutab energiakasutuse muudu ventilatsiooniseadme küttekalorifeeris. Sisestades mudelisse antud objektile kehtiva soojusenergia hinna, on võimalik määrata, kui palju võib hooldus- või remondiotsuse edasilükkamine ligikaudselt maksma minna. Arvutuseks olulised sisendparameetrid on: õhu massivooluhulk sissepuhkes, sissepuhke järgi leitud, õhuhulkadega korrigeeritud temperatuuri suhtarv, alternatiivne temperatuuri suhtarv, väljatõmbetemperatuur, sissepuhkeõhu temperatuur ning sissepuhkeõhu temperatuuri seadeväärtus. Arvutustäpsuse suurendamiseks on võimalik mudelisse sisestada ka ventilatsiooniseadme ajagraafik.

Koostatud arvutustabeliga on võimalik hinnata ka soojustagasti aastast kasutegurit, seda nii realselt mõõdetud kui ka alternatiivse ehk võrdluseks oleva temperatuuri suhtarvu korral.

Käesoleva töö lisana 3 on esitatud ekraanitõmmised arvutustabeli osadest.

2.5 NTU meetodika rakendamine

Magistritöö käigus uuriti NTU meetodiga kolme eelpool kirjeldatud ventilatsiooniseadet. Kõikide ventilatsiooniagregaatide kohta on teada nende soojusvahetite deklareeritud efektiivsused võrdsetel massivooluhulkadel. Nende näitajate abil leiti valemiga 1.22 NTU väärtused iga seadme kohta. Kui deklareeritud väärtused oleksid olnud teada erinevatel õhu massivooluhulkadel, siis oleks rakendatud valemit 1.23.

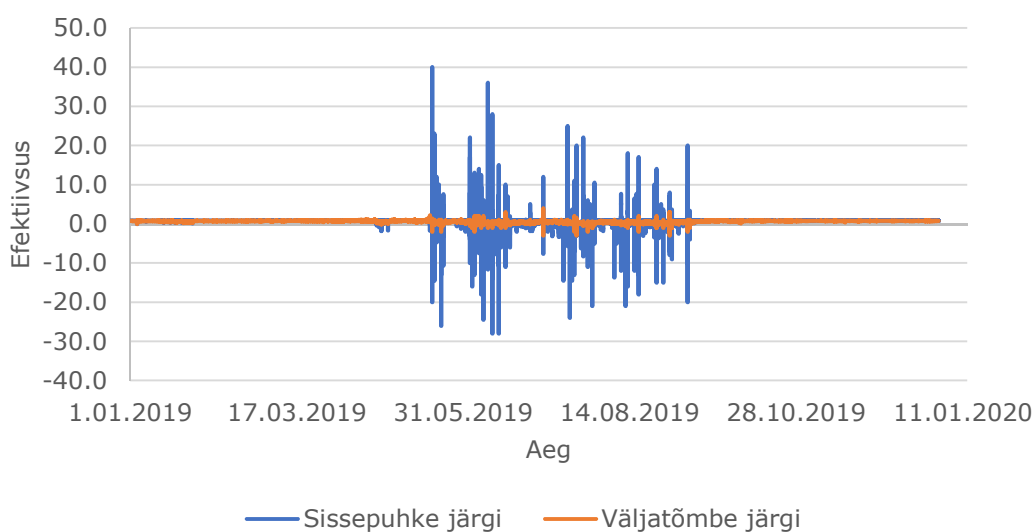
Järgmise sammuna leiti mõõdetud andetele tuginedes C_r väärtused, kasutades selleks valemeid 1.16 ning 1.21. NTU ning C_r väärtuste abil leiti valemiga 1.20, milline peaks soojustagasti efektiivsus teoreetiliselt uuritava ajahetkel olema. Saadud tulemus iseloomustas seda, milline sai olla maksimaalne soojustagasti efektiivsus nõu piirava õhuhulga suhtes. Piirangu all mõeldakse, et väiksema soojuserivõimsusega õhuhulk saab soojeneda vaid maksimaalse temperatuurimuudu võrra. Ei ole võimalik olukord, kus üks õhuvool annab rohkem energiat ära, kui teine õhuvool on võimeline vastu võtma.

Seejärel arvutati mõõdetud temperatuuridele tuginevad efektiivsused sissepuhke ning väljatõmbe järgi ja võrreldi saadud tulemusi teoreetilise efektiivsusega. Siinkohal on

oluline mainida, et teoreetilise väärtusega võrreldi piirava õhuhulga järgi leitud efektiivust. Kui sissepuhkeõhu soojuserivõimsus on suurem kui väljatõmbeõhul, siis kasutati väljatõmbe järgi leitud tegelikku efektiivsust. Õhu massivooluhulkade muutumisel kontrolliti täiendavalt, milline on antud hetkel piirav pool.

3. TEMPERATUURI SUHTARVUD

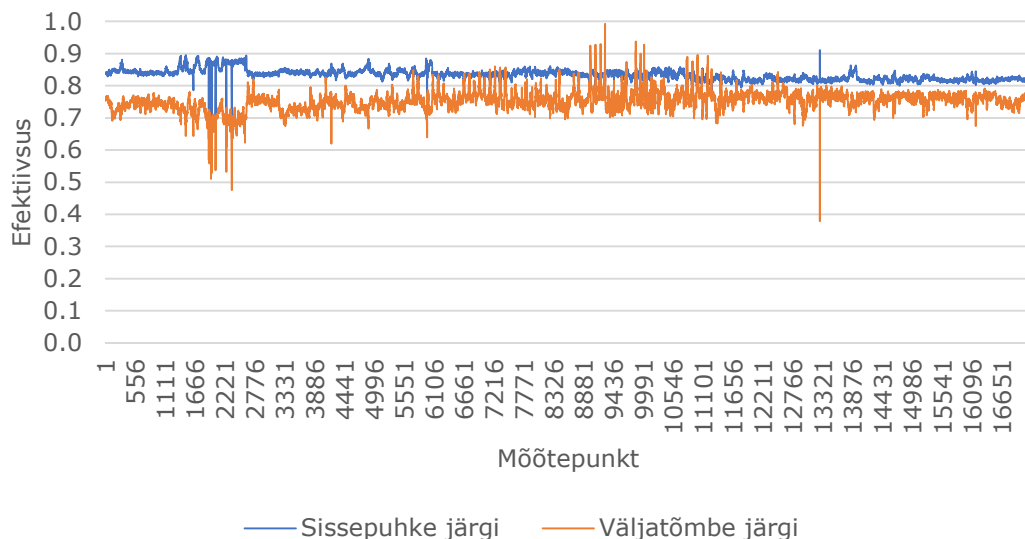
Järgnevates peatükkides 3.1-3.3 esitatakse kolme konkreetse ventilatsiooniseadme arvutuslikud temperatuuri suhtarvud. Võimalusel võrreldakse neid tootja poolt deklareeritud väärtustega ning analüüsitakse seda, kui suure osa ajast vastavad seadmed tootja poolt lubatule. Peatükkides 3.1-3.3 on graafikutel horisontaalse teljena kasutatud mõõtepunktide arvu. Järjepidevat ajatelge ei ole võimalik kasutada kuna tulemused on vastavalt meetodikale osaliselt filtreeritud. Näiteks on esitamata jäetud väärtused, mis on arvutatud olukorras, kus soojustagasti olek on madalam kui 100%. Joonisel 3.1 on illustreerimiseks esitatud pideva ajateljega, filtreerimata tulemused.



Joonis 3.1 Ventilatsiooniseadme SV10 temperatuuri suhtarvud filtreerimata kujul, pideval ajateljel

3.1 Plaatsoojusvahetiga ventilatsiooniseade SV10

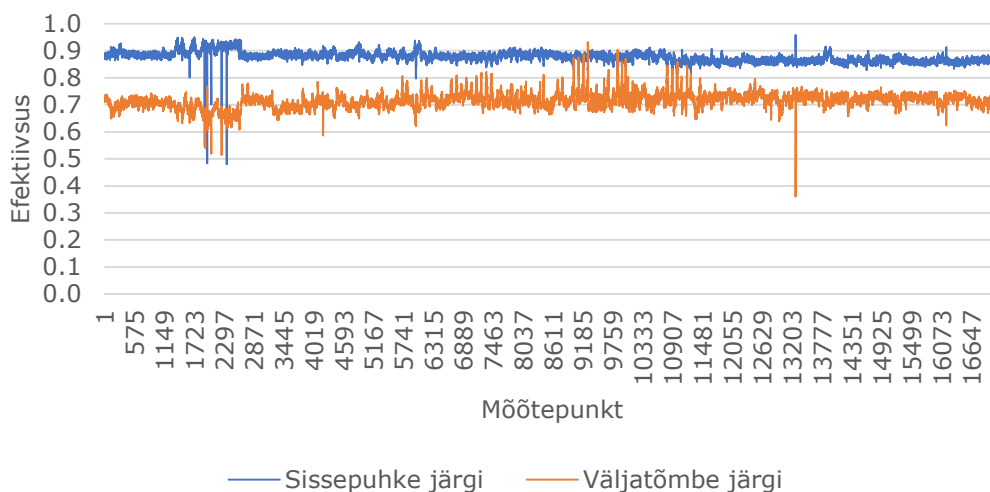
Esmalt analüüsi, millised on sissepuhke ja väljatõmbe järgi arvutatud temperatuuri suhtarvud olukorras, kus õhuhulkadega korrigeerimist ei ole tehtud. Tulemused on esitatud joonisel 3.2.



Joonis 3.2 Ventilatsiooniseadme SV10 õhuhulkadega korrigeerimata temperatuuri suhtarvud sissepuhke ja väljatõmbe järgi

Märgatav erinevus sissepuhke ning väljatõmbe järgi leitud väärtuste vahel on selgitatav sellega, et väljaviskekanalil paiknev temperatuuriandur asub peale väljatõmbeventilaatorit. Sellest tulenevalt on väljatõmbeõhu järgi leitud arvutuslik tulemus madalam kui tegelik.

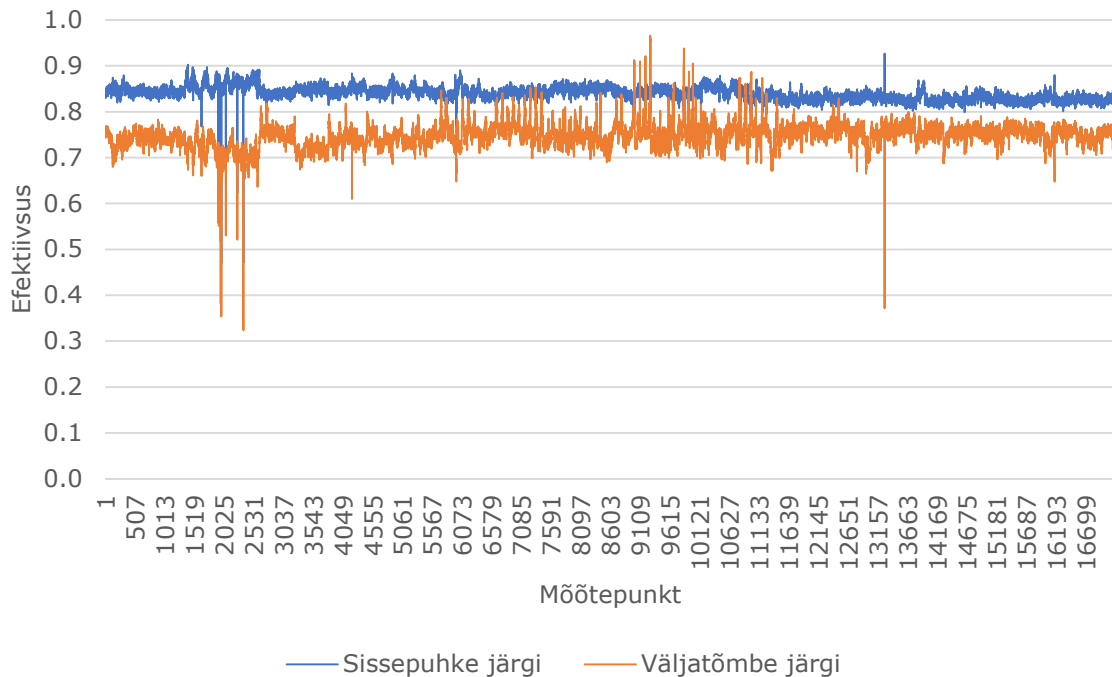
Järgmise sammuna arvutati sissepuhke- ja väljatõmbeõhu massivooluhulgad, kusjuures õhu tihedusena kasutati väärtust $1,2 \text{ kg/m}^3$. Selle tegevuse eesmärgiks oli võrdlusbaasi loomine olukorrale, kus õhutihedused arvutatakse vastavalt konkreetsetele temperatuuridele. Seejärel korrigeeriti temperatuuri suhtarve õhu massivooluhulkadega ja saadi tulemus joonisel 3.3



Joonis 3.3 Ventilatsiooniseadme SV10 temperatuuri suhtarvud. Õhuhulkadega korrigeeritud, õhu tihedusena kasutatud $1,2 \text{ kg/m}^3$

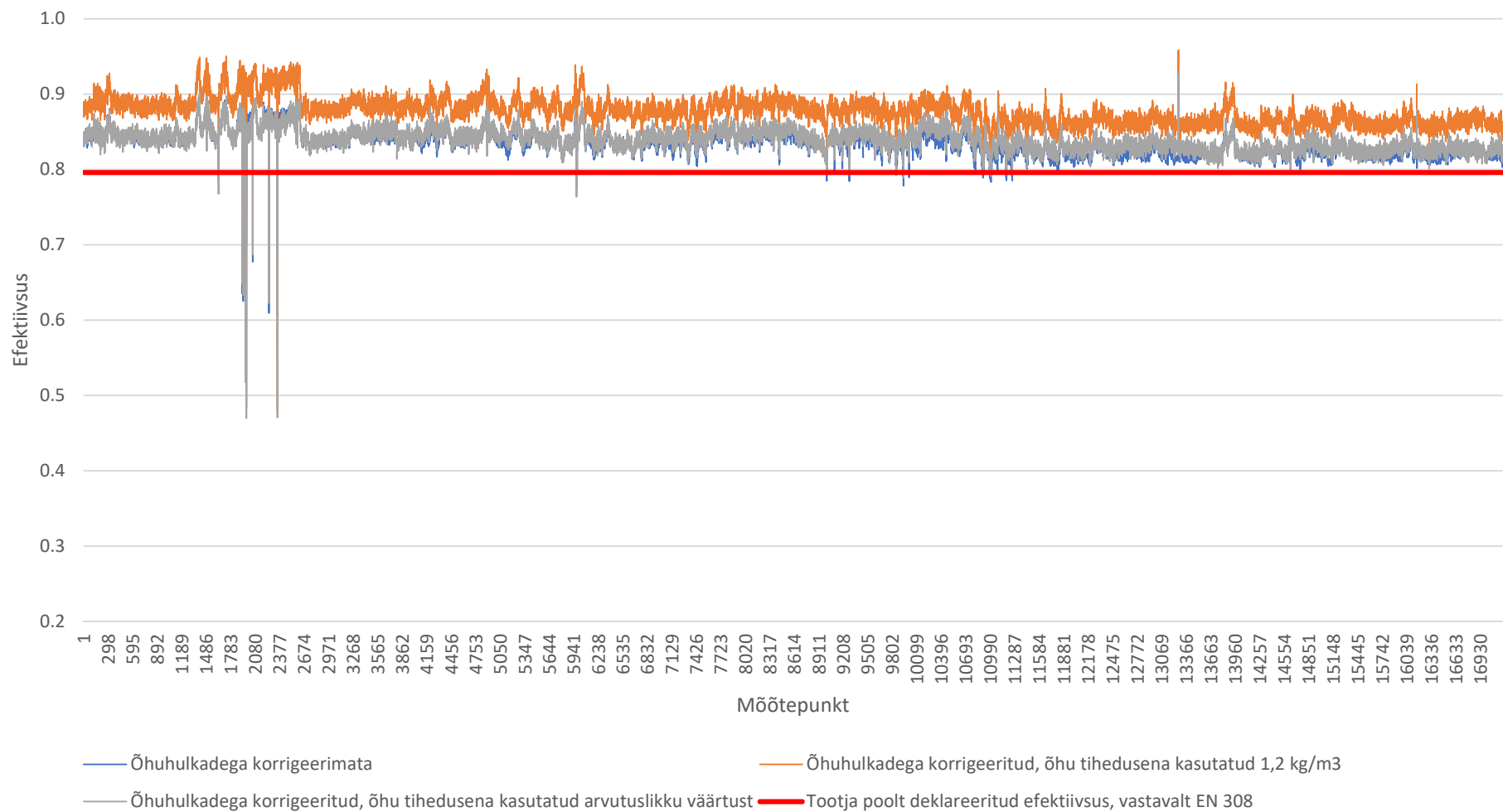
Võrreldes joonist 3.3 joonisega 3.2 näeme, et õhuhulkadega korrigeerimine on sissepuhke järgi leitud tulemust suurendanud (efektiivsuste keskmine väärtus tõusis 4.4 protsendipunkti) ning väljatõmbe järgi leitud tulemust vähendanud (efektiivsuste keskmine väärtus langes 3.7 protsendipunkti).

Joonisel 3.4 on esitatud temperatuuri suhtarvude tulemused, kus õhu massivooluhulkade arvutamisel on õhu tihedustena kasutatud arvutuslikke, korrektseid väärtuseid.



Joonis 3.4 Ventilatsiooniseadme SV10 temperatuuri suhtarvud. Õhuhulkadega korrigeeritud, õhu tihedustena kasutatud arvutuslikke väärtuseid

Tootjapoolses tehnilises dokumentatsioonis (vt. Lisa 1) on deklareeritud, et vastavalt standardile EVS-EN 308:2000 on selle ventilatsiooniseadme kuiv efektiivsus 79,6%. Järgnevale graafikule 3.5 on parema visualiseerimise eesmärgil lisatud kõik sissepuhke järgi arvutatud temperatuuri suhtarvud, täiendavalt on graafikule võrdluseks lisatud ka tootja poolt deklareeritud väärtus



Joonis 3.5 Ventilatsiooniseadme SV10 temperatuuri suhtarvud sissepuhke järgi

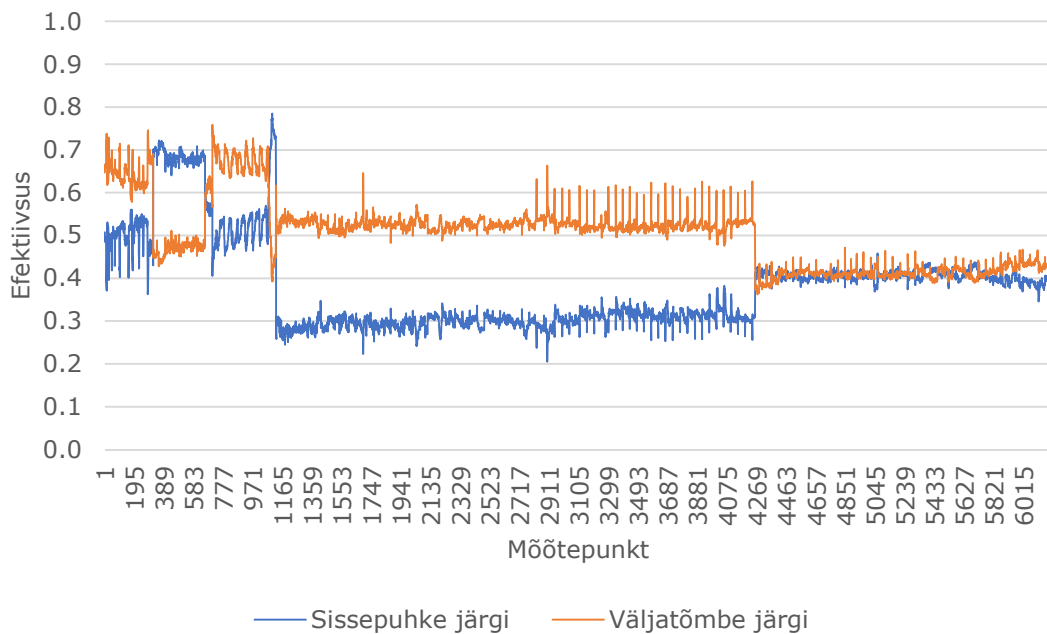
Analüüsitava seadme sissepuhke- ja väljatõmbeõhu massivooluhulkade erinevus uuritava ajaperioodil oli väike. Sellega seoses on jooniselt 3.5 nähtav, et korrektsete õhu massivooluhulkadega korrigeerimine ei oma olulist mõju saadavale tulemusele. Sinise ja halli joonega graafikud sisuliselt kattuvad. Tuginedes graafikule 3.5 saab järeldada, et kui õhuhulkadega korrigeerimine sisse viia, siis tuleb massivooluhulkade leidmisel kindlasti kasutada arvutuslikku õhu tihedust. Kasutades õhu tiheduse väärtusena $1,2 \text{ kg/m}^3$, saame moonutatud tulemuse, mille pealt järelduste tegemine ei ole korrektne. Moonutuse põhjuseks on asjaolu, et väljaviske temperatuur peale soojustagasti on enamasti madalam kui 20°C , sellega seoses on tegelik õhutihedus väljaviskes suurem kui $1,2 \text{ kg/m}^3$. Kasutades väljaviske õhu tihedusena väärtust $1,2 \text{ kg/m}^3$, saame arvutuslikult madalama massivooluhulga ning see omakorda korrigeerib efektiivsuse näitaja üles (oranž joon graafikul 3.5). Arvutades temperatuuri suhtarvu väljatõmbe järgi, toob vale tiheduse kasutamine kaasa olukorra, kus efektiivsust korrigeeritakse alla. See võib ekslikult jätta mulje, et seade vajab hooldust.

Graafikul 3.5 esitatud punane sirgjoon tähistab tootja poolt deklareeritud soojustagasti kuiva efektiivsust sissepuhke järgi (vastavalt standardile EVS-EN 308:2000, kondenseerumist ei esine). Analüüsist on näha, et arvutuslik temperatuuri suhtarv valdava osa ajast seda ka ületab. Küll aga ei ole need väärtused üks ühele võrreldavad, kuna deklareeritud väärtus on leitud kondensaadivabadel tingimustel. Seadme SV10 kohta leitud tegelikud väärtused sisaldavad aga ka veeauru kondenseerumise mõju soojustagasti efektiivsusele. Soojustagasti efektiivsus sõltub lisaks kondenseerumisele ka temperatuuridest, õhuvooluhulkadest ja muudest parameetritest. Sellest tulenevalt puudub ka hea võimalus nende andmete selliseks korrigeerimiseks, et need oleksid omavahel täielikult võrreldavad.

Kuna kondenseerumise mõjul sissepuhke järgi leitud temperatuuri suhtarv suureneb, siis peaks igal juhul leitud väärtus ületama tootja poolt deklareeritud kuiva efektiivsust.

3.2 Vahe-soojuskandjaga soojusvahetiga ventilatsiooniseade 333TK

Esmalt analüüsiti, millised erinevused on sissepuhke ja väljatõmbe järgi arvatatud temperatuuri suhtarvude vahel olukorras, kus õhuhulkadega korrigeerimist ei ole tehtud. Tulemused on esitatud joonisel 3.6

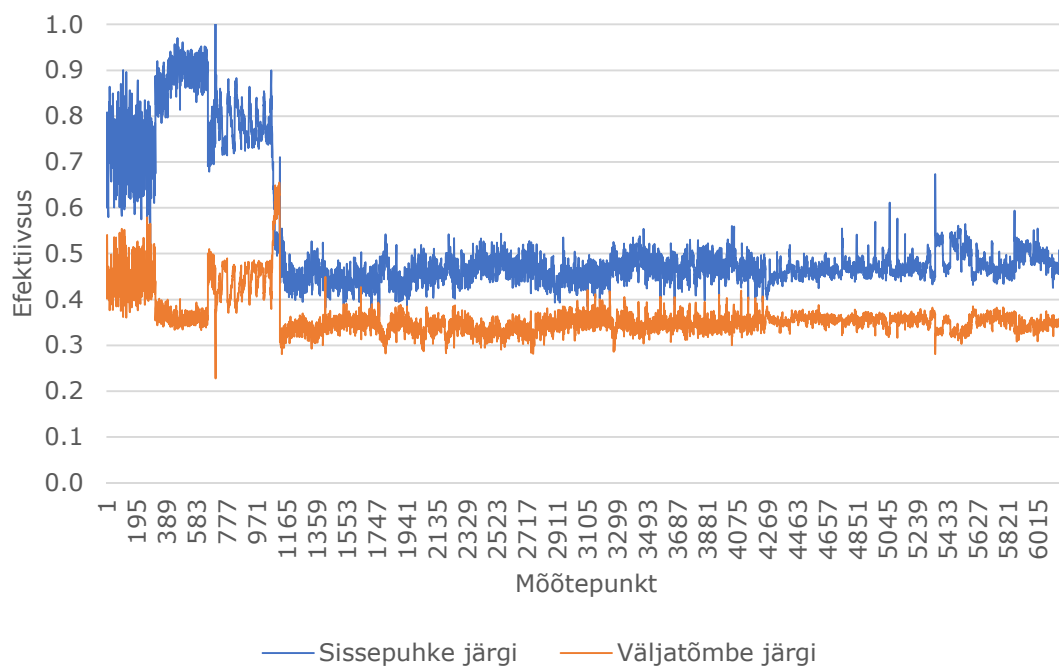


Joonis 3.6 Ventilatsiooniseadme 333TK temperatuuri suhtarvud, õhuhulkadega korrigeerimata

Jooniselt vaadeldav temperatuuri suhtarvude varieerumine on seletatav õhuhulkade absoluutväärtuste ning õhuhulkade vahe muutusega.

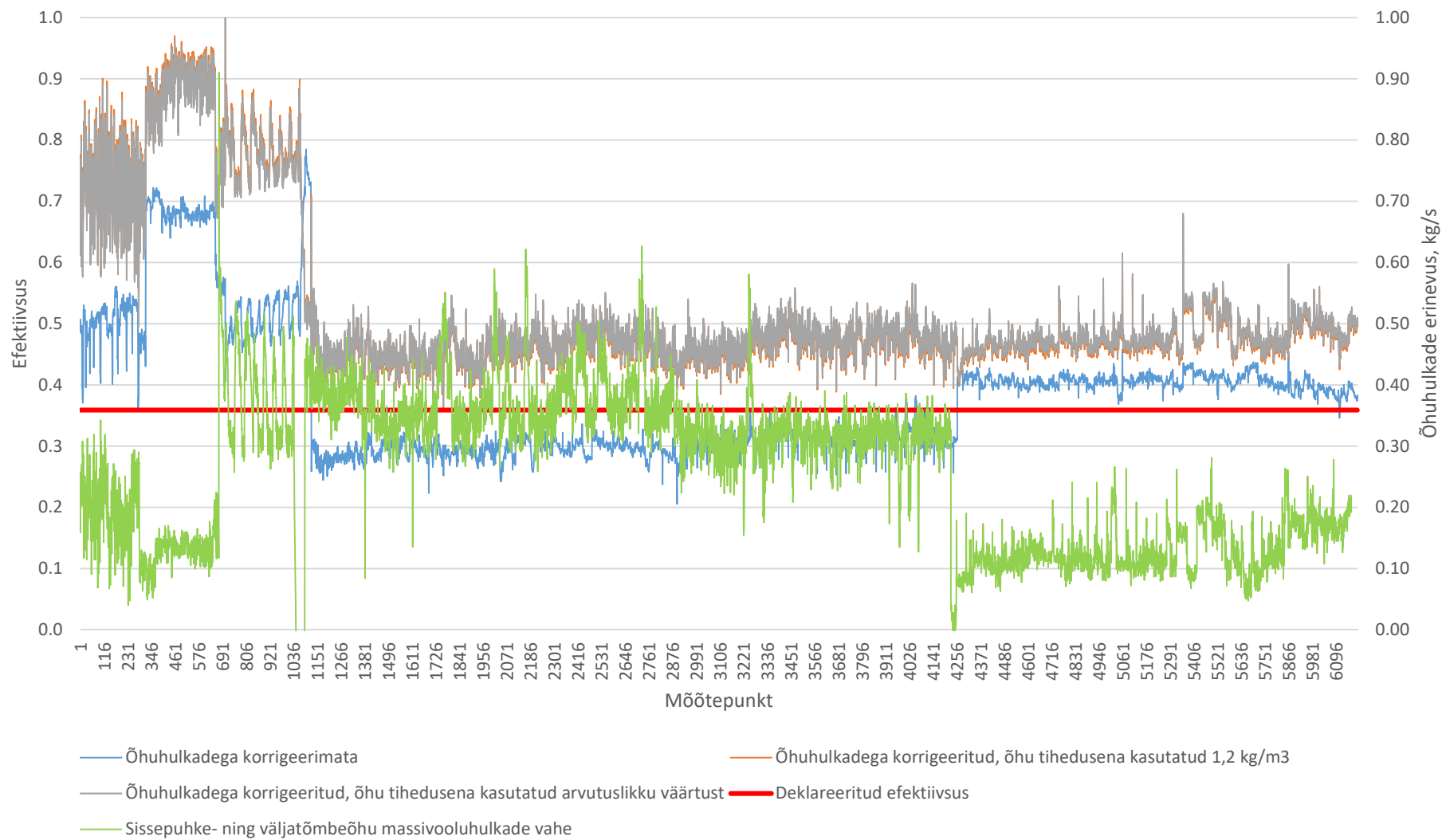
Järgmise sammuna arvatati sissepuhke- ja väljatõmbeõhu massivooluhulgad, kusjuures õhu tihedusena kasutati väärtust $1,2 \text{ kg/m}^3$. Selle tegevuse eesmärgiks oli võrdlusbaasi loomine olukorrale, kus õhutihedused arvutatakse vastavalt konkreetsetele temperatuuridele. Seejärel korrigeeriti temperatuuri suhtarve õhu massivooluhulkadega ja saadi tulemus joonisel 3.7. Võrreldes joonisega 3.6 varieeruvad tulemused vähem. See on põhjendatav sellega, et õhuhulkadega korrigeerimine elimineeris õhuhulkade vahest tingitud muutused.

Järgnevalt leiti temperatuuri suhtarvud olukorras, kus õhu massivooluhulkade leidmisel kasutati õhu tihedusena arvutuslikku, korrektset väärtust. Seadme 333 puhul ei omanud see olulist mõju, kuna seoses vahesoojus kandjaga soojustagasti ebaefektiivsusega oli väljatõmbeõhu temperatuur pärast soojustagastit kõrgem kui teiste seadmete puhul. Kõrge väljaviske temperatuur omakorda vähendas korrektse temperatuuriga korrigeerimise mõju. Saadud tulemused olid sisuliselt identsed joonisel 3.7 esitatud tulemustega.



Joonis 3.7 Ventilatsiooniseadme 333TK temperatuuri suhtarvud, õhuhulkadega korrigeeritud, õhu tihedusena kasutatud $1,2 \text{ kg/m}^3$

Viru Keskuse tehnosüsteemide jälgimiseks kasutatavas veebirakenduses on deklareeritud, et selle ventilatsiooniseadme osaks oleva soojustagasti efektiivsus on 35.9%. Töö koostajal puudub täpsem informatsioon nimetatud seadme tehniliste parameetrite kohta. Faktidele tuginedes ei saa öelda, kas tegemist on nn kuiva või märja efektiivsusega. Töö järjepidevuse huvides eeldatakse, et tegemist on kuiva efektiivsusega sissepuhke järgi. Järgnevale graafikule on parema visualiseerimise eesmärgil lisatud kõik sissepuhke järgi arvutatud temperatuuri suhtarvud, täiendavalt on graafikule võrdluseks lisatud ka deklareeritud efektiivsuse väärtus ning õhu massivooluhulkade erinevus uuritud ajaperioodil.



Joonis 3.8 Ventilatsiooniseadme 333TK temperatuuri suhtarvud, sissepuhke järgi

Jooniselt 3.8 on võimalik täiendavalt näha, et õhuhulkadega korrigeerimisel ei ole olulist mõju omanud arvutusliku õhutiheduse kasutamine massivooluhulkade leidmisel, hall ja oranž joon sisuliselt kattuvad. See on tingitud asjaolust, et vahesoojuskandjaga soojustagasti üldine efektiivsus on madal ning väljaviskeõhu temperatuur on sellest tulenevalt kõrge. Joonisel 3.8 esitatud andmemahu hulgas oli keskmine väljaviske temperatuur ventilatsiooniseadmes 13,5 °C. Joonisel 3.5 esitatud plaatsoojusvahetiga seadmel oli keskmine väljavisketemperatuur 6,9 °C. Jooniselt 3.5 on selgelt välja loetav, et korrektse tiheduse kasutamine väljaviskeõhu massivooluhulga leidmisel omab kõrgete kasuteguritega soojusvahetite korral olulist mõju saadava tulemuse suhtes.

Võrreldes joonisel 3.8 välja toodud graafikuid on nähtav, et õhuhulkadega korrigeerimine omab märgatavat mõju graafiku ühtlustamisel. Õhuhulkadega korrigeerimata graafik (sinine) tõuseb viimasel kolmandikul hüppeliselt üle deklareeritud väärtuse. Analüüsides aga õhuhulkadega korrigeeritud graafikut näeme, et olulist muutust soojustagasti efektiivsuses sellel ajal ei esinenud. Lähtudes vaid korrigeerimata väärtusest võib hoone omanik või haldaja saada vale signaali ning võtta ette tegevusi, mille järele tegelikult otstarve puudub.

Joonisele 3.8 on roheline joonena kantud sissepuhke- ning väljatõmbeõhu massivooluhulkade erinevus. Jooniselt on välja loetav, et mida suurem on massivooluhulkade erinevus, seda suurem on erinevus korrigeerimata ja korrigeeritud näitude vahel. See tuleneb arvutusvalemi ülesehitusest ning on esitatud lihtsalt korrigeerimise vajaduse illustreerimiseks.

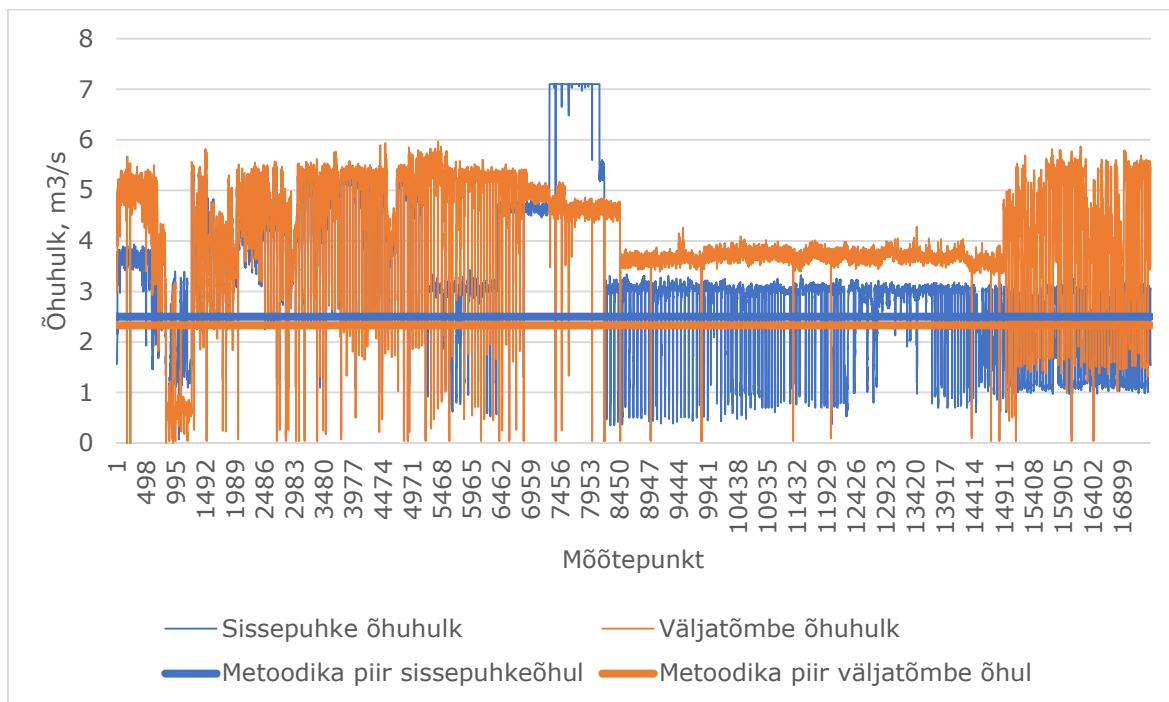
Võrreldes saadud tulemusi soojustagasti deklareeritud efektiivsusega näeme, et õhu massivooluhulkadega korrigeeritud väärtused ületavad seda. Korrigeerimata näit on aga ca pool ajast allpool deklareeritud väärtust.

Graafikute 3.6-3.8 algustes näha olevad arvutustulemuste ebaharilikud väärtused/liikumised võivad olla selgitatavad sellega, et uuritava perioodi alguses oli ventilatsiooniseadmel 333 kasutusel vanemat tüüpi andurid, mis möödunud aastal välja vahetati.

3.3 Rootorsoojusvahetiga ventilatsiooniseade 323TK

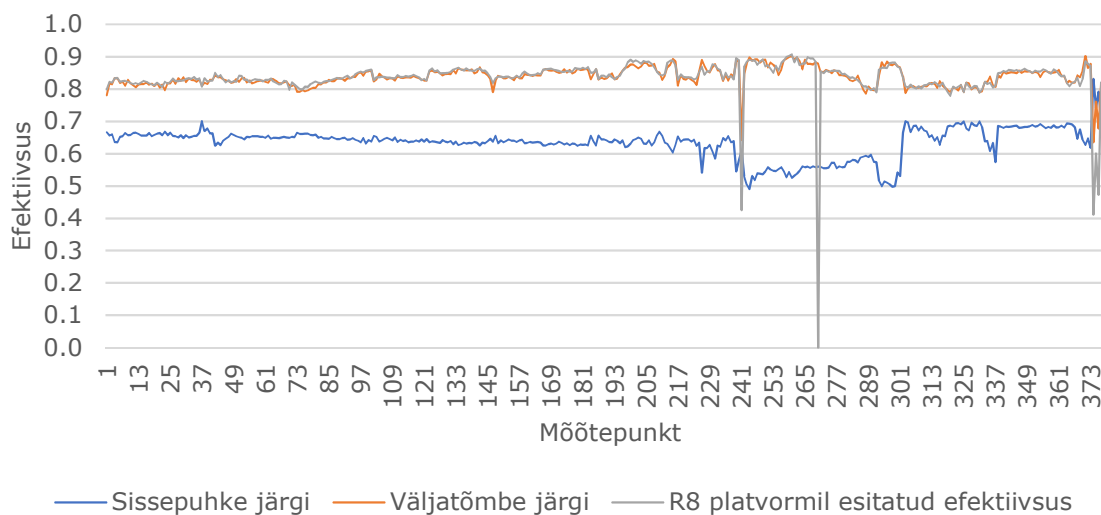
Seadme 323 analüüsimisel avaldus kasutatud meetodika kitsaskoht. Seoses selle ventilatsiooniseadme suure õhuhulkade erinevusega väljatõmbe kasuks tekkis olukord, kus soojusvaheti töötas täisvõimsusel vaid lühikest aega. See vähendas oluliselt

arvutusteks kasutatavate andmete mahtu. Seadme õhuvooluhulgad on esitatud joonisel 3.9. Täiendavalt on joonisele kantud ka meetoodika piirangud õhuhulkade suhtes.



Joonis 3.9 Ventilatsiooniseadme 323 sissepuhke ja väljatõmbe õhuhulgad ning meetoodika piirangud

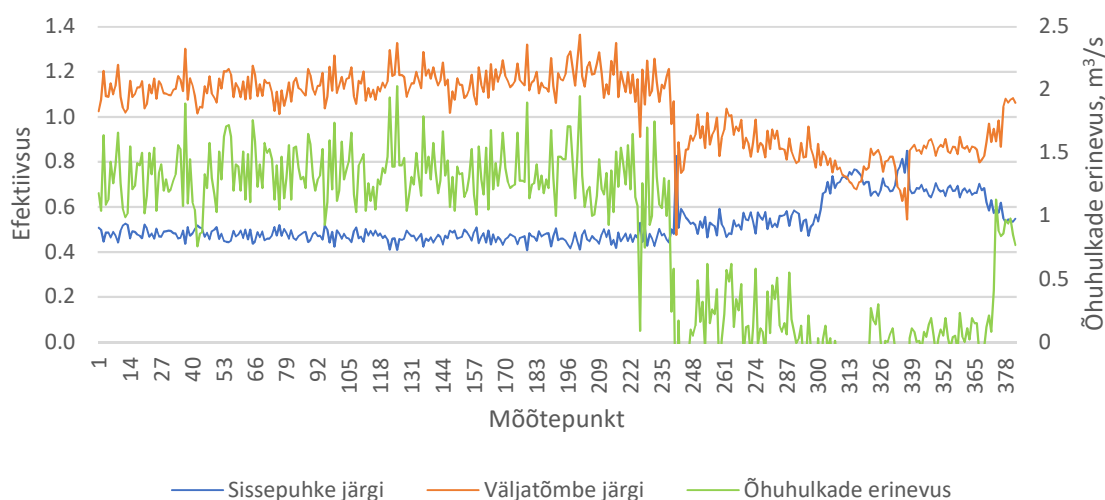
Temperatuuri suhtarvude analüüsimisel uuriti esmalt seda, millised erinevused on sissepuhke ja väljatõmbe järgi arvutatud väärtuste vahel olukorras, kus õhuhulkadega korrigeerimist ei ole tehtud. Tulemused on esitatud joonisel 3.10.



Joonis 3.10 Ventilatsiooniseadme 323 temperatuuri suhtarvud, õhuhulkadega korrigeerimata

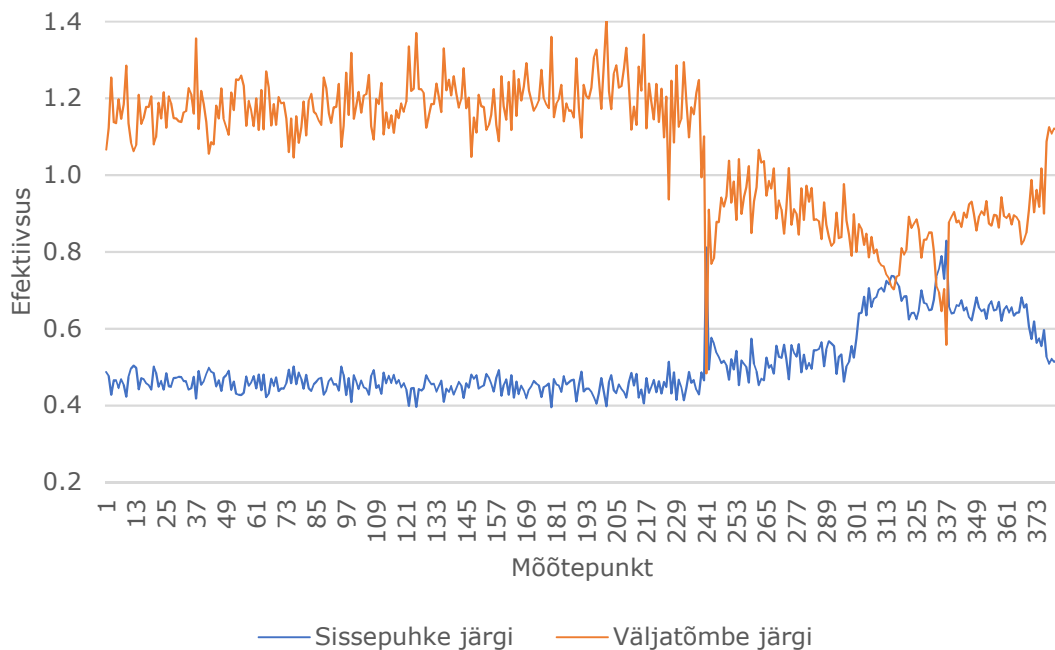
Joonisele on lisatud ka need temperatuuri suhtarvu väärtused (halliga), mis on kuvatud tehnosüsteemide monitoorimise veebirakenduses. Graafikutelt on näha, et kasutajale visualiseeritakse väljatõmbe järgi arvatud temperatuuri suhtarvu. Sellise lähenemise põhjus pole selge. Sissepuhke järgi arvatud temperatuuri suhtarv on kuvatud näiduga võrreldes oluliselt madalam. Käesoleva näite puhul võib tekkida olukord, kus hooldusmeeskond loeb selle seadme soojusvaheti korras olevaks, tegelikkuses on selle õhuhulkadega korrigeerimata temperatuuri suhtarv sissepuhke järgi aga oluliselt madalam planeeritust (deklareeritud efektiivsuseks on veebirakenduses näidatud 77,7%). Suur erinevus sissepuhke ning väljatõmbe järgi arvatud temperatuuri suhtarvude vahel võib olla seletatav nii leketega kui ka temperatuuriandurite paiknemisega seadmes.

Järgmise sammuna arvutati sissepuhke- ja väljatõmbeõhu massivooluhulgad, kusjuures õhu tihedusena kasutati väärtust $1,2 \text{ kg/m}^3$. Selle tegevuse eesmärgiks oli võrdlusbaasi loomine olukorrale, kus õhutihedused arvutatakse vastavalt konkreetsetele temperatuuridele. Seejärel korrigeeriti temperatuuri suhtarve õhu massivooluhulkadega ja saadi järgnev tulemus.



Joonis 3.11 Ventilatsiooniseadme 323 temperatuuri suhtarvud, õhuhulkadega korrigeeritud, õhu tihedusena kasutatud $1,2 \text{ kg/m}^3$

Joonisel 3.12 on esitatud temperatuuri suhtarvude arvutustulemused, kus õhu massivooluhulga leidmisel on õhu tihedusena kasutatud arvutuslikku, korrektset väärtust.



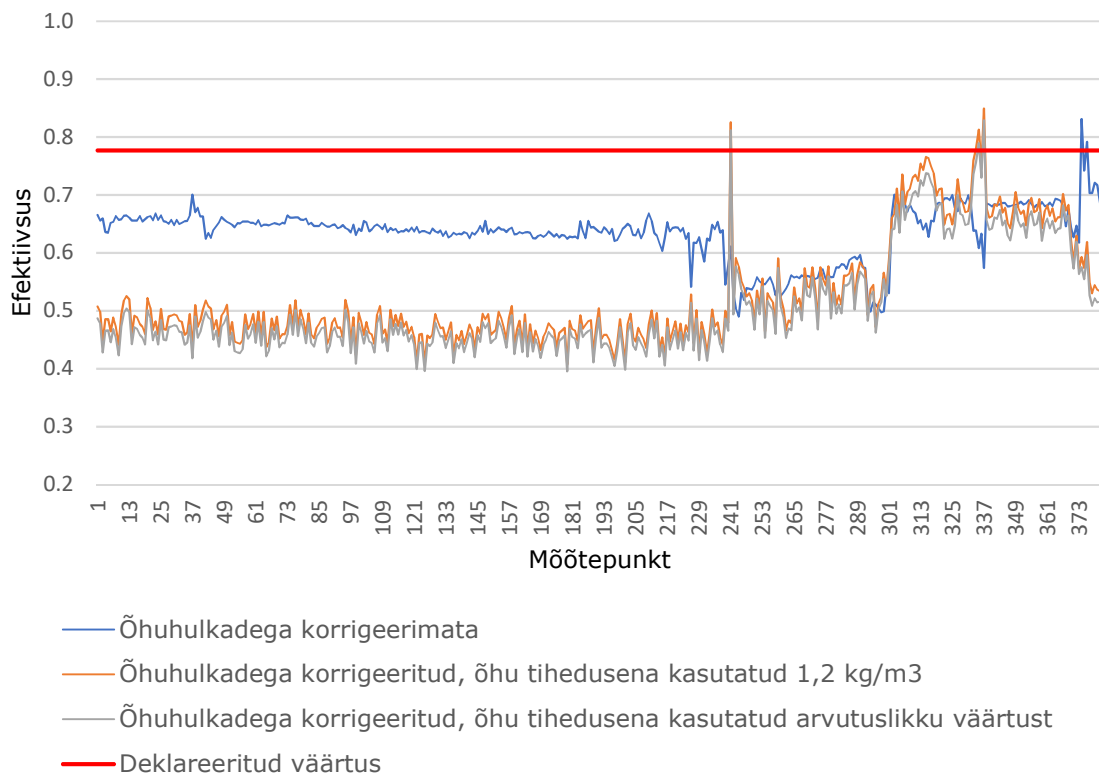
Joonis 3.12 Ventilatsiooniseadme 323 temperatuuri suhtarvud, õhuhulkadega korrigeeritud, õhu tihedusena kasutatud arvutuslikku väärtust

Joonistelt 3.11 ja 3.12 on näha, et õhuhulkadega korrigeeritud temperatuuri suhtarvud väljatõmbe järgi ületavad 1. See on põhjustatud asjaolust, et valem 1.11 korrigeerib näidu üles, kui väljatõmbe õhuhulk on suurem kui sissepuhke õhuhulk. Piltlikult võib öelda, et väiksema väljatõmbe õhuhulga korral jõuaks selle temperatuur soojustagastis rohkem langeda. Joonisele 3.11 on kantud ka õhuhulkade erinevus. Graafikult on selgelt näha, et kui erinevus väheneb, siis langeb ka arvutuslik tulemus madalamaks kui 1.

Antud ventilatsiooniseadme analüüsile tuginedes saab järeldada, et temperatuuri suhtarvu korrigeerimine õhuhulkadega on küll vajalik, aga valemeid 1.10 ja 1.11 saab kasutada vaid teatud tingimustel. Väga suurte õhuhulkade erinevuse korral võivad saadud tulemused osutada eksitavateks. Lisaks tuleb mainida, et teoreetiliselt võib graafikutel kirjeldatud olukord olla tingitud ka andmete kehvast kvaliteedist. Näiteks võivad kasutatud andmetes sissepuhkeõhu ja väljatõmbeõhu vooluhulgad ekslikult vahetuses olla.

Viru Keskuse tehnosüsteemide jälgimiseks kasutatavas veebirakenduses on deklareeritud, et selle ventilatsiooniseadme osaks oleva soojustagasti efektiivsus on 77,7%. Töö koostajal puudub täpsem informatsioon nimetatud seadme tehniliste parameetrite kohta. Faktidele tuginedes ei saa öelda, kas tegemist on nn kuiva või märja efektiivsusega. Töö järjepidevuse huvides eeldatakse, et tegemist on kuiva efektiivsusega sissepuhke järgi. Joonisele 3.13 on parema visualiseerimise eesmärgil lisatud kõik sissepuhke järgi arvutatud temperatuuri suhtarvud, täiendavalt on

graafikule võrdluseks lisatud ka deklareeritud suhtarvu väärtus.



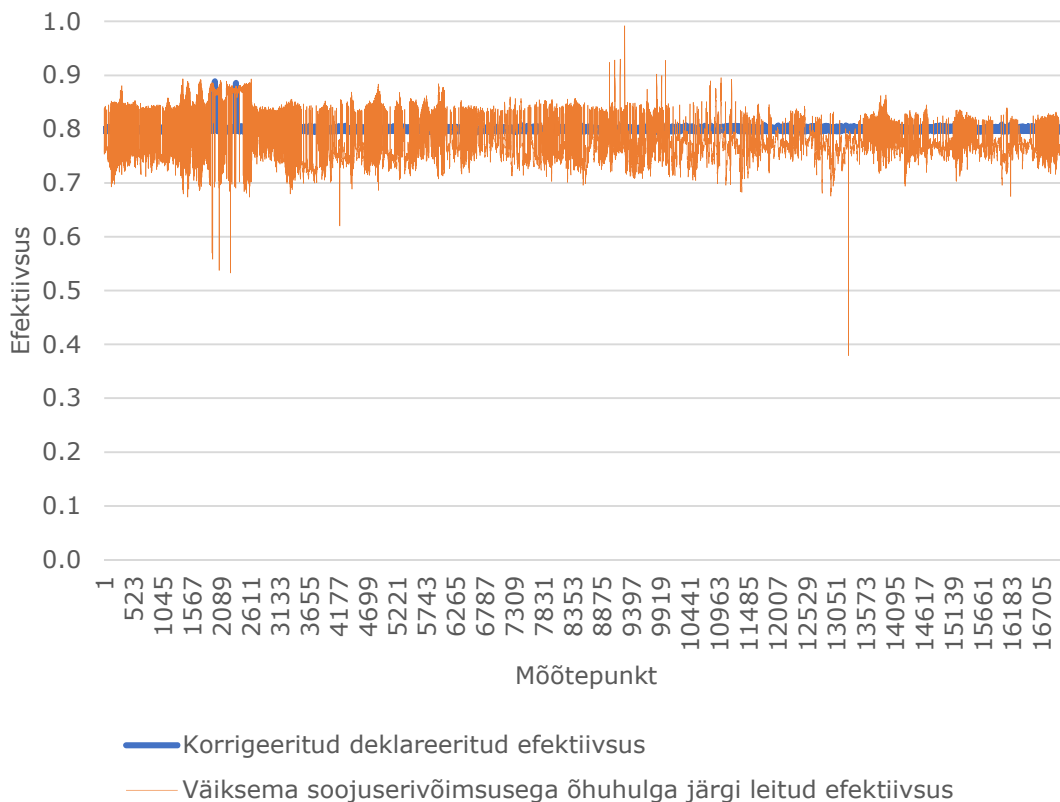
Joonis 3.13 Ventilatsiooniseadme 323 temperatuuri suhtarvud, sissepuhke järgi

Tulenevalt asjaolust, et väljatõmbe õhuhulk ventilatsiooniseadmes oli sissepuhke õhuhulgast oluliselt suurem, on jooniselt 3.13 näha, et õhuhulkadega korrigeerimine vähendab oluliselt arvutuslikku temperatuuri suhtarvu. Tegemist on hea näitega, kus soojusvaheti vajaks tõenäoliselt asjatundlikku ülevaatuset hooldusmeeskonna poolt. Hooneautomaatikas kuvatakse selle seadme temperatuuri suhtarvu väljatõmbe järgi, mis ei ole õhuhulkadega korrigeeritud. Jooniselt 3.10 on näha, et valdavalt ületab näit 0.8. Õhuhulkadega korrigeeritud näit sissepuhke järgi on valdava osa ajast aga madalam kui 0.5.

Võrreldes saadud tulemusi soojustagasti deklareeritud efektiivsusega näeme, et olulise osa ajast on see töötanud madalamal efektiivsusel.

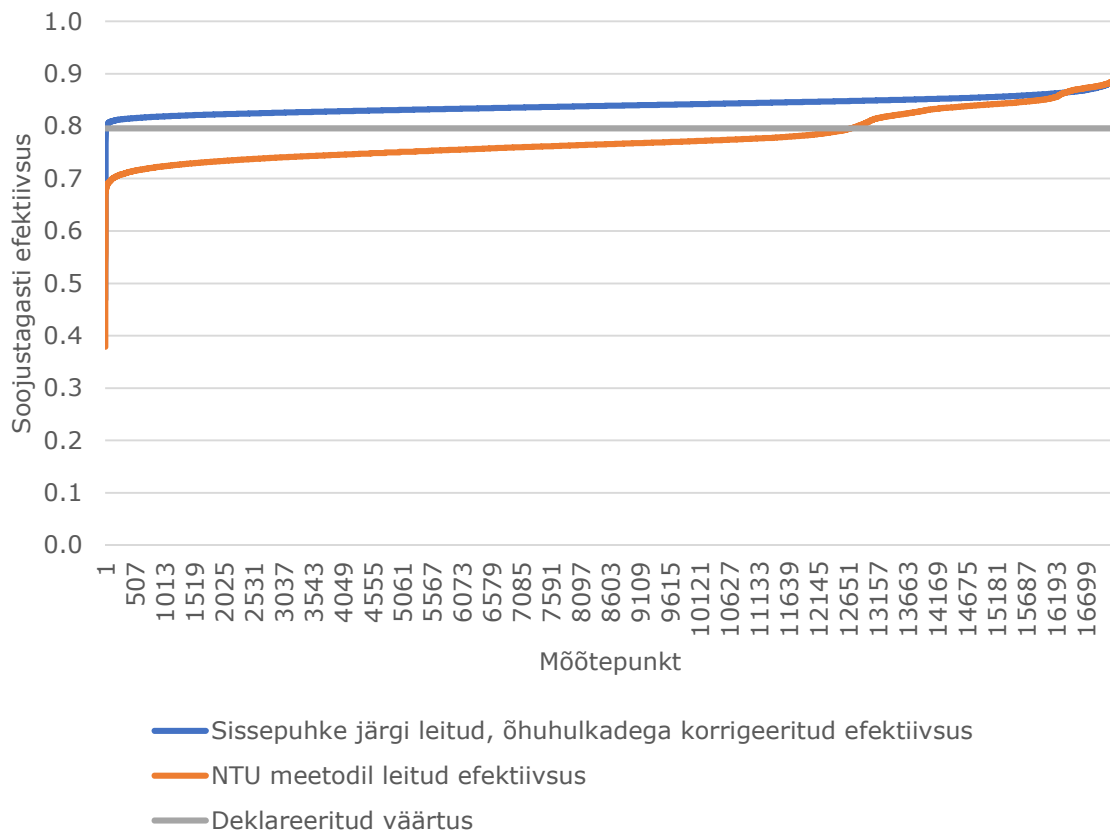
3.4 NTU meetodi tulemused

Ventilatsiooniseadme SV10 analüüsimisel saadud tulemus on esitatud jooniselt 3.14



Joonis 3.14 Ventilatsiooniseadme SV10 analüüs NTU meetodiga

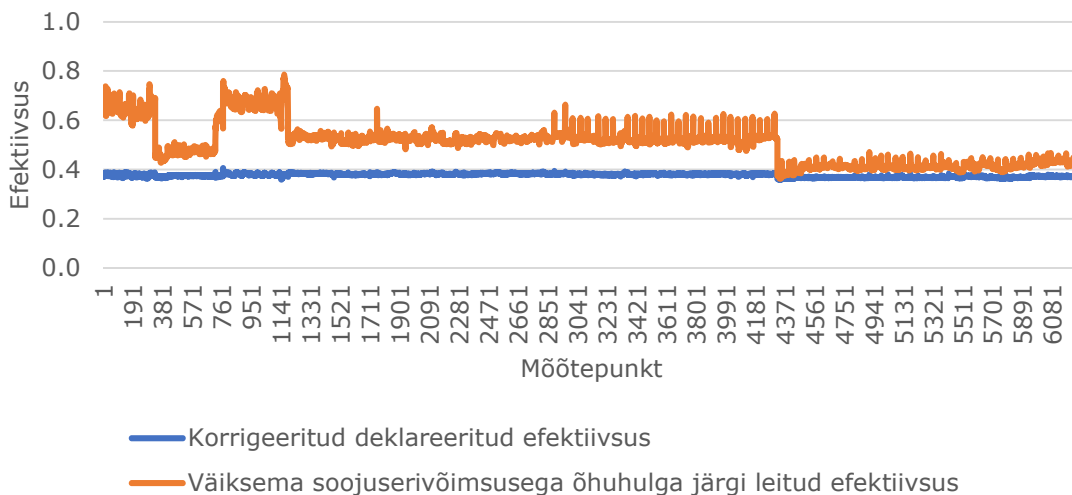
Tulenevalt olukorrast, et antud seadme õhu massivooluhulkade erinevus on väike, on graafikul sinise joonega näidatud korrigeeritud deklareeritud efektiivsus stabiilne ning deklareeritud väärtuse lähedane (deklareeritud väärtus on 79,6%). Graafikul oranžiga esitatud väärtused on piirava õhuhulga järgi leitud temperatuuri suhtarvud. Võrreldes saadud tulemusi joonisel 3.5 esitatud tulemustega on näha, et NTU meetodil leitud soojustagasti tegelik efektiivsus varieerub oluliselt rohkem ning on suurema osa ajast madalam deklareeritud väärtusest. Joonisel 3.15 on esitatud erinevate meetoditega leitud efektiivsuste kestusgraafikud.



Joonis 3.15 Ventilatsiooniseadme SV10 efektiivsused kestusgraafikul

Jooniselt on nähtav, et NTU meetodil leitud efektiivsus on valdava osa ajast madalam deklareeritud väärtusest, seevastu sissepuhke järgi leitud, õhuhulkadega korrigeeritud efektiivsuse näitaja suurema osa ajast seda ületab.

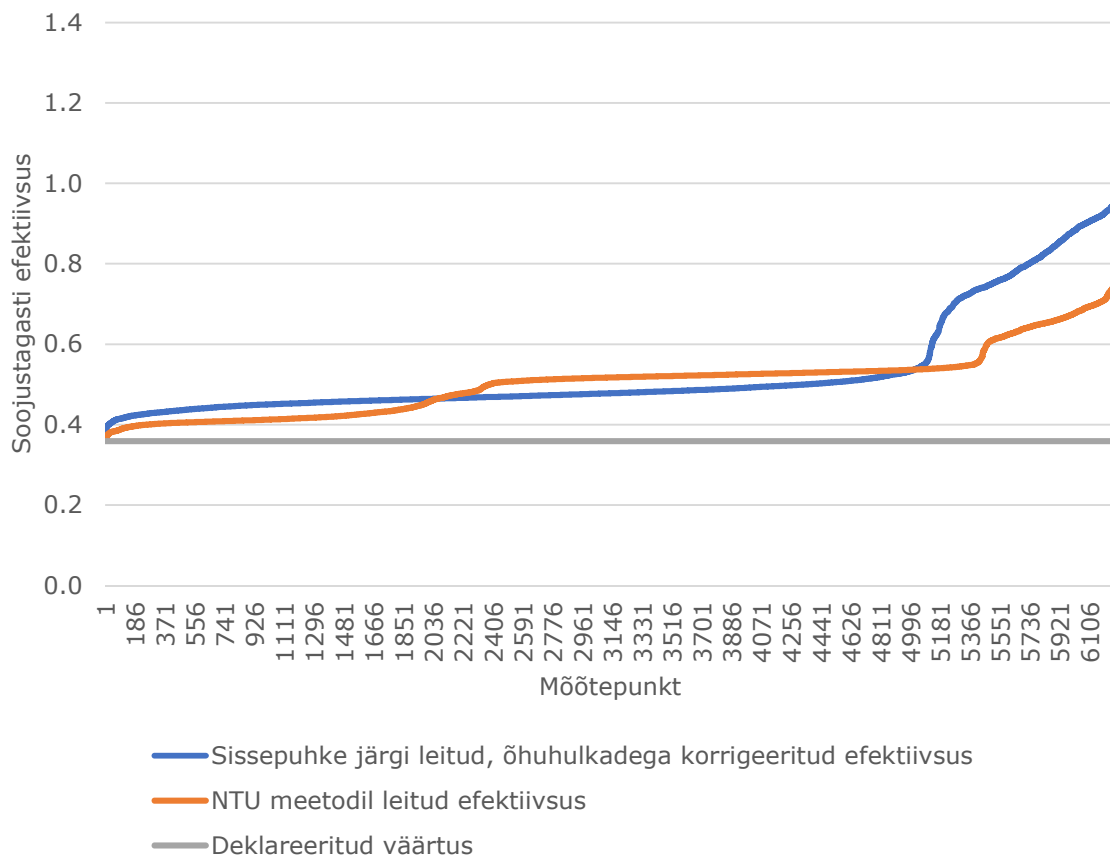
Ventilatsiooniseadme 333 analüüsimisel saadud tulemus on esitatud joonisel 3.16



Joonis 3.16 Ventilatsiooniseadme 333 analüüs NTU meetodiga

Jooniselt 3.16 on näha, et NTU meetodiga leitud efektiivsus ületab olulisel määral NTU meetodiga korrigeeritud deklareeritud väärtust. Analüüsile tuginedes saab öelda, et antud ventilatsiooniseadmele tuleks sooritada kohapealne kontroll. Võimalusel tuleks kontrollida temperatuuriandurite paigust ning nende korrasolekut. Oluliselt suurem arvutuslik efektiivsus võib olla seotud ka õhuleketega ventilatsiooniagregaadis või puuduliku isolatsiooniga.

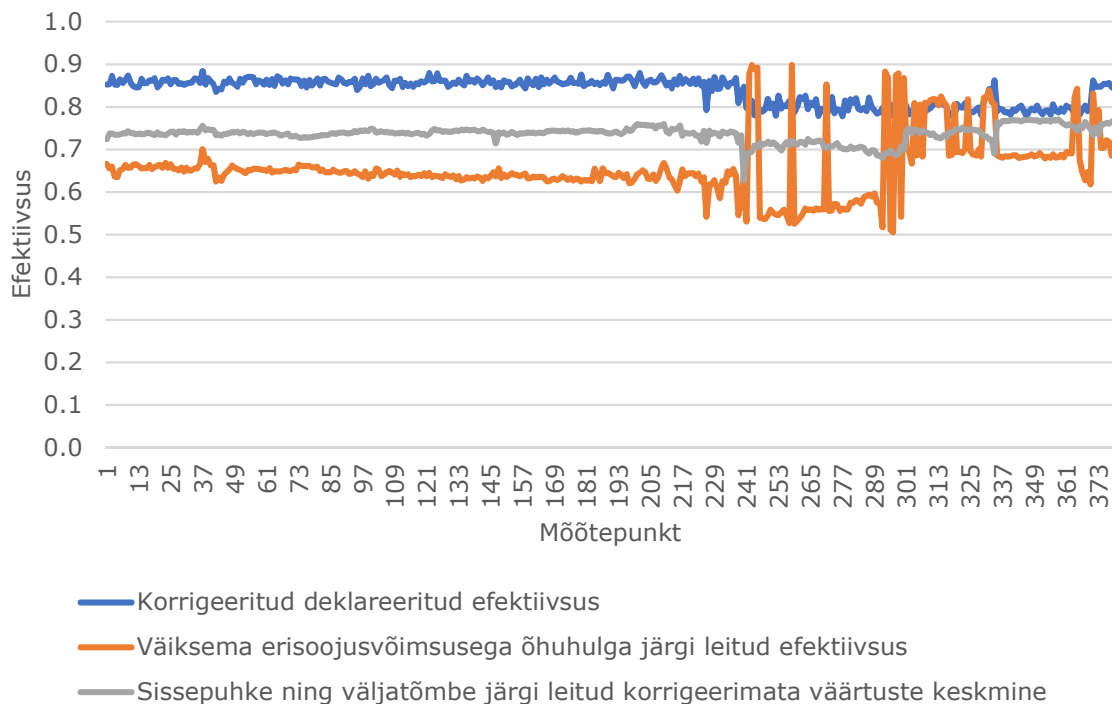
Järgneval joonisel on esitatud erinevate meetoditega leitud efektiivsuste kestusgraafikud.



Joonis 3.17 Ventilatsiooniseadme 333 efektiivsused kestusgraafikul

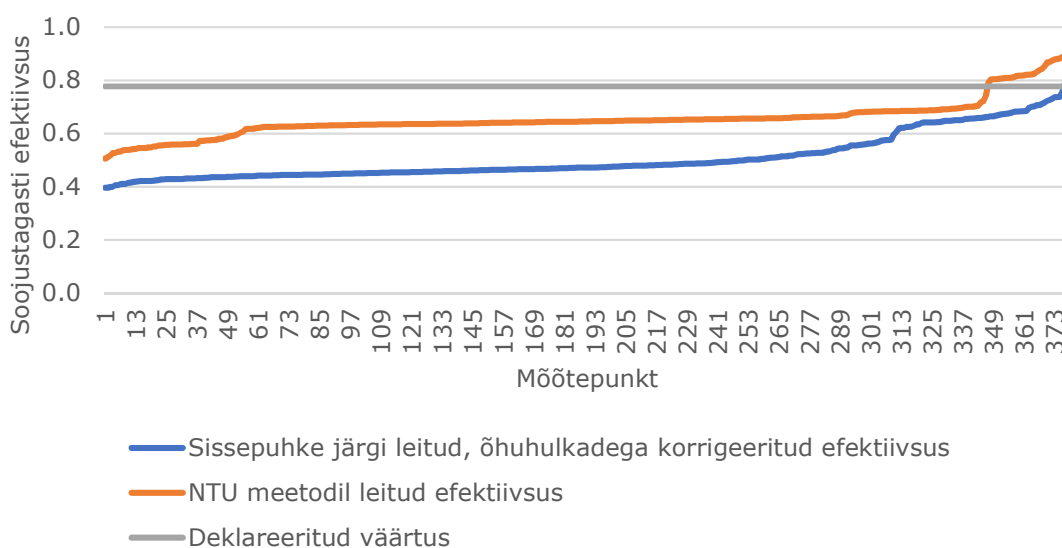
Ka jooniselt 3.17 on näha, et arvutuslikud efektiivsused on oluliselt kõrgemad deklareeritud väärtusest. Põhjusest aru saamiseks tuleb sooritada kohapealne kontroll.

Ventilatsiooniseadme 323 analüüsimisel saadud tulemus on esitatud joonisel 3.18.



Joonis 3.18 Ventilatsiooniseadme 323 analüüs NTU meetodiga

Jooniselt 3.18 on loetav, et ventilatsiooniseadme 323 soojustagasti töötab oluliselt ebaefektiivsemalt kui deklareeritud väärtuse järgi eeldada saaks. Seda iseloomustab paremini joonis 3.19. Joonisele 3.18 on täiendavalt lisatud ka peatükis 1.2 välja toodud Belgias kasutatav meetod, kus soojustagasti efektiivsus esitatakse kui sissepuhke ning väljatõmbe järgi leitud väärtuste keskmine. Jooniselt on näha, et see oluliselt kõrgem kui NTU meetodi järgi leitud väärtus. Sellest tulenevalt võib see olla ebasobilik soojustagastite töö hindamiseks.



Joonis 3.19 Ventilatsiooniseadme 323 efektiivsused kestusgraafikul

Graafikult 3.19 näeme, et soojustagasti arvutuslik efektiivsus on valdava osa ajast madalam kui deklareeritud väärtus. Võrreldes sissepuhke järgi leitud korrigeeritud väärtust ning NTU meetodil leitud väärtust näeme, et õhuhulkadega korrigeerimine võib omada liialt suurt mõju. Suurte õhuhulkade erinevuste korral toimub arvutusliku väärtuse liigne muutmine. Sellest tulenevalt on otstarbekam kasutada NTU meetodit, mis lähtub arvutustes alati piiravast õhuhulgast.

Töö autori hinnangul, tuleks seadmete hindamisel lähtuda NTU meetodil leitud väärtusetest. Piirava õhuhulga järgi leitud tulemused on realistlikumad ning nendes võetakse adekvaatsemalt arvesse õhuhulkade erinevusest tingitud muutuseid.

3.5 Soojustagastite efektiivsuse arvutamise meetoodika

Eelnevale analüüsile tuginedes saab öelda, et erinevate õhuhulkadega ventilatsiooniseadmete korral omab temperatuuri suhtarvu korrigeerimine olulist mõju. Sellest tulenevalt on soovituslik hoone automaatikasüsteemis kuvada korrigeeritud näit, mille põhjal tehtavad otsused võivad osutada õigemaks. Samuti peaks arvutatud tulemuse juures olema mäрге, kas kõik eeltingimused on täidetud. Näiteks olukorras, kus rootorsoojustagasti pöörleb poolel kiirusel, ei ole võimalik arvutustulemust usaldusväärselt tõlgendada.

Hoone automaatikasüsteemis kasutajale visualiseeritava info juures on oluline näidata, kas kuvatud näit on antud ajahetkel usaldusväärne või mitte. Usaldusväärsuse eeltingimused saab üldiselt kokku võtta selliselt, et soojustagasti peab töötama oma normaalses olekus. See tähendab käesoleva töö raames, et mõlemad ventilaatorid on töös ja õhuhulgad on vähemalt 1/3 nominaalsest väärtusest ning soojustagasti olek on 100%.

Arvutusliku ning deklareeritud väärtuse omavaheliseks võrdlemiseks võib osutada otstarbekaks ka viimase kuvamine hoone automaatikasüsteemis. Sellisel juhul on kasutajal hea ülevaade ning võimalik viga avastatakse varem. Vigade avastamise automatiseerimiseks on soovituslik kuvada häire, kui eeltingimustega kooskõlas olev arvutuslik väärtus on madalam kui deklareeritud väärtus. Häirepiiri seadistamisel on soovituslik kasutada viimase perioodi (päev, nädal) keskmist näitu, mitte hetkelist.

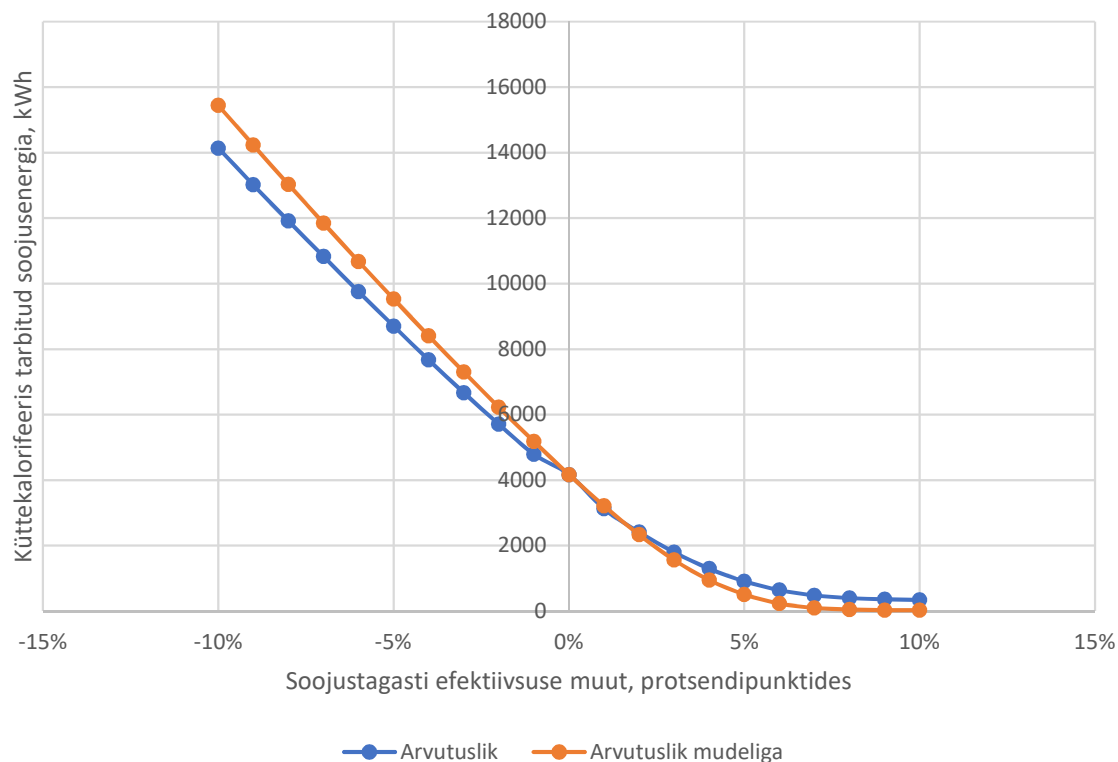
4. TEMPERATUURI SUHTARVU MÕJU ENERGIAKASUTUSELE

4.1 Analüüsi käik ja valideerimine

Arvutusmudeli koostamiseks ning valideerimiseks kasutati Akadeemia tee 5a paikneva ventilatsiooniseadme SV10 mõõtmisandmeid. Nimetatud seadme kohta on olemas ka tarbitud soojusenergia hulk uuritava perioodil ehk aastal 2019, see oli 4.18 MWh. Seadme poolt tarbitud elektrienergia kogus oli 2019. aastal 5.8 MWh.

Olemasolevate mõõtmisandmete (temperatuurid ning õhuhulk) analüüsi käigus leiti, et arvutuslikult oleks pidanud seadme küttekalorifeeris kulunud soojusenergiahulk olema 7.50 MWh. Arvutuslik energia ülekulu on seletatav õhutemperatuuri tõusuga seadme sissepuhkeventilaatoris ning korpuses. Tulemuse valideerimiseks kasutati sissepuhkeõhu temperatuuritõusuna ventilaatoris väärtust 0.65 °C, sellisel juhul oli arvutuslik soojusenergia hulk 4.17 MWh. Eelduse kontrollimiseks defineeriti FläktGroupi valikutarkvarasse Acon sarnane ventilatsiooniseade ning kontrolliti, millist õhutemperatuuri tõusu seal ventilaatoris kuvatakse, tulemuseks oli 0.7 °C. Lisaks leiti võimalik temperatuuritõus ventilaatoris ka lähtuvalt tarbitud elektrienergia kogusest. Sellisel juhul saadi tulemuseks 0.35 °C. Ülejäänud 0.3 °C on seletatav temperatuuritõusuga korpuses ning osaliselt ka mõõtmisandmete ebatäpsusega. Andmed pärinevad kahest PT1000 tüüpi temperatuuriandurist, mille summaarne mõõtmisviga saab olla kuni 0,12 kraadi. Sissepuhkeõhu temperatuuriandur paikneb masinast eemal, magistraalkanali peal.

Peale arvutusvalemi valideerimist leiti, millised oleksid võinud olla tarbitud soojusenergia kogused, kui soojustagasti efektiivsus oleks muutunud vahemikus -10 kuni +10 protsendipunkti. Selle jaoks leiti soojustagastijärgsed õhutemperatuurid muutunud soojustagasti efektiivsuste juures ning seejärel vajalikud soojusenergiahulgad sissepuhkeõhu temperatuuri saavutamiseks. Tulemused on esitatud järgneval joonisel. Joonisele on kantud ka need arvutustulemused, mis on leitud välja töötatud mudeli abil.



Joonis 4.1 Soojustagasti temperatuuri suhtarvu mõju küttekalorifeeris tarbitud energiahulgale

Erinevus tulemuste vahel on selgitatav sellega, et mudelis on oluline sisendinformatsioon esitatud konstantsena. Näiteks omab tulemusele olulist mõju see, et väljatõmbetemperatuurina ning õhuhulkadega korrigeeritud temperatuuri suhtarvuna on sisestatud aasta keskmised väärtused. Täpsema tulemuse saavutamiseks on mudelisse võimalik sisestada andmed ka tunnikaupa.

Täpsustuseks tuleb lisada, et soojustagasti temperatuuri suhtarvu suurenemisel ei ole arvesse võetud täiendavat jäätumisohtu ning sellega kaasnevat efektiivsuse langemist. Arvutusmudel on koostatud esmase hinnangu andmiseks ning ligikaudsete kulude leidmiseks.

4.2 Temperatuuri suhtarvu mõju soojusenergiakasutusele Viru Keskuse ventilatsiooniseadme 323 näitel

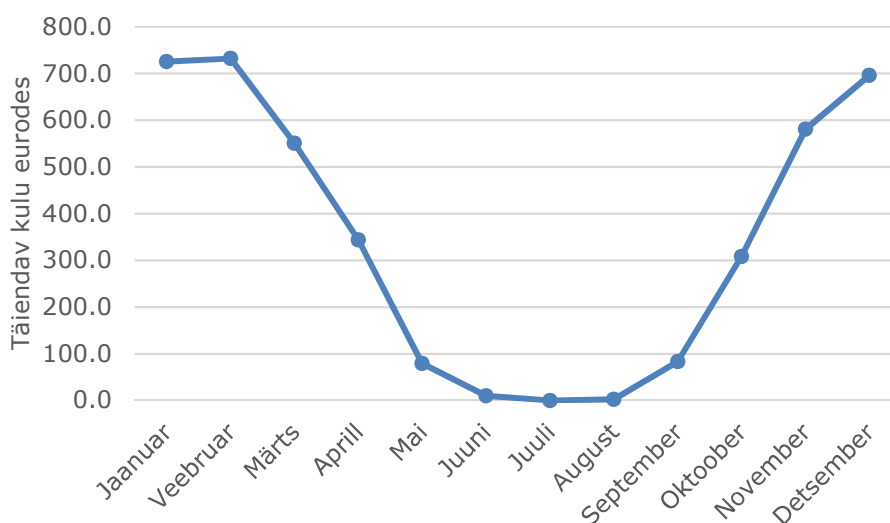
Uuritavaks objektiks valiti ventilatsiooniseade 323, kuna eelnev analüüs tõi välja selle problemaatilisuse. Jooniselt 3.13 on näha, et soojustagasti temperatuuri suhtarv sissepuhke järgi on oluliselt madalam kui deklareeritud väärtus. Täiendava rahalise kulu

arvutuses kasutati sisendinformatsioonina analüüsitud perioodi keskmisi väärtuseid, mis on esitatud tabelis 4.1.

Tabel 4.1 Ventilatsiooniseadme 323 energiakulu arvutuses kasutatud sisendinformatsioon

Õhu massivooluhulk sissepuhkes, kg/s	4.30
Kuiva õhu erisoojus, kJ/kg*K	1.006
Tegelik õhuhulkadega korrigeeritud temperatuuri suhtarv sissepuhke järgi, %	50.8%
Alternatiivne õhuhulkadega korrigeeritud temperatuurisuhtarv sissepuhke järgi, %	77.7%
Väljatõmbetemperatuur, °C	22.5
Soojusenergia maksumus, Eur/MWh	57.4
Sissepuhkeõhu temperatuuri seadeväärtus, °C	17.5

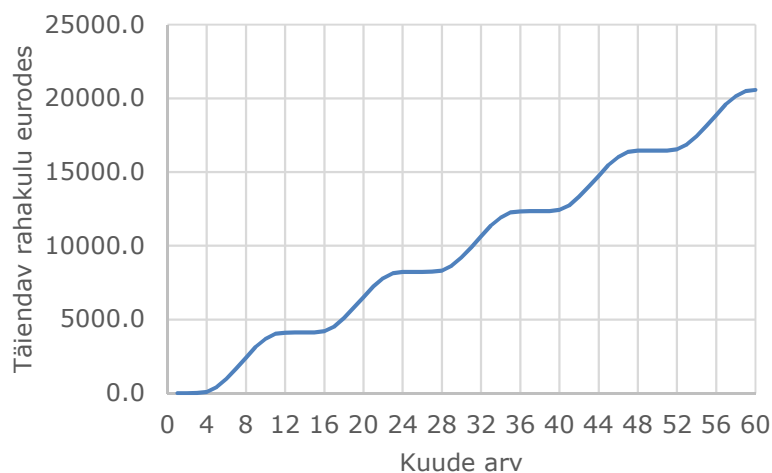
Ventilatsiooniseadme ajagraafikuna on arvestatud, et see töötab seitse päeva nädalas, kella kaheksast hommikul kella kümneni õhtul. Joonisel 4.2 on kujutatud kuude kaupa, kui suur on täiendav rahakulu sissepuhkeõhu soojendamiseks seoses soojustagasti vähenenud temperatuuri suhtarvuga.



Joonis 4.2 Täiendav rahakulu ventilatsiooniseadme 323 sissepuhkeõhu soojendamiseks erinevatel kuudel

Arvutuste kohaselt on täiendav aastane energiakasutus ca 72 MWh, mis rahalises vääringus teeb hinnanguliselt 4100 eurot aastas.

Joonisel 4.3 on esitatud kumulatiivne rahakulu järgmise 60 kuu jooksul (alates juuni 2020) eeldusel, et ventilatsiooniseade töötab sarnastel tingimustel ning välistemperatuur vastab Eesti energiaarvutuse baasaasta kliimas välja toodud väärtustele.

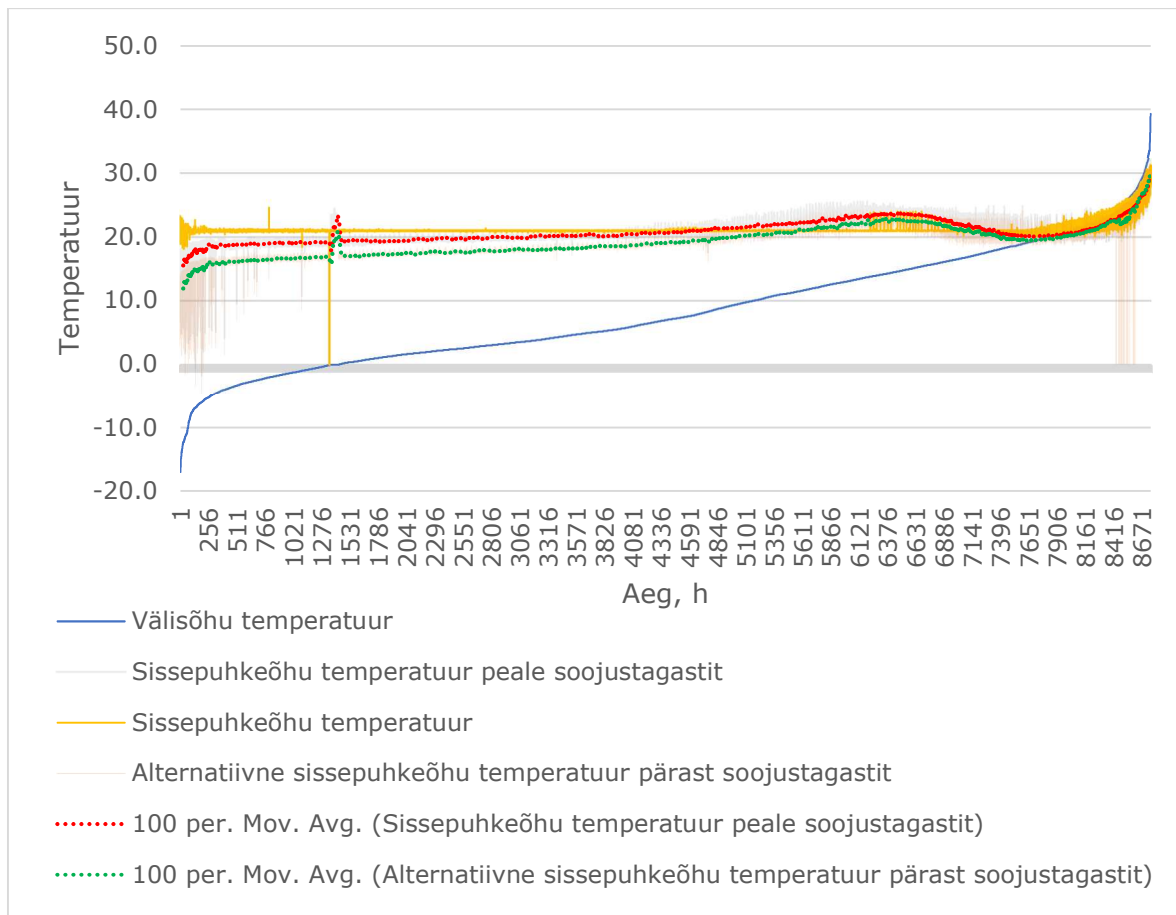


Joonis 4.3 Kumulatiivne rahakulu järgneva 60 kuu jooksul ventilatsiooniseadme 323 sissepuhkeõhu soojendamiseks, alates juuni 2020

Soojustagasti aastane kasutegur on mõõdetud andmete põhjal ligikaudu 68%, temperatuuri suhtarvu 77,7% juures oleks soojusvaheti aastane kasutegur ligikaudu 97%.

4.3 Temperatuuri suhtarvu mõju kestusgraafikul seadme SV10 näitel

Järgneval joonisel on esitatud mõõdetud andmetele tuginev graafik ventilatsiooniseadme SV10 kohta, millele on lisatud rohelisega sissepuhkeõhu temperatuur peale soojustagastit, kui soojustagasti kasutegur oleks olnud kümme protsendipunkti madalam.



Joonis 4.4 Ventilatsiooniseadme SV10 temperatuuride graafik

Joonisel on sinisega näidatud välisõhutemperatuur ning kollasega ventilatsiooniseadme sissepuhkeõhu temperatuur. Punasega on näidatud mõõdetud sissepuhkeõhu temperatuur peale soojustagastit.

Rohelise ja punase joone vaheline pindala (mis jääb kollasest joonest madalamale) iseloomustab täiendavat energiakulu, mis kaasneks seoses ebaefektiivsema soojustagastiga. Käesolevas peatükis kirjeldatud meetodika võimaldab hinnata selle kulu suurust nii energiaühikutes kui ka rahalises vääringus.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli analüüsida ventilatsiooniseadmetes kasutatavate soojustagastite efektiivsust ning uurida, millist mõju selle arvutustulemustele omab erinevate meetodite kasutamine. Lisaks uuriti, millist mõju omab soojustagasti alanenud efektiivsus ventilatsiooniseadme küttekalorifeeris kasutatavale soojusenergiahulgale.

Soojustagastite efektiivsuse arvutamiseks on kasutusel erinevaid meetodeid. Seda on võimalik leida nii sissepuhkeõhu kui ka väljatõmbeõhu parameetrite kohta. Kui õhu massivooluhulgad seadmes ei ole võrdsed, siis on võimalik arvutatud efektiivsuseid kas suuremaks või väiksemaks korrigeerida. Energiatõhususe seisukohast on tähtis, et tehnosüsteemide korrasolekut jälgivad inimesed mõistaksid, mis on hoone automaatikasüsteemis kuvatava efektiivsusnäitaja sisu ning kuidas seda tõlgendada.

Töö käigus selgus, et sissepuhkeõhu ning väljatõmbeõhu järgi arvutatud tulemused erinevad üksteisest olulisel määral. See on enamasti tingitud temperatuuriandurite vales paiknemisest, õhuleketest ventilatsiooniseadmes, veeauru kondenseerumisest, õhu massivooluhulkade erinevusest ning õhu soojenemisest/jahtumisest seadme korpuses. Märgatavat mõju saadavatele arvutustulemustele omab ka efektiivsusnäitaja korrigeerimine õhu massivooluhulkade suhtega. Suurte massivooluhulkade erinevuste korral sissepuhke ja väljatõmbe poolel võivad arvutuslikud efektiivsused ületada väärtust 100%. Sellest tulenevalt on tähtis, et õhuhulkade mõõtmine oleks sooritatud täpselt ning, et oleks teada ka õhutemperatuur punktis, kus õhu koguseid on mõõdetud (leidmaks korrektset massivooluhulka).

Erinevate lahenduste analüüsimisel selgus, et soojustagasti efektiivsuse arvutamiseks on kõige otstarbekam kasutada NTU meetodit. Selle kõige olulisemaks eripäraks on, et efektiivsusnäitaja arvutatakse alati nn piirava õhujoa järgi. Piiranguks loetakse seda, et üks õhuvool ei saa ära anda rohkem energiat, kui teine õhuvool on valmis vastu võtma. Võrreldes seda meetodit õhuhulkadega korrigeerimise meetodiga on eeliseks see, et tulemused ei saa ületada 100%. Kui reaalsel mõõtmistulemustel leitud väärtused siiski ületavad 100%, siis on see selge signaal objektile ülevaatuse sooritamiseks. NTU meetodi täiendavaks eeliseks on, et see võimaldab lähtuvalt tegelikust olukorrast korrigeerida ka tootja poolt esitatud soojustagasti efektiivsust.

Soojustagasti ebaefektiivsusest tuleneva lisakütte vajaduse hindamiseks ning ennustamiseks koostati töö käigus arvutustabel, mis baseerub Eesti energiaarvutuse

baasaasta kliimale. Koostatud metoodika alusel on võimalik ettevõtte Ruut8 OÜ poolt loodud tehnosüsteemide jälgimise/optimeerimise tarkvaras kasutusele võtta moodul, mis hindab tuleviku täiendavat rahakulu soojusenergiale seoses soojustagasti ebaefektiivse tööga. Viru keskuse ventilatsiooniseadme 323 näitel leiti käesolevas magistritöös, et olemasolevas olukorras on täiendav rahakulu aastas ca 4100 eurot.

Kokkuvõtvalt saab öelda, et soojustagasti olemasolu ning selle tehniline korrasoleku järjepidev monitoorimine omab olulist mõju ventilatsioonisüsteemide energiatõhususele. Korrasoleku hindamisel tuleb tugineda esinduslikele näitajatele ning on oluline mõista nende sisu.

SUMMARY

Aim of this master's thesis was to analyse heat recovery units which are used in ventilation systems. One purpose was to find out, what effects on the calculated efficiency have different calculation methods. Furthermore, the consumption of heating energy in the ventilation system was analysed as a function of heat recovery efficiency.

There are many ways to calculate the heat recovery efficiency. It can be found out according to the supply and exhaust side. There are different formulas which allow to take into consideration the impact of different massflows on both sides. In terms on energy efficiency, it is crucial that the people in charge of the buildings ventilation systems would understand the efficiency presented in the building automation system (BMS).

During the analysis it was found out, that there are major differences in the efficiencies calculated for the supply and exhaust side. It is mostly justified with the heat gain in fans (temperature sensors are not positioned correctly), leakages in the unit, flow rate unbalance, condensation and transmission heat fluxes from or to the surrounding. Additionally, correcting the calculation results with the ratio of inlet- and exhaust air massflows also has a major impact on the results. If the difference between the two massflows exceeds a certain value (depends on the unit), calculated efficiency will give abnormal results (more than 100%). This is the main weakness in correcting the efficiency with the massflows. It is worth to mention, that the measurement of airflows needs to be precise.

As a result of this master's thesis it was found out, that when calculating the heat recovery efficiency it is reasonable to use the NTU method. Main advantage for this method is, that the efficiency is always calculated by the limiting massflow, meaning that the warm exhaust air can not transfer more energy to the cold supply air than it is able to contain. For this reason, calculated efficiencies should not exceed 100%. If for any reason the calculated result will exceed 100%, then this is a certain sign for an inspection of the air handling unit (AHU). Additional bonus for the NTU method is, that it is possible to correct the declared value of the units efficiency given by the producer.

To estimate the additional heating costs due to the lowered heat recovery efficiency, a calculation table was prepared that is based on the Estonian test reference year climate. This method for calculating additional cost can be used in the optimization software created by Ruut8 LTD. For an example it was calculated, that yearly additional heating costs for AHU 323 in Viru Keskus are approximately 4100 euros.

To conclude, exploitation of a heat recovery unit and its monitoring holds a great potential in energy efficiency. To interpret the efficiency shown in BMS correctly, one has to understand how the shown value is calculated.

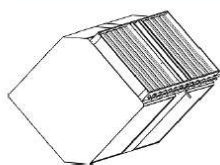
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] "Ettevõtete ressursitõhusus." <https://www.envir.ee/et/eesmargid-tegevused/ringmajandus/ressursitohusus>.
- [2] "Hoonete energiatõhusus." <https://mkm.ee/et/eesmargid-tegevused/ehitus-ja-elamumajandus/hoonete-energiatohusus>.
- [3] REHVA, *European Guidebook-Residential Heat Recovery*. 2018.
- [4] "Eesti Vabariigi valitsuse määrus nr. 63. Hoone energiatõhususe miinimumnõuded." 2019.
- [5] P. G. Schild, "Air-to-Air Heat Recovery in Ventilation Systems," *Ventilation Information Paper*, vol. 6, 2004.
- [6] T. Tark, "Ventilatsioonisüsteemide soojustagastite kasuteguritest." <http://www.hevac.ee/wp-content/uploads/2016/04/Soojustagastite.pdf>.
- [7] A. Mardiana-Idayu and S. B. Riffat, "Review on heat recovery technologies for building applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 2. pp. 1241–1255, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.09.026.
- [8] "EVS 906:2018. MITTEELAMUHOONETE VENTILATSIOON. Üldnõuded ventilatsiooni- ja ruumiõhu konditsioneerimissüsteemidele." Standardikeskus, 2018.
- [9] M. F. Martins Duarte, "Heat recovery units in ventilation," 2016.
- [10] S. C. Sugarman, "HVAC Fundamentals."
- [11] S. Caillou and P. van den Bossche, "HEAT RECOVERY EFFICIENCY: MEASUREMENT AND CALCULATION METHODS." [Online]. Leitav: www.bbri.be.
- [12] T.-A. Kõiv, *Õhu konditsioneerimine I*. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2014.
- [13] R. K. Shah and D. P. Sekulic, *Fundamentals of heat exchanger design*. John Wiley & Sons, 2003.
- [14] "KOMISJONI MÄÄRUS (EL) nr 1253/2014." Euroopa Liidu Teataja, 2014, [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/HTML/?uri=CELEX:32014R1253&from=ET#d1e443-8-1>.
- [15] "EVS-EN 308:2000. Soojusvahetid. Talitusandmete kindlaksmääramise toimingud õhk-õhk tüüpi soojuse ja lõõrigaaside soojuse korduskasutusseadmete puhul." Eesti Standardikeskus, 2000.
- [16] E. Abel and H. Voll, *Hoonete energiatarve ja sisekliima*. OÜ Presshouse.
- [17] O. Ronneseth, P. Liu, M. Justo-Alonso, and H. M. Mathisen, "Techniques for airflow measurements to determine the real efficiency of heat recovery in ventilation systems," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 352, no. 1, doi: 10.1088/1755-1315/352/1/012068.

- [18] Y. hee Choi, D. Song, D. Seo, and J. Kim, "Analysis of the variable heat exchange efficiency of heat recovery ventilators and the associated heating energy demand," *Energy and Buildings*, vol. 172, pp. 152–158, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.04.066.
- [19] A. B. Johnson, C. J. Simonson, and R. W. Besant, "Uncertainty analysis in testing of air-to-air heat/energy exchangers installed in buildings," 1998.
- [20] A. Merzkirch, S. Maas, F. Scholzen, and D. Waldmann, "Field tests of centralized and decentralized ventilation units in residential buildings - Specific fan power, heat recovery efficiency, shortcuts and volume flow unbalances," *Energy and Buildings*, vol. 116, pp. 376–383, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.12.008.
- [21] T. Kalamees and J. Kurnitski, "Estonian test reference year for energy calculations," *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 40–58, 2006.

LISAD

Lisa 1 – Ventilatsiooniseadmes SV10 paikneva plaatsoojustagasti väljatrükk



Plaatsoojusvaheti

Koos põhi- ja möödaviigu klapiga			
	Sissepuhe	Väljatõmme	
Õhuhulk	1.20	1.20	m ³ /s
Rõhukadu	242	230	Pa
Talvine õhutemperatuur enne/pärast	-22.0/13.4	22.0/-9.6	°C
Talvine õhuniiskus enne/pärast	90/6	20/97	%
Kondensaat		0.1	l/min
Tootlikkus	51.55		kW
Temperatuuri kasutegur	80.5		%
Kuiv efektiivsus EN 308 kui 1.20 m ³ /s	79.6		%
Kondensaadi alus		Standard	

Lisa 2 – Temperatuuri suhtarvu leidmine Siemensi kontrolleriis

Sensor location [SnlcTErc]

The reheat value or efficiency [Efcy] is calculated differently depending on the sensor location.

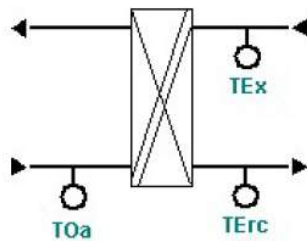
SnlcTErc Calculating the reheat value or efficiency **Efcy**

SupplAir
$$Efcy = \frac{T_{Erc} - T_{Oa}}{T_{Ex} - T_{Oa}}$$
 Illustration

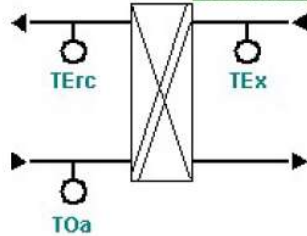
mk:@MSITStore:C:\ProgramData\Siemens\DESIGO\TOOLSET\XwpData\HQ\Libra... 2020-04-28

MON_ERC

Page 2 of 4



ExhauAir
$$Efcy = \frac{T_{Ex} - T_{Erc}}{T_{Ex} - T_{Oa}}$$
 Illustration



Lisa 3 – Väljavõtte koostatud arvutustabelist

Sisendid	
Õhu massivooluhulk sissepuhkes, kg/s	1.00
Kuiva õhu erisoojus, kJ/kg*K	1.006
Tegelik õhuhulkadega korrigeeritud temperatuuri suhtarv sissepuhke järgi, %	79.0%
Alternatiivne õhuhulkadega korrigeeritud temperatuurisuhtarv sissepuhke järgi, %	80.0%
Väljatõmbetemperatuur, °C	22.0
Soojusenergia maksumus, Eur/MWh	57.4
Sissepuhketemperatuuri seadeväärtus, °C	21.0

Uuritava ventilatsiooniseadme ajagraafik	Kellaeg	Seadme olek
	00:00-01:00	1
01:00-02:00	1	
02:00-03:00	1	
03:00-04:00	1	
04:00-05:00	1	
05:00-06:00	1	
06:00-07:00	1	
07:00-08:00	1	
08:00-09:00	1	
09:00-10:00	1	
10:00-11:00	1	
11:00-12:00	1	
12:00-13:00	1	
13:00-14:00	1	
14:00-15:00	1	
15:00-16:00	1	
16:00-17:00	1	
17:00-18:00	1	
18:00-19:00	1	
19:00-20:00	1	
20:00-21:00	1	
21:00-22:00	1	
22:00-23:00	1	
23:00-00:00	1	

Joonis 0.1 Väljavõtte 1 koostatud arvutustabelist

Tulemused	
Küttekalorifeeris kasutatav täiendav energia aastas, kWh	1423.4
Rahaline kulu või sääst aastas, Eur	81.6
+ märgiga tulemus näitab, et nii palju kuluks vähem	
- märgiga tulemus näitab, et nii palju kuluks rohkem	

Kuu	Küttekalorifeeris kasutatava energia muut	
	kWh	Eur
Jaanuar	187.1	10.7
Veebruar	191.7	11.0
Märts	163.4	9.4
Aprill	126.2	7.2
Mai	78.9	4.5
Juuni	54.5	3.1
Juuli	30.2	1.7
August	43.4	2.5
September	81.9	4.7
Oktoober	120.6	6.9
November	162.0	9.3
Detsember	183.4	10.5

Tegelik soojustagasti aastane kasutegur, %	83.8%
Alternatiivne soojustagasti kasutegur, %	84.8%

Joonis 0.2 Väljavõtte 2 koostatud arvutustabelist

EstoniaTRY							
Kuu	Päev	Tund	Välis temperatuur, °C	$t_{v,grit}$	tegelik	$t_{v,grit}$	alternatiiv
Jaanuar		00:00-01:00	-1.5		17.2		17.0
		01:00-02:00	-1		17.2		17.0
		02:00-03:00	-0.5		17.2		17.0
		03:00-04:00	-0.1		17.2		17.0
		04:00-05:00	0.3		17.2		17.0
		05:00-06:00	0.7		17.2		17.0
		06:00-07:00	1		17.2		17.0
		07:00-08:00	1.3		17.2		17.0
		08:00-09:00	0.4		17.2		17.0
		09:00-10:00	0.7		17.2		17.0
		10:00-11:00	1		17.2		17.0

Joonis 0.3 Väljavõte 3 koostatud arvutustabelist

Kui on soov tagantjärele kontrollida, siis saab siia lisada vastavad andmed. Seejärel muuta valemid tulpades M ja N					
Õhu massivooluhulk sissepuhkes, kg/s	Tegelik temperatuuri suhtarv, %	Alternatiivne temperatuuri suhtarv, %	Väljatõmetemperatuur, °C	Ilma	
1.00	79.0%	80.0%	22.0		
1.00	79.0%	80.0%	22.0		
1.00	79.0%	80.0%	22.0		
1.00	79.0%	80.0%	22.0		
1.00	79.0%	80.0%	22.0		
1.00	79.0%	80.0%	22.0		

Joonis 0.4 Väljavõte 4 koostatud arvutustabelist

Energiakasutus küttekalorifeeris, kWh tunnis				
°C	Ilma soojustagastita	Soojustagastiga, tegeliku temperatuuri suhtarvuga	Soojustagastiga, alternatiivse temperatuuri suhtarvuga	Erinevus soojustagastiga versioonide vahel
	22.6	3.96	3.72	0.24
	22.1	3.85	3.62	0.23
	21.6	3.75	3.52	0.23
	21.2	3.66	3.44	0.22
	20.8	3.58	3.36	0.22
	20.4	3.49	3.28	0.21
	20.1	3.43	3.22	0.21
	19.8	3.37	3.16	0.21
	20.7	3.56	3.34	0.22

Joonis 0.5 Väljavõte 5 koostatud arvutustabelist