



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**VASTUVOOLU PLAATSOOJUSTAGASTI
JÄÄTUMISE VÄLTIMISE JA HÄRMATISE
SULATUSE ANALÜÜS**

**ANALYSIS OF FROST PREVENTION AND DEFROSTING
OF A COUNTER-FLOW PLATE HEAT EXCHANGER**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Raido Valgenberg

Üliõpilaskood: 153975EAKI

Juhendaja: Alo Mikola, nooremteadur

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

25. mai 2020.

Autor:

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

25. mai 2020.

Juhendaja:

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Raido Valgenberg, 153975EAKI

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

Juhendaja: Nooremteadur Alo Mikola, 56647035

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Vastuvoolu plaatsoojustagasti jäätumise vältimise ja härmatise sulatuse analüüs

(inglise keeles) Analysis of frost prevention and defrosting of a counter-flow plate heat exchanger

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Mõõta plaatsoojustagastite toimivust külmal perioodil (temperatuurid, õhuvooluhulgad, rõhukadu üle soojustagasti väljatõmbe poole, suhteline niiskus).
2. Hinnata plaatsoojustagastite toimivust külmal perioodil vastavalt olemasolevatele kliimakambris teostatud mõõtmistele (temperatuurid, õhuvooluhulgad, rõhukadu üle soojustagasti väljatõmbe poole, suhteline niiskus).
3. Koostada vastavalt mõõtmisandmetele soojustagasti jäätumise ja jää sulatamise mudelid ning kalibreerida mudelid vastavalt mõõtmistulemustele.
4. Analüüsida simulatsioonimudelite abil sulatuse ja jäätumise vältimise lahendusi.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Mõõta plaatsoojustagastite toimivust külmal perioodil	01.03.2020
2.	Hinnata plaatsoojustagastite toimivust külmal perioodil vastavalt olemasolevatele kliimakambris teostatud mõõtmistele	15.03.2020
3.	Koostada vastavalt mõõtmisandmetele soojustagasti jäätumise ja jää sulatamise mudelid ning kalibreerida mudelid vastavalt mõõtmistulemustele	15.04.2020
4.	Hinnata simulatsioonimudelite abil järgmisi sulatuse ja jäätumise vältimise võimalusi:	06.05.2020

	1) Ainult eelküttekalorifeeriga kütmine ja jäätumise vältimine 2) Eelküttekalorifeeriga vajaduspõhine jäätumise vältimine ja järelküttekalorifeeriga õhu soojendamine 3) Väljaviske temperatuuri alusel jäätumise vältimine 4) Möödaviiguga jää sulatamine	
5.	Anda hinnang kõige energiaefektiivsemate plaatsoojustagastite sulatamise ja jäätumise vältimise lahendustele	15.05.2020

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 25. mai 2020.a

Üliõpilane: Raido Valgenberg 25. mai 2020.a
/allkirjastatud digitaalselt/

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

SISUKORD

Sissejuhatus	7
1. Teooria	9
1.1 Soojustagastus	9
1.1.1 Plaatsoojustagasti	9
1.1.2 Temperatuuri suhtarv	10
1.2 Õhu ja niiskuse seosed.....	11
1.3 Soojustagasti külmumine	12
1.3.1 Külmumise vastased meetmed.....	14
1.4 Varasemalt tehtud uuringud	15
1.5 Külmumiskaitse lahendused Eesti turul	16
1.5.1 Fläktwoodsi lahendus.....	16
1.5.2 Swegoni, Komfoventi lahendus	17
1.5.3 Systemairi lahendus	17
1.5.4 VTS, WOLFi lahendused	17
1.5.5 Menerga lahendus	18
2. Meetodid	19
2.1 Ülevaade probleemist ja lahendused	20
2.2 Kliimakambri mõõtmisetulemuste analüüs	20
2.3 Uuritud soojustagasti	21
2.4 Akadeemia tee 5a mõõtmised	22
2.5 Külmumise tuvastamise põhimõte	24
2.6 Soojustagasti modelleerimine	25
2.6.1 Külmumise tuvastamise modelleerimine.....	26
2.6.2 Sulatusrežiimi modelleerimine	27
2.6.3 Sissepuhke- ja väljaviskeõhu modelleeritud parameetrid.....	28
2.7 Akadeemia tee 5a ühiselamu	32
2.8 Mudeli testimine ja kalibreerimine	33
2.8.1 Soojustagasti mudeli toimimise valideerimine	35

2.9	Külmumiskaitsete lahenduste simuleerimine	37
2.9.1	Möödaviiguga jää sulatamine	38
2.9.2	Ainult eelküttekalorifeeriga jäätumise vältimine ning kütmine	38
2.9.3	Eelküttekalorifeeriga jäätumise vältimine	38
3.	Tulemused ja analüüs	40
3.1	Kliimakambri testide tulemused	40
3.2	Akadeemia tee 5a SV-10 süsteemi soojustagasti	41
3.3	Soojustagastuse temperatuuri suhtarv	43
3.4	2018. aasta simuleerimise tulemused	45
3.5	Eelküttekalorifeeriga jäätumise vältimine ja kütmine	46
3.6	Eel- ja järelküte sissepuhke temperatuuri järgi	48
3.7	Eel- ja järelküte väljaviske temperatuuri järgi	49
3.8	Möödaviiguga jää sulatamine	51
3.9	Meetodite võrdlus	52
3.10	Ettepanekud jäätumiskaitse projekteerimiseks	54
	Kokkuvõte	57
	Summary	59
	Kasutatud kirjandus	61

SISSEJUHATUS

Uued ning põhjalikult renoveeritavad vanad hooned ehitatakse tänapäeval oskuste ja materjalide arenedes aina õhutihedamatena. Hea siseõhu kvaliteedi tagamiseks on vajalik kasutada ventilatsiooni, milles õhu soojendamiseks kuluva energiahulga vähendamiseks on efektiivseks lahenduseks soojustagastus. Soojustagastuse kasutamine ventilatsioonisüsteemides on energia hinna kalliduse tõttu saanud elementaarseks ning selle mitte kasutamine peab olema eraldi tehniliselt või majanduslikult põhjendatud. Seetõttu on soojustagastuse lahenduse efektiivsusele ning kasutuskindlusele hakatud pöörama aina rohkem tähelepanu.

Uued soojustagastid arendatakse aina efektiivsematena, mistõttu tuleb külmas kliimas seadme kasutusel arvestada suurema külmumisohuga. Probleemi põhjus seisneb selles, et kui ruumist väljatõmmatav õhk jahtub soojustagastis madalamale temperatuurile kui on viimase kastepunkti temperatuur, hakkab õhust soojustagastisse vesi kondenseeruma. Kui tagasti pinna temperatuur on alla 0°C, hakkab kondensaat külmuma. Soojustagasti külmudes väheneb selle soojust üle kandev efektiivne pind, suureneb rõhulang soojustagastis ning kui jää tekke vastu meetmeid ei rakendata või seadet ei seisata, blokeerib jää viimaks soojustagasti täielikult ning võib seda püsivalt kahjustada. Seetõttu tuleb külma kliimaga regioonides soojustagastite külmumise vastu kasutada selleks sobilikke meetmeid.

Käesolevas magistritöös uuritakse erinevate plaatsoojustagastite külmumiskaitsete efektiivsust. Uuritakse täpsemalt meetodeid, kus välditakse täielikult jää teket – õhu eelsoojendamist enne tagastisse suunamist. Ühe meetodi korral tagatakse sissepuhkeõhu temperatuur välisõhu piisava temperatuurini eelsoojendamisel enne tagastisse juhtimist. Kaks meetodit tagavad sissepuhkeõhu temperatuuri järelküttekalorifeeris kuid erinevad üksteisest juhtimissüsteemi poolest. Lisaks uuritakse meetodit, kus jääl lastakse koguneda ja seda sulatatakse perioodiliselt sooja väljatõmbe õhuga. Samaaegselt juhitakse sissepuhkeõhk soojustagastist möödaviiku kasutades mööda. Töös analüüsitakse temperatuuri suhtarvu seaduspärasid tava ja külmumise perioodil ning uuritakse kui palju erinevad tavaline plaatsoojustagasti ja tagasti, läbi mille pinna toimub ka niiskuse ülekanne, külmumise olukorras. Antakse hinnang kõige energiaefektiivsemate vastuvoolu plaatsoojustagastite sulatamise ja jäätumise vältimise lahendustele.

Töös kasutatakse Akadeemia tee 5a liginullenergiahoone SV-10 süsteemi teenindava tsentraalse vastuvoolu plaatsoojustagasti ning Tallinna Tehnikaülikooli kliimakambris

teostatud mõõtmiste andmeid. Akadeemia tee andmete analüüsi tulemusel koostatakse simulatsioonitarkvaras IDA ICE soojustagasti külmumise mudel, mille alusel simuleeritakse Eesti energiaarvutuste baasaasta vältel läbi eelmainitud külmumise kaitse lahendused. Saadud tulemused võimaldavad hinnata ning võrrelda lahenduste efektiivsust. Kliimakambris läbi viidud testide alusel hinnatakse tavalise ja niiskust läbi pinna laskva soojustagasti toimivuse erinevust.

1. TEOORIA

1.1 Soojustagastus

Energia kokkuhoiuks on võimalik kanda soojus üle kõrgema temperatuuriga õhult madalama temperatuuriga õhule. Talvisel perioodil saab sooja väljaviskeõhu energiat kasutada sissepuhkeõhu eelsoojendamiseks ning kuumal ajal, kui väljaviskeõhu temperatuur on madalam välisõhu omast, saab sissepuhkeõhku väljatõmbeõhuga jahutada. Sellist süsteemi nimetatakse soojustagastiks. [1]

Soojustagastid jagunevad regeneratiivseteks ja rekuperatiivseteks. Regeneratiivsetes soojustagastites akumulereeritakse energia tsükliliselt ning lühikeste ajavahemike tagant muutub soojuslevi suund. Regeneratiivsed soojustagastid on valdavalt rootorsoojustagastid. Rekuperatiivsetes seadmetes muutub soojuslevi suund vaid suvisele jahutusrežiimile üleminekul. [1]

1.1.1 Plaatsoojustagasti

Levinuim rekuperaator-tüüpi soojustagasti on plaatsoojustagasti, milles kantakse soojus läbi sissepuhke- ja väljatõmbeõhku eraldavate alumiiniumist, plastikust, plekist või sünteetilistest kiududest moodustatud paralleelselt asetsevatest plaatidest. Plaatsoojustagastitel ei ole liikuvaid osasid ning on seetõttu kasutuskindlamad ja pikema elueaga kui alternatiivsed soojusvahetid. Kuna õhuvoolud omavahel kokku ei puutu, ei ole ka lõhnade ega aineosakeste ülekannet saastunud õhust värskesse sissepuhke õhku. [2] Kõrgeima temperatuuri suhtarvuga vastuvoolu rekuperatiivsed soojustagastid on vastuvoolu plaatsoojustagastid [3].

Soojustagastid, läbi mille pinna saab õhuvoolude vahel toimuda ka niiskuse ülekanne, nimetatakse membraan- ehk entalpiatüüpi soojustagastiteks ning ka energiatagastiteks. Plaatenergiatagasti pind on valmistatud töödeldud paberist või membraanist, milles saab ühelt õhuvoolult teisele kanduda üle nii soojus kui niiskus. Seega kantakse läbi tagasti pinna lisaks ilmsele soojusele ka suur osa varjatud soojusest, mistõttu suudab seade aasta lõikes tagada kõrgema energiatagastuse suhte kogu õhu soojendamiseks kuluva energia suhtes. Kuna antud tüüpi soojustagastid võimaldavad külma kliimaga paikades optimaalsemat siseruumi suhtelist niiskust hoida

ning on madalama külmumisriskiga, soovitatakse just membraanse pinnaga soojustagasteid kasutada. Lihtsama ehituse ja madalama maksumuse tõttu kasutatakse aga tavalisi soojustagasteid entalpiatüüpi tagastitest rohkem. [4]

1.1.2 Temperatuuri suhtarv

Soojustagasti temperatuuri suhtarv näitab seadme soojuslikku efektiivsust. Soojustagasteid testides on kohustuslik määrata ja dokumenteerida suhtarv sissepuhkeõhu järgi. Suhtarvu määramist ja dokumenteerimist väljaviske poole järgi ei ole nõutud. [5]

Temperatuuri suhtarvud sissepuhke ja väljatõmbe järgi arvatuna on tavaolukorras võrdsed või ligilähedased. Kui tagastis esineb kondenseerumist, jäätumist või niiskuse kandumist ühelt õhuvoolult teisele, siis suhtarvud võrdsed ei ole. Alates 2018. aastast on Euroopa Liidus seatud nõue, kus müüdavad plaatsoojustagastid peavad olema sissepuhke järgi arvatud temperatuuri suhtarvuga minimaalselt 73% [6]. Järgnevalt on toodud valemid temperatuuri suhtarvu arvutamiseks sissepuhke ja väljaviske temperatuuri alusel. [4]

$$\eta_{t,sp} = \frac{(t_{sp} - t_{v0})}{(t_{vt} - t_{v0})} \quad (1.1)$$

$$\eta_{t,vv} = \frac{(t_{vt} - t_{vv})}{(t_{vt} - t_{v0})} \quad (1.2)$$

kus $\eta_{t,sp}$ – temperatuuri suhtarv sissepuhke järgi, -
 $\eta_{t,vv}$ – temperatuuri suhtarv väljaviske järgi, -
 t_{sp} – sissepuhkeõhu temperatuur peale tagastit, °C
 t_{v0} – välisõhu temperatuur, °C
 t_{vt} – väljatõmbeõhu temperatuur, °C
 t_{vv} – väljaviskeõhu temperatuur, °C

1.2 Õhu ja niiskuse seosed

Mõõtmisel saadud suhtelise niiskuse ja õhu temperatuuri alusel on võimalik leida kõik selle õhu parameetrid. Selleks, et leida õhu niiskussisaldus ja kastepunkti temperatuur, tuleb kõigepealt arvutada veeauru küllastusrõhk. See leitakse alloleva valemiga 1.3. [7]

$$p_{sat} = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot t}{237,3+t}}, Pa, kui t \geq 0^\circ C \quad (1.3)$$

$$p_{sat} = 610,5 \cdot e^{\frac{21,875 \cdot t}{265,5+t}}, Pa, kui t < 0^\circ C$$

kus p_{sat} – veeauru küllastusrõhk, Pa
 t – õhu temperatuur, °C

Veeauru osarõhku kasutatakse niiskussisalduse leidmiseks. See arvutatakse läbi suhtelise niiskuse. Suhteline niiskus näitab veeauru osarõhu suhet veeauru küllastusrõhku. Parameeter leitakse kasutades allolevat valemit 1.4. [7]

$$RH = \frac{p_a}{p_{ak}} \cdot 100\% \quad (1.4)$$

kus RH – õhu suhteline niiskus, %
 p_a – veeauru osarõhk niiskes õhus, Pa
 p_{ak} – veeauru osarõhk veeauruga küllastunud niiskes õhus, Pa

Õhu niiskussisaldus leitakse valemiga: [7]

$$x = 622 \cdot \frac{p_a}{p_{\text{õhur}} - p_a} \quad (1.5)$$

kus x – õhu niiskussisaldus, g/kg_õ
 p_a – veeauru osarõhk niiskes õhus, Pa
 $p_{\text{õhur}}$ – õhurõhk, Pa

Temperatuuri, mille juures õhus olev veeaur küllastub ja kondenseerub veeks või jääks, nimetatakse kastepunkti temperatuuriks. See leitakse valemiga 1.6. [8]

$$t_{sat} = \frac{237,3 \cdot \ln\left(\frac{p}{610,5}\right)}{17,269 - \ln\left(\frac{p}{610,5}\right)}, ^\circ C, kui p \geq 610,5 Pa \quad (1.6)$$

$$t_{sat} = \frac{265,5 \cdot \ln\left(\frac{p_a}{610,5}\right)}{21,875 - \ln\left(\frac{p_a}{610,5}\right)}, \text{ } ^\circ\text{C, kui } p < 610,5 \text{ Pa}$$

kus t_{sat} - kastepunkti temperatuur, $^\circ\text{C}$
 p_a - veeauru osarõhk niiskes õhus, Pa

Võimsuse õhuvooluhulga soojendamiseks õhu niiskussisalduse muutumiseta saab arvutada valemiga 1.7. Kui õhuvoolu soojendamisel niiskussisaldus muutub, pole eelnev valem enam täpne, sest niiske õhu tihedus ja erisoojus muutuvad märkimisväärselt rohkem kui kuiva õhu samad parameetrid. Seetõttu arvutatakse niiske õhu soojendamiseks vajalik võimsus valemiga 1.8. [7]

$$\Phi = L \cdot \rho_{K\ddot{O}} \cdot c_{k\ddot{O}} \cdot \Delta t \quad (1.7)$$

$$\Phi = L \cdot \rho_{K\ddot{O}} \cdot \Delta h \quad (1.8)$$

kus Φ - soojendamiseks vajalik võimsus, kW
 L - õhu vooluhulk, m^3/s
 $\rho_{K\ddot{O}}$ - kuiva õhu tihedus, kg/m^3
 $c_{k\ddot{O}}$ - kuiva õhu erisoojus, $\text{kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$
 Δt - alg- ja lõpptemperatuuride vahe, $^\circ\text{C}$
 Δh - alg- ja lõppentalpia vahe, kJ/kg

Entalpia ehk soojussisalduse arvutamiseks kasutatakse allolevat valemit. [7]

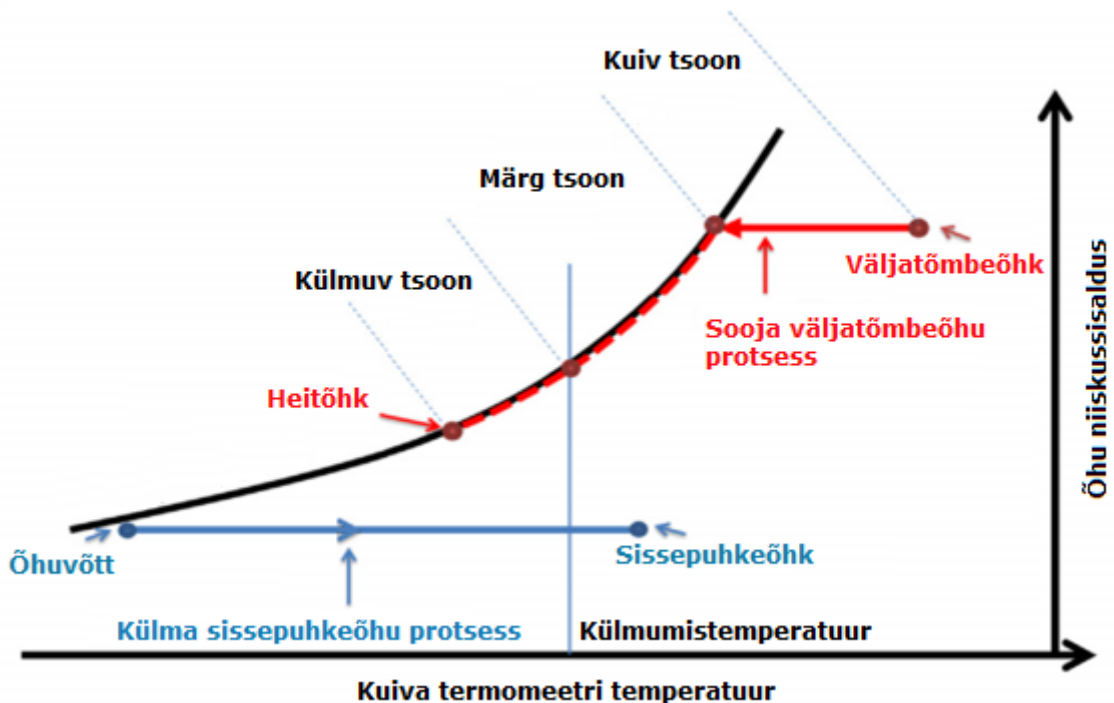
$$h = 1.006 \cdot t + \frac{(2501 + 1.805 \cdot t) \cdot x}{1000} \quad (1.9)$$

kus h - entalpia, kJ/kg
 t - temperatuur, $^\circ\text{C}$
 x - õhu niiskussisaldus, $\text{kg}/\text{kg}_{k\ddot{O}}$

1.3 Soojustagasti külmumine

Soojus väljatõmbeõhult kantakse talvises tingimuses üle külmale väljast võetavale õhule. Kui sooja ja niiske väljavisatava õhu temperatuur langeb jahtudes alla

väljatõmbeõhu kastepunkti temperatuuri, kondenseerub õhus sisalduv vesi soojustagastisse. Kui soojustagasti pinnatemperatuur on alla külmumispiiri, hakkab kondensaat tagastisse külmuma. [9] [3] Külmumisprotsessi kirjeldus on graafiliselt toodud alloleval joonisel (vt Joonis 1.1).



Joonis 1.1. Sissepuhke- ja väljatõmbeõhu protsessikiired soojustagastis [4]

Soojustagastites, kus toimub lisaks ilmsele soojusele ka varjatud soojuse ülekanne, näiteks rootorsoojustagastites ning membraan-plaatsoojustagastites, toimub protsess teisiti. Väljaviskeõhu temperatuuri langedes langeb ka niiskussisaldus. Niiskus väljatõmbeõhult kantakse osaliselt läbi soojustagasti sissepuhkeõhule. Seetõttu võib jäätumine alata alles mitu kraadi madalamal kui 0°C. Niiskuse ülekande tõttu langeb kastepunkti temperatuur ning jäätumine ei saa alata enne, kui soojustagasti pinnatemperatuur on langenud kastepunkti temperatuurist madalamale. [4]

Soojustagasti külmumine vähendab selle efektiivset pinda, mille otsesel tagajärjel väheneb soojusülekanne kahe õhuvoolu vahel ning langeb tagasti temperatuuri suhtarv. Lisaks põhjustab ristlõike pinna vähenemine jää tekke tagajärjel täiendavat rõhulangu soojustagastis, mis omakorda suurendab väljatõmbeventilaatori volutarbimist. Kui ventilaatorile tarnitav elektriline võimsus jääb konstantseks, väheneb õhuvooluhulk, mis väljatõmbe poolt läbib ning see viib sissetõmbe ja väljapuhke õhuvoolud üksteise suhtes tasakaalust välja. [9] Kui jää tekke vastu meetmeid ei rakendata, blokeerib see lõpuks soojustagasti ning võib seda püsivalt kahjustada [3].

Tänapäeva vastuvoolu soojustagastid on arendatud niivõrd efektiivseks, et nende temperatuuri suhtarv läheneb 0,9-le. Kõrge temperatuuri suhtarvuga seadmetes langetatakse külma välistemperatuuri korral väljaviskeõhu kui ka plaadi pinna temperatuur alla külmumispiiri. Kuna seetõttu esineb kondenseerumist ja jää teket, on probleem soojustagastite efektiivsuse tõustes aina aktuaalsem. [3]

1.3.1 Külmumise vastased meetmed

Plaatsoojustagasti külmumisest lähtuvate probleemide vältimiseks on erinevaid võimalusi. Järgnevalt on toodud põhilised meetodid külmumise vältimiseks või jää sulatamiseks:

- Välisõhu eelsoojendamisel eelküttekalorifeeris soojeneb õhk piisava temperatuurini, kus see soojustagasti pinna temperatuuri väljaviske kõige külmemas punktis alla 0°C langetada ei saa. Antud meetod on keeruline, sest vajab energia liigse kulutamise vältimiseks temperatuuride täpset mõõtmist ning seadistamist. [10]
- Perioodiliselt möödaviiguga külma õhuvoolu soojustagastist mööda juhtimisel sulatatakse sooja väljatõmbeõhuga soojustagastis olev külmunud kondensaat. Sel perioodil tuleb välistemperatuuril olev soojustagastist mööda juhitud sissepuhkeõhk järelsoojenduskalorifeeris sobivale temperatuurile soojendada. [11]
- Osalise välisõhu soojustagastist möödajuhtimine. Vähendades soojustagastit läbiva külma õhuvoolu hulka, ei jahuta see väljatõmbe õhku temperatuurini, mil kondensaat saaks külmuda. Sellises olukorras juhitakse väga madalate välistemperatuuride juures suur osa õhust soojustagastist mööda ning sellega langeb soojustagasti temperatuuri suhtarv märkimisväärselt. [10]
- Sektsioonsulatuse korral on soojustagasti jagatud kaheks või rohkemaks sektsiooniks. Valitud seadeväärtusest madalamal lävendil kasutatakse üht sektsiooni pidevalt soojustagastuseks ning üht sektsiooni, et sooja väljatõmbeõhuga tekkinud jääd sulatada. Teatud ajaperioodi tagant vahetatakse sektsioonide töö. [13]

Külmades oludes soojusvaheti toimimise garanteerimiseks on veel mitmeid teisi lahendusi. Näiteks on testitud väljatõmbeõhu soojendamist enne soojustagastisse suunamist, mis on osutunud ebamõistlikuks suure energiakulu tõttu. Katsetatud on välisõhu retsirkuleerimist kuni see saavutab soovitud seadeväärtuse. Meetod ei toimi kuigi hästi madalate välisõhu temperatuuride juures. [12]

1.4 Varasemalt tehtud uuringud

Soojustagastite jäätmise probleem on energia seisukohast muutumas aina aktuaalsemaks ning seetõttu on varasemalt plaatsoojustagasti toimimist külmades kliimas uuritud. Kuna soojustagastid arenevad aina efektiivsemaks, siis tekib paratamatult külmadel temperatuuridel jäätmisoht, mille lahendamisele võib erinevat moodi läheneda. Lisaks on hakatud ära kasutama kondenseerumisel vabanevat varjatud soojust, mis tõstab temperatuuri suhtarvu, kuid tõstab madalatel välisõhu temperatuuridel jäätmisriski [2].

A. Pacak, A. Jedlikowski, M. Karpuk, S. Anisimov analüüsisid soojuse ülekannet vastuvoolu plaatsoojustagastis alla 0°C välisõhu tingimustes. Lisaks uurisid nad varjatud soojuse mõju soojustagastuse efektiivsusele, mis avaldub väljatõmbeõhust vee välja kondenseerumisel. Vaadeldi kolme tsooni teket soojustagastis – kuiv, märg ja külmunud. Võrreldi kahte jäätmise vastast abinõu – välisõhu eelsoojendamist ja välisõhu osalist soojustagastist mööda juhtimist. Uuringus avaldus, et kuiva, märja ja külmunud tsooni teke sõltub väljatõmbeõhu temperatuurist ja niiskusest. Õhuniiskuse tõusmisega suureneb madala välistemperatuuri korral ka külmunud tsooni osakaal, mis on suurim kui väljatõmbeõhu kastepunkti temperatuur on 0°C. [14]

Tulemusena leiti, et välisõhu eelsoojendamisel saavutatakse kõrgem keskmine temperatuuri suhtarv kui konstantselt möödaviiku kasutades, mille korral saaks -20°C välisõhu temperatuuri juures soojustagastisse selle külmumata suunata suurusjärgus vaid 10% õhuvoolust. [14] Niisiis on konstantselt möödaviigu kasutamine külmumise vältimiseks liigselt energiakulukas ning otstarbekas oleks kasutada möödaviiku vaid soojustagasti sulatamiseks.

J. Kragh uuris kahe sektsiooniga soojustagasti toimist -7°C juures. Aktiveeritud sulatussüsteemi korral juhiti 10% väljatõmbeõhust läbi külmunud soojustagasti osa

ning ülejäänud 90% õhuvoolu kasutati sissepuhkeõhu soojendamiseks. Fikseeritud perioodi järel vahetati sektsioonide sulatatav sektsioon töösektsiooni vastu ja vastupidi. Tulemusena saavutati keskmine temperatuuri suhtarv 82%. Leiti, et süsteemi optimeerimiseks tuleks sektsioonide vahetamise aega reguleerida vastavalt mõõdetud temperatuuridele. Lisaks saaks optimeerida sulatusrežiimi õhuvoolude jagunemise suhet. [13]

1.5 Külumiskaitse lahendused Eesti turul

1.5.1 Fläktwoods'i lahendus

Fläktwoods on vastuvoolu plaatsoojustagastitele mõeldud kaitselahendused jaganud kolmeks tasemeks.

- Tase 1 – Mõödavooluklapiga sulatus
Mõeldud sooja talvekliimasse, kus temperatuur ei lange alla -5°C ning pole otstarbekas keerulisemaid süsteeme kasutada. Mõödaviiku kasutatatakse soojustagastuse juhtimiseks suvekuudel ning soojustagasti sulatamiseks talvekuudel.
- Tase 2 – Sektsioonsulatus kombineeritud mõödaviiguga
Sobib külma kliimasse, kus temperatuur ei lange alla $-22^{\circ}\text{C}/-26^{\circ}\text{C}$, sõltuvalt soojusvaheti tüübist. Süsteemi juhitakse väljaviskepoole kastepunkti ja temperatuuri järgi. Soojustagasti on jagatud sektsioonideks, millest sulatatakse korraga üht, ekstreemjuhul kaht. Kuna vaid üht sektsiooni sulatatakse tavatingimustel korraga, ei vähene sissepuhke vooluhulk märkimisväärselt, 5-10%. Kõrge väljatõmbeõhu suhtelise niiskuse ja väga madalate välistemperatuuride korral vähendatakse sissepuhke vooluhulka aga rohkem. Kui ainuüksi sektsioonsulatuses ei piisa, kasutatakse mõödavoolurežiimi.
- Tase 3 – Sektsioonsulatus kombineeritud mõödaviiguga + eelsoojendi.
Tegemist on sama meetodiga mis tase 2, lisatud on elektriline eelsoojendi. Sobib väga külma kliimasse, kus temperatuurid langevad alla -22°C , lisaks kõrge väljatõmbeõhu niiskuse korral, mil jää kogunemise vähendamiseks on

otstarbekas välisõhku valitud seadeväärtuseni eelsoojendada. Normaalolukorras soojendatakse õhk temperatuurini, millel sektsioonsulatuslega saab tagada soojustagasti sulatuse. [15]

1.5.2 Swegoni, Komfoventi lahendus

Swegon kui ka Komfovent kasutavad vastuvoolu soojustagastite jäätumise vastaseks kaitseks möödaviigu süsteemi ning sektsioonsulatus. Selleks on soojustagasti jagatud kolmeks sektsiooniks, lisaks on üks möödaviigu osa. Sektsioonsulatus rakendatakse kui rõhulang on tõusnud seadeväärtusest kõrgemaks ning väljatõmbeõhu suhteline niiskus ja välisõhu temperatuur vihvavad jää tekkele seadmes. Kui külma välisõhu temperatuuri ning kõrge väljatõmbeõhu niiskuse korral seade sektsioonsulatuslega end jääst vabastada ei jõua, avatakse möödaviiguklapp ning osa välisõhust juhitakse soojustagastist sulatamise perioodiks mööda. [16] [17] [18]

1.5.3 Systemairi lahendus

Systemair kasutab soojustagasti jäätumiskaitsena möödaviiguga sulatust, mida juhitakse välistemperatuuri ja tagasti rõhulangu järgi. Ajal, mil soe väljatõmbeõhk sulatab tagastit, siseneb sissepuhkeõhk ilma soojustagastit läbimata. Külma sissepuhkeõhk soojendatakse järelküttekalorifeeris. [19]

1.5.4 VTS, WOLFi lahendused

Tootjad VTS ja Wolf kasutavad külmumise probleemi vastu analoogseid lahendusi. Reeglina komplekteeritakse ventilatsiooniseade külma kliima jaoks möödaviigusüsteemiga, mis võimaldab rakendada külmumisvastaseid režiime ning juhtida soojustagastuse ulatust. [20] [21]

Mõlemad tootjad soovivad külma kliimasse paigaldada eelsoojendi. Lisaks on valikus retsirkulatsiooni mooduli lisamine, millega juhitakse osa sissepuhkeõhust õhuvõtu sektsiooni. Sellega soojendatakse välisõhku temperatuurini, kus soojustagastis ei saa väljatõmbeõhk alla külmumispiiri langeda. [20] [22] [21]

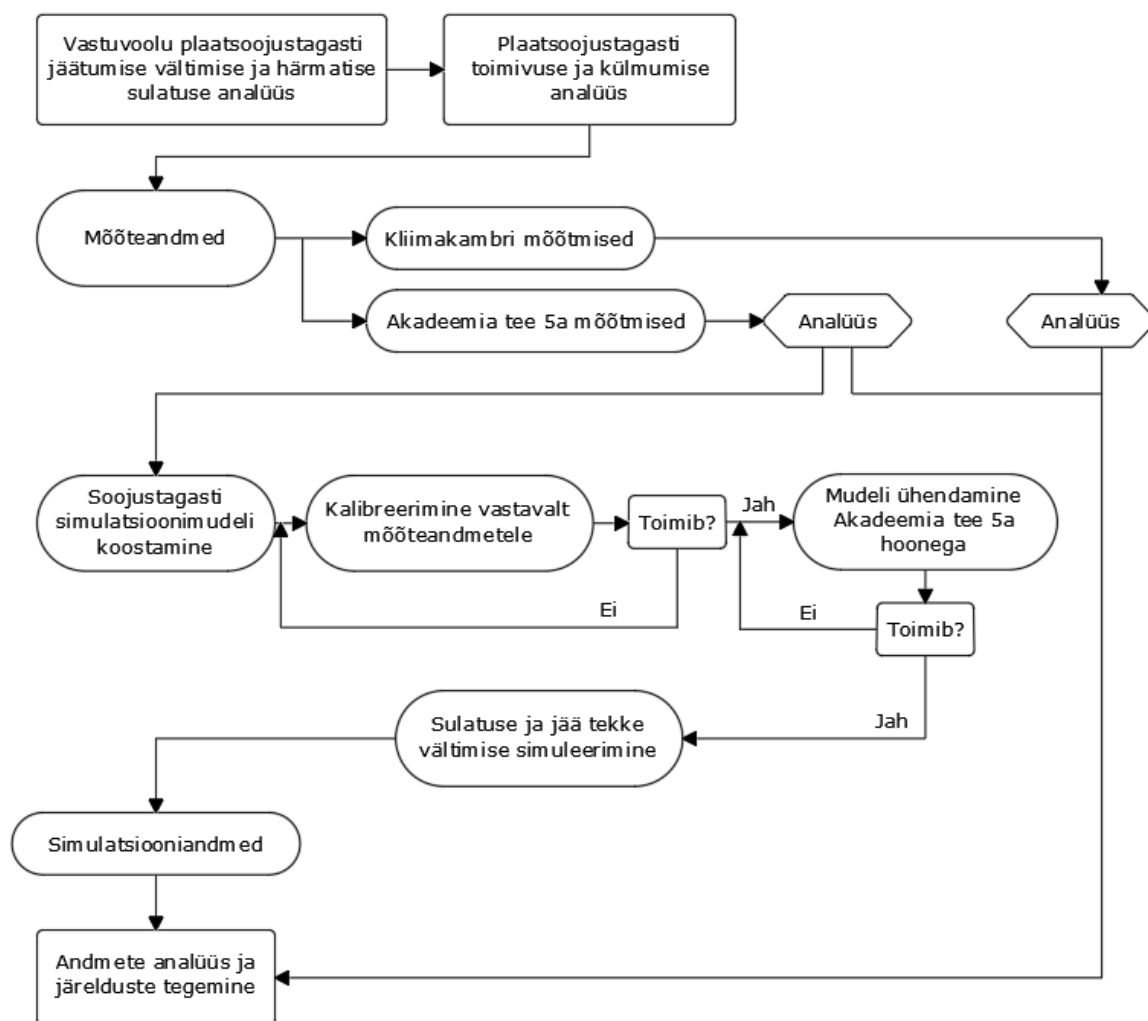
1.5.5 Menerga lahendus

Nagu paljud teised tootjad, kasutab ka Menerga möödaviiguga sulatusrežiimi. Erinevalt teistest tootjatest ei toimi Menerga soojustagastid lihtsalt seadeväärtuste järgi vaid jälgitakse kahe soojustagastis paikneva sensoriga tagasti pinnatemperatuuri. Selleks, et seade sulatusrežiimi lülituks, peab see kõigepealt töötama vähemalt 30 minutit. Sulatusrežiimi käivitamiseks peab vähemalt ühe sensori temperatuur olema madalam kui 0°C. Lisaks peab väljatõmbeõhu kastepunkti väärtus olema kõrgem kui madalaim soojustagasti pinnalt mõõdetud temperatuur. Sulatusrežiimi käivitamiseks peab tingimus täidetud olema 30 minutit. [23]

Sulatusrežiimi käivitumisel avaneb möödaviiguklapp ning suletakse soojustagasti ees olev klapp. Sooja väljatõmbeõhuga sulatatakse tagastit kuni mõlemad rekuperaatoris asuvad temperatuuriandurid on saavutanud temperatuuri $>1^{\circ}\text{C}$. [23]

2. MEETODID

Töös kasutatud meetodid on kirjeldatud järgneval protsessijoonisel. Vastuvoolu plaatsoojustagasti jäätumise vältimise ja härmatise sulatuse analüüsimiseks uuriti soojustagastuse toimivust ja külmumist mõõteandmete põhjal. Kliimakambri mõõtmistele tuginedes analüüsiti erinevat tüüpi soojustagastite toimimist. Akadeemia tee 5a mõõtmisandmeteid kasutati lisaks otsesele analüüsile simulatsioonimudeli koostamisel. Teostatud simulatsioonide tulemuste põhjal analüüsiti erinevate külmumise kaitse lahenduste toimimist.



Joonis 2.1. Kasutatud metoodika protsessijoonis

2.1 Ülevaade probleemist ja lahendused

Töö eesmärgiks on analüüsida kõrge temperatuuri suhtarvuga vastuvoolu plaatsoojustagasti külmumise vältimise ja sulatamise lahenduste energiaefektiivsust. Uurimine tõusis päevakorda Akadeemia tee 5a liginullenergia ühiselamu tsentraalse soojustagasti külmumisperioodil toimuva sulatusrežiimi suure energiakulu tõttu.

Töös analüüsitakse Akadeemia tee 5a ühiselamu soojustagasti külmumisandmeid ning leitud seoste põhjal koostatakse IDA ICE modelleerimistarkvaras soojustagasti mudel külmumiste simuleerimiseks. Soojustagasti kalibreeritakse Akadeemia tee 5a andmetele tuginedes. Lisaks analüüsitakse kliimakambri mõõtmistel saadud andmeid ning tuuakse välja leitud seaduspärasusi, mis aitaks leida efektiivsemaid külmumise vastaseid lahendusi.

Modelleerimistarkvaras katsetatakse läbi erinevaid külmumisvastaseid meetmeid ning proovitakse erinevate parameetrite järgi soojustagasti juhtimist, et külmumist minimeerida. Pärast seda leitakse ning analüüsitakse nende meetodite energiakulu ning kasutamise positiivseid ja negatiivseid külgi.

Lisaks uuritakse sissepuhke ja väljaviske järgi arvatud temperatuuri suhtarvude erinevust. Akadeemia tee 5a ühiselamus mõõdetud andmetest selguvalt võib perioodilise külmumise taustal toimuda varjatud soojuse ülekanne. Protsess mõjutab temperatuuri suhtarvu ning vähendab vajaminevat õhu lisasoojendamiseks kuluvat energiat. Töös analüüsitakse kui palju energiat varjatud soojuse ülekanne aitab kokku hoida.

2.2 Kliimakambri mõõtmisetulemuste analüüs

Tallinna Tehnikaülikooli kliimakambris katsetati erinevaid plaatsoojustagasteid. Kliimakambri testid viidi läbi erinevate väliskliima tingimuste ja väljatõmbeõhu suhteliste niiskuste juures. Käesolevas töös kasutati andmeid seoste leidmisel, mille arvesse võtmine võiks potentsiaalselt vähendada külmumisest tingitud mõju soojustagastile ja energiatarbele.

Töös testiti mitut erinevat soojustagastit, sealhulgas membraanpinnaga seadet. Membraan ehk entalpia plaatsoojustagasti toimimist testiti erinevates tingimustes, kuid selle toimimise võrdluseks tavaseadmega sobis vaid üks katse, mis teostati välisõhu temperatuuril -15°C ja väljatõmbeõhu suhtelisel niiskusel 40%. Põhjuseks oli analoogsetel tingimustel tavaseadme uurimisandmete puudumine. Töös võrreldi kahe erineva soojustagasti külmumise aega ning suhtarvu muutust jää kogunedes. Lisaks vaadeldi rõhulangu muutuse mõju väljatõmbeõhu vooluhulgale.

2.3 Uuritud soojustagasti

Suurem osa käesoleva töö andmetest saadi Akadeemia tee 5a SV-10 süsteemi teenindava vastuvoolu plaatsoojustagasti Systemair DVCompact 20 mõõtmisest. Antud ventilatsioonisüsteemiga tagatakse õhuvahetus poolele hoone eluruumidest ehk ühe trepikoja 40-le korterile. [24]

Seade on projekteeritud külmal perioodil välisõhu temperatuurile -21°C ja sissepuhke õhule 20°C . Soojustagastuse temperatuuri suhtarv on 80,5%. Soojustagasti on varustatud 34,6 kW järelküttekalorifeeriga, mis on projekteeritud arvestades, et see oleks piisav soojendamaks -2°C õhk $+20^{\circ}\text{C}$ kraadini. [25]

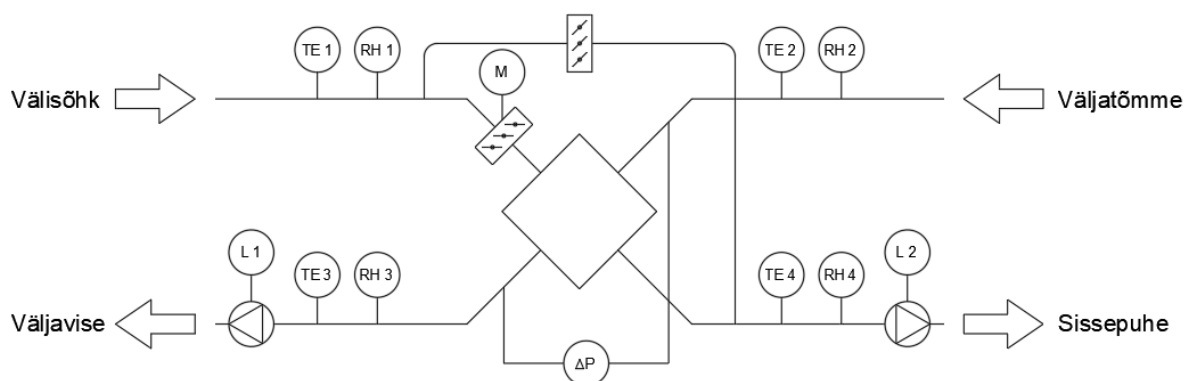
Seadme täieliku külmumise vältimiseks talveperioodil kasutatakse sulatusrežiimi [25]. Kui soojustagasti väljatõmbepoolel suureneb rõhulangu teatud väärtuseni, siis sulatusrežiim käivitatakse. Õhuvõtu poolel avatakse möödaviiguklapp, mille kaudu suunatakse suurem osa sissepuhkeks suunatavast välisõhust soojustagastist mööda. Külma õhku soojendatakse sobivale sissepuhketemperatuurile järelküttekalorifeeris. Soojustagasti sulatamiseks kasutatakse sooja väljatõmbeõhku, mis sissepuhke õhku soojendama ei pea ning annab seega oma energia jää sulatamiseks. Kui välisõhu temperatuur on madalam kui järelküttekalorifeeri võimsus soojendada suudab, vähendatakse või peatatakse sissepuhke täielikult.

2.4 Akadeemia tee 5a mõõtmised

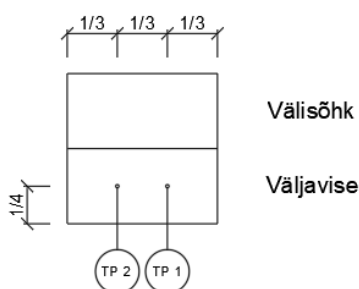
Analüüsimiseks sobivad andmeid koguti füüsilise mõõtmise teel ning hoone haldussüsteemist alla laadides. Mõõtmised teostati 2018. ja 2020. aasta veebruaris. Madalamad välistemperatuurid (püsivalt alla -5°C) olid 2018. aasta veebruaris ning seetõttu on valdav osa käesoleva töö analüüsist teostatud selle aasta mõõteandmete põhjal.

2018. aasta veebruaris koguti soojustagastit läbivate õhuvoolude temperatuurid ja suhtelise niiskuse väärtused. Teised edasiseks tööks tarvilikud andmed saadi ühiselamu halduskeskkonnast alla laadides. Lisaks kontrolliti keskkonna ja mõõdetud õhutemperatuuride väärtuste kokkulangevust. 2020. aastal mõõdeti lisaks õhutemperatuuridele ja suhteliste niikustele soojustagasti väljaviskepoole rõhulangu ning tagasti pinna temperatuuri. Selleks paigaldati kaks termomeetrit (vt Joonis 2.3) toodud asukohtadesse soojustagastisse väljaviske poolele umbes 5 cm sügavusele.

Paigaldatud andurite mõõtepunktide asukohad on näidatud järgnevatel joonistel (vt Joonis 2.2, Joonis 2.3) ning toodud tabelis (vt Tabel 2.1).



Joonis 2.2. Soojustagasti mõõtepunktide skeem



Joonis 2.3. Vaade soojustagastile välisõhu/väljaviske poolelt

Tabel 2.1. Soojustagasti mõõtepunktide loetelu

Tähis	Parameeter	Selgitus
TE1	Temperatuur	Välisõhu temperatuur
TE2	Temperatuur	Väljatõmbeõhu temperatuur
TE3	Temperatuur	Väljaviskeõhu temperatuur
TE4	Temperatuur	Sissepuhkeõhu temperatuur pärast soojustagastit
RH1	Suhteline niiskus	Välisõhu suhteline niiskus
RH2	Suhteline niiskus	Väljatõmbeõhu suhteline niiskus
RH3	Suhteline niiskus	Väljaviskeõhu suhteline niiskus
RH4	Suhteline niiskus	Sissepuhkeõhu suhteline niiskus
L1	Vooluhulk	Väljatõmbeõhu vooluhulk*
L2	Vooluhulk	Sissepuhkeõhu vooluhulk*
M	Klapi avatus	Möödaviiguklapi staatus*
ΔP	Rõhulang	Rõhulang soojustagastis*,**
TP1	Temperatuur	Soojustagasti pinna temperatuur**
TP2	Temperatuur	Soojustagasti pinna temperatuur**

* parameetrid, mille andmed on saadud hoone haldussüsteemist.

** parameetrid, mida mõõdeti vaid aastal 2020.

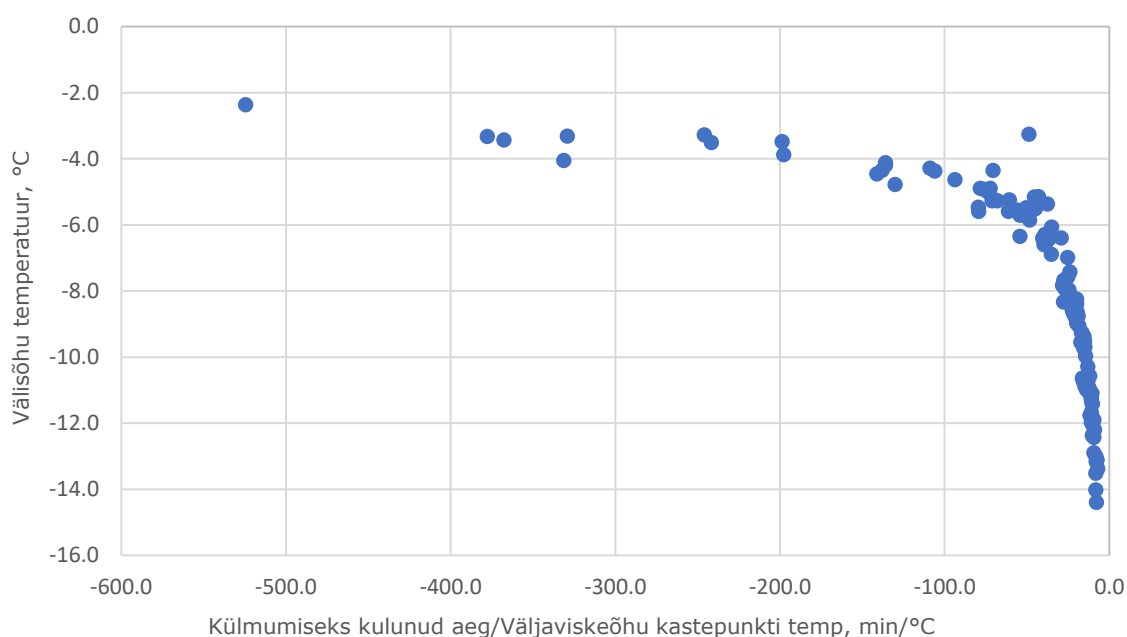
Mõõteseadmetena kasutati HOB0 andureid. Soojustagastit läbiva õhu temperatuuride ja suhtelise niiskuse mõõtmiseks ja andmete salvestamiseks kasutati Hobo UX100-011 seadmeid. Soojustagasti pindade temperatuurid mõõdeti ning salvestati UX120-006M seadmesse. Rõhulang tagastis mõõdeti T-VER-PXU-L anduriga ning salvestati U12-006 andmeloggerisse.

2.5 Külmumise tuvastamise põhimõte

Erinevate külmumisvastaste lahenduste tõhususe testimiseks koostati IDA ICE programmis soojustagasti simulatsioonimudel. Kuna simulatsiooniprogrammi poolt pakutud lähtemudel on sisuliselt lihtne suhtarvudega arvutaja, tuli jäätumine matemaatiliselt sellele juurde lisada ning kirjeldada ka sulatusrežiimi ajal toimuvat.

Jäätumise olukorra parameetrite tuvastamiseks analüüsiti Akadeemia tee 5a ühiselamu andmeid ajavahemikus 12-28. veebruar 2018. Leiti külmumiseks kuluv aeg ning otsiti erinevate sulatusrežiimide vahele jääva aja jooksul temperatuuride ning suhteliste niiskuste vahelisi seoseid. Selgeid seoseid külmumisolukorra paika panemiseks leiti mitmeid, paraku osutusid need täpseks vaid teatud vahemikes.

Täpsuse suurendamiseks tuli leida korrelatsioon võimalikult mitme muutuja vahel ning siduda see edasiseks kasutatavasse vormi. Sobiva tulemuse andis külmumiseks kuluva aja jagatis väljaviske õhu kastepunkti temperatuuriga, mis on seoses tagastisse siseneva välisõhu temperatuuriga. Kuna kõrgeim väljaviskeõhu kastepunkti temperatuur, mille juures külmumine aset leidis, oli üle 0°C, lahutati igalt kastepunkti temperatuuri väärtuselt 2,5. See on vajalik, et aja-temperatuuri jagatised oleks kõik ühemärgilised ning sama külmumise seaduspära saaks rakendada antud soojustagasti raames universaalsemalt. Leitud seos on toodud joonisel (vt Joonis 2.4).



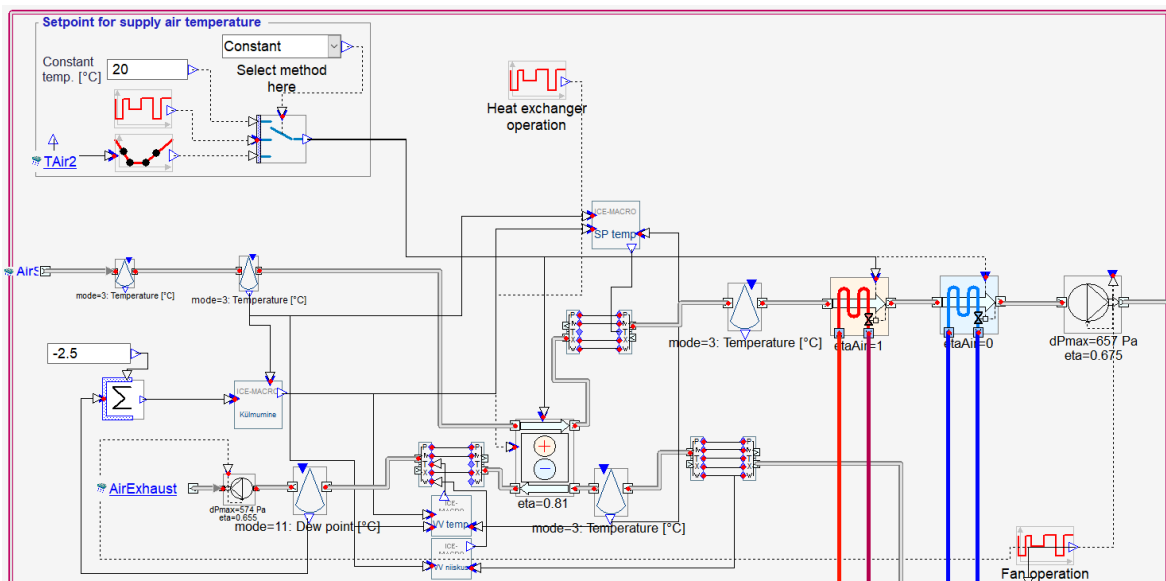
Joonis 2.4. Külmumiseks kuluva aja, väljaviske õhu kastepunkti ja välisõhu temperatuuri vaheline seos

Eelneval joonisel toodud korrelatsioon sisaldab endas väljaviskeõhu ja kasutatava välisõhu temperatuuri, väljaviske suhtelist niiskust ning võimaldab nimetatud parameetreid kasutades soojustagasti tavarežiimil toimides ennustada külmumiseks kuluvat aega.

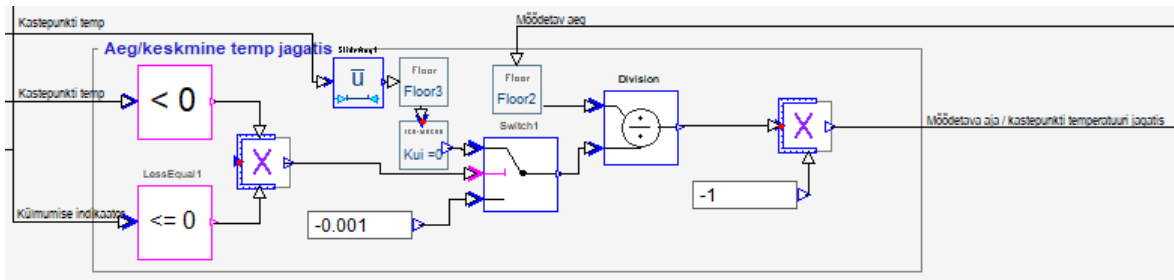
2.6 Soojustagasti modelleerimine

Simulatsiooniprogrammis IDA ICE külmumisvastaste lahenduste testimiseks tuli eelnimetatud külmumise tuvastamise meetod IDA olemasoleva soojustagasti mudeli koosseisu lisada ning sisestada ka sulatamisrežiimi toimimine. Seejärel kalibreeriti mudelit kasutades sisendmuutujatena mõõteandmeid ning siis sai liikuda edasi külmumiskaitsete testimiseni.

Alloleval joonisel (vt Joonis 2.5) on toodud modelleeritud soojustagasti üldskeem. Soojustagastuse juhtimiseks on skeemis kasutusel neli põhilist makrot, mille abil arvutatakse sissepuhke- ja väljaviskeõhu temperatuurid, lisaks väljaviskeõhu niiskussisaldus. Külmumise tuvastuse makro toimib väljaviskeõhu kastepunkti ja välisõhu temperatuuri alusel ning sellest antakse külmumise korral signaal edasi väljaviskele ning sissepuhkele. Täpsemat seadme toimimist kirjeldatakse järgmistes alapeatükkides.

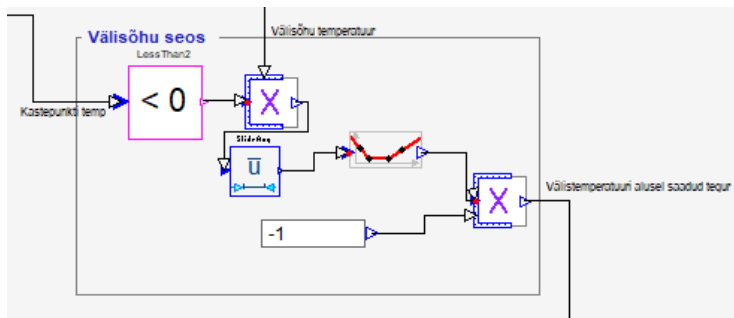


Joonis 2.5. Soojustagasti mudel



Joonis 2.7. Mõõdetava aja ja väljaviske temperatuuri jagatis

Paralleelselt mõõdetakse välisõhu temperatuuri, mille alusel saadakse graafikult suurus, mis on võrdne mõõdetud välisõhu temperatuurile vastava külmumiseks kuluva aja ja väljaviske kastepunkti vahelise jagatisega. Graafik on koostatud vastavalt mõõtmisandmetest koostatud seosele (vt Joonis 2.4).



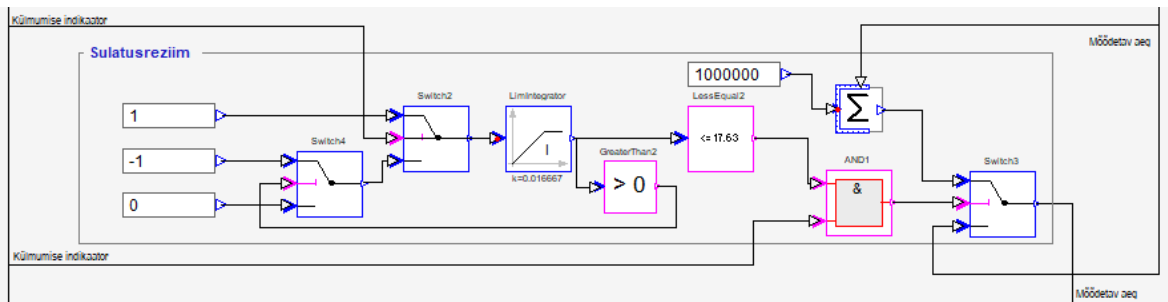
Joonis 2.8. Välisõhu temperatuurile vastav tegur

Seejärel võrreldakse välistemperatuuri alusel saadud tegurit (vt Joonis 2.8) ning mõõdetava aja ja kastepunkti temperatuuri jagatist (vt Joonis 2.7). Kui jagatise väärtus on võrdluses välisõhu graafikult saadud väärtusest suurem, on jäätumiseks vajalikud tingimused täidetud ning soojustagasti lülitub ümber sulatusrežiimile. Võrdlus ning aja mõõtmine toimuvad mudelis ühe minuti kaupa.

2.6.2 Sulatusrežiimi modelleerimine

Kui jäätumiseks vajalikud tingimused on täidetud, antakse külmumise indikaatorile signaal. Nimetatud signaali väärtuse olemasolul hakkab alloleval joonisel (vt Joonis 2.9) olev integraatori blokk summeerima minuteid. Nii kaua kui integraatori väärtus on alla ettenähtud piirmäära ning külmumise indikaator annab signaali, antakse mõõdetava aja väärtuseks edasi järgmisesse blokki mitu suurusjärku tavalisest kõrgem suurus. See on vajalik, et hoida külmumise indikaatori väärtus tõesena ettenähtud aja vältel sõltumata makro teiste osade tegevusest. Kui kõnealuse mooduli integraatori väärtus saavutab

ettenähtud piirmäära, lülitatakse "mõõdetav aeg" uuesti tavaühendusse ilma suurusjärku muutmata. Seeläbi langeb mõõdetava aja ja kastepunkti temperatuuri jagatis (vt Joonis 2.7) nulli ning on välisõhu temperatuuri alusel saadud tegurist väiksem. Seega on sulatusrežiim lõppenud ning külmumise indikaatori väärtuseks saab uuesti 0.



Joonis 2.9. Modelleeritud sulatusrežiim

Sulatusrežiimi kestus on modelleeritud mõõdetud andmete keskmise järgi. Selleks on käesoleval juhul 17,63 minutit. Kuna mudelit simuleeritakse minuti kaupa, siis realselt teostatakse sulatust 18 minutit. Seda võeti arvesse ka järgnevatel punktides toodud sulatusrežiimiaegse sissepuhke- ja väljaviskeõhu parameetrite arvutuses.

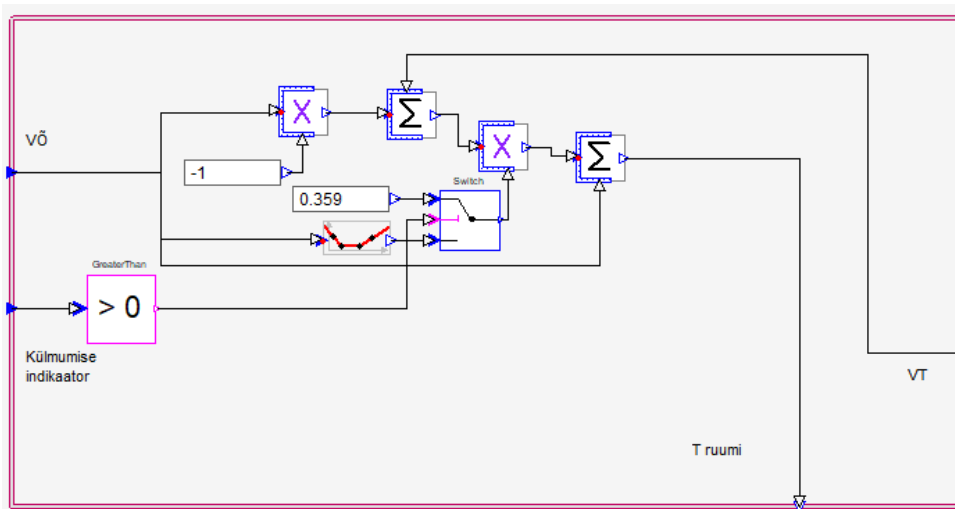
2.6.3 Sissepuhke- ja väljaviskeõhu modelleeritud parameetrid

Soojustagasti sulatusrežiimi käivitumisel juhitakse enamik sisenevast välisõhust soojustagastist möödaviigu kaudu mööda. Väike osa, mis tagastit läbib, tõstab kogu sissepuhutava õhuvoolu keskmist temperatuuri ning seetõttu on soojustagastil ka sulatusrežiimi ajal väike kasutegur.

Mõõtmisandmete järgi saadi vastavalt valemile 1.1 sulatusrežiimi keskmiseks temperatuuri suhtarvuks sissepuhke temperatuuri järgi 0,359. Soojustagastist sulatusrežiimi ajal väljuvad sissepuhkeõhu temperatuurid on arvatud eelnimetatud valemi pöördtehtega.

Sulatusrežiimiaegse sissepuhke temperatuuri arvutamise makro on toodud alloleval joonisel (vt Joonis 2.10). Kui külmumise indikaatorist tuleb signaal "1", antakse edasi järelküttekalorifeeri mineva õhu temperatuuriks väljaõhu, väljatõmbeõhu ja suhtarvu alusel arvatud väärtus. Kui sulatusrežiim lõppeb, antakse ruumi edasi välisõhu ja

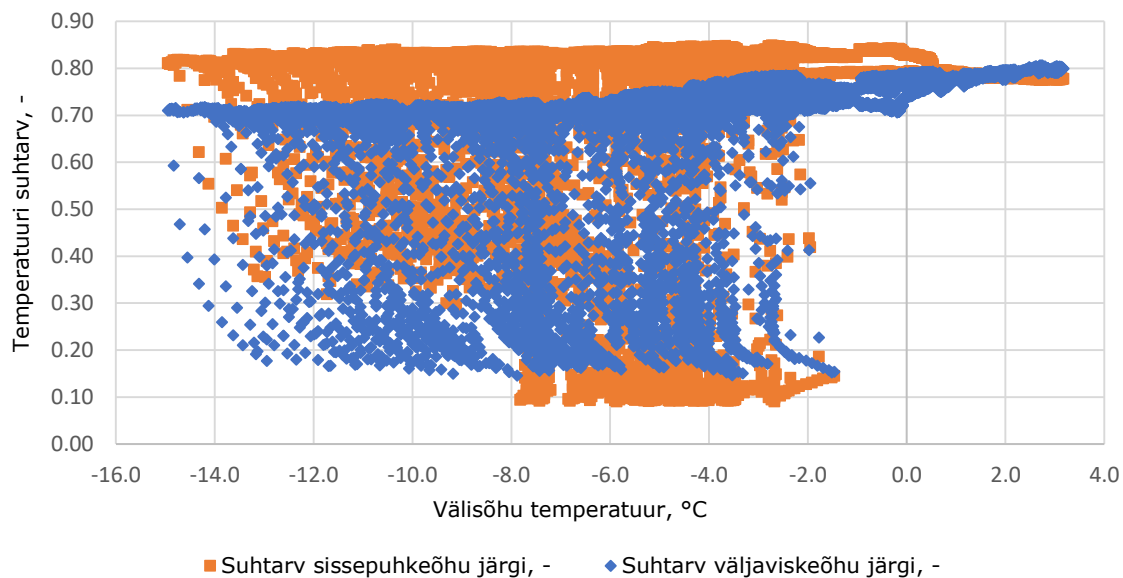
temperatuuri suhtarvu alusel arvatud temperatuuri väärtus, mis saadakse graafikul toodud seose abil (vt Joonis 2.11).



Joonis 2.10. Sisepuhkeõhu temperatuuri arutamise makro

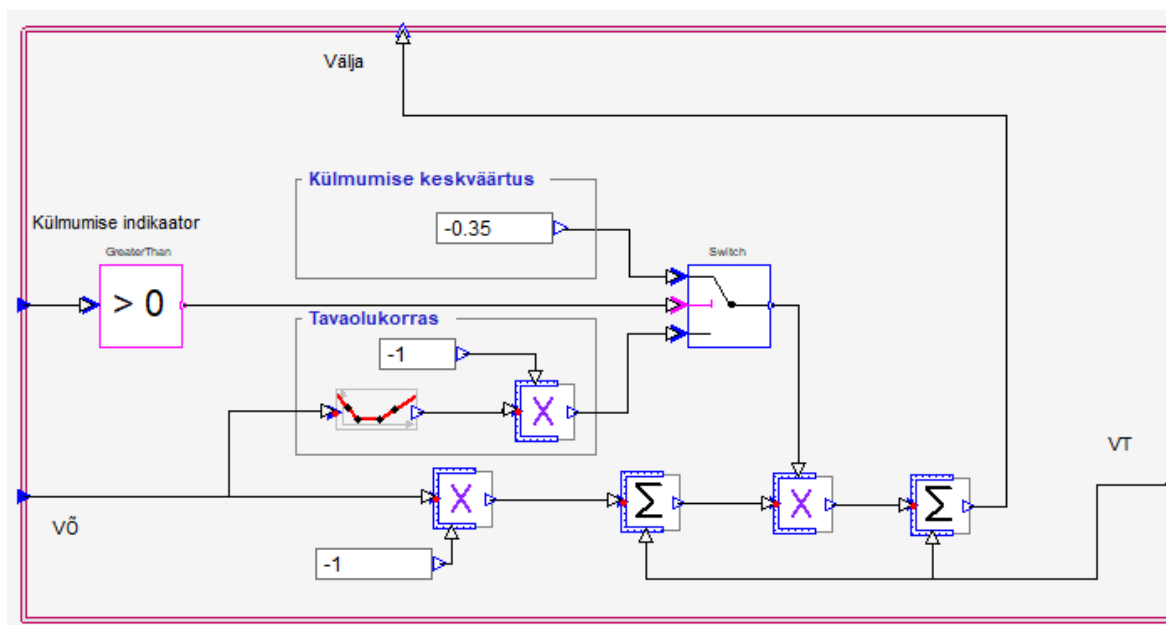
Sulatusrežiimiaegne väljaviske temperatuur arvutati analoogselt sisepuhke omaga. Väljaviske järgi arvatud temperatuuri suhtarvuks saadi valemi 1.2 järgi 0,363. Kuna sarnaselt sisepuhkeõhule ei vastanud simuleerimistarkvara soojustagasti poolt arvatud temperatuurid mõõdetutele täpselt, siis tuli leida seos väljaviskeõhu järgi arvatava suhtarvu ning mõne välise parameetri vahel.

Simuleerimiseks piisavalt täpsed seosed leiti läbi välisõhu temperatuuri. Välisõhu ja temperatuuri suhtarvu vaheline seos on toodud alloleval joonisel (vt Joonis 2.11). Vahemikus $-7^{\circ}\dots-15^{\circ}$ on suhtarv väljaviske järgi tavaolukorras veidi kõrgem kui 0,70. Kõrgemal kui 0°C on suhtarv stabiilselt 0,80 ümbruses.



Joonis 2.11. Suhtarvude seos välistemperatuuriga

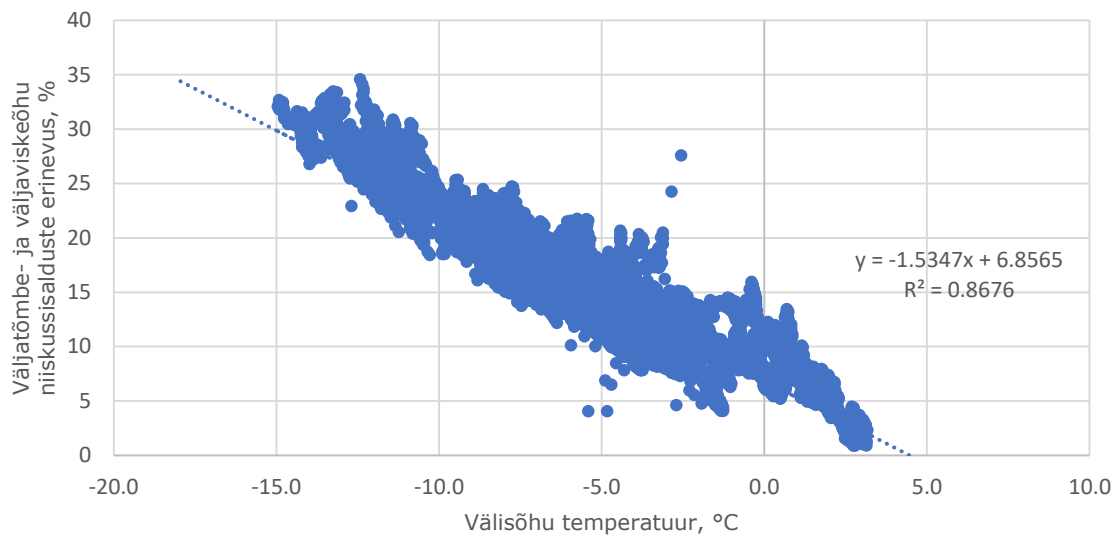
Seos sisestati soojustagasti mudeli väljaviske temperatuuri arvutamise graafikusse. Kogu makro on toodud alloleval joonisel (vt Joonis 2.12). Väljaviskeõhu temperatuur arvutatakse vastavalt valemile 1.2 pöördtehtele. Kui külmumisolukorras sulatusrežiimi ajal kasutatakse suhtarvuna väärtust 0,363, siis tavaolukorras kasutatakse suhtarvu, mis saadakse vastavalt Joonis 2.11 järgi koostatud graafikule.



Joonis 2.12. Väljaviske temperatuuri arvutav makro

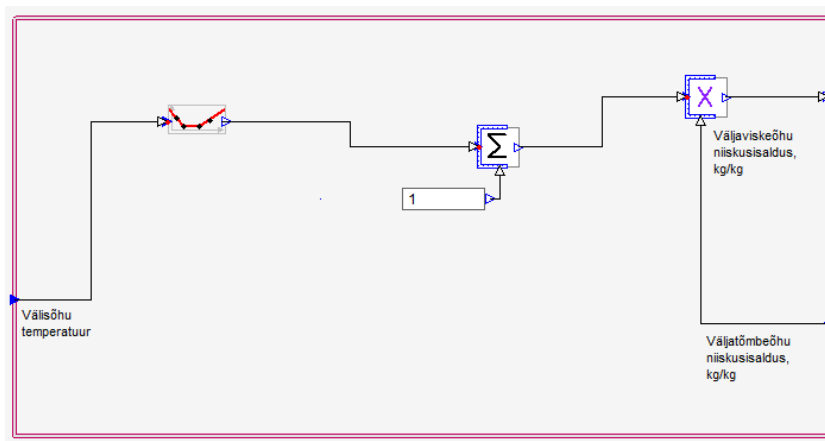
Samuti nagu temperatuuri korral, ei arvuta simulatsiooniprogramm enda standardse mudeli korral kondenseerumisest tingitud niiskuse hulga vähenemist õigesti. Selle

kompanseerimiseks leiti niiskushulga vähenemine tagastis sõltuvalt välistemperatuurist mõõteandmete alusel. Seos on toodud alloleval joonisel.



Joonis 2.13. Niiskussisalduse vähenemine soojustagastis vastavalt välisõhu temperatuurile

Eelneval joonisel toodud seose alusel loodi mudelisse graafik ning selle abil loodud matemaatilise tehtega saadi väljaviskeõhule reaalsete mõõtmisandmetega lähedane niiskussisaldus. Makro on toodud alloleval joonisel (vt Joonis 2.14).



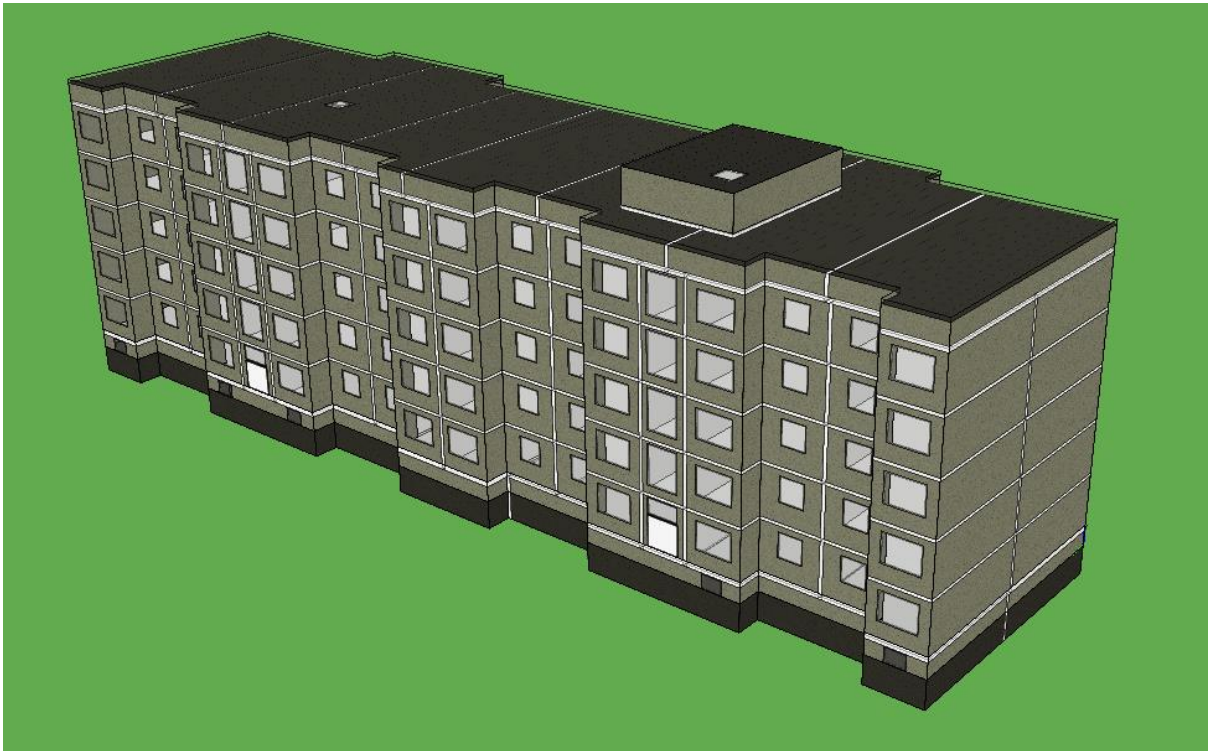
Joonis 2.14. Väljaviske niiskussisaldust arvutav makro

2.7 Akadeemia tee 5a ühiselamu

Analüüsitava hoone paikneb Tallinnas, aadressil Akadeemia tee 5a. Tegemist on viiekorruselise kahe trepikojaga elamuga. Mõlemas trepikojas on 40 ühiselamu boksi. Keldrikorrusel asuvad panipaigad, tehnilised ruumid ja showruum. [24]

Ühe trepikoja bokse teenindavad boksidepõhised sissepuhke/väljatõmbeseadmed. Kokku on projekteeritud 40 ventilatsioonisüsteemi. Seadmed on paigutatud iga korteri panipaikadesse. Õhuvõtt ja väljavise on teostatud läbi iga boksi välisseina. [24]

Keldris asuvaid panipaikaseid ja showruumi teenindab (viimase mitte kasutusel olemise ajal) tsentraalne ventilatsioonisüsteem SV11. Showruumi on ühtlasi projekteeritud süsteem SV4, mis hakkab tööle, kui ruumis viibivad inimesed. Trepikojas number 2 asuvaid ühiselamu bokse teenindab tsentraalne süsteem SV10, mille ventilatsiooniagregaat paikneb katuselasuvas ventilatsioonikambris. [24] Vastavalt Sirkel & Mall OÜ poolt tehtud tööprojektile on koostatud ühiselamu hoone mudel.

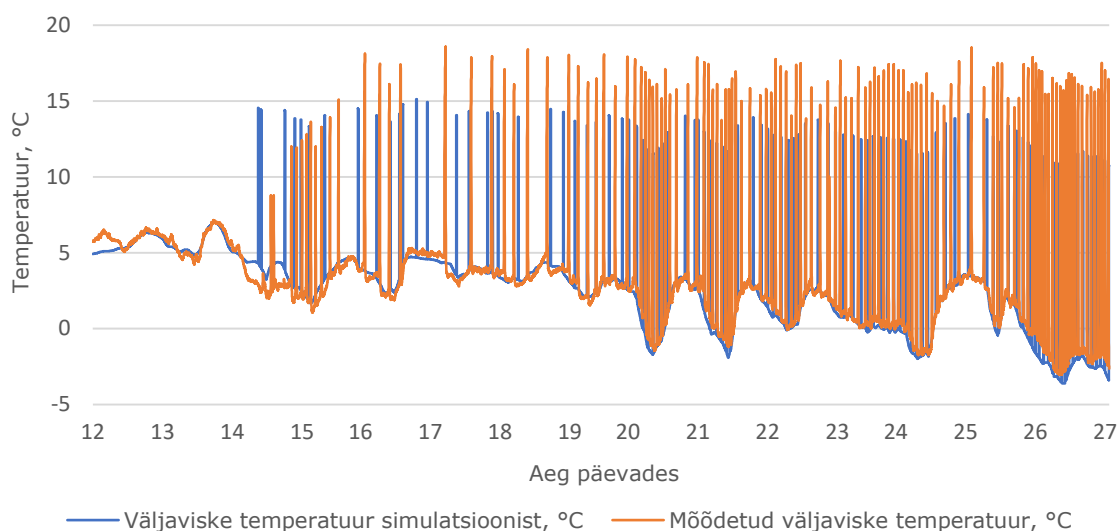


Joonis 2.15. Akadeemia tee 5a mudel 3D vaates

2.8 Mudeli testimine ja kalibreerimine

Loodud mudeli testimiseks koostati väliskliima fail, milles kasutati 2018. aasta veebruaris realselt mõõdetud parameetreid. Väljatõmbeõhu parameetrid anti soojustagastile ette faili kujul, mis on samuti koostatud vastavalt reaalsele mõõtmisele. Simuleeriti läbi ajavahemik 12-28 veebruar ning veenduti, et külmumiste seaduspära vastab realselt toimunud jäätumistega.

Simuleerimisel saadud väljaviske temperatuuride graafikul (vt Joonis 2.16) on näha sarnase mustriga järske temperatuuritõuse, mis kujutavad külmumisolukordi. Temperatuur tõuseb, sest soojustagastit sulatatakse sooja väljaviskeõhuga. Külmumised on kohati ajaliselt nihkes. Simulatsioonist saadud sulatusrežiimiaegsed temperatuurid ei ulatu realselt mõõdetutega samale suurusele, sest mudelis tõstetakse temperatuur energiakulu arvutamiseks külmumise aja keskmisele temperatuurile.



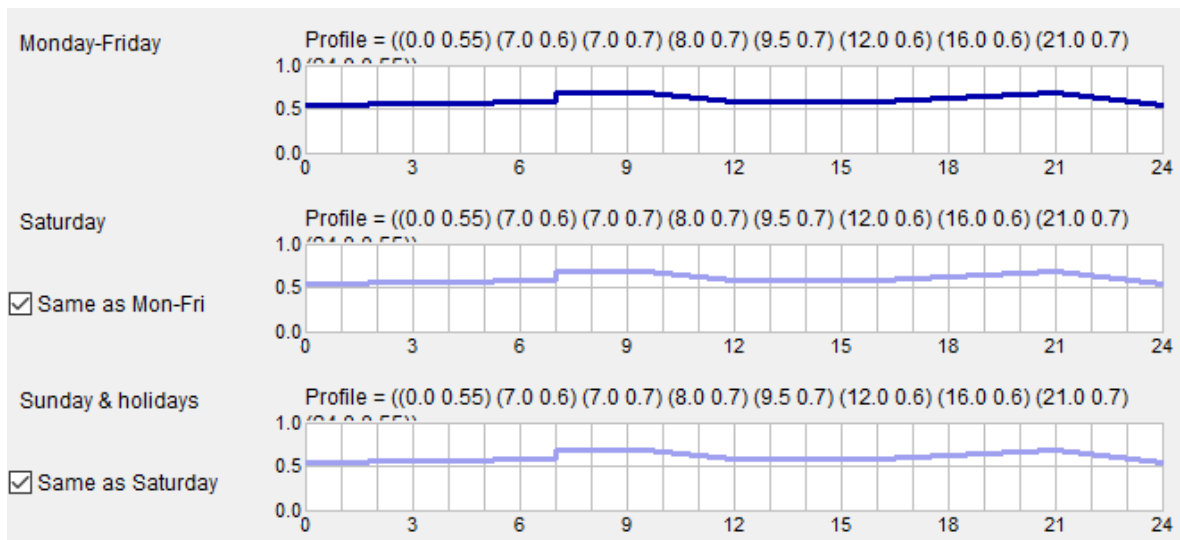
Joonis 2.16. Simuleeritud ja mõõdetud väljavisketemperatuurid vahemikus 12-28 veebruar 2018

Soojustagasti mudeli kasutamiseks teistel ajaperioodidel väljaspool 2018. aastal teostatud mõõtmisi, tuli see kalibreerida Akadeemia tee 5a ühiselamu mudeliga. Selleks seadistati kõigepealt Akadeemia tee mudelit, et mõõteandmete alusel koostatud 2018. aasta veebruari väliskliimaga simuleerimisel saadaks mõõtmisandmetele võimalikult täpsed väljatõmbeõhu parameetrid.

Akadeemia tee 5a mudelisse viidi sisse täpsustavad muudatused:

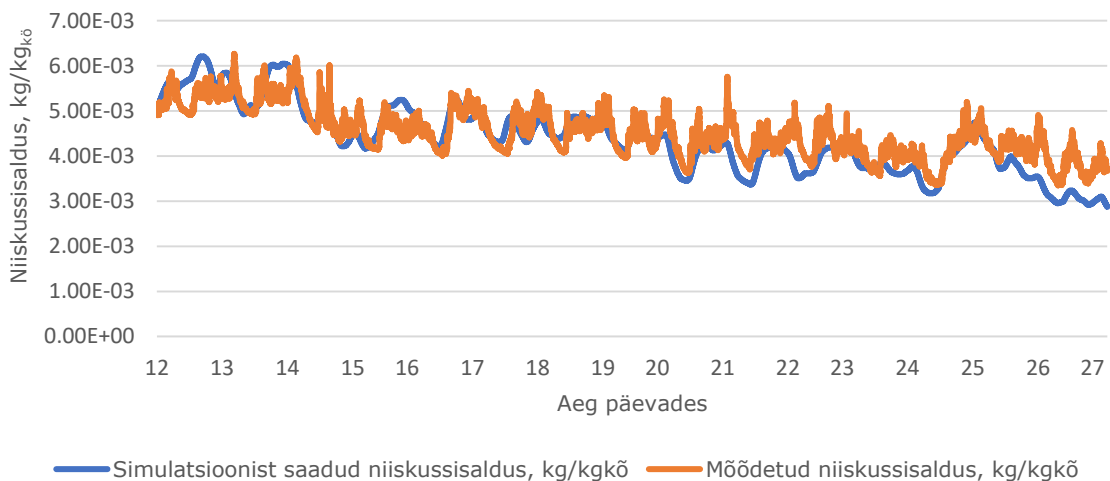
- Korrigeeriti inimeste kohaloleku graafikut, et ööpäevane niiskuskooormus vastaks mõõdetule (vt Joonis 2.17)

- Muudeti kütte seadeväärtus 19°C peale, et väljatõmbesse jõuaks õige temperatuuriga õhk



Joonis 2.17. Inimeste aktiivsuse graafik

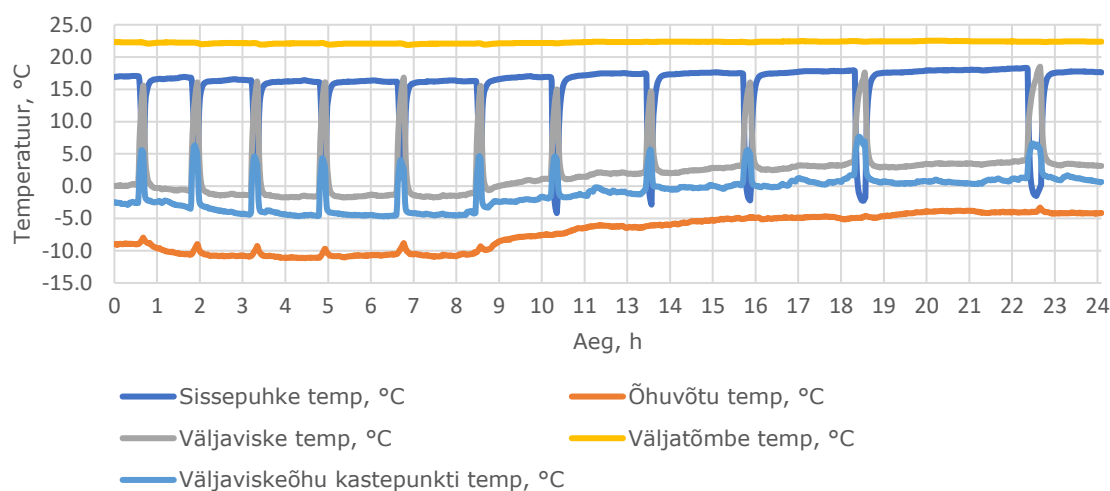
Keerulisimaks ning kõige raskemini simuleeritavaks parameetriks hoones osutus niiskuskooormus. Järgneval joonisel (vt Joonis 2.18) on toodud simuleeritud ja mõõdetud andmete väljatõmbeõhu niiskussisaldused.



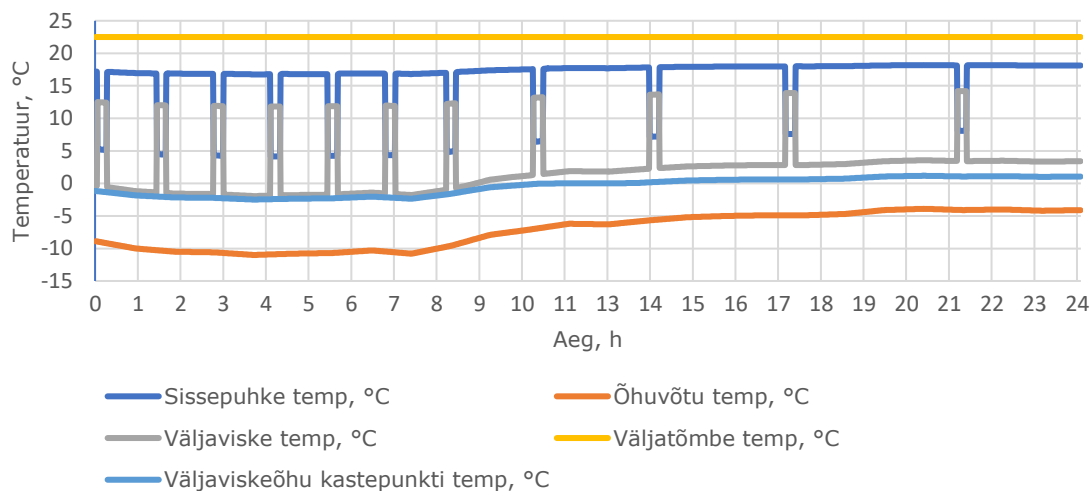
Joonis 2.18. Mõõtmiselt ja simulatsioonist saadud väljatõmbeõhu niiskussisaldused

Kui Akadeemia tee 5a ühiselamu mudeli simuleerimisel saadi piisavalt täpsed väljatõmbeõhu parameetrid, katsetati jäätumise tuvastuse mudelit ühiselamu mudelil. Jällegi kasutati 2018. aasta mõõteandmete baasil loodud väliskliimat. Mõõdetud perioodil kulus analüüsitava ventilatsiooniseadme järelkütte soojusmõõtja andmetel õhu soojendamiseks 1627 kWh energiat. Simuleerimisel saadi energiakuluks 1597 kWh.

Reaalselt lülitus soojustagasti sulatusrežiimi antud perioodi jooksul 124 korda. Simuleerimisel 122 korda. Seega loeti kalibreerimine piisavalt täpseks. Kalibreerimise näitena on toodud soojustagasti läbivate õhuvoolude parameetrid 25. veebruaril 2018. aastal. Joonis 2.19 kajastab mõõdetud parameetreid ja Joonis 2.20 simulatsiooni läbiviimise tulemusel saadud parameetreid. Külmmumised on väikeses ajalisel nihkes kuid üldiselt toimivad sarnaselt.



Joonis 2.19. Soojustagasti läbivate õhuvoolude mõõdetud parameetrid



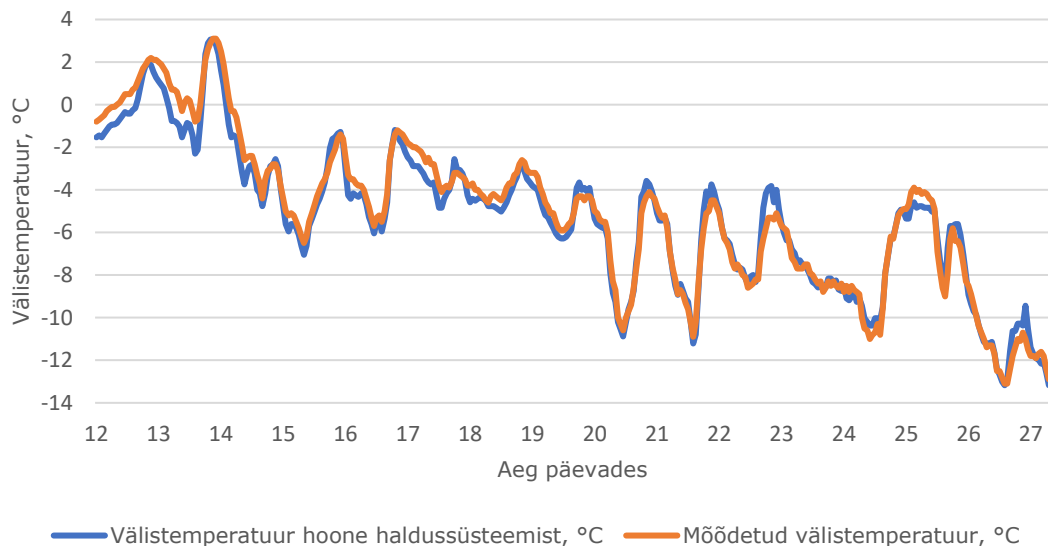
Joonis 2.20. Soojustagasti läbivate õhuvoolude simulatsioonist saadud parameetrid

2.8.1 Soojustagasti mudeli toimimise valideerimine

Soojustagasti mudeli toimivust katsetati simulatsiooniprogrammis kogu 2018. aasta läbi simuleerimisega. Selleks oli vaja välisõhu ning väljatõmbeõhu temperatuuri ja niiskuse

väärtusi aasta lõikes. Kuna eraldi mõõtmisi vajalike andmete saamiseks ei teostatud, siis laaditi Akadeemia tee 5a hoone halduskeskkonnast alla välisõhu temperatuurid ning analüüsitava SV-10 süsteemi plaatsoojustagasti väljatõmbeõhu temperatuurid. Kuna antud seadme väljatõmbeõhu niiskust ei mõõdetata, kasutati korteripõhiste seadmete keskvaartusi. Selleks arvutati välja mõõdetavate korterite väljatõmbeõhkude niiskussisaldused ning võeti nende aritmeetiline keskmine. Saadud suhteline niiskus ning väljatõmbeõhu temperatuuri väärtused anti lähtefailina soojustagastile simuleerimiseks. Kliimafailis asendati välistemperatuur 2018. aastal mõõdetutega. Simulatsioon teostati vahemikule 7. veebruar – 31. detsember 2018. Enne 7. veebruari olid hoone halduskeskkonnast saadavad andmed puudulikud.

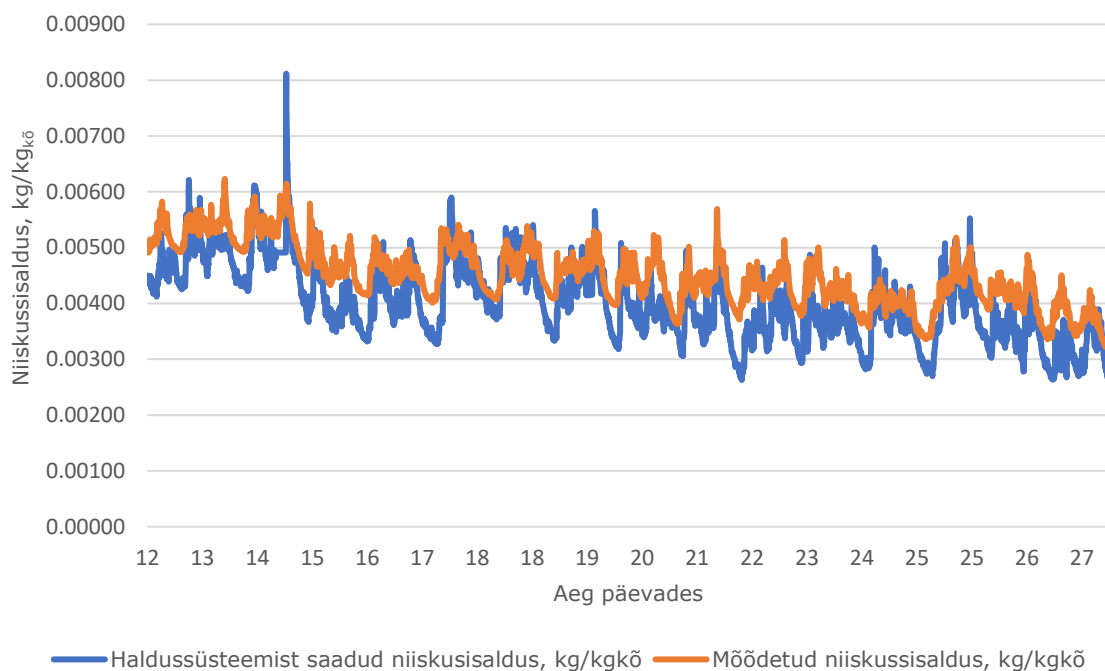
Teostati kaks simulatsiooni – üks 11 kuu vältel eelmainitud vahemikus ning teine mõõdetud perioodile 12-28 veebruar, et veenduda õhuvoolude parameetrite õigsuses. Kuna hoone haldussüsteemis toodud välisõhu temperatuur on mõõdetud hoone välispinnal, ning soojustagastisse jõudmise hetkeks on see juba vähesel määral soojenenud, siis võeti seda arvesse parandusteguriga, korrutades temperatuurid läbi väärtusega 0,85. Korrigeeritud ja mõõdetud välistemperatuuri võrdlus on toodud alloleval joonisel.



Joonis 2.21. Mõõdetud ning haldussüsteemist saadud välistemperatuur

Korterite keskmine väljatõmbe niiskus muutus päeva vältel suurema amplituudiga kui tsentraalse seadmega teenindavates korterites (vt Joonis 2.22). Niiskust ei korrigeeritud, sest võrdlusandmeid polnud selleks piisavas mahus ning selleks ei leitud loogilist seost. Seega kasutati simulatsioonil väljatõmbeõhu niiskusena täpselt samasid väärtusi, mis olid korteriseadmete puhul väljatõmmataval õhul. Väljatõmbeõhu

temperatuurina kasutati hoone haldussüsteemist saadud simuleeritavale seadmele vastavaid väärtusi.



Joonis 2.22. Mõõdetud ning haldussüsteemist saadud õhu niiskussisaldus

2.9 Külumiskaitsete lahenduste simuleerimine

Loodud soojustagasti mudeli abil katsetati erinevaid olemasolevaid külumiskaitse lahendusi. Selleks lisati soojustagasti mudelile kaitselahenduse süsteem ning seejärel viidi läbi simulatsioon kalibreeritud Akadeemia tee 5a ühiselamu mudeliga Eesti energiaarvutuste baasaasta välisõhu parameetritel.

Külumiskaitse lahendustena vaadeldi järgmisi lahendusi:

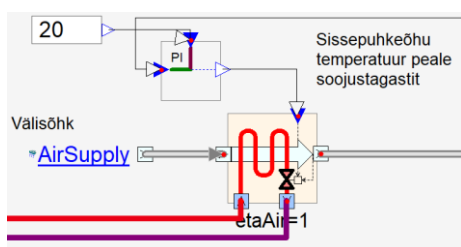
- Mõödaviiguga jää sulatamine, õhu soojendamine järelküttekalorifeeris;
- Ainult eelküttekalorifeeriga kütmine ning jäätumise vältimine;
- Õhuvõtu temperatuuri järgi eelküttekalorifeeriga jäätumise vältimine ning järelküttekalorifeeriga õhu soojendamine sissepuhkeks;
- Väljaviske temperatuuri alusel eelküttekalorifeeriga jäätumise vältimine ning järelküttekalorifeeriga õhu soojendamine sissepuhkeks.

2.9.1 Mõõdaviiguga jää sulatamine

Mõõdaviiguga jää soojustagastist sulatamise meetod ei vajanud mudelile täienduste tegemist, sest antud meetodi alusel on mudel loodud. Tulemuste saamiseks simuleeriti olemasolev Akadeemia tee 5a hoone mudel soojustagasti jäätumise mudeliga. Simuleeriti läbi ka olukord, kus mudelilt eemaldati jäätumist simuleeriv makro. Saadud tulemuste abil saab määrata jäätumisrežiimi ajal sulatamisele kulutatava energiahulga ning leida, kui väikse energiakuluni on olemasolevate soojustagastite sulatusrežiimi modifitseerides võimalik jõuda. Lisaks vaadeldakse kas energiatõhususe miinimumnõuete määramises toodud heitõhu miinimumtemperatuuri $+5^{\circ}\text{C}$ nõue plaatsoojustagasti korral on antud kontekstis korrektne.

2.9.2 Ainult eelküttekalorifeeriga jäätumise vältimine ning kütmine

Ainult eelküttekalorifeeriga jäätumise vältimisel soojendatakse välisõhk piisavalt kõrgele temperatuurile, et lisaks külmumise vältimisele tagatakse ka soovitud sissepuhkeõhu temperatuur. Selleks lisati kalibreeritud mudelisse soojustagasti ette kalorifeer, mille temperatuuri seadeväärtus arvutatakse vastavalt mõõdetava sissepuhkeõhu temperatuurile PI-regulaatoris. Regulaatorile antakse ette väärtus, antud juhul soovitud sissepuhketemperatuur, millele püütakse väljundväärtust muutes võimalikult lähedale jõuda. Mudeli skeem on toodud alloleval joonisel.



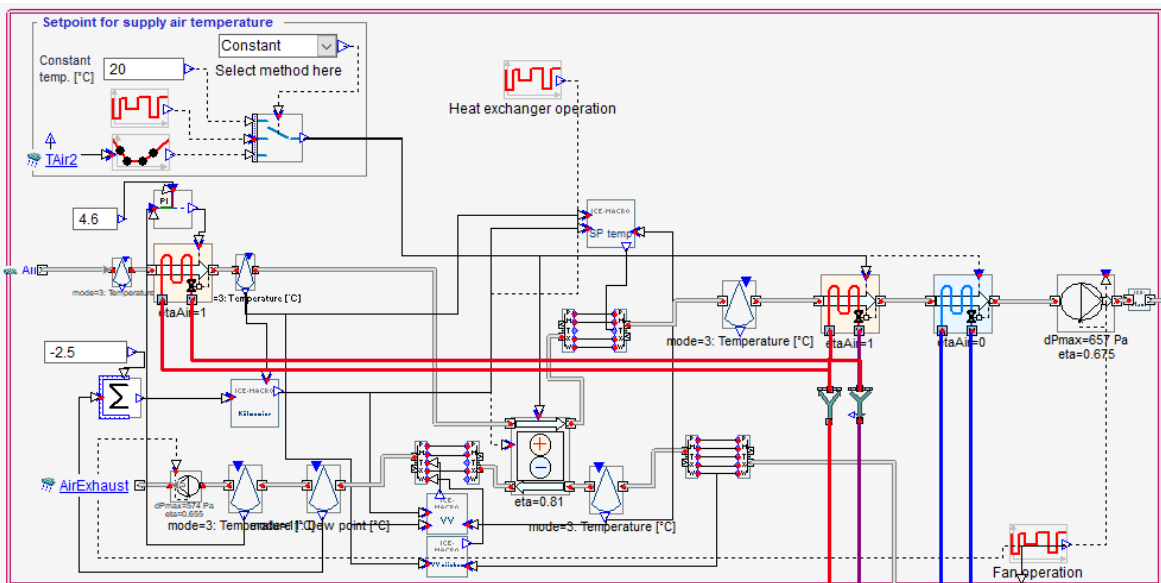
Joonis 2.23. Eelküttekalorifeeriga jäätumise vältimise mudeli skeem

2.9.3 Eelküttekalorifeeriga jäätumise vältimine

Eelküttekalorifeeriga jäätumise vältimise meetod on sarnane eelmises alapeatükis nimetatule. Erinevus seisneb selles, et soojustagastisse sisenevat välisõhku soojendatakse vaid piisavalt, et ära hoida tagasti jäätumist. Sissepuhkeõhu temperatuur

saavutatakse järelküttekalorifeeris. Käesolevat meetodit katsetati kahe erineva seadearu järgi - simuleeriti läbi eelkütmine välisõhu ja väljaviskeõhu järgi.

Väljaviske järgi välisõhu eelsoojendamise mudeli skeem on toodud alloleval joonisel (vt Joonis 2.24). Kasutatavat välisõhku soojendatakse piisavalt, et soojustagasti väljaviskepoolel ei langeks temperatuur alla $4,6^{\circ}\text{C}$. Väljaviskepoole seadeväärtus $4,6^{\circ}\text{C}$ on valitud selline, mille juures jäätumist energiaarvutuste baasaasta simuleerimisel enam ei esinenud.



Joonis 2.24. Väljaviske temperatuuri alusel välisõhu eelsoojendamine

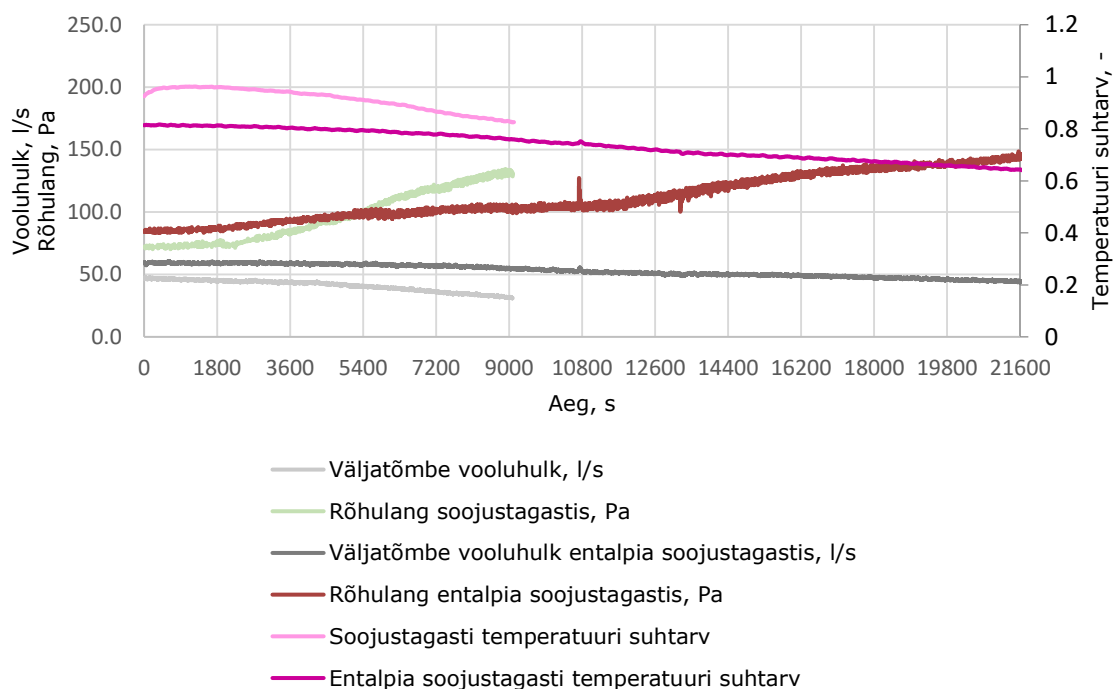
Teise soojustagasti eelküttekalorifeeri juhtimise variandina soojendati välisõhk enne soojustagastisse suunamist eelküttekalorifeeris -2°C -le. Seadeväärtus valiti vastavalt mõõte- ja simulatsioonandmetele, et jäätumisriski ei eksisteeriks.

3. TULEMUSED JA ANALÜÜS

3.1 Kliimakambri testide tulemused

Kliimakambri testitud andmetest analüüsiti tavalise plaatsoojustagasti ja entalpiatüüpi tagasti toimimist -15°C välisõhu temperatuuri juures, et tuvastada jäätumise iseärasusi erinevates seadmetüüpides. Väljatõmbeõhu temperatuur oli mõlemas katses seadistatud 19°C , suhteline niiskus 40%. Temperatuuri väärtused kõikusid kuni $1,5^{\circ}\text{C}$ ulatuses, suhteline niiskus kuni 2% ulatuses.

Katsete väljatõmbeõhu vooluhulgad, temperatuuri suhtarvud ja rõhulang soojustagasti väljatõmbepoolel on toodud alloleval joonisel (vt Joonis 3.1). Joonisel heledama tooniga toodud parameetrid iseloomustavad niiskust mitteläbilaskva pinnaga soojustagastit. Tumedama tooniga on tähistatud entalpia-tüüpi soojustagasti parameetrid. Seadmete mõõtmistulemused on toodud vahemikus, mil mõlemas seadmes suureneb rõhulang 60 Pa. Membraanpinnaga soojustagastil suureneb mõõdetud parameetrite juures tagasti rõhulang tunni vältel keskmiselt 9,9 Pa, tavalises tagastis 23,5 Pa. Seega võtab antud rõhulangu saavutamise entalpiatüüpi soojustagastil aega 2,4 korda kauem kui tavalisel soojustagastil.



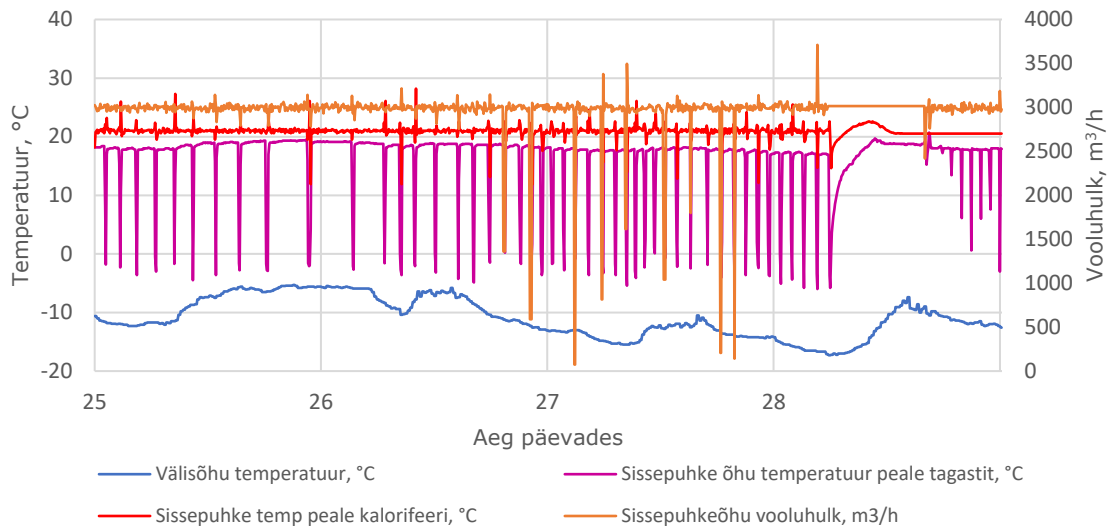
Joonis 3.1. Soojustagastite võrdlus kliimakambri mõõtmise andmete baasil

Nagu näha eelneval joonisel, langeb olenemata soojustagasti tüübist rõhu tõusmisel tagastis paraleelselt ka väljatõmbeõhu vooluhulk. Kuna väljatõmbe ventilaator rõhu tõusu ei kompenseeri, langeb jää kogunedes väljatõmbeõhu vooluhulk. Õhuvoolude tasakaalust välja minekul ei saa väljatõmbeõhk enam sissepuhutavat välisõhku potentsiaalsele temperatuurile soojendada. Seega langeb tagastis rõhuvahe tõusmisel soojustagastuse temperatuuri suhtarv.

3.2 Akadeemia tee 5a SV-10 süsteemi soojustagasti

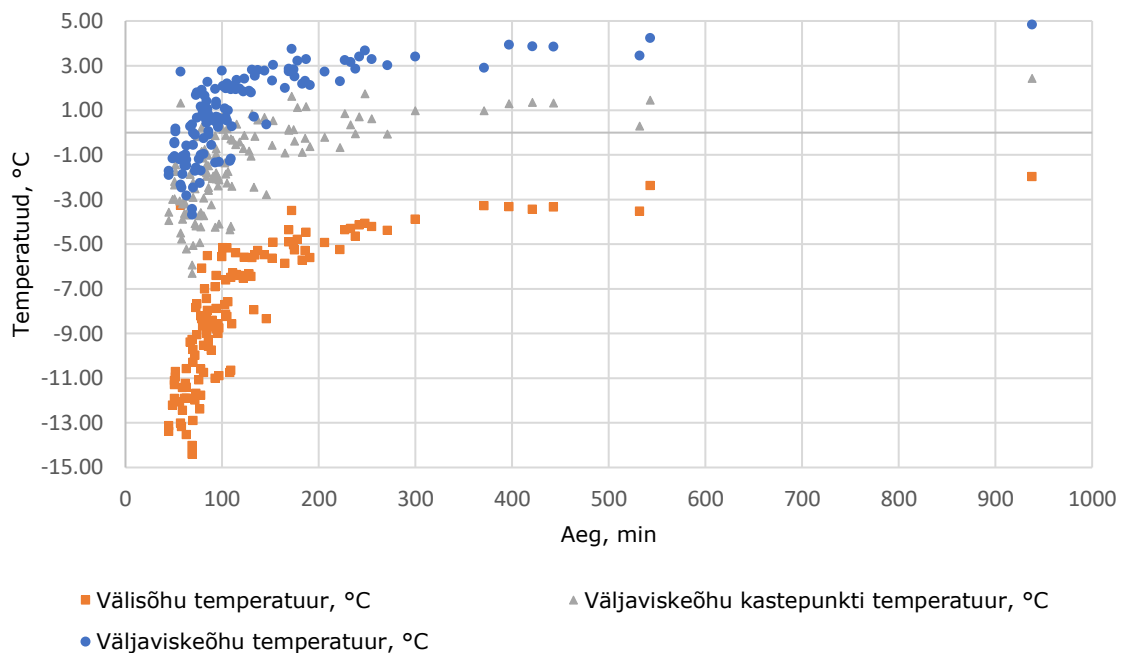
Akadeemia tee 5a ühiselamu soojustagasti külmumiskaitse rakendub kui rõhulang väljaviske poolel on tõusnud seadeväärtuseni 200 Pa. Sulatusrežiimi vältel avatakse soojustagasti sissepuhke poolel möödaviik, mille kaudu juhitakse valdav osa välisõhust soojustagastist mööda järelküttekalorifeeri, kus see sobivale sissepuhke temperatuurini soojendatakse. Väike osa sissepuhkeõhust läbib ka sulatusrežiimi ajal soojustagastit ja nii ei lange temperatuuri suhtarv kordagi alla 0,1. Järelküttekalorifeeri suunatava õhu temperatuur sulatuse ajal langeb juba -6°C välistemperatuuri juures alla -2°C ning kuna järelküttekalorifeer on projekteeritud tõstma sissepuhutava õhu temperatuuri -2° pealt kuni 20°C , siis alla -10°C välisõhu temperatuuri juures algavad tõrked soojustagasti töös.

Alloleval joonisel (vt Joonis 3.2) on toodud soojustagastit läbivate õhuvoolude parameetrid ajavahemikul 25-28 veebruar aastal 2018. 25. päeval ja 26. õhtul töötab seade probleemideta. 26. veebruari õhtul langeb välisõhu temperatuur alla -10°C ning sulatusrežiimis ei suuda seade mitmel korral sobivat sissepuhkeõhu temperatuuri tagada ning sissepuhke ventilaator seisatakse. 28. veebruari hommikul, mil välisõhu temperatuur on alla -17°C , seiskab soojustagasti automaatika seadme töö üheksaks järgnevas tunniks täielikult. Analoogselt seisatakse seade 2017/2018 talveperioodil 8 korda. Vastavalt mõõteandmetele peaks -20°C arvutusliku välistemperatuuri korral järelküttekalorifeer soojendama õhu -5°C -lt 20°C -ni. Seega peaks kalorifeeri võimsus olema projekteeritud 34,6 kW asemel 39,3 kW.



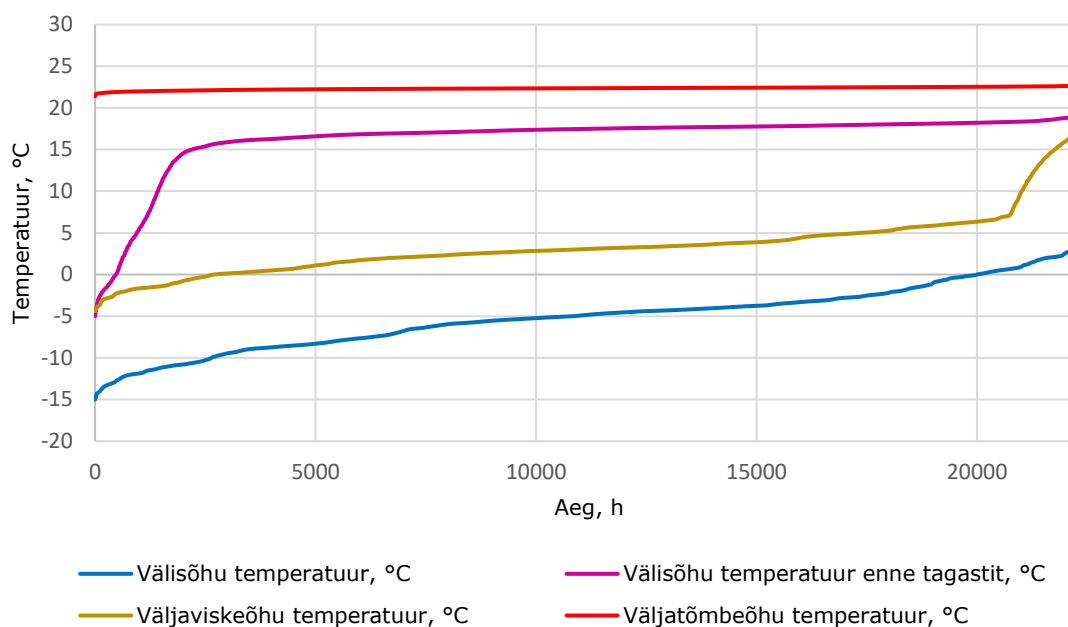
Joonis 3.2. Soojustagastit läbivate õhuvoolude parameetrid 25-28. veebruar 2018

Andmete analüüsist selgus, et kõige pikem aeg, mille jooksul jää tagastisse pidevalt ilma külmumiskaitse rakendamiseta kogunes, oli 938 minutit ning see toimus keskmise välisõhu temperatuuri $-1,96^{\circ}\text{C}$ juures. Välistemperatuuri ja külmumiseks kuluva aja vahel leiti mõõteandmete põhjal seos, mis on toodud alloleval joonisel (vt Joonis 3.3). Analoogsed tugeva korrelatsiooniga seosed kehtisid ka külmumiseks kuluva aja ning väljaviske temperatuuri ning väljaviske kastepunkti temperatuuri vahel. Kastepunkti temperatuuri kasutati simulatsioonimudeli koostamisel, sest nii oli võimalik täpsemate tulemuste saamiseks arvesse võtta ka väljatõmbepoole suhteline niiskus.



Joonis 3.3. Külmumiseks kuluva aja ja välisõhu temperatuuri vaheline seos

Alloleval joonisel (vt Joonis 3.4) on toodud 2018. aasta veebruari mõõtmise kestuskõver ajavahemikus 12-28 veebruar. Mõõtmisperioodi vältel oli välistemperatuur alla -2°C 81,6% ajast ning sellel perioodil leidsid aset kõik külmumised. Sellel potentsiaalse külmumisriskiga perioodil oli seade sulatusrežiimis 11,8% ajast.



Joonis 3.4. 2018. aasta veebruari mõõtmiste kestuskõver

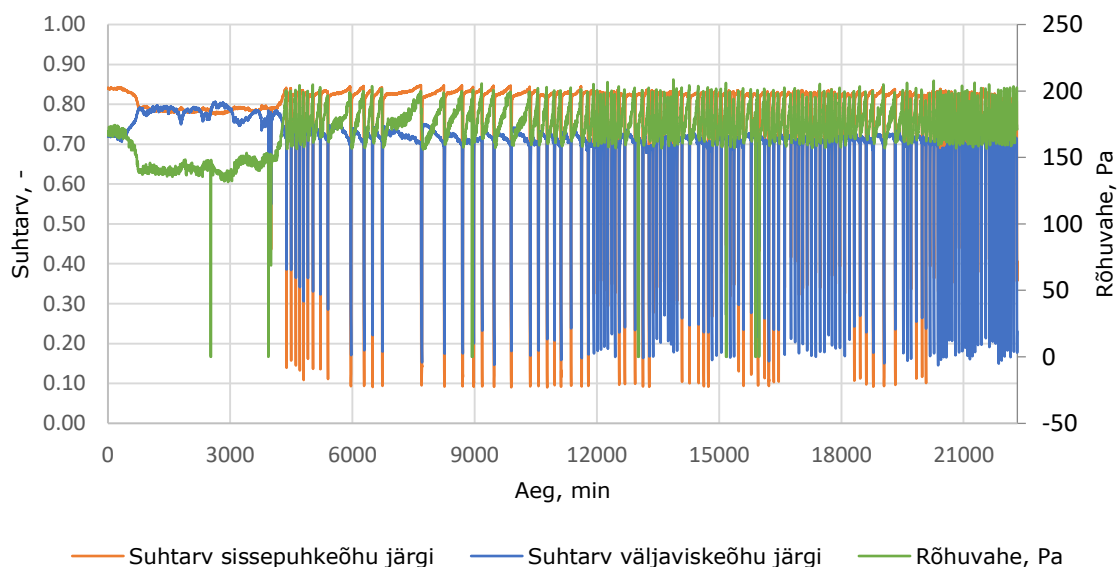
Sulatusrežiimi aja väljatõmbe- ja väljaviskeõhuvoolude entalpia vahe ja vooluhulga kaudu arvutati välja soojustagasti sulatamisele kuluv energia. Soojustagastis oleva jää sulatamiseks kulus mõõdetud ajaperioodil keskmiselt 9241 kJ ehk 2,57 kWh energiat. Tasub tähele panna, et arvutatud suurus on energia, mis n-ö jäi tagastisse. Reaalsel sulatamisel on kulu tunduvalt suurem, sest sulatamise kasutegur ei ole 100% ning suur osa soojusest lastakse väliskeskkonda. Saadud energiat saab aga kasutada sulatamisrežiimide efektiivsuse võrdluseks maksimaalse võimaliku kasuteguri referentsina.

3.3 Soojustagastuse temperatuuri suhtarv

Soojustagasti modelleerimisel temperatuuride ebakõlade uurimisel selgus, et külmumisperiodil ei ole temperatuuri suhtarvud sissepuhke ning väljatõmbe alusel arvutatuna võrdsed. Perioodil, mil toimuvad aktiivne külmumine ja soojustagasti sulatamine vaheldumisi, on suhtarv väljaviske järgi arvutatuna ligikaudu 10

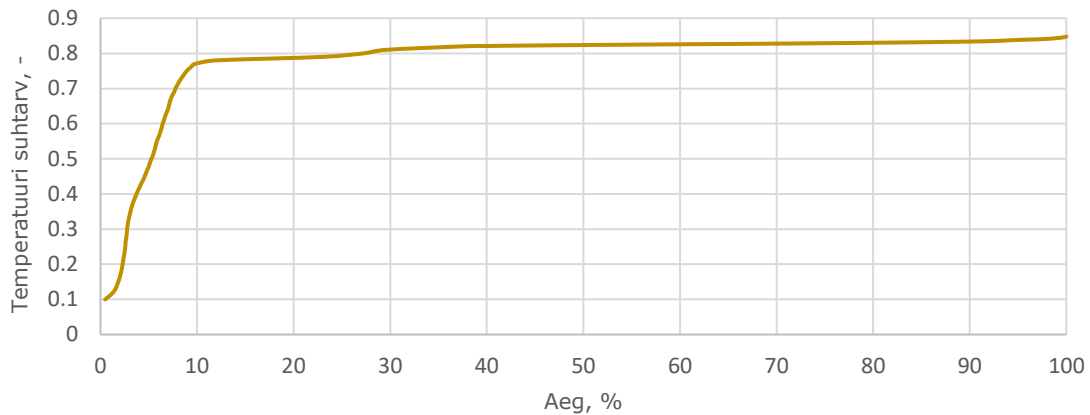
protsendipunkti madalam sissepuhke järgi arvatust. See tähendab, et soojustagasti väljaviskepoole temperatuuride vahe on ligi 10% väiksem kui sissepuhkepoole temperatuuride vahe ning järelikult toimub jäätumise perioodil külmumisel vabaneva varjatud soojuse ülekanne.

Alloleval joonisel (vt Joonis 1.1) on toodud 2018. aasta veebruaris mõõdetud andmete põhjal arvatud suhtarvud mõlema meetodi alusel ning külmumise iseloomustamiseks rõhulang tagasti väljaviske poolel. Perioodil, mil külmumist ei esine, on rõhulang alla 150 Pa ning külmumisperioodil vahemikus 155 kuni 200 Pa. Nagu ka jooniselt näha, siis lisaks suurenenud suhtarvude vahelisele erinevusele, on külmumisperioodil suhtarv tavaperioodist keskmiselt 5% võrra kõrgem. Seetõttu võiks järeldada, et külmumise perioodil on külmumissoojust potentsiaalselt võimalik kõrgema keskmise suhtarvu saamiseks ära kasutada. Suhtarv soojustagasti külmumise ajal märkimisväärselt ei muutu, sest väljatõmbe ventilaator on dimensioneeritud piisava varuga, et see suudaks jää kogunemise tagajärjel tõusva rõhulangu ületada ning jääd ei lasta koguneda nii palju, et see hakkaks soojusülekannet märkimisväärselt mõjutama.



Joonis 3.5. Suhtarvude muutus tava- ja külmumisperioodi vältel

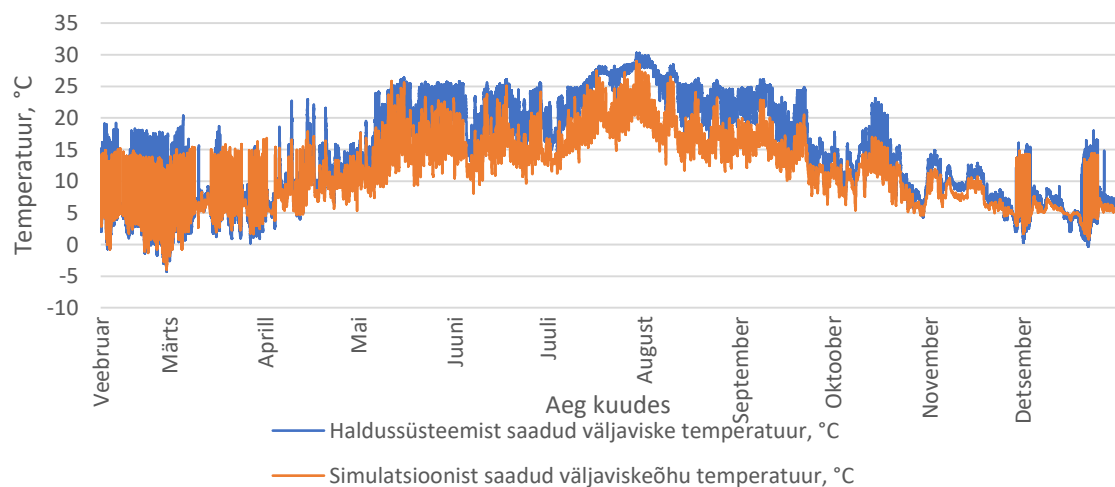
Soojustagasti suhtarv sissepuhke alusel arvatuna 2018. aasta veebruari mõõtmiste põhjal on toodud alloleval joonisel (vt Joonis 3.6). Seade on 9,6% mõõdetud ajast sulatusrežiimis, mis on graafikul tuvastatav vasakul, kus suhtarv on alla 0,78. Lisaks on joonisel näha selgelt kahte erinevat perioodi. Ajal, mil jäätumist ei toimu, on temperatuuri suhtarv 0,78...0,8 ning intensiivse jäätumisega perioodil on suhtarv vahemikus 0,82...0,84.



Joonis 3.6. Mõõdetud perioodi temperatuuri suhtarv sissepuhke järgi

3.4 2018. aasta simuleerimise tulemused

Soojustagasti külmumise mudeli toimimiseks simuleeriti läbi peaaegu terve 2018. aasta, 7. veebruar kuni 31. detsember. Selle jaoks saadi väliskliima ning väljatõmbeõhu parameetrid Akadeemia tee 5a hoone haldussüsteemist. Enne 7. veebruari olid andmed ebapiisavad. Kuna täpset õhuvõtu temperatuuri polnud teada, kasutati parandiga mõõdetud välisõhu temperatuuri. Väljatõmbeõhu niiskuseks kasutati korteriseadmete keskväärtust. Külmumiste toimumine on nähtav alloleval joonisel toodud väljaviskeõhu temperatuuride võrdluses, kus külmumine on tuvastatav temperatuuri järsu tõusuna vähemalt 10°C võrra. Joonisel (vt Joonis 3.7) on simulatsioonist ja hoone haldussüsteemist saadud väljaviskeõhu väärtused.



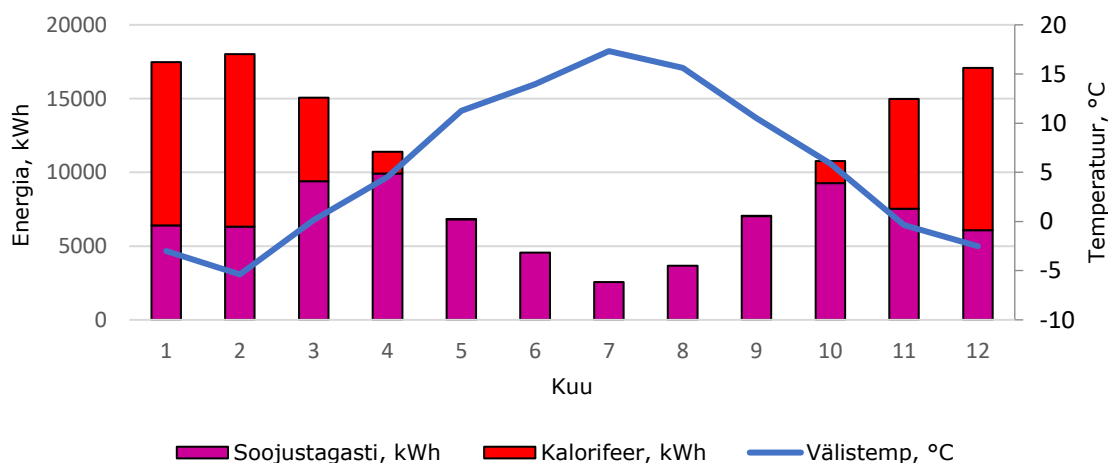
Joonis 3.7. Simulatsioonitulemustest ja hoone haldussüsteemist saadud väljaviskeõhu temperatuurid

Joonisel on näha ebakõla soojemate kuude temperatuuride vahel. See on tingitud välisõhu temperatuuri parandi kasutamisest, mistõttu on simulatsioonis kasutatav välisõhu temperatuur madalam haldussüsteemist saadud väärtusest. Viga on aksepteeritav, sest tänu parandile on külmade kuude, mil jäätumine aset leiab, temperatuurid väga ligilähedased haldussüsteemi omadele.

Veebruari lõikes toimus simulatsiooni tulemuste kohaselt 103 ja aasta lõikes 325 külmumist. Vastavad väärtused olid tegelikkuses 125 ja 302. Erinevus tegelikkuses oli seega -17,6% ja 7,6%. Viga ei ole suurusjärgult väga suur, sellegipoolest on külmumiste ettenägemine ilma täpseid väljatõmbeõhu niiskussisaldusi teadmata ebatäpne.

3.5 Eelküttekalorifeeriga jäätumise vältimine ja kütmine

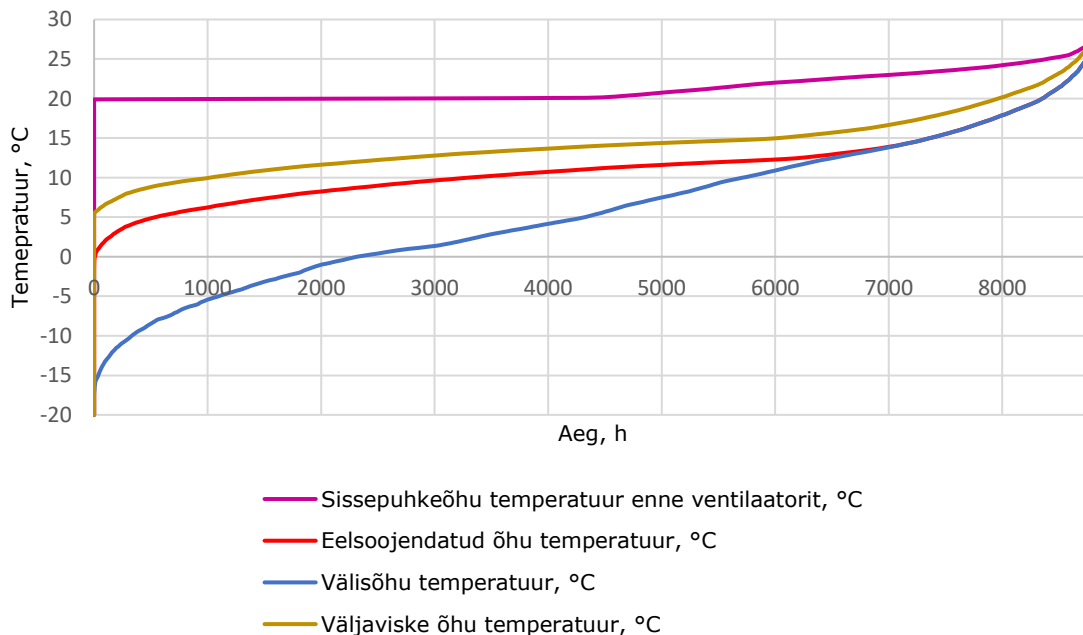
Ainult eelküttekalorifeeriga jäätumise vältimine ning sobiva sissepuhkeõhu temperatuuri tagamise korral kulunud energia hulk on Estonian TRY energiarvutuste baasaasta jooksul kuude lõikes toodud alloleval joonisel (vt Joonis 3.8). Lillaga on tähistatud energiahulk, mis soojustagasti kaudu väljatõmbeõhult sissepuhkele tagastati ning punasega on kujutatud energia, mis anti õhule enne soojustagastisse sisenemist sissepuhketemperatuuri tagamiseks. Jaanuaris, veebruaris ja detsembris on lisaküttele kuluv energiahulk suurem kui tagastist saadud energiahulk. Kõrgematel välisõhu temperatuuridel on soojustagastuse osakaal suurem.



Joonis 3.8. Eelküttekalorifeeriga kütmise energiahulk aasta lõikes

Aastane kestuskõver on kujutatud alloleval joonisel (vt Joonis 3.9). Ligi 7000 tunnil aastast on sissepuhkeõhu sobiva temperatuuri tagamiseks vaja kasutada eelkütet. Soojustagastuse suhe kogu soojendamisele kuluvale energiale ehk soojustagati energiatagastuse suhtarvuks, on aasta lõikes 61,5%. See tähendab, et üle kolmandiku ventilatsiooniõhu soojenduseks kuluvast energiast tuleb lisaküttena juurde anda. Energia ebaefektiivsus näitab kõrge väljaviske temperatuur ehk suur osa soojast õhust lastakse ilma seda utiliseerimata väliskeskkonda. Temperatuuri suhtarv väljaviske järgi lisakütet vajavatel kuudel on keskmiselt 0,32. See on põhjustatud eelküttekalorifeerist tulevast kõrge temperatuuriga õhust, mis soojendatakse talve perioodil +5...10°C juurde, et tagada sobiv sissepuhkeõhu temperatuur. Kõrge õhuvõtu temperatuuri tõttu ei saa väljatõmbeõhult rohkem energiat üle kanda.

Madalaim temperatuur, mis aasta jooksul eelküttekalorifeerist soojustagastisse jõudis oli -1,5°C. Alla 0°C õhk siseneb soojustagastisse aasta jooksul kokku vaid 29 tunni vältel. Ainult eelküttekalorifeeriga õhu soojendamisel on tarvis võimast eelküttekalorifeeri. Baasaasta arvutuste kohaselt on madalaima välisõhu temperatuuri korral vaja õhk eelsoojendada -17,4 kraadilt 12,6 kraadini, milleks kuluv võimsus on 36,2 kW.

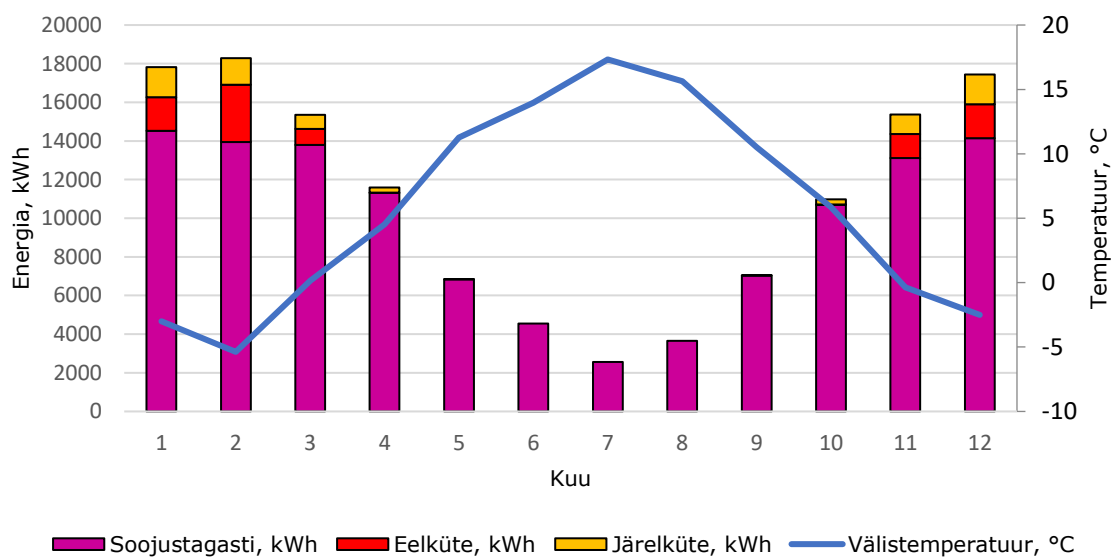


Joonis 3.9. Eelküttekalorifeeriga kütmise aastane kestuskõver

3.6 Eel- ja järelküte sissepuhke temperatuuri järgi

Eel- ja järelkütte kasutamine sissepuhkeõhku konstantse temperatuurini soojendades andis energiaefektiivsema tulemuse kui ainult eelküttekalorifeeriga küttes. Jäätumise vältimiseks soojendati välisõhk eelküttekalorifeeriga -2 kraadini. Seejärel soojenes õhk soojustagastis ning peale seda, kui oli tarvis, soojendati õhku lisaks järelküttekalorifeeris. Väljaviskeõhu temperatuur on kõige külmemal perioodil +4,5°C ning jää teket välditi täielikult. Simuleerides läbi olukordi, kus välisõhku soojendati madalamatele temperatuuridele kui -2°C, külmumise täielikuks vältimiseks sellest ei piisanud ning alternatiivse jäätumiskaitse puudumise tõttu jää teket lubada ei saa.

Alloleval joonisel on toodud energiatarve kuupõhiselt. Välistemperatuuri +5°C kraadist soojema temperatuuri korral õhk enam peale soojustagastit lisasoojendamist ei vaja. 0-kraadist allpool saadakse 75-90% vajalikust soojusenergiast soojustagasti kaudu väljatõmbeõhust. Aastaseks soojustagastuse suhtarvuks saadi 88,3%.

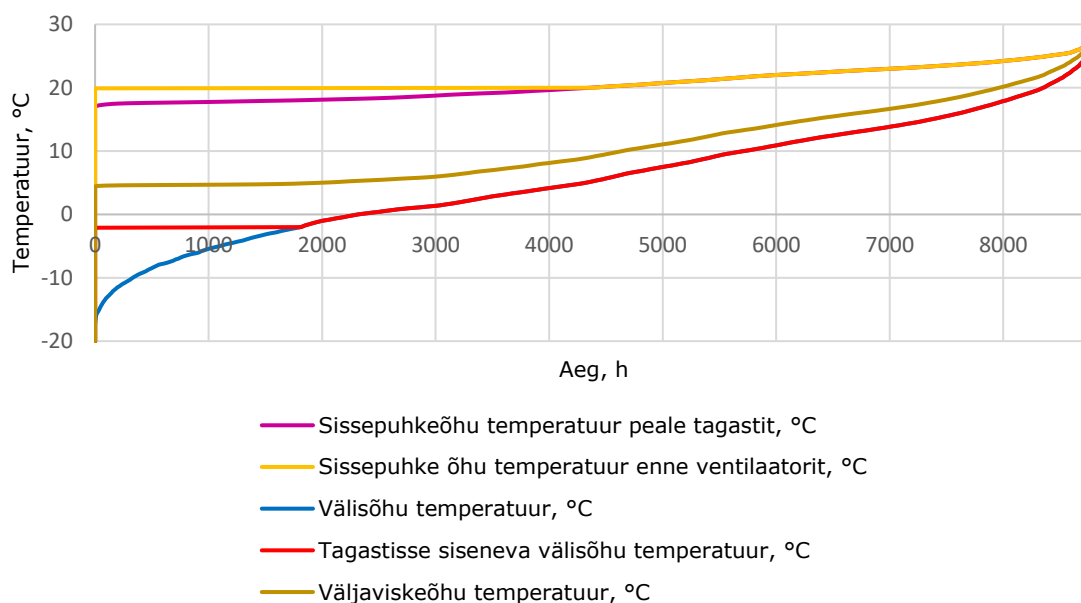


Joonis 3.10. Sisspuhkeõhu temperatuuri järgi külmumise vältimise lahenduse aastane energiahulk

Alloleval joonisel (vt Joonis 3.11) on toodud sissepuhkeõhu temperatuuri järgi külmumise vältimise lahenduse aastane kestuskõver. Punase joonega on tähistatud madalaim temperatuur, milleni välisõhk soojendatakse. Aasta jooksul kasutatakse külmumise vältimiseks eelkütet 1815 tunni ehk peaaegu 76 päeva vältel. Eelküttekalorifeeri minimaalseks vajalikuks võimsuseks on 18,6 kW.

Järelküttekalorifeeri siseneva õhu temperatuur on alloleval joonisel tähistatud lilla värviga. Kõige külmemal hetkel siseneb järelküttekalorifeeri 16°C õhk, mille

soojendamiseks 4°C võrra 20°C saavutamiseks on tarvis kalorifeeri võimsusega 4,83 kW.

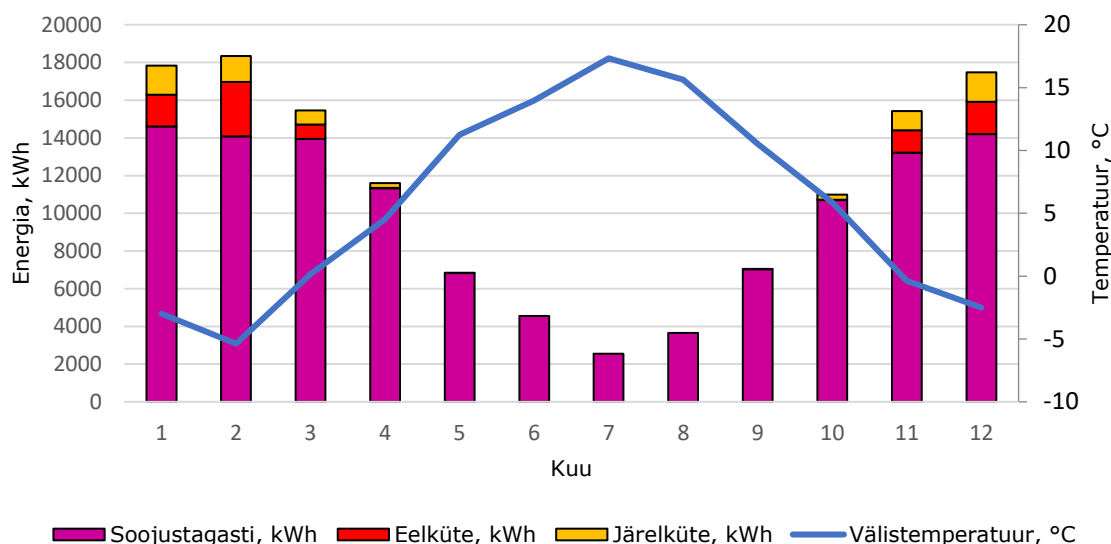


Joonis 3.11. Sisspuhkeõhu temperatuuri järgi külmumise vältimise lahenduse aastane kestusköver

3.7 Eel- ja järelküte väljaviske temperatuuri järgi

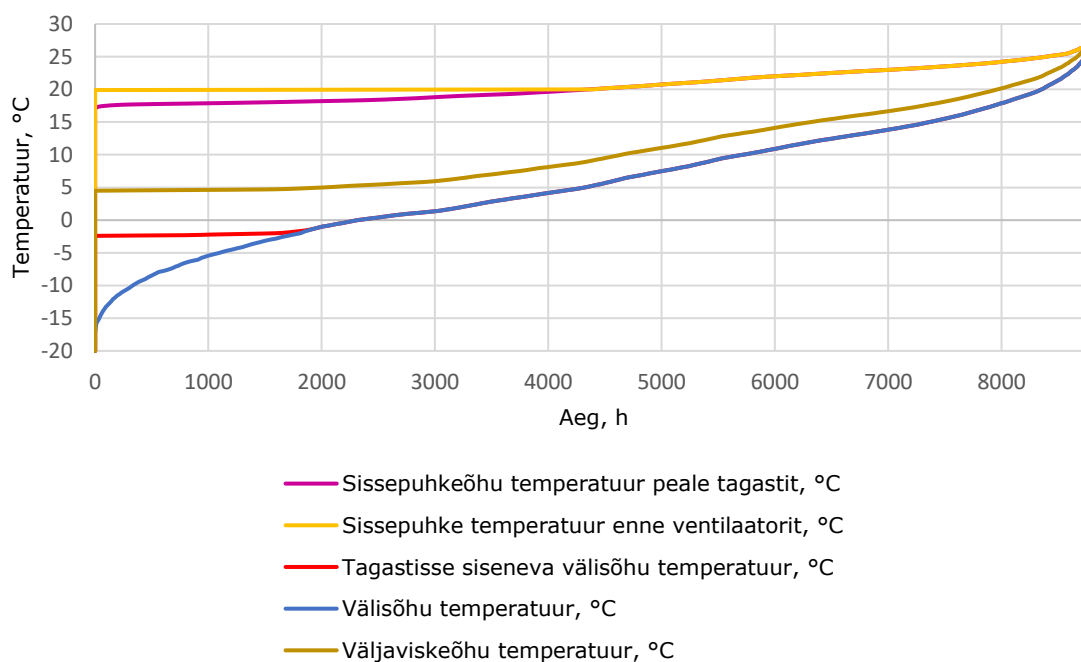
Väljaviskeõhu temperatuuri alusel eelküttekalorifeeri juhtimine osutus märkimisväärselt keerulisemaks kui kalorifeeri seadeväärtusena konstantset väärtust kasutades. Kuna väljaviske temperatuuri muutus toimus ajalise nihkega sissepuhke temperatuuri muutuse suhtes, langes väljaviskeõhu temperatuur välisõhu kiirel jähinemisel tihti alla ettenähtud seadeväärtuse 4,6°C. Selle lahendamiseks ei piisanud PI-regulaatori reageerimisaja vähendamisest ega regulaatori reguleerimissammu suurendamisest ning ette tuli anda lävendtemperatuur, millest allapoole temperatuur ei lange. Jäätumise täielikuks vältimiseks baasaasta jooksul piisas selleks -2,3°C.

Jäätumise vältimise meetodil väljaviske temperatuuri järgi saadud energiakulu simulatsioonist on toodud alloleval joonisel (vt Joonis 3.12). Õhu soojendamiseks kulub energiat alla ühe protsendi vähem kui sissepuhkeõhku konstantse temperatuurini sulatades ning energiatagastuse suhtarv kogu sissepuhkeõhu soojendamisele kuluva energia suhtes aasta vältel on 88,6%.



Joonis 3.12. Väljaviskeõhu temperatuuri järgi külmumise vältimise lahenduse aastane energiahulk

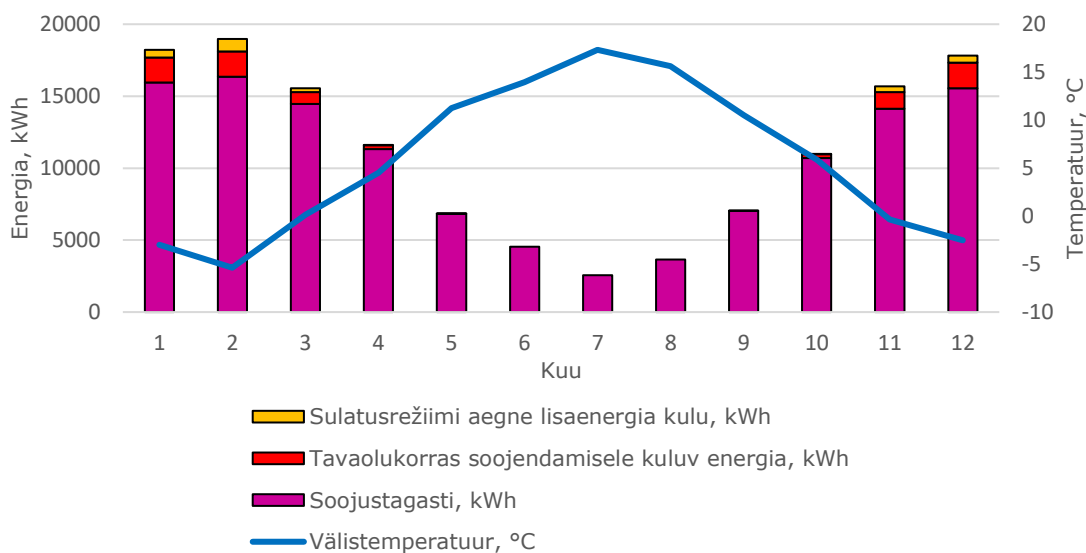
Alloleval joonisel (vt Joonis 3.13) on toodud väljaviske järgi eelküttekalorifeeri kasutamise meetodi aastane kestuskõver, mis sarnaneb eelmises alapeatükis tooduga (vt Joonis 3.11). Väljaviske temperatuuri alusel juhtimisel varieerus temperatuur, milleni välisõhku eelsoojendati. Kõige külmemal ajal tagastisse siseneva välisõhu temperatuur on $-2,3^{\circ}\text{C}$. Baasaasta jooksul on selle temperatuuri tagamiseks vaja eelküttekalorifeeri, mille võimsus on vähemalt 18,2 kW. Energiatõhususe miinimumnõuete määrukses toodud heitõhu temperatuuri piiramise nõue $+5^{\circ}\text{C}$ -ni plaatsoojusvaheti korral on antud kontekstis jäätumise vältimise otstarbel põhjendatud.



Joonis 3.13. Väljaviske temperatuuri järgi külmumise vältimise lahenduse aastane kestuskõver

3.8 Mõõdaviiguga jää sulatamine

Mõõdaviiguga sulatamise meetodi simuleerimisel saadud järelküttekalorifeeris kuluv energiahulk kuude lõikes on toodud alloleval joonisel (vt Joonis 3.14). Tavaolukorras järelküttekalorifeeris õhu soojendamiseks kulunud energia on toodud joonisel punasega. Sulatamisrežiimi ajal järelküttes kulunud energiahulk on tähistatud kollasega. Aeg, mil kondensaat soojustagastisse külmus ning seda seda perioodiliselt sulatati, moodustas kogu aastast 21,8%. Kogu aasta jooksul oli seade sulatusrežiimis 2% ehk 11,6% külmumisohuga ajast. Veebruaris, mil toimus 1/3 kõikidest külmumistest, oli soojustagasti sulatusrežiimis 8,5% ajast. Seade külmus aasta jooksul 597 korda ning ühe külmumise jooksul kulus sulatamiseks keskmiselt 4,29 kWh.

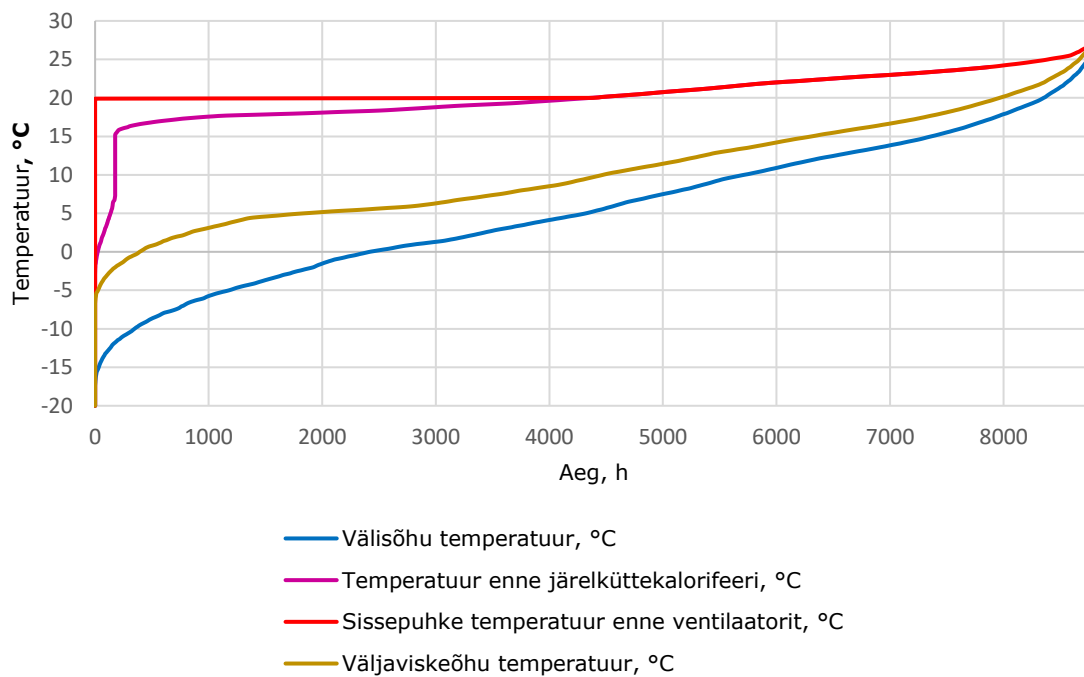


Joonis 3.14. Mõõdaviiguga sulatuse meetodi aastane energiahulk

Järelküttekalorifeeris kulus õhu järelsoojendamiseks energiaarvutuste baasaasta vältel kokku 10377,3 kWh energiat ning soojustagasti sulatamiseks kuluv energia moodustas sellest 24,7%. Soojustagastuse energia suhe kogu õhu soojendamiseks kuluvasse energiasse saadi 92,2%.

Jäätumine avaldas soojustagastis täiendavat mõju temperatuuri suhtarvule, mis 21,8% jooksul aastast, mil kondensaat tagastisse külmus, tõstis suhtarvu kuni 5 protsendipunkti võrra. Selle nähtuse tõttu hoiti tavarežiimi energiakulus aasta jooksul kokku 8,5% ning energiatagastuse suhtarv oli 0,46 protsendipunkti võrra aasta lõikes kõrgem võrreldes olukorraga, kui nähtus antud kujul ei toimiks ning suhtarv oleks konstantne.

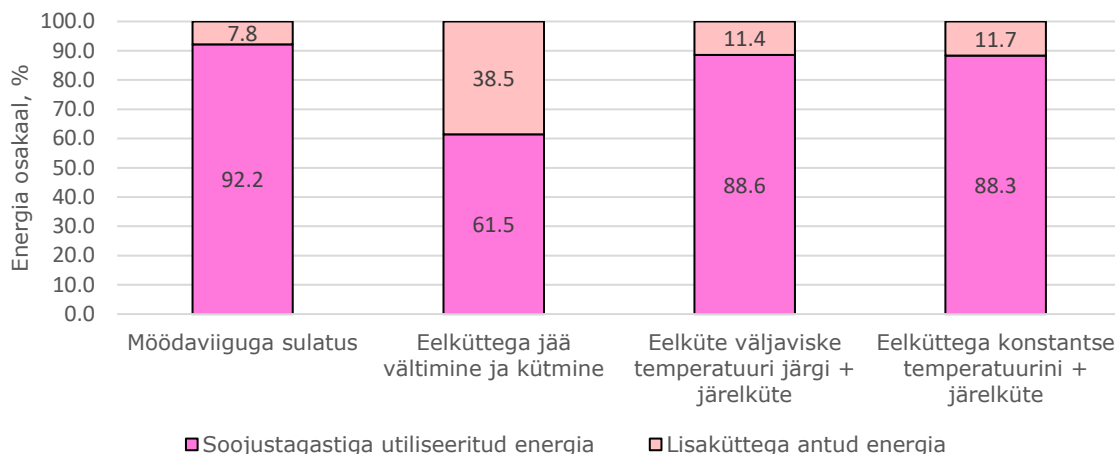
Soojustagasti möödaviiguga sulatamise meetodi aastane kestusgraafik on toodud alloleval joonisel (vt Joonis 3.15). Jäätumise mõju on näha graafiku vasakus osas lilla joone järsu muutusena, mil sulatamise ajal on õhu temperatuur enne järelküttekalorifeeri märkimisväärselt madalam tavaolukorrast. Sel hetkel jõuab järelküttekalorifeeri osaliselt läbi soojustagasti ja osaliselt möödaviigust tulnud õhu segu, mille temperatuur on alla 0°C.



Joonis 3.15. Möödaviiguga sulatuse süsteemi kestvusköver aasta vältel

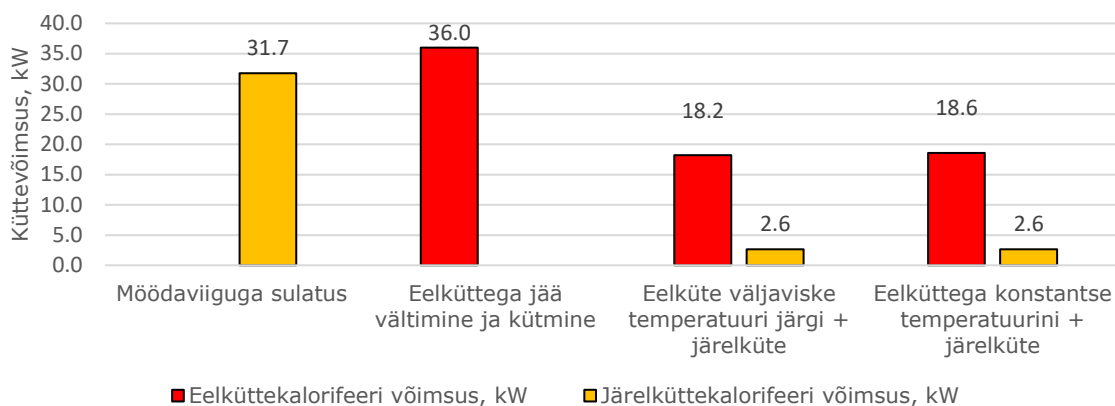
3.9 Meetodite võrdlus

Alloleval joonisel on toodud erinevate simuleeritud meetodite soojustagastiga säästetud ja antud lisaenergia osakaalud. Tumedama tooniga on toodud soojustagastiga tagastatava energia osakaal ning heledama tooniga on tähistatud lisaenergia osakaal aasta lõikes.



Joonis 3.16. Soojustagastiga säästetud ja lisatud energiade osakaalud baasaasta vältel

Simuleeritud meetodite vajalikud kalorifeeride võimsused on toodud alloleval joonisel. Kalorifeeride võimsused on arvatud vastavalt Estonian TRY baasaasta jooksul läbi viidud simulatsioonile. Oranži värviga on tähistatud järeküttekalorifeeri ning punasega eelküttekalorifeeri võimsused.



Joonis 3.17. Soojustagasti kalorifeeride võimsused

Erinevate plaatsoojustagastite külmumiskaitsete ja jäätumiste vältimiste lahenduste simuleerimisel selgus, et aastane soojustagastuse energia suhtarv on madalaim eelküttekalorifeeriga õhku eelsoojendades ning järelsoojendit mitte kasutades. Aastas saadi antud meetodil soojustagastiga keskmiselt 61,5% sissepuhkeõhu temperatuuri soojendamiseks kuluvast energiast. Veebruaris saadi soojustagastiga aga vaid 35% kogu vajaminevast soojusenergiast. Suure energiakulu põhjuseks on vajadus eelküttega tagada lõplik sissepuhkeõhu temperatuur peale tagastit. Selleks on külmal perioodil vaja välisõhk eelsoojendada kuni 10°C. Kuna aga tagastisse siseneb kõrge temperatuuriga õhk, siis ka väljaviskeõhu temperatuur ei saa kuigi madalale langeda ning väljaviskeõhus olev soojus jääb suures mahus utiliseerimata. Meetodi eeliseks on

jäätumisohtu täielik välistatus. Õhu eelsoojendamiseks on vaja võimsat eelküttekalorifeeri.

Õhu eelsoojendamine enne tagastit ning järelküttekalorifeeriga õhu sissepuhkeks piisavale temperatuurile soojendamine andis energiaefektiivsema tulemuse kui ainult eelküttekalorifeeri kasutamise meetod. Sissepuhkeõhu eelsoojendamine konstantse -2°C -ni andis aastaseks soojustagasti energiatagastuse suhtarvuks 88,3%. Meetodi muutis vähesel määral efektiivsemaks soojustagasti juhtimine väljaviske temperatuuri järgi ning soojustagastuse suhtarvuks saadi baasaasta vältel 88,6%. Eelküttekalorifeer tagas antud meetodil väljavisketemperatuuri vähemalt $4,6^{\circ}\text{C}$. Mõlema meetodi korral on jää tekke vältimine testitud parameetritel tagatud. Väljaviskeõhu temperatuuri järgi juhtimine tagab veidi kõrgema aastase energiatagastuse suhtarvu, aga kasutatava kalorifeeri juhtimise süsteemi on tehniliselt märkimisväärselt keerulisem koostada. Temperatuuride lävendid võiksid olla madalamad madalama väljatõmbeõhu suhtelise niiskuse korral.

Simuleeritud lahenduste võrdluses saadi kõige efektiivsem tulemus möödaviiguga soojustagasti sulatamise meetodil. Soojustagastuse aastaseks energia suhtarvuks saadi 92,2%. Külumise perioodil oli tänu kondenseerunud niiskuse jäätumisel vabanevale energiale temperatuuri suhtarv kuni 5 protsendipunkti tavaolukorrast kõrgem ning selle tõttu on soojustagastiga potentsiaalselt tagastav energiahulk suurem kui külumist vältides. Sulatusrežiimi kestus on keskmiselt 17,6 minutit ning selle aja jooksul tuleb osaliselt soojustagastist ning osaliselt möödaviigust tulnud külm õhk sissepuhkeks sobivale temperatuurile soojendada. Selleks on tarvis võimsat järelküttekalorifeeri.

3.10 Ettepanekud jäätumiskaitse projekteerimiseks

Efektiivsemate jäätumiskaitsete kasutamine võimaldab kokku hoida märkimisväärse koguse energiat. Testitud meetoditest on ebamõistlik kasutada ainult eelküttekalorifeeriga kütmist, millel on teiste meetoditega võrreldes madal energiatagastuse suhtarv. Külumise vältimiseks on eelküte mõistlik lahendus, aga lõpliku sissepuhke temperatuuri tagamise jaoks on see väga energiakulukas isegi soojema kliima korral. Eel- ja järelküttekalorifeeri ning möödaviiguga sulatamised on aga oma efektiivsuse poolest sarnased lahendused.

Eel- ja järelküttekalorifeeri kasutamisel tuleb energiaefektiivse lahenduse leidmiseks kütta välisõhku nii vähe kui võimalik, samas piisavalt, et jää teket täielikult vältida. Käesolevas töös juhiti eelküttekalorifeeri kahel erineval meetodil. Ühe puhul soojendati välisõhk konstantse temperatuurini, teise meetodi korral soojendati tagastisse sisenevat välisõhku piisavalt, et oleks tagatud piisavalt kõrge väljatõmbeõhu väärtus. Saadud tulemused olid lisaenergia tarbelt peaaegu võrdsed. Suurimaks erinevuseks oli juhtimissüsteemi keerukus. Väljaviske parameetrite alusel eelküttekalorifeeri juhtimine nõuab täpset parameetrite mõõtmist väikese ajaperioodi tagant ning kalorifeeri kiiret reageerimist.

Eelküttekalorifeeri juhtimisel võiks lisaks kasutatud meetoditele parameetrikaks olla ka soojustagasti väljaviskepoole rõhulang. Ajal, mil rõhulang suurenenud ei ole, juhitaks kalorifeeri seadeväärtuse alusel vastavalt soovitud meetodile. Rõhu tõustes jää kogunemisel tõstetaks kalorifeerist väljuva õhu temperatuuri seadeväärtust vastavalt loodud programmile. Antud meetodi puhul tuleb rõhu muutumisi täpsemalt jälgida ning jää väiksemagi tõenäolise tekke korral reageerida.

Eelküttekalorifeeri on tunduvalt keerulisem juhtida väljaviske parameetrite alusel kui õhku konstantse temperatuurini soojendada. Sisepuhke parameetrite muutus jõuab väljaviskeni ajalise nihkega ning seetõttu võib esineda ebatäpsusi eelküttekalorifeeris õhu soojendamisel üle- või alakompenseerimise näol. Kuna simulatsioonimudelid saadi meetodite võrdlemisel peaaegu identsed tulemused, siis on õhu konstantse temperatuurini soojendamine põhjendatud. Lisades veel osalise rõhulangu järgi juhtimise, võiks see olla efektiivne lahendus kasutuskulude mõttes. Soetuskuludena tuleb arvesse võtta, et tuleb tagada kahe kalorifeeri toimimine. Eelküttekalorifeeri puhul tuleb silmas pidada, et see soojendab õhku väga madalalt temperatuurilt ning külmumise vältimiseks tuleb soojuskandjana kasutada näiteks vesi-glükooli segu. Glükool vajab mõne aasta tagant vahetust ning lisaks tuleb selle kasutamiseks ehitada eraldi glükoolisõlm, mis omakorda tõstab soetuskulusid. Elektrikalorifeeriga külmumisprobleemi pole, aga selle kasutus on kallid elektri hinna tõttu.

Möödaviiku kasutades soojustagasti jääst sulatamise meetodil saadi käesolevas töös kõige suurem aastane soojustagastuse suhtarv. Meetod osutus efektiivseks, sest selles kasutatakse osaliselt ära jää tekkel vabanev energia. Seega on mõistlik efektiivse sulatuslahenduse korral lasta jää tagastisse koguneda ning seda perioodiliselt sulatada. Töös ei analüüsitud tagasti rõhulangu suurenemisest tulenevat täiendavat ventilaatori elektrikulu. Lisaks ei ole teada, kui kiirest soojustagasti ilma sulatusrežiimi lülitumata täielikult jäässe läheb ning missuguseks kujuneb temperatuuri suhtarv edasise jää

kogunemise korral. Seetõttu ei saa analüüsida, missugune võiks olla optimaalne rõhulangu seadeväärtus sulatusrežiimi alustamiseks. Edasiselt oleks mõistlik uurida, kas on võimalik sulatusrežiimide arvu vähendada kui rõhulangu seadeväärtust suurendada ning kas see oleks põhjendatud lähtudes temperatuuri suhtarvust ning ventilaatori elektrikulust. Möödaviiguga sulatuse korral on vajalik võimas järelküttekalorifeer, mis suudaks tagada piisava sissepuhkeõhu temperatuuri sulatusrežiimi ajal. Seda probleemi vähendaks soojustagasti sulatamine sektsioonide kaupa, mille korral langeb temperatuuri suhtarv sulatamise perioodil vähem kui möödaviiguga sulatades.

Mõõtmisandmetelt väljatõmbe ja väljaviske entalpia vahe kaudu arvatud energiakulu soojustagasti sulatamiseks, ehk minimaalne jää sulatamiseks kuluv energia, oli keskmiselt 9241 kJ ehk 2,57 kWh. Simultsiooniandmete analüüsist saadi ühele sulatustsüklile kuluvaks energiahulgaks 4,29 kWh. Seega oleks teoorias võimalik sulatamisele kuluvat energiat kokku hoida 40,1%. Selle saavutamiseks peaks suurem osakaal väljavisatavas õhus olevast energiast kuluma jää sulatuseks. Selleks tuleks täiendavalt katsetada sulatusrežiimi pikkuse, soojustagastit sissepuhke poolel ning möödaviiku läbivate õhuvoolu osakaalude muutmisega.

Kliimakambri testide tulemusena selgus, et kui jää kogunemisel väljatõmbeventilaator suurenevat rõhulangu ei kompenseeri, siis langeb väljatõmbeõhu vooluhulk märkimisväärselt ning sellega kaasnevalt langeb ka temperatuuri suhtarv. Seega on kriitiline, et väljatõmbele mõeldud ventilaator dimensioneeritaks sissepuhke omast võimsamana.

Kliimakambris teostatud uuringute andmetest võrreldi tavalise pinnaga ning entalpia tüüpi soojustagasti külmumise aega. Leiti, et entalpia tüüpi soojustagastis võttis täiendava 60 Pa jagu rõhulangu tekkimine 2,4 korda kauem aega kui niiskust mitteläbilaskva pinnaga tagastis. Kuna erinevate sulatussüsteemide rõhulangu seadeväärtused võivad olla antud 60 paskalist väiksemad ning jäätumine võib teistsuguste väljatõmbeõhu niiskuste juures olla teistsuguse intensiivsusega, ei saa täpset soojustagasti tüüpide külmumise aja erinevust käesoleva töö raames teada. Üldjoontes on jää kogunemise intensiivsuse vahe kahekordne.

Kuna töös ei uuritud kõiki kasutuses olevaid jäätumise vältimise ega jää sulatamise lahendusi, siis ei saa käesoleva töö alusel lõplike järeldusi kõige efektiivsema külmumisvastase meetodi valikuks teha.

KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös uuriti erinevate vastuvoolu plaatsoojustagastite külmumise kaitse lahendusi. Analüüsiti varasemalt teostatud kliimakambri uuringuid, kus võrreldi entalpia tüüpi ja niiskust mitteläbilaskva pinnaga soojustagasti külmumise erinevust. Suurem osa tööst baseerus aga Akadeemia tee 5a liginullenergia ühiselamu tsentraalse ventilatsioonisüsteemi SV-10 vastuvoolu plaatsoojustagasti andmetele.

Akadeemia tee 5a hoone ventilatsiooniseadme uurimiseks viidi 2020. aasta veebruaris läbi mõõtmine, mille tulemusi sojade välisõhu temperatuuride tõttu kasutada ei saanud. Varasemalt oli teostatud analoogne mõõtmine 2018. aasta veebruaris ning valdavalt tuginetakse töös nendele andmetele. Seadme mõõtmistulemuste analüüsil leitud seoste põhjal loodi simulatsiooniprogrammis IDA ICE soojustagasti jäätumist ennustav mudel ning lisaks kirjeldati seadme toimimist sulatusrežiimil. Saadud mudelit katsetati mõõteandmete baasil ning leiti, et see kirjeldab mõõdetud seadme toimimist piisavalt hästi.

Kui soojustagasti ning Akadeemia tee 5a hoone mudelid olid kalibreeritud vastavalt mõõtetulemustele, liiguti edasi külmumiskaitsete simuleerimise juurde. Esmalt simuleeriti eelküttekalorifeeriga kütmise meetodit. Kalorifeeriga soojendati õhk piisavalt kõrgele, et oleks välditud jää teke ning oleks tagatud piisavalt soe sissepuhkeõhu temperatuur. Antud meetodi aastaseks energiatagastuse suhtarvaks saadi 61,5%. Järelikult tagati soojustagastiga väljaviskeõhust kaks kolmandikku kogu ventilatsiooniõhu soojendamiseks vajaminevast energiast. Soojustagastust ei kasutatud külmadel kuudel maksimaalselt ära, sest sissepuhke temperatuuri saavutamiseks oli vaja õhk eelsoojendada kõrgele temperatuurile. Kõrge õhuvõtu temperatuuri tõttu ei saa väljatõmbeõhult rohkem energiat üle kanda. Seetõttu saadi temperatuuri suhtarvaks eelküttekalorifeeriga lisasoojendamist vajavatel kuudel väljaviske järgi keskmiselt vaid 0,32, mis näitab selgelt, et suur osa väljatõmbes olevast soojusenergiast jäetakse utiliseerimata.

Järgnevalt simuleeriti läbi eel- ja järelküttekalorifeeriga jää vältimise ja õhu järelsoojendamise meetod. Antud meetodit juhiti sissepuhke- kui ka väljaviskeõhu järgi. Esimesel meetodil soojendati soojustagastisse siseneva külm välisõhk temperatuurini -2°C . Seeläbi saavutati aastane energia suhtarv 88,3%. Meetod on oma olemuselt lihtsasti kasutatav, samas ei ole see madalate väljatõmbeõhu niiskuste korral põhjendatud, sest siis on jää tekke lävendtemperatuur madalam.

Eel- ja järelküttekalorifeeri juhtimisel väljaviske õhu järgi saadi aastaseks energiatagastuse suhtarvuks 88,6%. Eelküttekalorifeeri juhiti väljaviske temperatuuri seadeväärtuse alusel. Kalorifeer soojendas tagastisse sisenevat välisõhku piisavalt, et väljaviskeõhk ei langeks alla 4,6°C. Meetodi kasutusel hoiti kokku väike kogus energiat võrreldes välisõhu konstantse temperatuurini juhtimisega. Kuna sissepuhkeõhu ja väljaviskeõhu temperatuuride muutus toimub teineteise suhtes ajalise viivitusega, on juhtimisautomaatika koostamine keeruline ning külmumise täielikuks vältimiseks tuleb temperatuure jälgida ning korrigeerida väga lühikeste intervallide tagant.

Möödaviiguga sulatuse simuleerimise tulemusena saadi aastaseks energiatagastuse suhtarvuks 92,2%. Aeg, millal soojustagasti potentsiaalselt aasta jooskul külmuda sai, oli 21,8%. Sellest potentsiaalsest ajast oli seade sulatusrežiimis 11,6% ehk aastast moodustas sulatusrežiimi kestvus 2%. Kogu järelküttekalorifeeriga antud energiast kulus sulatusrežiimi ajal 24,7%. Sulatuse ajal kulus vastavalt simulatsioonandmetele keskmiselt 4,29 kWh energiat. Vastavalt mõõteandmetelt entalpia kaudu arvatud väärtusele, peaks sulatusrežiimi ajal kuluvat energiahulka teoorias saama sulatuse optimeerimisega 40% võrra vähendada.

Jäätumine soojustagastis avaldas täiendavat mõju temperatuuri suhtarvule. Kondensaadi tagastisse külmumise ajal, ehk 21,8% jooksul aastast, tõstis see temperatuuri suhtarvu kuni 5 protsendipunkti võrra ning tänu jäätumise mõjule oli aastane energiatagastuse suhtarv ligi 0,5 protsendipunkti võrra kõrgem kui ilma antud varjatud soojuse ülekande toimumiseta.

Töös võrreldi entalpiatüüpi ja tavalise pinnaga soojustagasti toimivust. Analüüsimisel selgus, et 40% väljatõmbe õhu suhtelise niiskuse ning -15°C välisõhu temperatuuri tingimustel koguneb entalpia soojustagastisse jää üle kahe korra aeglasemalt kui tavalise pinnaga soojustagastisse.

Eelmainitud arvesse võttes on energiasäästust lähtudes otstarbekas kasutada kõrge temperatuuri suhtarvuga entalpiatüüpi soojustagastit, milles jää tekke probleem on tavapinnaga tagastist märkimisväärselt väiksem. Külmumisprobleemi on kõige mõistlikum lahendada soojustagasti perioodilise sulatamisega. Sel moel on võimalik kasutada külmumisel vabanevat jäätumissoojust ning ei pea igal juhul jää teket vältima.

SUMMARY

In this master's thesis different counter-flow frost protection measures were analysed. Test results conducted in an environmental test chamber were analysed where enthalpy and regular heat exchangers were compared. The thesis was mainly based on the data of the counter-flow heat exchanger based in Akadeemia tee 5a nearly zero energy building.

To study the operation of the Akadeemia tee 5a ventilation aggregate measurements were conducted in 2020 February. The results were unusable because of high outdoors temperatures of that period. Earlier measurements of the same subject were conducted in the February of 2018 on which the thesis mainly relies. The data was used to create a freezing prediction model in the simulation program IDA ICE that also included a defrosting mode. The created model was tested with the measured data and it was concluded that the model works sufficiently.

Firstly, heating and frost prevention with the preheater was simulated. The outside air was preheated to a sufficient temperature where frost accumulation was prevented and the final inlet temperature could be achieved with the heat exchanger. Yearly returned energy to overall energy used for heating ratio of 61.5% was achieved. Therefore two thirds of necessary energy used throughout the year was obtained from the heat exchanger. Return heat could not be fully utilised because in order to achieve the sufficient inlet temperature, outside air was preheated to a high level. Therefore the temperature efficiency ratio calculated after exhaust air in the cold months was just 0.32. This is a clear sign that a large proportion of energy in the extract air is left unused.

Secondly, preheating and post heating were simulated. This method was controlled by two different approaches. In the first approach the cold outside air was preheated to -2°C . Then it entered the heat exchanger and after that it was heated to the desired inlet temperature. In this method a yearly energy recovery ratio of 88.3% was achieved. The method itself can easily be used, although when extract air moisture level is low, the threshold temperature of frost formation is lower and to conserve energy the outside air could be preheated to lower temperatures.

When controlling the preheater and postheater in the heat recovery system after exhaust temperature, a yearly energy recovery ratio of 88.6% was achieved. The preheater heated the used outside air temperature to a sufficient level, where exhaust

temperatures would not fall under 4.6°C. The method utilised more energy than the method characterized in the last segment. Because there is a small time delay in the change of inlet and extract air temperatures, it is difficult to compose a well operating software for the system. Also, to fully avoid frost formation, temperatures need to be monitored and adjusted in a small time step.

The bypass system that was analysed achieved a yearly energy recovery ratio of 92.2%. The time when frost formed in the heat exchanger made up 21.8% of the year. Of this potential time, the heat recovery device was in defrost mode for 9.2. Therefore it took up 2% of total time in a year. The defrost mode took up 24.7% of total extra heat used. According to the simulation data, one defrost cycle took up 4.29 kWh of heating energy. In theory, in accordance with the data measured, it was calculated that this value could be reduced by 40%.

Formation of ice had an additional impact of the temperature efficiency. During the freezing of condensate water, temperature efficiency was additional 5% higher than it usually was. Thanks to this phenomena the yearly heat recovery ratio was about 0.5% higher than without this transference of latent heat.

In the thesis, enthalpy and regular heat exchangers were also compared. It was discovered that under the conditions of 40% relative humidity and -15°C outside temperature, ice formation in the enthalpy heat exchanger took over two times longer compared to the regular exchanger.

Taken all the mentioned into consideration it can be said that it is reasonable to use an enthalpy heat exchanger with a high temperature efficiency. Enthalpy exchangers have a lower risk of freezing than regular exchangers and therefore are an optimal option. If frost still occurs it is wise to use defrosting with the bypassing method. In that way latent heat of frost formation can be utilised.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] T. Tark, „Ventilatsioonisüsteemide soojustagastite kasuteguritest,” [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.hevac.ee/wp-content/uploads/2016/04/Soojustagastite.pdf>. [Kasutatud 6 Veebruar 2020].
- [2] S. Anisimov, A. Jedlikowski ja D. Pandelidis, „Frost formation in the cross-flow plate heat exchanger for energy recovery,” 2015.
- [3] T. R. Nielsen, J. Rose ja J. Kragh, „Dynamic model of counter flow air to air heat exchanger for comfort ventilation with condensation and frost formation,” 2009.
- [4] M. R. Nasr, M. Fauchoux, R. W. Besant ja C. J. Simonson, „A review of frosting in air-to-air energy exchangers,” 2013.
- [5] "EVS-EN 13141-7:2010. Hoone ventilatsioon - Elamute ventilatsiooniseadmete ja -komponentide katsetamine - Osa 7: Ühepereelamutele mõeldud sundventilatsiooni süsteemide sissepuhke/ väljatõmbe seadmete (sh. soojustagastuse) katsetamine," Eesti Standardikeskus, 2010.
- [6] "Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiivi 2009/125/EÜ määrus nr 1253/2014," Euroopa Komisjon, 2014.
- [7] T.-A. Kõiv, Õhu konditsioneerimine I, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2014.
- [8] T. Kalamees, „Õppematerjal, Ehitusfüüsika II osa,” [Võrgumaterjal]. Available: https://www.ttu.ee/public/p/projektid/BuildEst/Ehitusfuusika_II_Osa_T_Kalamees.pdf. [Kasutatud 3 veebruar 2020].
- [9] S. Gendebien, A. Parthoens ja V. Lemort, „Investigation of a single room ventilation heat recovery exchanger under frosting conditions: Modeling, experimental validation and operating strategies evaluation,” 2019.
- [10] A. Jedlikowski ja S. Anisimov, „Analysis of the frost formation and freeze protection with bypass for cross-flow recuperators,” 2017.
- [11] M. R. Nasr, M. Kassai, G. Ge ja C. J. Simonson, „Evaluation of defrosting methods for air-to-air heat/energy exchangers on energy consumption of ventilation,” 2015.
- [12] R. Ahmed ja J. Appelhoff, „Frost-protection measures in energy recuperation with multiple counterflow heat exchangers,” *REHVA*, nr 5, 2013.
- [13] J. Kragh, J. Rose, T. R. Nielsen ja S. Svendsen, „New counter flow heat exchanger designed for ventilation systems in cold climates,” 2007.

- [14] A. Pacak, A. Jedlikowski, M. Karpuk ja S. Anisimov, „Analysis of power demand calculation for freeze prevention methods of counter-flow heat exchangers used in energy recovery from exhaust air,” 2019.
- [15] FläktGroup, „Recuterm® EQRM counterflow-plate heat exchanger,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.flaktgroup.com/api/v1/Documents/5a43de42-e838-4e09-ada1-a8cedd0f7f25>. [Kasutatud 16 veebruar 2020].
- [16] Swegon, „Description of the air handling unit GOLD,” [Võrgumaterjal]. Available: https://www.swegon.com/globalassets/_product-documents/air-handling-units/gold-version-f/general/_en/gold_f_description.pdf. [Kasutatud 16 veebruar 2020].
- [17] Swegon, „GOLD PX RECOFrost,” [Võrgumaterjal]. Available: http://www1.swegon.com/Global/PDFs/Corporate%20and%20campaign%20material/_en/Recofrost-2p.pdf. [Kasutatud 16 veebruar 2020].
- [18] Komfovent, „Smart multi-level frost prevention,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.komfovent.com/en/news/smart-multi-level-frost-prevention/>. [Kasutatud 16 veebruar 2020].
- [19] Systemair, „Topvex - Compact. Specification Data,” [Võrgumaterjal]. Available: https://www.systemair.com/fileadmin/user_upload/systemair-b2b/Support/Media_Center/Air_Handling_Units/E8259_Topvex_specification_data_en.pdf. [Kasutatud 15 veebruar 2020].
- [20] VTS, „VTS Ventus catalogue,” [Võrgumaterjal]. Available: https://vtsgroup.com/files/document-files/2494/EN_VENTUS%20catalogue_2019.pdf. [Kasutatud 15 veebruar 2020].
- [21] WOLF, „Air-handling unit AHU TE/AHUW TE Installation and maintenance instructions,” [Võrgumaterjal]. Available: https://www.wolf.eu/fileadmin/Wolf_Profi/Downloads_EN/Installation_and_operating_instructions/Air_handling_systems/AHU_TE/3064058_201610_Air-handling_unit_AHU_TE_AHUW_TE_Installation_and_maintenance_instructions.pdf. [Kasutatud 16 veebruar 2020].
- [22] VTS, „VENTUS Compact Air Handling Unit with polystyrene recuperator,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://vtsgroup.com/ventus-compact-air-handling-unit-with-polystyrene-recuperator-8484>. [Kasutatud 15 veebruar 2020].
- [23] Menerga, "Product information," erakogu, 2012.
- [24] "Akadeemia tee 5a korterelamu rekonstrueerimine. Küte ja ventilatsioon. Tööprojekt", Kliimakonsult OÜ töö nr 15020360/1541-2, 06.12.2016.

- [25] Systemair, "DVCompact 20 | Project: Akadeemia tee 5a | Plant no.: sv10," 2017.
- [26] "EVS-EN 16798-3:2017. Hoonete energiatõhusus. Hoonete ventilatsioon. Osa 3: Mitteeluhoonete ventilatsioon. Üldnõuded ventilatsiooni- ja ruumiõhu konditsioneerimise süsteemidele," Eesti Standardikeskus, 2018.