



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

EHITUSE JA ARHITEKTUURI INSTITUUT
LIGINULLENERGIAHOONETE UURIMISRÜHM

Üldhoidla kliimakontseptsioon Hiiumaa hoidla näitel

Uuringu aruanne

Tellija:
Muinsuskaitseamet

Koostajad:
vanemteadur Alo Mikola
ekspert Tuule Mall Parts
prof. Martin Thalfeldt
prof. Jarek Kurnitski

Tallinn 2024

Sisukord

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Sissejuhatus..... | 3 |
| 1.1 | Töö lähteülesanne..... | 3 |
| 1.2 | Üldhoidla sisekliima lähteparameetrid..... | 4 |
| 1.3 | Lähtedokumendid..... | 4 |
| 1.4 | Hoidlaruumide sisekliima tagamise alused..... | 4 |
| 1.5 | Üldhoidlate sisekliima parameetrid..... | 5 |
| 1.6 | Hoonete energiakasutuse ja sisekliima simulatsioonid..... | 6 |
| 2 | Simulatsioonide meetodid..... | 7 |
| 2.1 | Uurimisobjekt..... | 7 |
| 2.1.1 | Hoidla andmed..... | 7 |
| 2.2 | Simulatsiooni geometriamudel ja selle lähteparameetrid..... | 8 |
| 2.3 | Vabasoojused ja kasutusprofiilid..... | 9 |
| 2.4 | Õhutöötlusprotsesside simuleerimine..... | 12 |
| 2.4.1 | Simulatsioonimudeli ventilatsiooniseadme ülesehitus..... | 12 |
| 2.4.1 | Simulatsioonimudeli õhutöötlusseadme juhtalgoritm..... | 13 |
| 2.5 | Hoidla sisekliima CFD simulatsioonid..... | 14 |
| 3 | Tulemused..... | 16 |
| 3.1 | Üldhoidla õhutöötlussüsteemi kirjeldus ja juhtimis põhimõtted..... | 16 |
| 3.2 | Üldhoidla arvutuslikud kütte-, jahutus- ja niisutusvõimsused..... | 18 |
| 3.3 | Üldhoidla sisekliimaparameetrite tagamine..... | 19 |
| 3.3.1 | Baasmudeli simulatsioonitulemused..... | 19 |
| 3.3.1 | Kõigi uuritud mudeli versioonide tulemused..... | 22 |
| 3.4 | Hoone energiasimulatsioonid..... | 25 |
| 3.5 | Hoidla sisekliima CFD simulatsioonid..... | 27 |
| 4 | Kokkuvõte..... | 30 |
| 4.1 | Üldhoidlate optimaalse sisekliima tagamise lahenduse kirjeldus..... | 30 |
| 4.2 | Hiiumaa hoidla arvutuslikud kütte-, jahutus- ja niisutusvõimsused..... | 30 |
| 4.3 | Üldhoidla sisekliimaparameetrite tagamine..... | 30 |
| 4.4 | Hoone energiasimulatsioonid..... | 31 |
| 4.5 | Hoidla sisekliima CFD simulatsioonid..... | 31 |
| 4.6 | Projekteerimisjuhised..... | 32 |
| 4.6.1 | Õhutöötlemise protsessid ja seadmed..... | 32 |
| 4.6.2 | Passiivsete meetmete rakendamine: nõuded hoone tarinditele ja hoidlate paiknemisele..... | 33 |
| 4.6.3 | Üldhoidla ruumikaart..... | 34 |

1 Sissejuhatus

Käesoleva töö eesmärgiks on luua üldhoidla põhimõtteline lahendus, mis sisaldab projekteerimise lähteülesandesse lisatava ruumikaardi ja põhimõttelise sisekliimalahenduse koos skeemi ja juhtautomaatika kirjeldusega. Lisaks luuakse töö raames eraldi dokumendi kujul arvutusjuhend, mille abil kütte-, ventilatsiooni- ja jahutuse (KVJ) projekteerija või energiatõhususe spetsialist (tase 8) on võimeline teostama konkreetse hoidla simulatsioonarvutused IDA ICE tarkvaras.

Vastavalt kokkuleppele töö Tellijaga, kuuluvad antud uuringu koosseisu järgmised tööde etapid ja aruanded:

- Hoidla (ja konserveerimise tööruumi) ruumikaardis kajastavate sisekliimaparameetrite vahemike vaikeväärtused ja nende nõuetele vastavuse hindamise kirjeldus. Parameetrite lubatud muutumiskiirused ja kõrvalekalded.
- Üldhoidla välisõhu ventilatsiooni ja ringlusagregaatide põhimõttelise skeemi koostamine (hoidla sisekliimasüsteemi tehnoloogiline tüüpskeem) ja selle juhtimis põhimõtete kirjeldamine (lähteülesanne KVJ ja automaatika projekteerijatele).
- IDA ICE simulatsioonimudeli loomine Hiiumaa hoidlale ning sisekliima ja energiaarvutuste teostamine.
- Sisekliimasüsteemi IDA-ICE tarkvaraga modelleerimise juhiste koostamine KVJ projekteerijale/energiatõhususe spetsialistile, mille abil tase 8 projekteerija on võimeline eelpool kirjeldatud põhimõttelise lahenduse mudeli looma ja simulatsioonarvutused teostama.
- Aruande koostamine, mis sisaldab:
 - o sisend üldhoidla ja konserveerimise tööruumi ruumikaartidesse,
 - o üldhoidla põhimõtteline agregaatide skeem, juhtimis põhimõtted ja õhujaotuse põhimõtted,
 - o juhised arhitektile passiivsete meetmete rakendamiseks ja soovitud konserveerimislaborite teostamiseks lokaalse niisutusega,
 - o Hiiumaa hoidla simulatsiooni tulemused (temperatuuri ja niiskuse püsivus, energiakulu, dimensioneerimise võimsused).

1.1 Töö lähteülesanne

Antud tööga ennetatakse hoone projekteerimisel tekkivat probleemi, kus projektis lahendatakse hoidla üldventilatsiooniga ning lisatakse seletuskirja, et sisekliimaparameetrite tagamine toimub täppiskonditsioneeriga. Selline käsitlus jätab hoidla kliimasüsteemi sisuliselt lahendamata ja võib päädida väga energiamahuka lahendusega.

Võimalikult energiasäästliku ja selge tööpõhimõttega hoidla kliimasüsteem eeldab sisekliimaparameetrite lubatud vahemiku maksimaalset ärakasutamist. Praktika tähendab see seda, et erinevalt tavapärasest aastaringiselt samade sisekliima parameetrite seadeväärtuse tagamisest, tuleks sisekliimaparameetreid tagada vaid nende alumise või ülemise piiriväärtuse lähedases piirkonnas. Kuna hoidlad ei ole tööruumid (ei ole pideva viibimisega ruumid), siis viiakse välisõhu vooluhulk miinimumi ning kasutatakse ringlusõhku vastavalt vajadusele siseõhu niisutamiseks, soojendamiseks, jahutamiseks ja kuivatamiseks. On võimalik kasutada passiivseid lahendusi, valides hoidlale õige asukoha hoones ja sise- ning välispiirete soojustuse taseme ja kasutades ehitusmaterjale, mis võimaldavad niiskuse puhverdamist. Võrreldes aastaringiselt sama seadeväärtuse juures töötava täppiskonditsioneeriga, väheneb energiakulu aruandes kirjeldatva lahenduse korral ligikaudu 10 korda. Kirjeldatud lahenduste kasutamise eelduseks on, et projekteerija on teadlik ja saab aru välisõhu ventilatsiooni- ja ringlusagregaadi tööst ning on võimeline teostama hoidlale dünaamilise simulatsioonarvutuse. Täielikku tüüplahendust ei ole võimalik välja töötada, sest konkreetne hoidla võib koosneda ühest või mitmetest ruumidest, mis võivad paikneda erinevates hoone osades või korrustel ning milles võidakse hoiustada väga erinevaid esemeid. Mida rohkematest tsoonidest hoidla koosneb, seda keerulisem on sisekliimaparameetrite lubatud vahemike hoidmine. Projekteerija peab simulatsioonarvutuste tulemuste põhjal otsustama, kui mitmeks eraldi kliimasüsteemiga osaks hoidla jagatakse. Lisaks tuleb vastavalt simulatsioonide tulemustele dimensioneerida kliimasüsteemi komponendid ja valida süsteemi juhtimiseks optimaalsed temperatuuri ja niiskuse seadeväärtused, mis võivad arvestada erinevates ruumides tekkivaid kõrvalekaldeid ja sisaldada mõistlikku varu.

1.2 Üldhoidla sisekliima lähteparameetrid

Hoidlate sisekliimaparameetrid kirjeldatakse lubatud suhtelise niiskuse ja temperatuuri vahemike abil. Sõltuvalt säilitatavatest esemetest on üldhoidla suhtelise niiskuse alumine piir 35-40% ja ülemine piir 55-60%. Temperatuur ei tohi ületada 21 kraadi ning temperatuuril ei pruugi olla alumist piiri. Projekteerimisel kasutatavad lubatud vahemikud peab tellija konsultant täpsustama igale konkreetsele hoidlale eraldi, lähtudes säilikutest (dokument-paber, puit-, metall-, plastikesemed või olmeesemed – segamaterjalid, maal, skulptuur jne.).

Hoidla ruumikaardis peab olema kirjeldatud ka sisekliimaparameetrite nõuetele vastavuse hindamine. Üldjuhul peavad temperatuur ja suhteline niiskus püsima lubatud vahemikus vähemalt 95%-i jooksul ruumide kasutusajast ning hetkelisi ja väikesed kõrvalekaldeid aktsepteeritakse.

Üldhoidlate sisekliima piirväärtused on üldiselt järgmised:

- õhutemperatuur **vahemikus 0 – 21 °C**
- suhteline õhuniiskus vahemikus **35 – 60%**
- suhteline niiskuse varieerumine alla **10%-i ööpäevas**
- temperatuuri muutumise kiirus **alla 1°C-i** tunnis.

1.3 Lähtedokumendid

- Tallinna Tehnikaülikooli poolt 02.11.2023 tehtud hinnapakkumine
- Hiiumaa Hoidla KVJ põhiprojekt
- Hiiumaa Hoidla arhitektuurne põhiprojekt
- Meilivahetus Tellija ja uuringu meeskonna vahel

1.4 Hoidlaruumide sisekliima tagamise alused

Üldistatult võib enamlevinud stabiilseid kliimatingimusi vajavate hoidlate tüübid jagada kolme alamkategoriasse. Levinud hoidla tüübiks on toatemperatuuri lähedased hoidlad, kus temperatuur hoitakse vahemikus +15...21 °C ja suhteline niiskus 50% ümbruses. Teise hoidla tüübina saab eristada hoidlaid, kus temperatuuri ja suhtelise niiskuse seadeparameetreid on alandatud. Jahehoidlates hoitakse temperatuuri vahemikus +8...12 °C ning suhteline niiskus jääb 30-50% juurde. Kolmanda hoidla tüübina on võimalik eristada külmhoidlad. Nendes hoidlates tagatakse temperatuuri vahemikus -5...-20 °C ja suhteline niiskus peaks jääma 40% lähedusse. Täpsed hoistamise sisekeskkonna tingimused tuleb paika panna arvestades iga hoidla spetsiifikat eraldi. Kokkuvõtlikult saame teha järelduse, et käesolevas töös vaadeldav üldhoidla jääb lubatud sisetemperatuuri väärtuste osas suvisel perioodil toatemperatuuri lähedaste hoidlate kategooriasse ja talvisel perioodil jahehoidlate kategooriasse.

Kui tegu on hoidlatega, kus toimub ka pikaajaline töö tegemine, siis tuleb temperatuuritingimuste määramisel vaadelda eelkõige lisaks ka sisetemperatuuri mõju ruumides viibijatele. On teada, et enamasti on toatemperatuuri kahjulik mõju tühine, kuid liigkõrged või madalad temperatuurid võivad esile kutsuda säilikut kahjustumise. Temperatuuri mõju seisukohast on halvem olukord, kui esinevad madalamad temperatuurid. Kõrgematest temperatuuridest tingitud kahjulikud mõjud on seotud asjaoluga, et tavatingimustel sisaldavad orgaanilised ained suures koguses vett, mis temperatuuri tõustes osaliselt või täielikult dehüdratiseeruvad. Tulemusena saavad mõjutatud materjali mehhaanilised omadused, mistõttu toimuvad protsessid muudavad materjali hapramaks ja kergesti purunevaks. Temperatuuri tagamise seisukohast on vajalik leida sobilik kesktee temperatuurist tingitud ohutegurite ning energiatõhususe vahel.

Suhteline niiskus on otseselt seotud temperatuuriga, millest tulenevalt temperatuuri muutumine põhjustab ka suhtelise niiskuse muutumist. Õhusuhteline niiskus on väljendatav õhu tegeliku niiskussisalduse suhtena antud temperatuuril ja rõhul õhus olevasse maksimaalsesse niiskussisaldusse:

$$RH = \frac{x_{teg}}{x_{kül}} \times 100\%$$

kus RH – õhu suhteline niiskus, [%]

x_{teg} – õhu tegelik niiskussisaldus, [kg/kg_{kõ}]

$x_{kül}$ – küllastunud õhu niiskussisaldus samal temperatuuril, [kg/kg_{kõ}].

Hoidlates leiduvate materjalide puhul on oluline teada, kui kiiresti saavutab konkreetne materjal keskkonnas tasakaaluniiskuse. Tasakaaluniiskuse all mõistetakse niiskussisaldust antud keskkonna tingimustel, milles materjal ei loovuta niiskust ega omasta seda ruumi õhus leiduvat niiskust. Absorbeerimisvõime on erinevatel materjalidel väga erinev, kuid enamasti toimub protsess pika aja jooksul. Õhu suhtelise niiskuse muutumine suurtes piirides ning suure kiirusega põhjustab materjalide kahjustumist. On leitud, et lühikesed ja aeglaselt toimuvad suhtelise niiskuse kõikumised ei põhjusta materjalide säilitamise suhtes kahjulike protsesside teket. Erinevat tüüpi objektide hoiustamiseks tuleb tagada erinevaid suhtelise õhuniiskuse piire, kuid eelistatud peaksid olema suhtelise niiskuse väärtused lähemal alampiirile. Niiskusest tingitud muutuste mõju vähendamiseks tuleb soosida hoiustamislahendusi, kus objektid isoleeritakse keskkonnast.

Suhtelise õhuniiskusega seotud aspekt, mis hoidlatega seoses veel tähelepanu vajab, on hallitus. Õhus ja pindadel esineb alati hallitust põhjustavaid osakesi. Suhtelise niiskuse sobilikule tasemele kerkimisega tekivad soodsad tingimused hallituse vohamiseks. Hallituse tekke riskide vähendamiseks on soovitatav hoida suhteline niiskus alla 60% ning tagada õhuvahetus sellisel tasemel, et oleks välditud hallitusosakeste kuhjumine arhivaalidele. Hallituse tekke üheks mõjuriks on hallitusseente spooride esinemine ruumiõhus. Hoidlate konditsioneerimissüsteemides on soovituslik näha ette õhufiltreid, mis puhastavad ringlevat õhuvoolu ning vähendavad hallituseente spooride kontsentratsiooni ruumiõhus. Hallituse teket aitab vähendada ka arhivaalide paigutamine hajutatult, et oleks tagatud ühtlane õhu liikumine ruumis.

Hoidlate sisekliima kontrollimise vaatepunktist on oluline, et õhutemperatuur ja suhteline niiskus oleksid tagatud kindlates piirides. Hoidlates hoiustatav materjal on sageli tundlik suhtelise niiskuse kõikumise vastu, mistõttu on vajalik tagada stabiilne suhtelise niiskuse tase. Õhu suhtelise niiskuse taseme kontrollimine toimub peamiselt läbi konditsioneerimissüsteemide töö, kuid tähelepanu tuleks pöörata ka soojusniiskuslikele protsessidele, mis toimuvad ruumiõhu ja hoidlates paikneva hügrokoopse materjali vahel. Paberil ja teistel sarnaste omadustega materjalidel on suur niiskusmahutuvuslik potentsiaal. See tähendab, et materjalidel on võime siduda niiskust ümbritsevast kõrgema niiskussisaldusega keskkonnast. Vastupidine protsess leiab aset juhul, kui ruumi temperatuur ning suhteline niiskus on madalamad. Sellisel juhul annab hügrokoopne materjal ära endasse salvestunud niiskuse. Niiskusvahetust ümbritseva keskkonnaga tuntakse kui suhtelise niiskuse puhverefekti. Hügrokoopse massi niiskusmahutuvusega arvestamine on hoidlate energiatõhususe seisukohast oluline, kuna võimaldab kavandada konditsioneerimissüsteeme, kus on lubatud suurema piirkonnaga suhtelise niiskuse tagamine. Hügrotermaalne inertis väljendab võimet takistada temperatuuri ja suhtelise niiskuse muutuseid hoone ruumides. Sobilike soojusniiskuslike omadustega tarindikonstruktsioonide kasutamine ja hoidlas leiduva hügrokoopse materjali omaduste ning mahuga arvestamine loovad eeldused energiatõhusate hoidlahoonete kavandamiseks.

1.5 Üldhoidlate sisekliima parameetrid

Üldhoidlad on tavaliselt pideva inimkasutusega ruumid, kus sisekliimanõueteks on suhtelise niiskuse tagamine ja minimaalne ventilatsioon. Üldhoidlate puhul on üldjuhul tegemist kütmata ruumidega, kuna nii on võimalik olulisel määral energiat kokku hoida.

Üldhoidlate puhul on nõutav minimaalne välisõhuvahetus üks õhuvahetus kahe ööpäeva jooksul. Lisaks tuleks nii madala õhuvahetuse puhul Tellija soovil hinnata ka võimalikku VOC-de eraldumist säilikutest ja vajaduse korral kasutada aktiivsõefiltreid. Reeglina on vanade esemete keemilised emissioonid madalad ja nimetatud probleemi pole teaduskirjanduse baasil täheldatud.

Üldhoidlate suhteline niiskuse kõikumine ei või ületada 10%-i ööpäevas ja temperatuuri muutumise kiirus 1°C-i tunnis. Taotluslike sisekliimanõuete saavutamiseks tuleb kasutada lahendusi, mis tagavad sisekliimaparameetrite püsimise toodud vahemikes vähemalt 95%-il jooksul ruumide kasutusajast. Hetkelised ja väikesed kõrvalekalded on aksepteeritavad.

1.6 Hoonete energiakasutuse ja sisekliima simulatsioonid

Energiakasutuse ja sisekliima simulatsioonid hõlmavad mitmeid põhimõtteid, mida kasutatakse hoonete energiatarbimise ja sisekliima modelleerimiseks. Simulatsioonid arvestavad soojusülekanne põhimõtteid, sealhulgas juhtivust, konvektsiooni ja kiirgust. See aitab mõista, kuidas soojus levib hoonetes ja kuidas seda saab tõhusamalt kontrollida. Simulatsioonide koosseisu kuulub hoonete energiabilansi arvutamine, mis on oluline, et mõista, kuidas hoone tarbib ja toodab energiat. Simulatsioonide energiabilanss hõlmab nii kütte-, jahutus-, valgustus- kui ka ventilatsioonisüsteemide mõju. Materjalide soojusisolatsiooni hindamine on oluline energiakadude vähendamiseks. Simulatsioonid võimaldavad hinnata erinevate konstruktsioonimaterjalide ja isolatsioonimaterjalide mõju soojuskadudele. Samuti aitavad simulatsioonid hinnata loodusliku valguse sisenemist hoonesse ja kuidas seda saab optimeerida, vähendades seeläbi vajadust kunstliku valgustuse järele. Simulatsioonid võimaldavad ka hoone tehnosüsteemide automaatikasüsteemide hindamist, mis kohandavad hoone energiakasutust vastavalt reaalajas muutuvatele tingimustele. Need põhimõtted aitavad inseneridel ja arhitektidel kujundada ja optimeerida hooned nii, et need oleksid energiatarbivad ja pakuksid samal ajal optimaalset sisekliimat. Simulatsioonide abil saab teha enne ehituse või renoveerimise algust põhjalikke analüüse, et tagada hoone keskkonnasõbralikkus ja inimeste heaolu.

Siseõhu kvaliteet ja hea ventilatsioon osas aitavad simulatsioonid hinnata ventilatsioonisüsteemide tõhusust, sealhulgas õhu liikumist ja kvaliteeti. Sisekliima simulatsioonid hindavad temperatuuri, niiskust ja muude keskkonnatingimuste mõju inimeste mugavusele ja tervisele.

2 Simulatsioonide meetodid

Üldhoidla konditsioneerimissüsteemide energiatõhususe ja sisekliima parameetrite hindamiseks koostati dünaamilises energiasimulatsiooni tarkvaras IDA ICE 4.8 hoidla hoone geomeetiline mudel ja pandi kokku ka üldhoidla õhutõotlusseadmete lahendus. Koostatud õhutõotlusseadmete mudel seoti vastava hoidla geomeetrilise mudeliga ja seejärel liiguti edasi erinevate lähteparameetrite variatsioonidega simulatsioonide läbiviimisega. Tehtud energiasimulatsioonide tulemuste analüüsi käigus teostati lahenduste sisekliima parameetrite sobivuse ja energiatarbe analüüs, mille baasil formuleeriti töö peamised järeldused. Lisaks on üldhoidla temperatuurikihistumise hindamiseks kasutatud ka CFD mudeldamise meetodeid. Vastavad simulatsioonid teostati IDA ICE 5.0 kihistuva tsoonimudeli abil.

Kuna töös on teostatud erinevate mudeli lähteparameetrite mõju analüüs hoone sisekliimale ja energiatõhususele, siis on töö meetodite peatükis üldiselt välja toodud vaid baasmudeli lähteparameetrid. Töö tulemuste all oleva parameetrilise analüüsi puhul on iga simulatsiooni korral eraldi mainitud, millist konkreetset parameetrit vastava simulatsiooni puhul muudeti ning kuidas see mõjus hoone sisekliimale ja energiatõhususele. Kuna parameetrilise analüüsi puhul muudeti korruga vaid ühte simulatsiooni lähteparameetrit, siis ülejäänud vastava mudeli parameetrid vastavad omakorda jällegi baasmudeli puhul defineeritud lähtesuurustele.

2.1 Uurimisobjekt

Antud töö uurimisobjektiks on Hiiumaa Muuseumihoidla hoidlahoone ja töös teostatud simulatsioonimudel baseerub peamiselt peaprojekterija DAGOpen OÜ poolt teostatud Hiiumaa Muuseumihoidla hoidlahoone põhiprojekt. Viidatud hoone paikneb Kärkla linnas, Väike-Sadama tn 1c. Vastavalt arhitektuursele seletuskirjale rajatakse hoidlahoone kaasaegset arhitektuuri stiili järgides selliselt, et kavandatav hoone sobiks Kärkla linna väljakujunenud miljösse. Hoone on liigendatud kaheks osaks – viilkatusega hoidla osa ja lamekatusega kontoriosa.

Arhitektuurses põhiprojektis toodud hoidlahoone peamised tehnilised andmed on kajutatud Tabel 1.

Tabel 1. Hoidlahoone peamised tehnilised näitajad.

| | |
|--------------------|--|
| Otstarve | 12520 Hoidlad ja laohooned, välja arvatud põllumajanduslikud laohooned (12710) |
| Gabariitmõõtmed | 38,8 x 27,4 x 8,80 |
| Hoonealune pindala | 999,9 m ² (projektsiooni järgi) |
| Korruselisus | 1/2 - minimaalne/maksimaalne maapealsete korruste arv |
| Suletud netopind | 1171 m ² |
| Suletud brutopind | 1345 m ² |
| Kasulik pind | 1171 m ² |
| Kõetav pindala | 1171 m ² |
| Maht | 6023 m ³ |
| Inimeste arv | Töötajaid ca 8, külastajaid kuni 40 |
| Kasutusiga | 50 aastat |

Vastavalt Tellija korrigeeritud lähteülesandele muudetakse põhiprojektiga paika pandud ruumiprogrammi nii, et üldhoidla paikneb ühes kõrges ruumis ja selle kõetav pind on ligikaudu 400 m². Ülejäänud kontoriruumide uus pindala on ca 370 m². Mudeli koostamisel on kontoriosa pidala vähendatud telgede A-B ja 1-5 vahelise hooneosa võrra. Sellest muudatusest lähtuvalt saab põhiprojekti järgesest teljel B paiknevast siseseinast välissein.

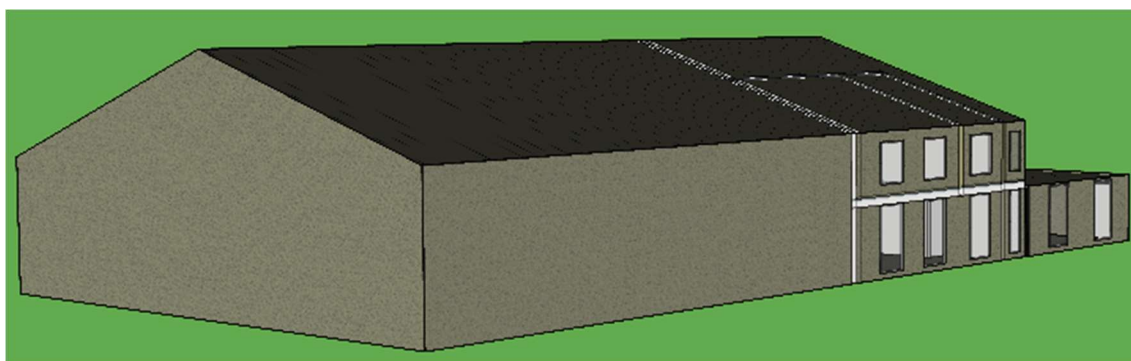
2.1.1 Hoidla andmed

Hoones paikneb üks üldhoidla tüüpi hoidla, kus on vajalik temperatuuri (0 – 21 °C) suhtelise niiskuse piirväärtuste (35–60%) tagamine. Vastavalt hoone põhiprojektile on nn „kõrge hoidla“ pindala 338,6 m² ja keskmine kõrgus 6,42 m.

Vastavalt Tellija korrigeeritud lähteülesandele muudetakse põhiprojektiga paika pandud ruumiprogrammi nii, et üldhoidla pindalaks kujuneb tegelikult ligikaudu 400 m². Tegu saab olema 4-8 m kõrge ruumiga, mis on osaliselt vahekorrustega liigendatud. Vahekorruse pindala on vahemikus 100-150 m² ja vahekorrus ei ole seinaga eraldatud ja moodustab üldhoidla õhuruumiga ühise mahu. Ladustamine hakkab toimuma kõrgetel kompaktriitel, mis tähendab, et ettenähtud sisekliima parameetrid tuleb tagada sisuliselt kogu ruumi kõrguses.

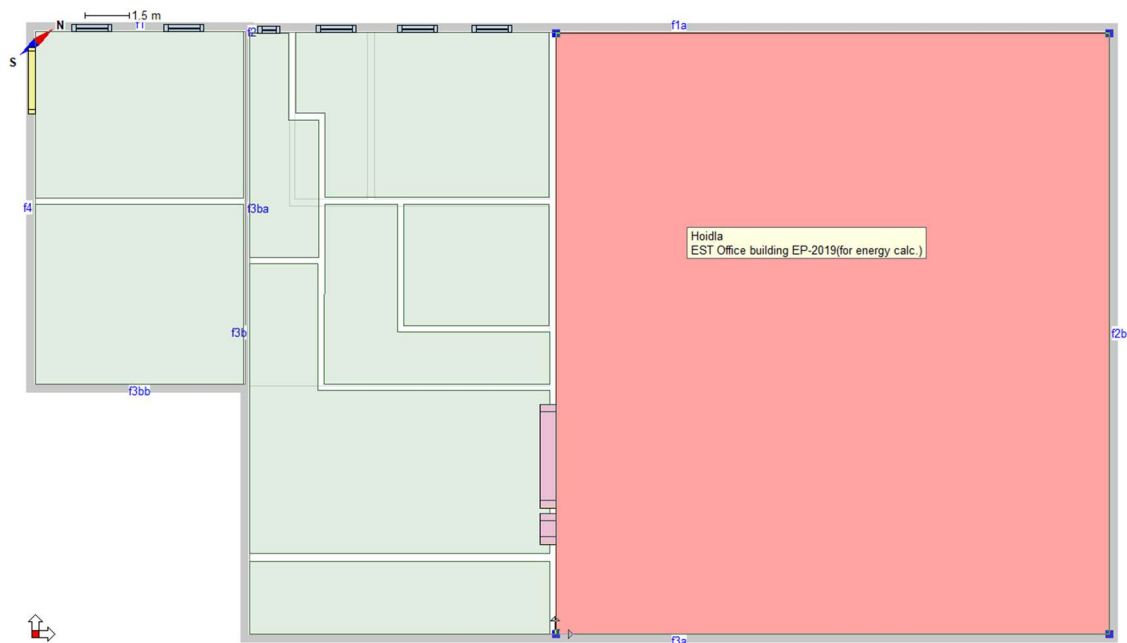
2.2 Simulatsiooni geometriamudel ja selle lähteparameetrid

Hoidlate energiasimulatsioonide läbiviimiseks ning võimalike konditsioneerimisskeemide toimimise hindamiseks on Hiiumaa Muuseumihoidla hoone osadest loodud lihtsustatud geomeetiline mudel (vt Joonis 1). Simulatsioonides kasutatud hoidlaruum paikneb põhiprojekti arhitektuurseid alusplaane arvesse võttes telgede B-F ja 3-6 vahelisel alal. Hoidla katuse kõrgus ja kuju vastab põhiprojektis toodule. Tüüphoidla simulatsiooni mudel on defineeritud ühe arvutustsoonina, mille pindala mudelis on 386,4 m² (2498 m³). Tüüphoidla baasmudeli piirdetarindid on määratud vastavalt Tabel 1 esitatud suurustele. Inimestest tulenev vabasoojus ja niiskuseraldised on arvesse võetud ainult hoone kontoribloki osas. Simuleerimiseks vajalikud vabasoojused ning kasutusprofiilid on esitatud pt 2.3.



Joonis 1. Simuleeritava tüüphoidla 3D kujutis simulatsiooni tarkvaras.

Hoidlaid ümbritsevate alade ventilatsiooni õhuvooluhulga väärtuste määramisel on kasutatud dokumendis „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“ kontorihoonele määratud suuruseid. Hoidlate ja muude hoone ruumide plaaniline paiknemine ja tsoonideks jaotus on kujutatud Joonis 2. Hoone tarindi tüüpide kirjeldamisel mudelis on üldiselt lähtutud DAGOpen OÜ poolt teostatud põhiprojektis esitatud parameetritest. Samas on osasid tarindi tüüpe võrreldes põhiprojektis toodule ka mõningal määral muudetud. Simulatsiooni baasmudelis kasutatud tarinditüübid ja omadused on välja toodud Tabel 2.



Joonis 2. Üldhoidla simulatsioonimudel.

Tabel 2. Geomeetria mudelis kasutatud piirdetarindite omadused.

| Piirdetarindi tüüp | Soojusläbivus (U-arv), W/(m ² *K) |
|---|---|
| Välissein | 0,10 |
| Hoidla sisesein | 0,28 |
| Põrand pinnasel | 0,10 |
| Katuslagi | 0,08 |
| Välis- ja siseuksed (tulmeruumi ja hoidla vaheline uks) | 1,0 |
| Aknad | 0,83 |

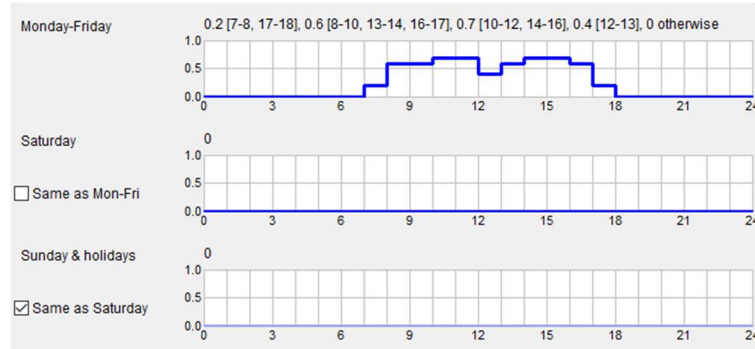
2.3 Vabasoojused ja kasutusprofiilid

Dünaamiliste energiasimulatsioonide läbi viimiseks on vajalik simulatsioonimudelis ära defineerida toonide vabasoojused ning nende kasutusprofiilid. Kontoribloki ja selles paiknevate hoidlaruumide valgustusest, seadmetest ja inimestest tulenevate vabasoojusede määramise aluseks on võetud määrus “Hoonete energiatõhususe arvutamise meetodika” ning kasutatud arvvaartused on esitatud Tabel 3. Hoidlate simulatsioonimudelite vabasoojusede ja kasutusprofiilide loomisel on lähtutud sellest, et üldhoidlas üldjuhul inimesi ei viibi ja ka vabasoojused nii valgustusest kui ka seadmetest on marginaalsed. Ülejäänud hoones paiknevate kontori ja laoruumide suhtes on tehtud simulatsioonimudelis lihtsustus ning nende vabasoojused ja kasutusprofiilid on defineeritud vastavalt kontorihoonetele ettenähtud suurustele.

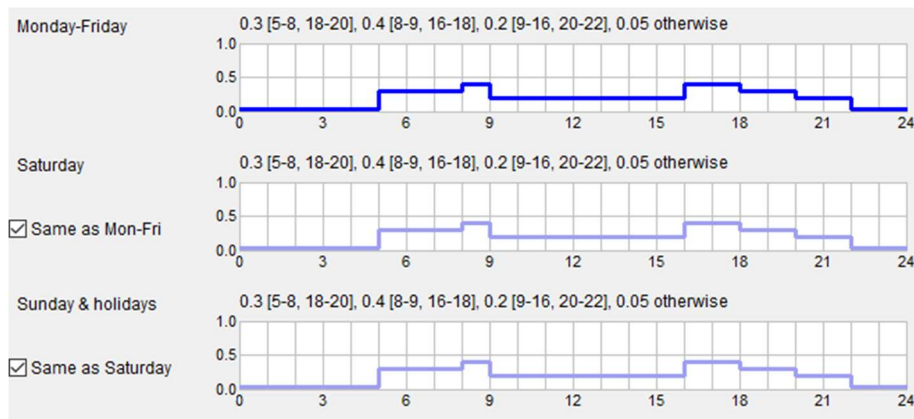
Tabel 3. Dünaamilises energiasimulatsioonis kasutatud vabasoojused.

| Hoone kasutusotstarve | Kasutusaste | Valgustus | Seadmed | Inimesed | |
|----------------------------|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | [-] | [W/m ²] | [W/m ²] | [W/m ²] | [m ² /W] |
| Kontorihoone | 0,55 | 10 | 12 | 5 | 17 |
| Üldhoidla | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muud hoidlad kontoriplakis | 0,2 | 10 | 0 | 0 | 0 |

Kasutusprofiile kasutatakse mudelis inimeste, valgustuse ja seadmete tegeliku kasutamise kirjeldamiseks. Kasutusprofiiliga esitatakse ruumi vabasoojuste soojuseralduste kasutusaste suhtena võimalikku maksimaalsesse soojuseraldusse. Kontorihoone kasutusprofiil on esitatud ühtse graafikuna kõigile kolmele simulatsiooni tarkvaras defineeritud vabasoojuse liigile. Kontoriplokis paiknevate laopindade puhul on arvestatud ainult valgustuse vabasoojusega ja seega on ka kasutusprofiil anutud ainult valgustuse komponendile. Kasutatud kasutusprofiilide graafikud on välja toodud Joonis 3 ja Joonis 4.

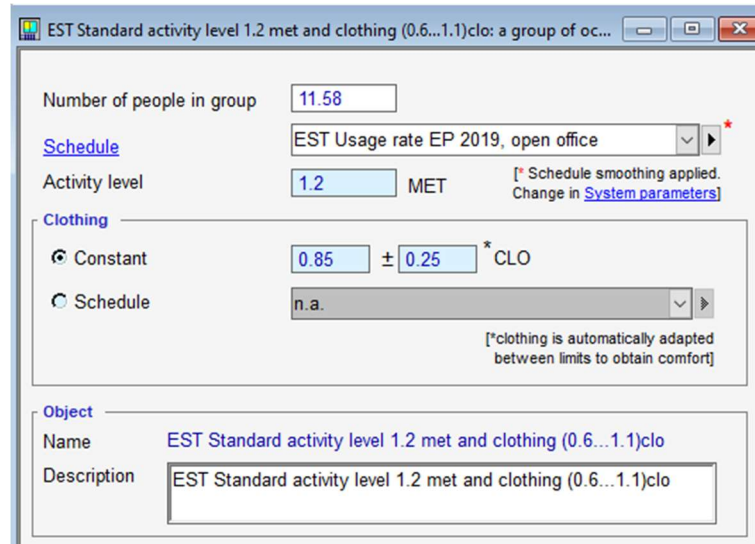


Joonis 3. Kontorihoone seadmete, valgustuse ja inimeste kohalolekuprofiil.



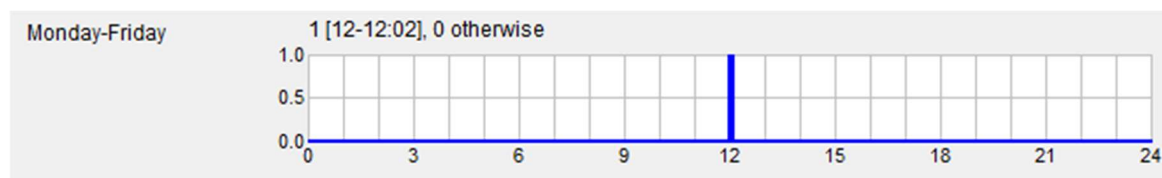
Joonis 4. Simulatsioonis kasutatud muude kontoriblokis paiknevate hoidlaruumide valgustuse kasutusprofiil.

Joonis 5 kirjeldab inimese soojuseraldusühiku defineerimist simulatsiooni mudelis, milleks on võetud 1,5 met ning riietuse takistuseks on konstantselt määratud 1,1 clo.



Joonis 5. Simulatsioonimudelil defineeritud inimeste vabasoojus.

Vastavalt Tellija lähteülesandele arvestatakse simulatsioonide teostamisel ka üldhoidla ja tulmeruumi vahelise väikese siseukse avamise mõjuga. Baasmudeli koostamisel on arvestatud, et siseuks on avatud tööpäevadel kell 12:00 – 12:02. Viidatud siseukse avatuse graafik on näidatud Joonis 6.



Joonis 6. Üldhoidla ja tulmeruumi vahelise väikese siseukse avatus.

Infiltratsiooni õhuvooluhulk on arvestatud konstandina. Õhulekke õhuvooluhulga suurus arvutati vastavalt „Hoonete energiatõhususe arvutamise meetodika“ toodud arvutusalluste:

$$q_i = \frac{q_{50}}{3,6 \times x} \times A$$

kus q_i – aasta keskmine infiltratsiooni õhuvooluhulk, [l/s].
 q_{50} – hoone välispiirde keskmine õhulekkearv, [m³/(h·m²)].
 x – tegur, mis on ühekorruselisele hoonele 35, kahekorruselisele hoonele 24 ning kolme- ja neljakorruselisele hoonele 20, viie- ja enamakorruselisele hoonele 15, kusjuures korruse kõrgusena on arvestatud 3 meetrit ja korruselise määramisel arvestatakse üksnes maapealsete korrustega
 A – hoone välispiirde sisepindala, [m²].

Baasmudeli lähteparemeetriks õhulekkearvu leidmisel kasutati piirete keskmist õhulekkearvu väärtust $q_{50}=1,0 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ ning korruselisust iseloomustavaks parameetriks võeti $x=24$. Töö lähteandmete parameetrilise analüüsi käigus on eraldi välja toodud ka õhulekkearvu varieerumise mõju hoidla energiatarbele ja sisekliimale.

Baasmudelil on üldhoidla õhuvahetuseks ringlusõhuga võetud 0,5 l/(s·m²). Kuna hoidla pindala on kokku 386,4 m², siis on nii sissepuhke kui ka väljatõmbe ringlusõhu vooluhulgaks kokku 193 l/s. Välisõhu vooluhulk on leitud arvestusega, et üldhoidla õhuvahetus peaks olema vähemalt 1 kord 2 ööpäeva jooksul. Sellest lähtuvalt on hoidla välisõhu õhuvooluhulk 15 l/s. Baasmudelil on agregaadil välisõhu osal kasutuses hügrokoopne rootorsoojutagasti, mille temperatuuri suhtarvaks on arvestatud 0,8, niiskustagastuse suhtarvaks samuti 0,8 ja soojustagasti jäätumise vältimiseks ei lasta heitõhu temperatuuril langeda alla -5 °C.

Baasmudelil moodustavad soojuskaod läbi külmasildade 11% välispiirete kogusoojuskadudest. Läbiviidud aastaste energiasimulatsioonide aluseks on Eesti kliima andmetega referentsaasta Estonian TRY 1990-2020 (koostatud 2023. aastal). Töös ei ole simuleeritud hoone sooja tarbevee tarbimist, kuna see ei mõjuta otseselt hoidlaruumide energiatarvet. Vastavalt Hiiumaa hoidla KJV projektlahendusele on hoone soojusvarustusüsteemina ette nähtud avatud puurkaevudega maasoojuspump. Sellest lahendusest lähtuvalt on töös teostatud elektrienergia tarbimise hindamisel kasutatud soojuspumba aasta keskmist soojustegurit (COP) 4 ja külmamasina (eeldatavalt sama maasoojuspumba reverseerimise olukorras) jahutustegurit (EER) 3,5.

Jahutuspatarei järgne minimaalne suvine ringlusõhu temperatuur on baasmudeli simulatsioone puhul võetud 13 °C. Temperatuuri pärast jahutuspatareid juhitakse vajaduspõhiselt arvestades samaaegselt nii kuivatus kui ka hoidla jahutusvajadusega. Küttekalorifeeri puhul on arvestatud maksimaalseks sissepuhkeõhu temperatuuriks hoidlasse 30 °C. Küttekalorifeeri juhitakse arvestades samaaegselt nii maksimaalse ruumiõhu suhtelise niiskuse taseme kui ka minimaalse sisetemperatuuriga. Aurniisuti puhul on arvestatud veeauru temperatuuriks 100 °C ja sissepuhkeõhu suhteline niiskus pärast niisutit on maksimaalselt 60%.

Mudeldamisel on kasutatud ainult ringlusõhu baasil õhutöötlusprotsesse, kus õhu kuivatamine toimub külmal perioodil sisetemperatuuri tõstmisega küttekalorifeeris. Soojal perioodil jahutatakse ringlusõhku esmalt jahutusparareis, mistõttu kondenseerub õhust niiskust välja, ja seejärel järelsoojendatakse jahutatud õhku vajadusel küttekalorifeeris. Lisaks kasutatakse külmal perioodil ringlusõhu niisutamist aurniisutiga. Kuna nii varasemalt teostatud uuringud kui ka antud töö raames tehtud simulatsioonid näitavad, et kirjeldatud lahenduse abil on võimalik soovitud sisekliima parameetrid energiaoptimaalselt tagada, siis ei ole töö raames teisi võimalikke õhutöötlemise lahendusi vaadeldud (eelkõige rootorkuivatiga suvine õhu kuivatamine, mis on vajalik madalama temperatuuriga hoidlates). Näiteks rootorkuivati kasutamisel tuleks hoidla õhutöötlussüsteemi nii jahutuspatarei kui ka küttekalorifeer igal juhul lisada (rootorkuivati puhul lisaks veel ka regeneratsiooniõhu soojendamiseks mõeldud kalorifeer). Seega ei pea antud uuringu koostajad üldhoidlate lahenduse puhul rootorkuivati kasutamist kuluoptimaalseks lahenduseks.

2.4 Õhutöötlusprotsesside simuleerimine

2.4.1 Simulatsioonimudeli ventilatsiooniseadme ülesehitus

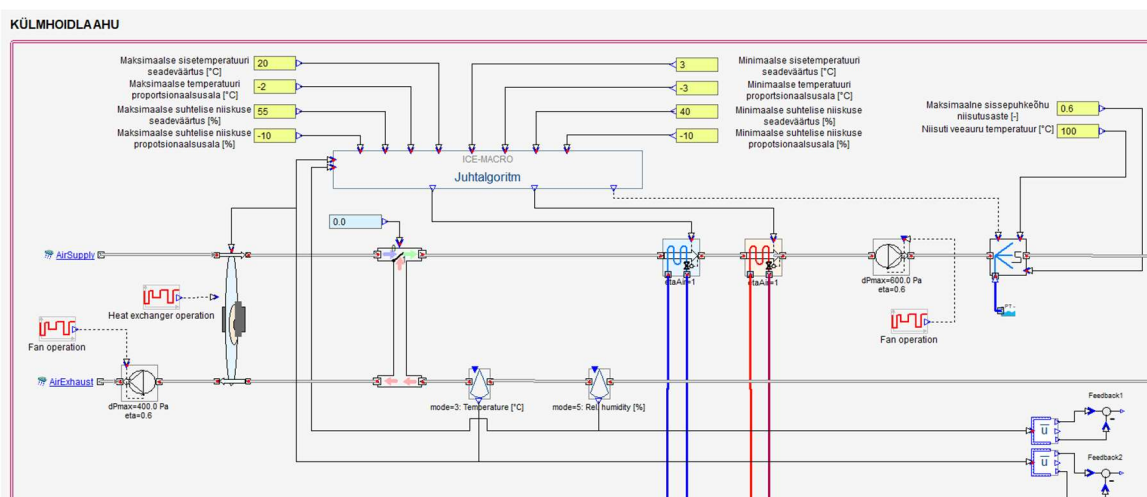
Erinevate tehniliste lahendustega hoidlate konditsioneerimissüsteemide dünaamiliste energiasimulatsioonide läbiviimiseks on üldhoidla jaoks valitud eraldi ventilatsioonisüsteem (AHU). Selle ventilatsioonisüsteemi näol on praktikas tegu ringlusõhu baasil konditsioneerimissüsteemiga, mis õhutöötlusprotsesside osas koosneb õhu soojendamisest, jahutamisest, niisutamisest ja kuivatamisest. Lisaks sisaldab hoidla konditsioneerimissüsteem ka retsirkulatsioonisektsiooni, kus väljatõmbeõhk segatakse teatud koguse välisõhuga ja välisõhu osas kasutatakse ka soojustagastit, et väljaviskeõhus sisalduv soojus ja niiskus uuesti värsele õhule üle kanda. Konditsioneerimissüsteemid on valitud põhimõttel, et simulatsioonide tulemustest oleks võimalik teha üldistusi enim kasutatust leidvate üldhoidlate sisekliima tagamise ja energiakasutuse kohta.

Baasmudeli lahenduseks on osalise tagastusõhuga konditsioneerimissüsteem. Seadme välisõhuvahetuse sektsioonis on energiatõhususe suurendamiseks ning niiskus- ja külmatagastuseks ette nähtud rootorsoojustagasti. Soovitud sisekliima parameetrite tagamiseks on seadme ringlusosal tarvilikud aurniisuti, jahutuskalorifeer ja küttekalorifeer. Jahutuspatareil on seadmes kaks funktsiooni. Esiteks on jahutuspatarei vajalik temperatuuri ülemise nõude tagamiseks. Teiseks jahutuspatarei eesmärgiks on õhu kuivatamine suvisel perioodil. Süsteemi erinevate komponentide juhtimine on lahendatud lähtuvalt väljatõmbe õhus paiknevate temperatuuri ja suhtelise niiskuse andurite näitudest. Olgu täpsustuseks mainitud, et IDA ICE seguneva tsoonimudeli kasutamisel on modelleeritud tsooni kõigis õhukeskkonnas paiknevates ruumipunktides samad temperatuuri ja suhtelise niiskuse parameetrid. Kuna antud mudeli puhul tsoonis kihistumist ei toimu, siis saame seguneva mudeli korral juhtimisalgoritmiga kasutada väljatõmbeõhu temperatuuri ja suhtelist niiskust. Kihistuva tsoonimudeliga teostatud mudeldamine näitab, et praktikas ei või õhutöötlemisseadmete juhtimist väljatõmbeõhus paiknevate andurite alusel korraldada, kuna kõrge sissepuhketemperatuuri korral on hoidlaruumi ülemine osa oluliselt kõrgema temperatuuriga kui alumine osa.

Modelleeritava seadme juhtimisloogika on koostatud lähtuvalt hoidla tüübile seatud suhtelise niiskuse ja temperatuuri piirväärtustest. Juhtimiseks kasutatavad seadesuurused on valitud lähtuvalt konditsioneerimisseadmete komponentide töötamise loogikast ja paiknemisest süsteemi konfiguratsioonis. Seadme simulatsiooni tarkvaras loodud kujutis on välja toodud Joonis 7.

Soojustagasti juhtimine on skeemi puhul korraldatud lähtuvalt hoidla väljatõmbeõhutemperatuurist nii, et soojustagasti järgi ei tõuseks temperatuur üle hoidla väljatõmbeõhu temperatuuri. Antud juhtimisalgoritm võimaldab soojustagasti töötamist vajaduspõhiselt.

Simulatsioonimudel on kasutatud välisõhu segamiseks ruumi väljatõmbesüsteemi retsirkulatsioonisektsiooni. Praktikas pole retsirkulatsioonisektsiooni kasutamine antud süsteemis üldiselt mõistlik ja välisõhu tarvis on vajalik kasutada eraldi soojustagastiga ventilatsiooniseadet. Sellisel juhul tuleb viidatud seadme sissepuhketorustik ühendada õhukanaliga pärast retsirkulatsiooniseadet. Simulatsiooni teostamisel aitab aga Joonis 7 toodud retsirkulatsioonisektsiooni ja värsket õhu segamisega lahendus lihtsustada mudeldamise protsessi ja sellest lähtuvalt pole vajalik eraldi värsket õhu ventilatsiooniseadme mudelisse lisada. Retsirkulatsioonisektsioonis on võimalik värsket õhu vooluhulk määratleda parameetri "MFRESHMIN" väärtuse muutmise abil. Baasmudel on arvestatud, et õhk vahetub hoidlas kahe päeva jooksul ehk värsket õhu vooluhulgaks on arvatud 15 l/s.



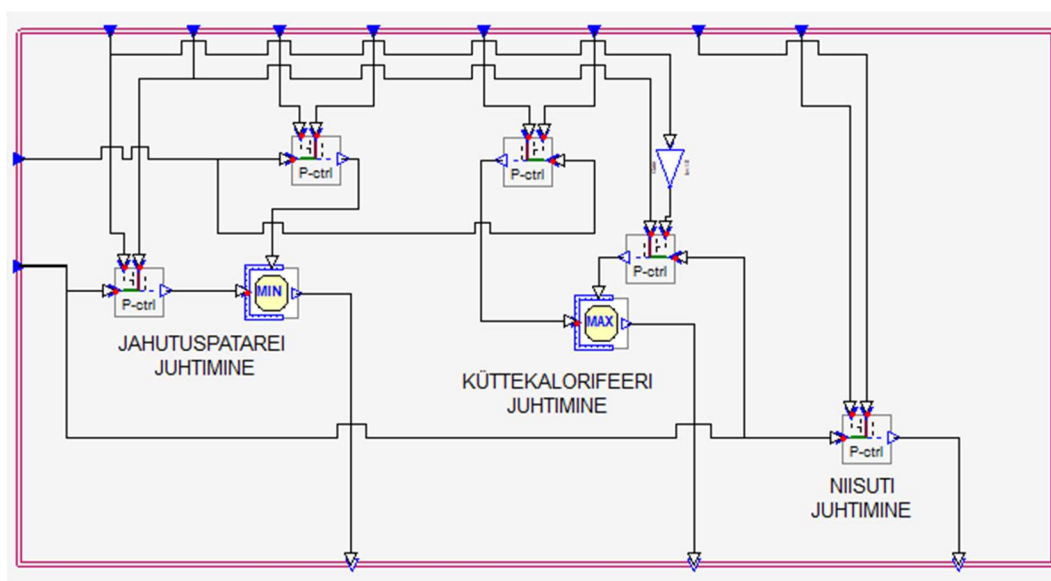
Joonis 7. Üldhoidla konditsioneerimissüsteemi mudel simulatsiooni tarkvaras.

2.4.1 Simulatsioonimudeli õhutõotlusseadme juhtalgoritm

Õhutõotlussüsteemi juhtimine on selguse mõttes lahendatud eraldi IDA ICE makro abil (vt Joonis 8). Jahutuspatarei juhtimine toimib väljatõmbeõhu suhtelise niiskuse väärtuse alusel. Väljatõmbeõhu suhtelise niiskuse mõõdetud väärtus saadetakse jahutuse juhtimistüübiga proportsionaalsesse regulaatorisse, kus võrreldakse mõõdetud suurust seadesuurusega. Joonis 7 võime näha, et baasmudeli maksimaalse suhtelise niiskuse seadeväärtuseks on valitud 55% ja proportsionaalsusala on võetud 10%. Selleks, et suveperioodil ei ületaks hoidla temperatuur kindlasti 21 °C, on jahutuspatarei juhtimiseks süsteemi lisatud ka teine proportsionaalne regulaator, mis suurendab jahutuspatarei jahutusvõimsust juhul kui kuivatusvajadus puudub või kui kuivatusvajadus on minimaalne. Viidatud juhtimislahenduse puhul mõõdetakse ruumi väljatõmbeõhu temperatuuri, mida võrreldakse regulaatoris seadesuuruseks oleva väärtusega (baasmudel on 20 °C ja proportsionaalsusala 1 °C) ja vastavalt sellele annab regulaator väljundsignaalina vajaliku jahutuspatarei järgse temperatuuri. Nii maksimaalse suhtelise niiskuse kui ka temperatuuri regulaatorite puhul on proportsionaalse kontrolleri väljundsignaalide puhul määratletud temperatuuri ülemiseks väärtuseks 21 °C ja alumiseks väärtuseks 13 °C. Olgu mainitud, et 13 °C jahutuspatarei järgse temperatuuri puhul kondenseerub väljatõmbeõhust välja piisavalt niiskust, et 21 °C väljatõmbeõhu suhteline niiskus jääks alla 60%. Juhtalgoritmi järgmisel tasemel võrreldakse omavahel maksimaalse suhtelise niiskuse ja temperatuuri regulaatorite väljundväärtuseid ja jahutuspatarei juhtimiseks kasutatakse nendest väärtustest väiksemat suurust.

Küttekalorifeeri juhtalgoritm on ära kirjeldatud Joonis 8. Esimeses etapis mõõdetakse ruumi väljatõmbeõhu suhtelist niiskust ja võrreldakse seda proportsionaalses kontrolleris Joonis 7 toodud minimaalse suhtelise niiskuse seadeväärtusega. Juhul, kui mõõdetud suhtelise niiskuse tase hoidlas on liiga kõrge, siis tõstetakse viidatud regulaatori abil hoidla sisetemperatuuri, mis omakorda toob kaasa suhtelise niiskuse taseme languse. Baasmudeli minimaalse suhtelise niiskuse seadeväärtuseks on valitud 40% ja proportsionaalsuslaks on valitud 10%. Selleks, et talveperioodil ei langeks hoidla temperatuur näiteks alla 3 °C, on küttekalorifeeri juhtimiseks süsteemi lisatud ka teine proportsionaalne regulaator, mis suurendab küttekalorifeeri küttevõimsust juhul, kui suhtelise niiskuse mõõdetud taseme alusel pole sissepuhkeõhku vajalik kütta. Selle regulaatori seadeväärtus on baasmudelis 3 °C ja proportsionaalsusala 6 °C. Nii minimaalse suhtelise niiskuse kui ka temperatuuri regulaatorite puhul on proportsionaalse kontrolleri väljundsignaalide puhul määratletud temperatuuri ülemiseks väärtuseks 30 °C ja alumiseks väärtuseks 5 °C. Juhtalgoritmi järgmisel tasemel võrreldakse omavahel minimaalse suhtelise niiskuse ja temperatuuri regulaatorite väljundsuuruseid ja küttekalorifeeri juhtimiseks kasutatakse nendest väärtustest suurimat väljundit.

Auru niisuti juhtimisalgoritmi puhul mõõdetakse väljatõmbeõhu suhtelist niiskust ja võrreldakse seda proportsionaalses regulaatoris minimaalse suhtelise niiskuse seadeväärtusega (baasmudelis on minimaalseks suhtelise niiskuse seadeväärtuseks 40% ja vastavaks proportsionaalsuslaks 10%). Kui mõõdetud suhteline niiskus on madalam kui seadesuurus, siis tekitab regulaator vastavalt seadesuuruse ja mõõdetud suuruse erinevusest auriniisutite väljundsignaali auru genereerimiseks. Regulaatori väljundsignaali väärtus on vahemikus 0-1 ja selle suurus sõltub seadesuuruse ja mõõdetud suuruse erinevusest ja regulaatori määratud proportsionaalsusala laiusest. Kõigi kirjeldatud proportsionaalsete regulaatorite puhul on täpselt seadeväärtuse saavutamisel väljundsignaali võimuse 50%. 100% väljundsignaal antakse juhul, kui mõõdetud suurus on saavutanud proportsionaalsusala ülemise piirväärtuse, ja 0% on regulaatori väljund juhul, kui mõõdetud suurus on ületanud proportsionaalsusala alumise piirväärtuse



Joonis 8. Üldhoidla konditsioneerimissüsteemi juhtimisalgoritmid simulatsiooni tarkvaras.

2.5 Hoidla sisekliima CFD simulatsioonid

CFD mudeldamise eesmärgiks on detailsemalt hinnata ruumi erinevatel kõrgustel kujunevat sisekliimat vastavalt Tellija lähteülesandes püstitatud sisekliima nõuete tagamise vajadusele. Eelnenud analüüs on baseerunud mudelolukorrale, kus ruumis eeldatakse täielikku õhu segunemist, s.o. siseõhu parameetrid olid ruumi horisontaal- ja vertikaalsuundades võrdsed.

CFD mudel võtab detailselt arvesse vähemalt järgnevat:

- Ruumi täpsed mõõtmed ja arhitektuur, k.a. avatäited ning tehnosüsteemide osad.

- Sissepuhke- ja väljatõmbeelementide õhujugade mudeldamine arvutusolukorrale vastavate õhuvooluhulkade ja sissepuhkeõhu temperatuuridega.
- Seinte, pindade parameetrite määramine täpse soojus- ja massilevi hindamiseks konvektsiooni, kiirguse ning soojusjuhtivuse teel.
- Sisemised soojuskoormused ning päikese otse- ja hajuskiirguse mõju.

CFD simulatsioonarvutusi teostati *IDA ICE climate model with stratification* – arvutuskihi kõrgus 0,5 m ja kokku on seega 16 õhukihti.

Hinnatavad olukorrad on järgmised:

- Suurema sissepuhke õhujaotaja joakiirusega lahendus (õhu liikumise kiirus ruumi põrandapinna ligikaudu 0,5 m/s)
- Suurema sissepuhke õhujaotaja joakiirusega lahendus (õhu liikumise kiirus ruumi põrandapinna ligikaudu 0,3 m/s)

Õhutõõtlussüsteemi juhtimine toimub hoidla õhuruumis 1,5 meetri kõrgusel paiknevate temperatuuri ja suhtelise niiskuse andurite järgi. Väljatõmbeõhu kanalis paiknevate temperatuuri ja suhtelise niiskuse andurite alusel õhutõõtlussüsteemi juhtimise lahendust ei vaadelda, sest külmal perioodil tekib hoidlas märkimisväärne vertikaalne temperatuurikihistumine, mis muudab väljatõmbeõhu parameetrite alusel juhtimise küsitavaks.

3 Tulemused

3.1 Üldhoidla õhutöötlussüsteemi kirjeldus ja juhtimispõhimõtted

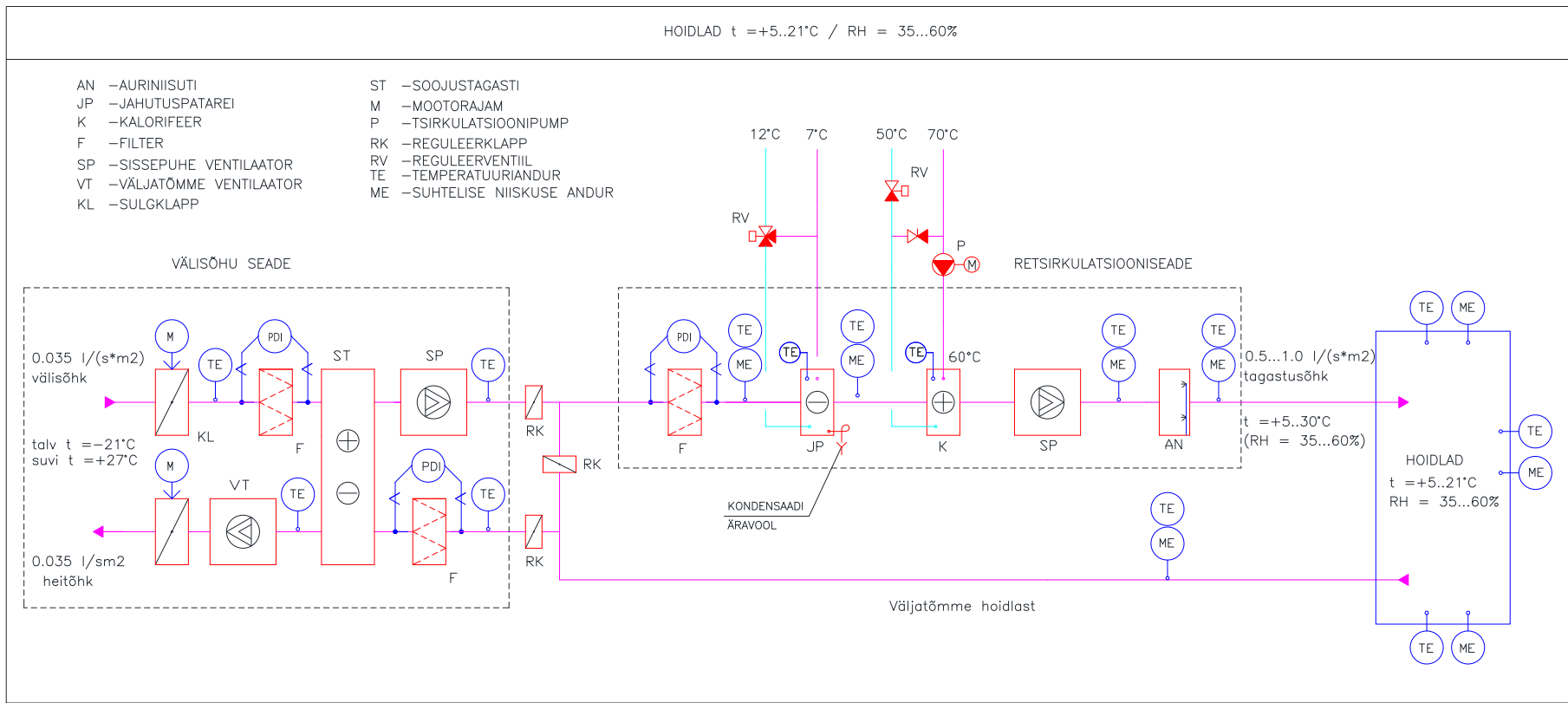
Üldhoidlates kasutatakse sisekliima tagamiseks võimalikult lihtsat ja energiaoptimaalset õhutöötlussüsteemi. Konstantse minimaalse ringlusõhu vooluhulgaga $0,5-1,0 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$ süsteem kasutab väikest välisõhu vooluhulka (minimaalselt üks õhuvahetus kahe ööpäeva jooksul). Üldhoidla õhutöötlussüsteem koosneb retsirkulatsiooniseadest ja välisõhu vahetuseks mõeldud seadmest. Retsirkulatsiooniseadmes toimub õhu puhastamine, jahutamine, kuivatamine, soojendamine ja niisutamine. Välisõhuseade on soojustagastiga sissepuhke-väljatõmbeseade, kus külmal perioodil toimub väljatõmbeõhult soojuse ja niiskuse tagastus ning soojal perioodil saab hügrokoopse või sorptsioon rootorsoojustagasti kasutamisel sissepuhkeõhule ka külma tagastada ja teatud määral ka välisõhku kuivatada. Kuna välisõhu vooluhulk on minimaalne, siis võib väiksemate hoidlate puhul kuluoptimaalseks lahenduseks osutada hoopis soojustagastita lahendus, kus välisõhu ja väljaviskeõhu tagamiseks kasutatakse näiteks kanaliventilaatoreid.

Joonis 9 vasakul on näidatud soojustagastiga mehaaniline sissepuhke/väljatõmbe ventilatsiooniseade, mis koosneb soojustatud labadega välisõhu klappidest, filtritest, soojustagastist, ventilaatoritest ja seadme juhtautomaatikast. Kuna välisõhku pole vaja lisaks soojendada, siis puudub vajadus sellesse seadmesse küttekalorifeeri lisamisel. Küll aga tuleb antud seadme dimensioneerimisel veenduda, et valitud soojustagasti tüüp talvisel ajal ei jäätuks ning seadmesse ette näha vastavad soojustagasti jäätumise vältimise/sulatuse meetmed. Antud seadme soojustagasti tööd on otstarbekas juhtida hoidla ruumitemperatuuri alusel nii, et sissepuhke temperatuur pärast rootorsoojustagasti on hoidla ruumitemperatuuriga võrdne. Süsteem teostatakse konstantse välisõhuhulgaga $0,035 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$, mille jaoks kasutatakse oma välisõhuventilaatorit. Süsteemi võib vajadusel dimensioneerida nii, et välisõhu vooluhulka saaks suurendada kuni $0,2 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$, et hoidlast ehitusniiskust välja kuivatada.

Joonis 9 paremal paikneb retsirkulatsiooniseade, mis koosneb filtrisektsioonist, jahutuspatareist, küttekalorifeerist, ventilaatorist ja aurniisuti sektsioonist. Seade tagab hoidlas konstantse minimaalse õhuvooluhulga $0,5-1,0 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$. Hoidla suhtelist niiskust kontrollitakse retsirkulatsiooniseadme küttekalorifeeriga, mida juhitakse vastavalt hoidlaruumi alumises osas mõõdetavale suhtelisele niiskusele. Kui hoidlaruumi suhteline niiskus ületab seadeväärtust (näiteks 55%), siis soojendatakse sissepuhkeõhku nii kaua kuni vastav seadeväärtus saavutatakse. Kui hoidlaruumi sisetemperatuur langeb talvisel perioodil alla lubatud piirväärtuse (näiteks $3-5 \text{ }^\circ\text{C}$), siis on mõistlik retsirkulatsiooniseadme küttekalorifeeri abil hoidlaruumi mõningal määral lisaks kütta. Teostatud simulatsioonid näitasid, et baasmudeli lähteandmete puhul ei langenud hoidlaruumi sisetemperatuur alla $6,6 \text{ }^\circ\text{C}$, mistõttu antud uuringus vaadeldud üldhoidla ruumi lisaks kütta vaja ei olnud.

Tagamaks hoidla temperatuuri püsimise suvel alla $21 \text{ }^\circ\text{C}$ ja suhtelise niiskuse taseme jäämist alla 60%, on tarvis soojal perioodil välisõhku jahutada ja kuivatada. Simulatsioonitulemused näitasid, et Hiiumaa hoidla puhul on piisav vajaduspõhine õhu jahutamine $13 \text{ }^\circ\text{C}$ -ni. Suuremate niiskuskooormustega üldhoidlate korral võib jahutuspatarei järgne vajalik temperatuur jääda vahemikku $11-13 \text{ }^\circ\text{C}$. Jahutuspatarei vee temperatuurigraafik on seega ca $7/12 \text{ }^\circ\text{C}$. Simulatsioonitulemused näitasid, et samaaegselt õhu jahutamisega on mõistlik seda ka kalorifeeriga järelsoojendada, mistõttu tuleb paralleelselt jahutuspatarei reguleerventiili juhtimisele ka küttekalorifeeri soojusväljastust juhtida. Suvisel perioodil toimub kütteväljastuse juhtimine sama juhtimisalgoritmi alusel, mis talvel.

Kui väljatõmbeõhu suhteline niiskus on alla seadeväärtuse, siis soojendamist ei toimu ja suhteline niiskus püsib lubatus vahemikus (35-60%) tänu hoidla jahtumisele ning poorbetoonseinte ja hojustatavate museaalide niiskuselekandele. Niiskuse langedes alla näiteks 40-45% rakendub aurniisuti. Süsteemi põhimõtteline lahendus koos peamiste andurite paiknemisega on toodud Joonis 9.



Joonis 9. Üldhoidla õhutõutlusseadme põhimõtteline skeem.

3.2 Üldhoidla arvutuslikud kütte-, jahutus- ja niisutusvõimsused

Tagamaks hoidla temperatuuri ja suhtelise niiskuse lubatud tasemeid on dünaamilise simulatsiooni abil teostatud üldhoidla ruumi õhutõtlusprotsesside ja seadmete vajalikud arvutuslikud dimensioneerimisvõimsused.

Küttekalorifeeri võimsuse leidmiseks vaadeldi simulatsioonimudeli abil, milline on minimaalne temperatuur, et tagada õhuvahetuse $0,5 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$ juures rahuldavalt (maksimaalne ületus alla 1,5% ajast) nii sisetemperatuuri kui ka suhtelise niiskuse tasemete hoidmine nõutud piirides kui ka sisetemperatuuri ja suhtelise niiskuse muutumise kiirused. Selgus, et minimaalne sissepuhkeõhu temperatuur, mille juures suhtelise niiskuse varieerumise tase ületab lubatud määra (10% ööpäevas) alla 1,5% ajast, on $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Lisaks tuleb kalorifeeri võimsuse leidmisel arvesse võtta ka vajadust soojendada soojustagastit läbivat välisõhku. Arvutustes on soojustagasti jäätumise vältimise olukorra (heitõhu piirang $-5 \text{ }^\circ\text{C}$) kasutegurina kasutatud soojustagasti jäätumise vältimisega arvestavat temperatuuri suhtarvu väärtust 0,38. Arvutuslikus välisõhu temperatuuriks on antud arvutuse puhul võetud $-21 \text{ }^\circ\text{C}$. Arvestades seda, et baasmudeli lahenduses ei lubata siseõhu temperatuuril langeda alla $5 \text{ }^\circ\text{C}$, saab vajaliku küttekalorifeeri võimsuse arvutada seosest:

$$\begin{aligned} \phi_{\text{kal}} &= ((0,5 \cdot 386,4) - 15) \cdot 0,001 \cdot 1,2 \cdot (30 - 5) + 15 \cdot 0,001 \cdot 1,2 \cdot (30 - (-21)) \cdot (1 - 0,38) = \\ &= 5,92 \text{ kW} \end{aligned}$$

Jahutuspatarei puhul tuleneb arvutusliku võimsuse dimensioneerimisolukord suvisest kuivatus- ja sisetemperatuuri tagamise vajadusest. Arvutustes on välisõhu temperatuuriks võetud $27 \text{ }^\circ\text{C}$, välisõhu suhteliseks niiskuseks 60%, siseõhu arvutuslikuks temperatuuriks $21 \text{ }^\circ\text{C}$ ja siseõhu suhteliseks niiskuseks 60%. Jahutuspatareid läbinud õhu temperatuuriks on võetud $13 \text{ }^\circ\text{C}$ ja suhteliseks niiskuseks arvestati 90%. Jahutuspatarei dimensioneerimisel ei arvestata antud juhul välisõhu seadme külmatagastuse funktsiooniga. Eelnevalt välja toodud lähteandmete alusel saab jahutuspatarei koguvõimsuse (ilmne+varjatud) saab arvutada seosest:

$$\phi_{\text{Jah}} = ((0,5 \cdot 386,4) - 15) \cdot 0,001 \cdot 1,2 \cdot (44,7 - 34,2) + 15 \cdot 0,001 \cdot 1,2 \cdot (55,6 - 34,2) = 2,63 \text{ kW}$$

Vastavalt teostatud simulatsioonidele on hoidla suhtelise niiskuse tagamiseks suurim vajalik niisutusvõimsus talveperioodil juhul, kui siseõhu temperatuur on ca $9 \text{ }^\circ\text{C}$. Sellest lähtuvalt kasutame niisuti arvutusliku võimsuse leidmiseks lähteparameetritena siseõhu temperatuuri $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ja suhtelist niiskust 40%. Välisõhu arvutusliku temperatuurina kasutame $-21 \text{ }^\circ\text{C}$ ja suhtelist niiskust 80%. Kõrvalruumide infiltratsiooni ja uste avamise mõju arvestamiseks on nende ruumide temperatuuriks arvestatud $21 \text{ }^\circ\text{C}$ ja suhteliseks niiskuseks 15%. Lähtuvalt simulatsioonitulemustest selgub, et üldhoidla maksimaalne infiltratsiooni õhuvooluhulk läbi välispiirete on 23 l/s ja läbi sisepiirete keskmiselt 15 l/s (arvestades ka hoidla ja tulmeruumi vahelise väikese siseukse lühiajalise avamise mõju). Juhul, kui talvisel perioodil on plaanis hoidla ja tulmeruumi vahelist ust pidevalt avada, siis tuleks niisuti dimensioneerimisel ka sellega arvestada, kuid antud arvutuste käigus on lähtutud vaid väikese ukse igapäevasest lühiajalisest lahtiolekust.

Eelnevalt välja toodud lähteandmete alusel saab vajaliku aurniisuti niisutusvõimsuse leida seosest:

$$G_N = (15 + 23) \cdot 0,001 \cdot 1,2 \cdot (3 - 0,5) + (15) \cdot 0,001 \cdot 1,2 \cdot (3 - 2,3) = 0,13 \text{ g/s} = 0,46 \text{ kg/h}$$

Üldhoidla arvutuslikud kütte-, jahutus- ja niisutusvõimsused on toodud Tabel 4. Lisaks on viidatud tabelis toodud ka simulatsioonide teel leitud suhtelise niiskuse 10% ületav ööpäevane varieerumine aastapikkuse perioodi vältel. Ööpäevane suhtelise niiskuse varieerumine on vastavalt teostatud simulatsioonidele kõige kriitilisem sisekliima parameeter. See on ka põhjus, miks tulemuste sisekliima osa hindamisel just eelkõige sellest lähtutakse. Tabel 4 on eraldi välja toodud ka arvutuslikud kütte-, jahutus- ja niisutusvõimsused juhul, kui süsteemis kasutada suurendatud õhuvahetuse normmäära $1,0 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$. Suurema õhuvahetusega juhul on arvutustes arvestatud simulatsiooni käigus leitud maksimaalse vajaliku sissepuhkeõhu temperatuuriga, milleks on vastavalt tulemustele $26 \text{ }^\circ\text{C}$. Jahutuspatarei dimensioneerimisel on suurema õhuvooluhulga korral minimaalne simulatsioonist tulenev jahutuspatarei järgne temperatuur $15 \text{ }^\circ\text{C}$, mistõttu jahutuspatarei dimensioneerimisvõimsus suurema õhuvahetuse juures olulisel määral ei muutu. Lisaks on arvutustes arvestatud sama värske õhu ventilatsiooniseadme soojustagastuse temperatuuri suhtarvu ja samade infiltratsiooni õhuvooluhulkadega, mida kasutati ka väiksema õhuvahetusega lahenduse korral. Lähtuvalt samadest infiltratsiooni õhuvooluhulkadest ei muutu suurema õhuvahetuse korral ka aurniisuti niisutusvõimsus.

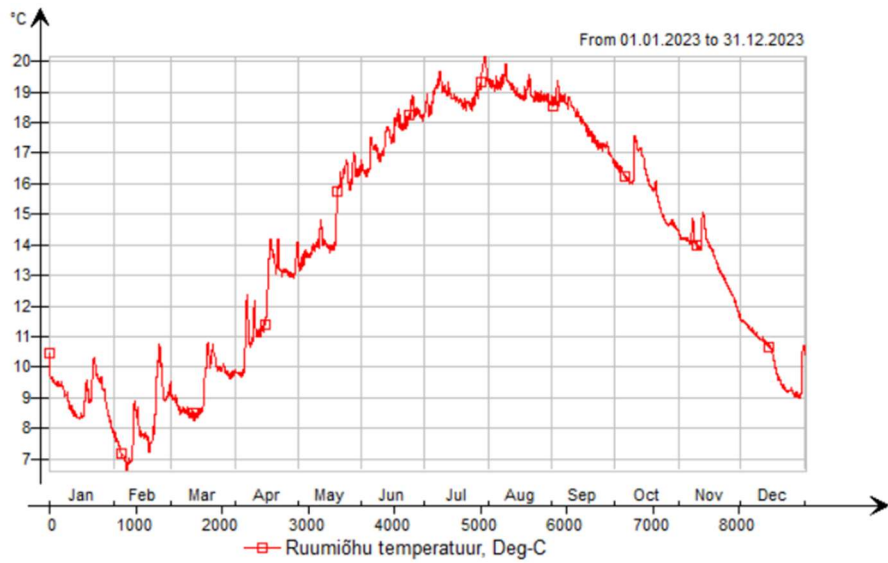
Tabel 4. Üldhoidla arvutuslikud kütte-, jahutus- ja niisutusvõimsused.

| Õhutöötlemissüsteemi lahendus/süsteemi arvutuslik võimsus | Vaja-lik ringlus-õhu norm, l/(s*m ²) | RH varieeru-mine üle 10% ööpäevas, (h/aastas)/ (%) | RH varieeru-mine üle 10% ööpäevas, h/aastas | Kütte-kalorifeeri võimsus, kW | Jahutus-patarei võimsus, kW | Aurniisuti niisutusvõimsus, kg/h |
|---|--|--|---|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Baasmudeli lahendus | 0,5 | 123/ 1,40 | 123 | 5,92 | 2,63 | 0,46 |
| Suurema õhuvahetusega lahendus | 1,0 | 67,1/ 0,77 | 67,1 | 9,88 | 2,70 | 0,46 |

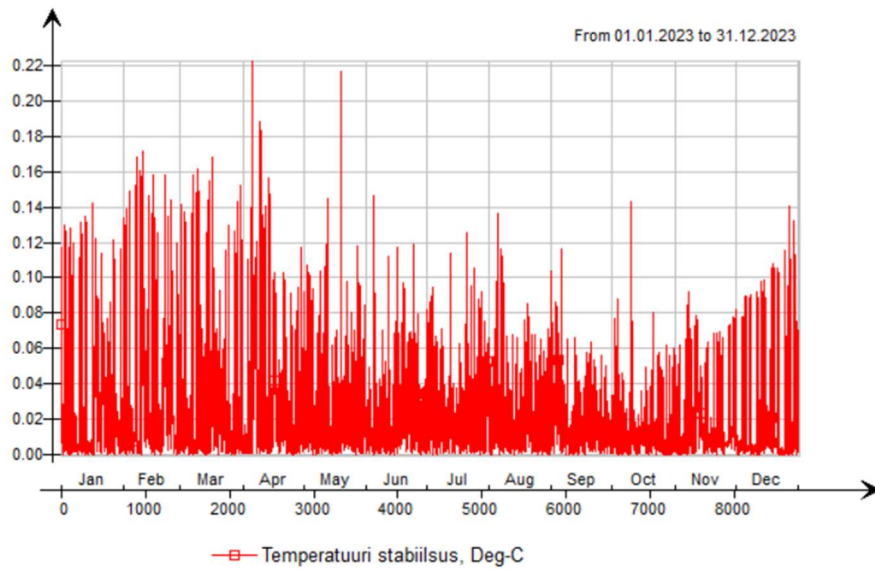
3.3 Üldhoidla sisekliimaparameetrite tagamine

3.3.1 Baasmudeli simulatsioonitulemused

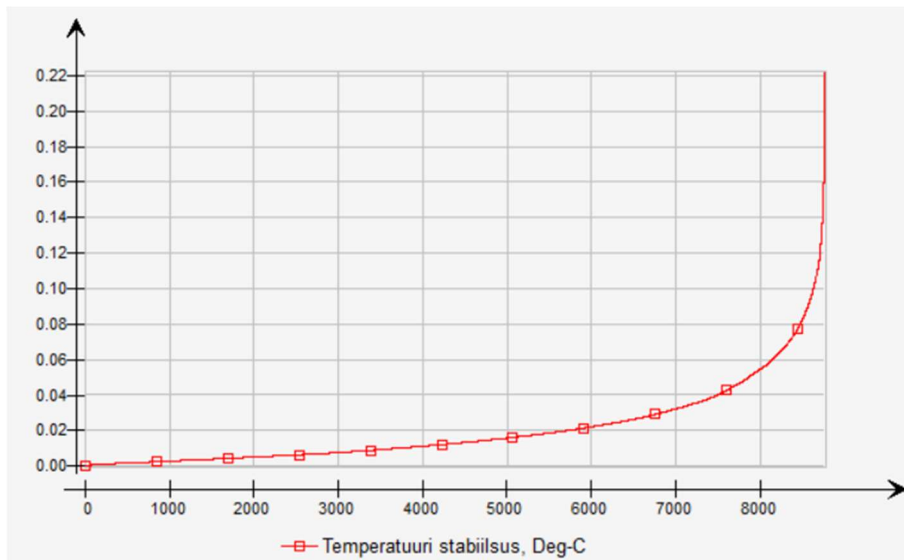
Baasmudeli arvutuse lähteparameetrid on ära kirjeldatud uuringu meetodite peatükis. Simulatsioonitulemustest saab välja tuua, et maksimaalne suvine hoidla sisetemperatuur oli 20,1 °C ja minimaalne talvine temperatuur vastavalt 6,6 °C. Hoidla ruumiõhu temperatuuri varieerumine aastapikkuse perioodi vältel on välja toodud Joonis 10. Baasmudelis kasutatud õhukonditsioneerimise lahendus tagab seega kasutatud lähtetingimuste korral selle, et üldhoidla siseõhutemperatuur jääb lubatud piiridesse (0-21 °C). Joonis 11 kirjeldab hoidla sisetemperatuuri varieerumist ühe tunni pikkusel perioodil. Joonis 11 selgub, et baasmudeli maksimaalne ühe tunni pikkuse perioodi temperatuuri varieerumine on ca 0,22 °C, mis jääb samuti lubatud piiridesse (maksimaalselt lubatud temperatuuri varieerumine 1 °C/h). Sisetemperatuuri varieerumisest parema ülevaate saamiseks on tulemused esitatud ka kestvuskõvera kujul (vt Joonis 12).



Joonis 10. Baasmudeli hoidla ruumiõhu temperatuur.

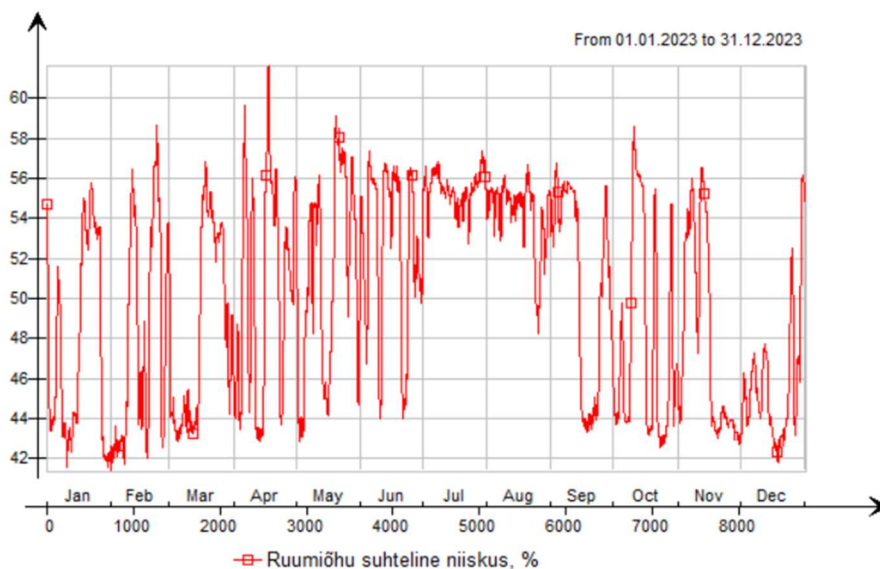


Joonis 11. Baasmudeli temperatuuri stabiilsus hoidlas.

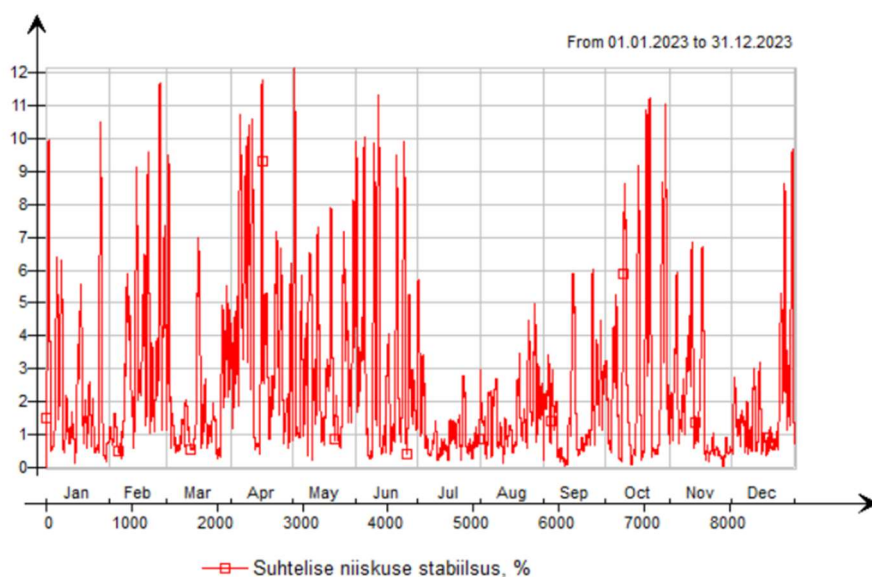


Joonis 12. Temperatuuri stabiilsuse aastase perioodi kestvusgraafik.

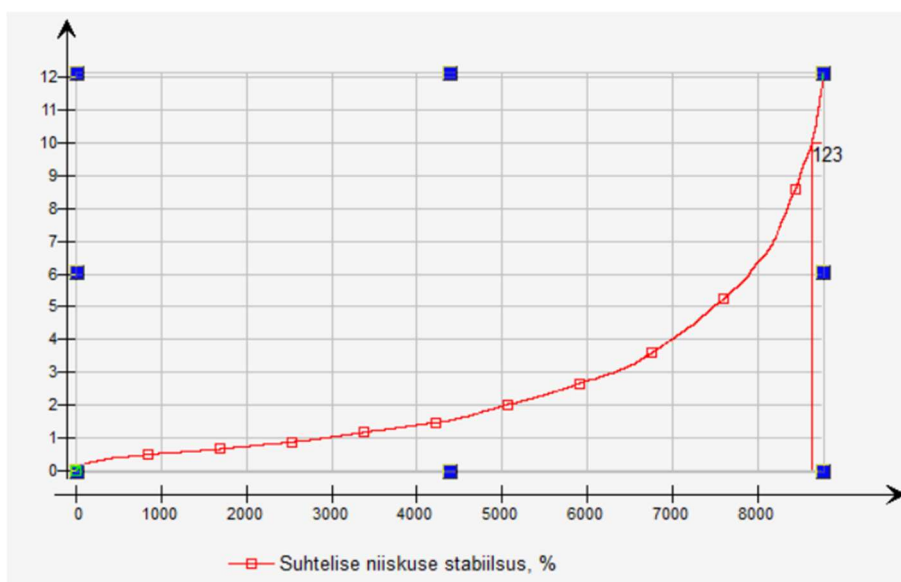
Sisekliima parameetrite puhul on kõige problemaatilisem tagada just üldhoidla suhtelise niiskuse taseme püsimist lubatud vahemikus (35–60%). Veelgi kriitilisem on aga suhtelise niiskuse varieerumise nõude tagamine (ööpäeva jooksul võib suhteline niiskus maksimaalselt muutuda 10% võrra). Baasmudeli simulatsioonitulemused näitavad, et antud juhul on minimaalne talveperioodi suhteline niiskus 41,5% ja maksimaalne suveperioodi suhteline niiskus 62%. Suhtelise niiskuse tase ületab suvist lubatud taset (maksimaalne lubatud tase on 60%) 11,7 h aastas ehk 0,1% kogu ajast. Hoidla suhtelise niiskuse aastapikkuse perioodi simulatsioonitulemused on toodud Joonis 13. Suhtelise niiskuse taseme ööpäevase maksimaalse varieerumise tulemused on ära toodud Joonis 14 ja Joonis 15. Suhtelise niiskuse varieerumine on suurem kui lubatud 123 h aastas ehk 1,4% ajast.



Joonis 13. Baasmudeli hoidla ruumiõhu suhteline niiskus.



Joonis 14. Baasmudeli suhtelise niiskuse stabiilsus aastase perioodi vältel.



Joonis 15. Baasmudeli suhtelise niiskuse stabiilsus kestvuskõveral.

3.3.1 Kõigi uuritud mudeli versioonide tulemused

Kõigi simuleeritud üldhoidla võimalike lahenduste sisekliima parameetrite tulemused on välja toodud Tabel 5. Peamised järeldused, mida antud tulemuste baasil välja tuua saab, on järgmised:

- Sisetemperatuuri ja selle stabiilsuse tagamine antud õhutöötlemislahendust kasutades problemaatiline ei ole.
- Oluliselt keerulisem on tagada suhtelise niiskuse maksimaalset taset ja veelgi problemaatilisem on suhtelise niiskuse ööpäevase varieerumise nõude tagamine.
- Hoidla õhuvahetuse suurendamine aitab suhtelise niiskuse ööpäevast varieerumist stabiliseerida.
- Hoidlaruumi õhupidavus on äärmiselt oluline, kuna see aitab ööpäevast hoidla temperatuuri ja suhtelise niiskuse tasemete varieerumist stabiliseerida.
- Üldhoidla ja tulmeruumi vahelise väikse siseukse avamise mõju sisekliima parameetritele on suhteliselt marginaalne.

- Üldhoidla ja tulmeruumi vahelise suure siseukse avamise mõju sisekliima parameetritele on märkimisväärsem, kuid üksikutel kordadel aastas kasutamisel ei tekita ka see olulisi probleeme.
- Saab anda soovitus, mitte avada üldhoidla ja tulmeruumi vahelist suurt siseust pikaajaliseks perioodiks (>30 min) juhul, kui suhtelise niiskuse tase on lähedal selle maksimaalsele või minimaalsele lubatud tasemele.
- Hoidla sise- ja välisseinte soojuslähivuse väärtus ei ole sisekliima parameetrite mõttes oluline.
- Välisõhu ventilatsiooniseadme puhul aitab kõrge niiskustagastusega hügrokoopne rootorsoojustagasti ööpäevast suhtelise niiskuse taseme varieerumist stabiliseerida.
- Kui välisõhu ventilatsiooniseadmel ei ole hügrokoopset soojustagastit või kui soojustagastust üldse ei ole, siis on suure tõenäosusega suhtelise niiskuse varieerumise stabiliseerimiseks vajalik hoidla ringlusõhuvahetust tõsta kõrgemaks kui minimaalne võimalik õhuvahetuse väärtus $0,5 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$.
- Õhutöötlusprotsesside tööpõhimõtete puhul on eelkõige suhtelise niiskuse ööpäevase varieerumise mõttes oluline, et protsesside juhtimine ei toimuks on/off reguleerimisena lubatud minimaalsel ja maksimaalsel temperatuuri/suhtelise niiskuse väärtustel.

Tabel 5. Sisekliima parameetrite simulatsioonitulemused.

| Simulatsiooni nr | RH üle 60%, % | RH stab. üle 10% päevas, % | TE stab. üle 1 °C tunnis, % | Min. õhutemperatuur, °C | Max. õhutemperatuur, °C | Märkused |
|------------------|---------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|--|
| S1 | 0,13 | 1,40 | 0,00 | 6,6 | 20,1 | Baasmudel |
| S2 | 0,00 | 1,04 | 0,00 | 7,0 | 20,0 | Õhuvahetus 0,7 l/(s*m ²) |
| S3 | 0,00 | 0,77 | 0,00 | 7,5 | 19,7 | Õhuvahetus 1,0 l/(s*m ²) |
| S4 | 0,14 | 0,95 | 0,00 | 6,4 | 20,1 | Siseuks suletud |
| S5 | 0,13 | 2,15 | 0,06 | 6,9 | 20,2 | Suur uks päevas 2 min avatud |
| S6 | 0,11 | 3,69 | 2,40 | 7,2 | 20,2 | Suur uks päevas 10 min avatud |
| S7 | 0,63 | 4,39 | 0,00 | 5,9 | 20,7 | 2 m ³ /(h*m ²) |
| S8 | 1,28 | 7,52 | 0,00 | 5,4 | 21,1 | 3 m ³ /(h*m ²) |
| S9 | 0,08 | 0,60 | 0,00 | 6,9 | 19,9 | 0,6 m ³ /(h*m ²) |
| S10 | 0,14 | 1,40 | 0,00 | 6,6 | 20,1 | Hoidla välisseinad U=0,5 W/(m ² *K) |
| S11 | 0,13 | 1,39 | 0,00 | 6,6 | 20,1 | Hoidla välisseinad U=0,35 W/(m ² *K) |
| S12 | 0,14 | 1,38 | 0,00 | 6,6 | 20,2 | Hoidla välisseinad U=0,2 W/(m ² *K) |
| S13 | 0,00 | 1,16 | 0,00 | 7,5 | 20,2 | Hoidla siseseinad U=0,53 W/(m ² *K) |
| S14 | 0,00 | 0,66 | 0,00 | 9 | 20,3 | Hoidla siseseinad U=1,0 W/(m ² *K) |
| S15 | 0,46 | 3,82 | 0,00 | 6,3 | 20,2 | Ilma soojustagastita |
| S16 | 0,41 | 3,71 | 0,00 | 6,8 | 20,2 | Tavaline rootor |
| S17 | 0,32 | 1,43 | 0,00 | 6,6 | 19,5 | Konstantse jahutuspatarei järgse seadeväärtuse järgi juhtimine |
| S18 | 0,14 | 2,84 | 0,00 | 6,6 | 20,1 | Alumise RH seadeväärtuse langetamine (40%→37%+PB:"-10"→"-6") |
| S19 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 7,4 | 20,8 | Ülemise RH seadeväärtuse langetamine (55%→50%) |
| S20 | 0,32 | 2,81 | 0,00 | 6,3 | 19,9 | Ülemise RH seadeväärtuse tõstmine (55%→57%+PB:"-10"→"-6") |
| S21 | 0,13 | 2,72 | 0,00 | 6,5 | 20,1 | On-off regulaatorid+baasmudeli seadeväärtused |
| S22 | 0,28 | 2,66 | 0,00 | 6,4 | 20,4 | Värske õhu vooluhulga suurendamine (15 l/s→30 l/s) |
| S23 | 0,13 | 1,39 | 0,00 | 6,6 | 20,2 | Ilma maksimaalse jahutuse temperatuuri seadeväärtuseta |
| S24 | 0,33 | 3,06 | 0,00 | 6,7 | 20,2 | Tavaline hügrokoopne rootor |
| S25 | 0,13 | 1,39 | 0,00 | 6,6 | 19,8 | Jahutuspatarei järgse temperatuuri langetamine (13 °C→11 °C) |
| S26 | 0,40 | 3,76 | 0,00 | 6,5 | 20,2 | Plaatsoojustagasti kasutamine värskel õhul |
| S27 | 1,71 | 12,33 | 0,01 | 6,0 | 21,5 | Retsirkulatsiooni klapp on kinni, ainult välisõhu kasutamine |
| S28 | 0,00 | 0,00 | 0,0 | 18,1 | 22,3 | PP järgne lahendus, sisetemp. 20 kraadi, välisõhu vahetus 0,35 l/(s*m ²) |

3.4 Hoone energiasimulatsioonid

Vastavalt baasmudeli simulatsioonitulemusele on hoidla soojusenergia kulu 3066 kWh, jahutusenergia kulu 1228 kWh ja niisuti elektrikulu 214 kWh. Hoidla kogu elektrikulu töö meetodite osas välja toodud soojuspumba ja külmamasina tehniliste näitajate korral 3030 kWh. Kuna üldhoidla mõjutab läbi hoidla ja ülejäänud hoone vahelise siseseina soojuslevi ja õhulekke kaudu ka ülejäänud hoone ruumide energiabilanssi, siis toome baasmudeli energiasimulatsiooni tulemuste alusel välja ka ülejäänud hoone energiakulu näitajad. Ülejäänud hoone soojusenergia kulu on 32437 kWh, jahutusenergia kulu 3635 kWh ja kogu elektrikulu 17767 kWh. Hoidla ja kogu hoone elektri kogutarbimise puhul on arvestatud sellega, et soojusenergia allikaks on soojuspump aastase soojusteguriga 4 ja jahutusenergia allikaks on külmamasin aastase jahutusteguriga 3,5.

Teostatud hoone energiasimulatsioonide tulemused on esitatud Tabel 6. Viidatud tabelis on eraldi veergudes välja toodud üldhoidla ruumi soojusenergia erikulu, jahutusenergia erikulu, ventilaatorite elektrienergia erikulu, aurniisuti elektrienergia erikulu, hoidla värske õhu ventilatsiooniseadme soojustagasti soojusenergia taaskasutus ruumi kõetava pinna kohta, üldhoidla kogu elektri erikulu ja hoidla ja muude hoones paiknevate ruumide kogu elektri erikulu.

Vastavalt baasmudeli simulatsioonitulemusele on hoidla soojusenergia erikulu 7,9 kWh/m², jahutusenergia erikulu 3,2 kWh/m² ja niisuti elektri erikulu 0,6 kWh/m². Hoidla kogu elektri erikulu eelnevalt välja toodud soojuspumba ja külmamasina tehniliste näitajate korral 7,8 kWh/m². Hoidla ja ülejäänud hoone ruumide kogu elektri erikulu on baasmudeli tulemuste alusel kokku 25,4 kWh/m².

Peamised järeldused, mida energiasimulatsioonide tulemuste baasil (vt Tabel 6) saab teha on järgmised:

- Baasmudelisse valitud sise- ja välisseinad ning õhutöötlusprotsessi tehniline lahendus on suhteliselt optimaalsed ja oluliselt energiatõhusamat lahendust pole antud lähtetingimuste puhul võimalik välja pakkuda.
- Mida madalamad on nii välisõhu vooluhulk kui ka retsirkulatsiooni vooluhulk, seda energiatõhusama lahendusega tegu on.
- Hoidlaruumi ja tulmeruumi vaheliste uste avamise mõju hoone energiatõhususele on suhteliselt marginaalne.
- Hoone õhupidavusel on hoone üldisele energiatarbimisele selge mõju. Hoone (eelkõige üldhoidla) õhupidavus võiks minimaalselt olla baasmudelis toodud väärtusega 1 m³/(h*m²) 50 Pa rõhuerinevuse juures.
- Energiatõhususe seisukohast võiks hoidla välisseinte soojuslähivuse väärtus olla alla 0,2 W/(m²*K).
- Energiatõhususe seisukohast võiks hoidla ja hoone ülejäänud ruumide siseseinte soojuslähivuse väärtus olla alla 0,5 W/(m²*K).
- Hoidla välisõhuvahetust tagava ventilatsiooniseadme soojustagastuse olemasolul ei mõjuta see hoone energiatõhusust olulisel määral.
- Hoidla õhutöötlusseadme jahutuspatarei järgset temperatuuri tuleks kindlasti juhtida vajaduspõhiselt. Konstantse seadeväärtuse alusel juhitud jahutuspatarei järgne temperatuur tõstab oluliselt hoidla energiakulu.
- Hiiumaa hoidla põhiprojektis projekteeritud hoidla õhutöötlemise lahenduse korral (täppiskonditsioneer ja põrandküttega süsteem, sisetemperatuuri hoitakse aastaringselt seadeväärtusel 20 °C ning välisõhu norväärtuseks on 0,35 l/(s*m²)) oleks soojusenergia tarbimine ligi 9 korda suurem kui baasmudeli lahenduses ja jahutusenergia tarbimine 2,7 korda kõrgem. Lisaks suureneks põhiprojekti järgse lahenduse puhul aurniisuti elektritarve 13 korda võrreldes antud töös välja töötatud baaslahendusega.

Tabel 6. Energiatarbe simulatsioonide tulemused.

| Jrk nr | Soojusenergia, kWh/m ² | Jahutusenergia, kWh/m ² | Ventilaatorite elekter, kWh | Niisuti elekter, kWh | Hoidla seadme soojus-tagastus, kWh/m ² | Hoidla elekter kokku, kWh/m ² | Kogu hoone elekter kokku, kWh/m ² | Märkused |
|------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|----------------------|---|--|--|--|
| S1 | 7,9 | 3,2 | 4,4 | 0,6 | 2,7 | 7,8 | 25,4 | Baasmudel |
| S2 | 6,9 | 3,5 | 6,1 | 0,6 | 2,8 | 9,5 | 26,2 | Õhuvahetus 0,7 l/(s*m ²) |
| S3 | 5,2 | 3,8 | 8,7 | 0,7 | 3,0 | 11,8 | 27,2 | Õhuvahetus 1,0 l/(s*m ²) |
| S4 | 8,2 | 3,1 | 4,4 | 0,5 | 3,1 | 7,8 | 25,3 | Siseuks suletud |
| S5 | 7,6 | 3,3 | 4,4 | 0,6 | 2,7 | 7,9 | 25,5 | Suur uks päevas 2 min avatud |
| S6 | 6,8 | 3,3 | 4,4 | 0,7 | 2,8 | 7,8 | 25,6 | Suur uks päevas 10 min avatud |
| S7 | 11,0 | 4,1 | 4,4 | 0,9 | 2,6 | 9,2 | 26,5 | 2 m ³ /(h*m ²) |
| S8 | 13,6 | 4,9 | 4,4 | 1,2 | 2,6 | 10,4 | 27,6 | 3 m ³ /(h*m ²) |
| S9 | 6,5 | 2,7 | 4,4 | 0,4 | 2,7 | 7,2 | 24,9 | 0,6 m ³ /(h*m ²) |
| S10 | 8,0 | 3,2 | 4,4 | 0,6 | 2,7 | 7,9 | 28,4 | Hoidla välisseinad U=0,5 W/(m ² *K) |
| S11 | 8,0 | 3,2 | 4,4 | 0,6 | 2,7 | 7,9 | 27,3 | Hoidla välisseinad U=0,35 W/(m ² *K) |
| S12 | 8,0 | 3,2 | 4,4 | 0,6 | 2,7 | 7,8 | 26,2 | Hoidla välisseinad U=0,2 W/(m ² *K) |
| S13 | 5,4 | 3,0 | 4,4 | 0,6 | 2,8 | 7,2 | 25,4 | Hoidla sisseinad U=0,53 W/(m ² *K) |
| S14 | 2,7 | 2,7 | 4,4 | 0,8 | 3,1 | 6,6 | 25,5 | Hoidla sisseinad U=1,0 W/(m ² *K) |
| S15 | 10,3 | 3,5 | 4,4 | 0,8 | 0,0 | 8,8 | 25,9 | Ilma soojustagastita |
| S16 | 8,8 | 3,6 | 4,4 | 0,9 | 2,6 | 8,5 | 25,7 | Tavaline rootor |
| S17 | 13,2 | 10,5 | 4,4 | 0,5 | 2,5 | 11,2 | 27,0 | Konstantse jahutuspatarei järgse seadeväärtuse järgi juhtimine |
| S18 | 7,8 | 3,2 | 4,4 | 0,4 | 2,6 | 7,6 | 25,3 | Alumise RH seadeväärtuse langetamine (40%->37%+PB:"-10"->"-6") |
| S19 | 14,0 | 5,9 | 4,4 | 0,7 | 3,0 | 10,2 | 26,4 | Ülemise RH seadeväärtuse langetamine (55%->50%) |
| S20 | 6,3 | 2,4 | 4,4 | 0,5 | 2,6 | 7,2 | 25,1 | Ülemise RH seadeväärtuse tõstmine (55%->57%+PB:"-10"->"-6") |
| S21 | 8,2 | 3,2 | 4,4 | 0,4 | 3,2 | 7,7 | 25,4 | On-off regulaatorid+baasmudeli seadeväärtused |
| S22 | 8,9 | 3,6 | 4,4 | 0,7 | 5,2 | 8,3 | 25,6 | Värske õhu vooluhulga suurendamine (15 l/s->30 l/s) |
| S23 | 7,9 | 3,2 | 4,4 | 0,6 | 2,7 | 7,8 | 25,4 | Ilma maksimaalse jahutuse temperatuuri seadeväärtuseta |
| S24 | 8,6 | 3,5 | 4,4 | 0,8 | 2,5 | 8,3 | 25,6 | Tavaline hügrokoopne rootor |
| S25 | 8,6 | 4,3 | 4,4 | 0,5 | 2,6 | 8,3 | 25,7 | Jahutuspatarei järgse temperatuuri langetamine (13 °C->11 °C) |

| | | | | | | | | |
|------------|------|-----|-----|-----|------|------|------|--|
| S26 | 8,4 | 3,6 | 4,4 | 0,9 | 2,4 | 8,4 | 25,7 | Plaatsoojustagasti kasutamine värskel õhul |
| S27 | 19,4 | 6,8 | 4,4 | 2,1 | 30,0 | 13,3 | 28,0 | Retsirkulatsiooni klapp on kinni, ainult välisõhu kasutamine |
| S28 | 69,8 | 8,5 | 4,4 | 7,2 | 50,9 | 25,5 | 33,0 | PP järgne lahendus, sisetemp. 20 kraadi, välisõhu vahetus 0,35 l/(s*m ²) |

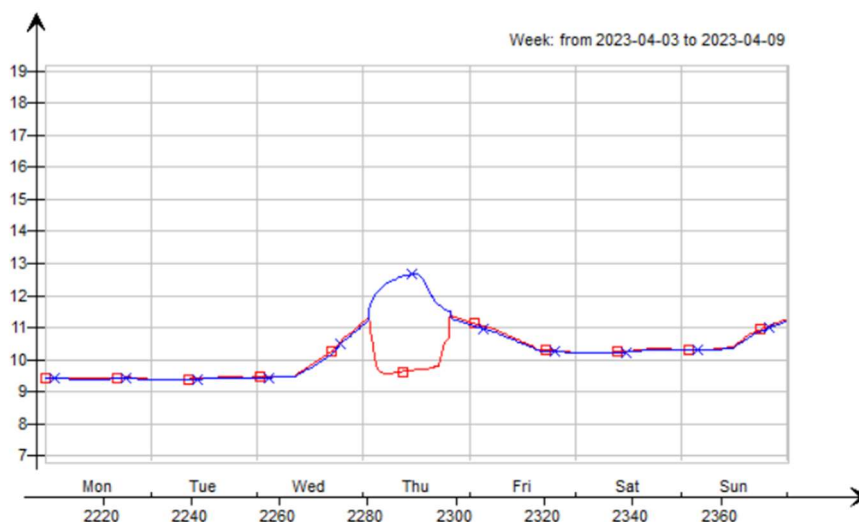
3.5 Hoidla sisekliima CFD simulatsioonid

Vastavalt töös teostatud simulatsioonidele on ringlusõhu õhuvahetuse 0,5 l/(s*m²) puhul vajalik tagada sissepuhkeõhu maksimaalne temperatuur 30 °C. Sellest lähtuvalt on üldhoidla õhuvahetuse lahenduse puhul kriitiline soe sissepuhkeõhu juga võimalikult suurel kiirusel ruumi alumisse tsooni juhtida. Kui sooja sissepuhke õhujoo kiirus on madal, siis ei jõua see ruumi alumisse tsooni ja hoidlas tekib suur vertikaalne temperatuurikihistumine.

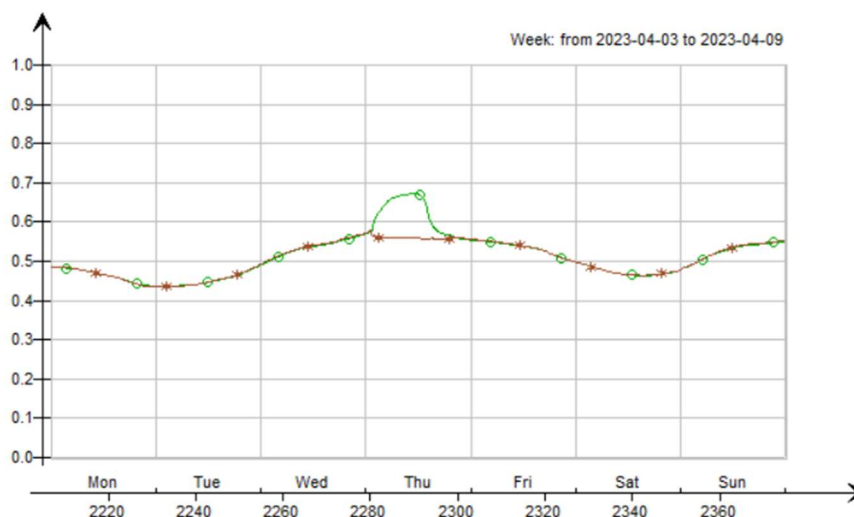
Hoidla sisekliima CFD simulatsioonid näitavad, et kui üldhoidlas kasutada lae all paiknevaid sissepuhke õhujaotajaid, siis peaks õhujoo kiirus põranda pinnal olema vähemalt 0,5 m/s. Teostatud hoidla sisekliima CFD simulatsioonid olukorras, kus õhuvahetuse 0,5 l/(s*m²) korral on ruumi lakke paigaldatud 3 vertikaalset juga andvat sissepuhke õhujaotajat. Nagu mainitud, siis on CFD simulatsioonide esimeses lähenduses õhujaotajad valitud nii, et sissepuhkeõhu liikumise kiiruseks põranda pinnal on ligikaudu 0,5 m/s. Lisaks on oluline mainida, et teostatud simulatsiooni puhul juhitakse õhutõõlusseadmete tööd ca 1,2 m kõrgusel seinal paikneva temperatuuri/suhtelise niiskuse anduri abil.

Teostatud sisekliima CFD tulemused siseõhu temperatuuri ja suhtelise niiskuse osas on näidatud vastavalt Joonis 16 ja Joonis 17. Mõlemal joonisel on toodud ruumi alumise (õhukihi keskmine kõrgus 0,3 m põrandast) ja ülemise (õhukihi keskmine kõrgus 7,9 m põrandast) õhukihi ühe nädala pikkuse talvise perioodi temperatuurid. Tulemustest selgub, et antud lähtetingimuste korral on talveperioodil, kui temperatuurikihistumise probleem on suurim, maksimaalne hoidlaruumi vertikaalne temperatuurikihistumine ligikaudu 3,6 °C. Maksimaalne temperatuurikihistumine tekib olukorras, kus külmal perioodil on vajalik suhtelise niiskuse taseme tõstmiseks ruumi ligi 30 °C sissepuhkeõhu abil kütta.

Temperatuurikihistumine toob kaasa ka suhtelise niiskuse vertikaalse kihistumise (Joonis 17). Jooniselt selgub, et suure temperatuurikihistumise olukorras on hoidlaruumi alumises tsoonis suhtelise niiskuse tase 68% ja samal ajal ülemises tsoonis 55%. Sellest lähtuvalt tõuseb lühikese perioodi vältel, kui sissepuhkeõhu temperatuur on kõrge, hoidla alumise osa siseõhu suhteline niiskus üle lubatud piirmäära.



Joonis 16. Üldhoidla vertikaalne temperatuurikihistumine talveperioodi 1 nädalase perioodi vältel. Sinine joon näitab ülemist ja punane joon alumist õhukihti.

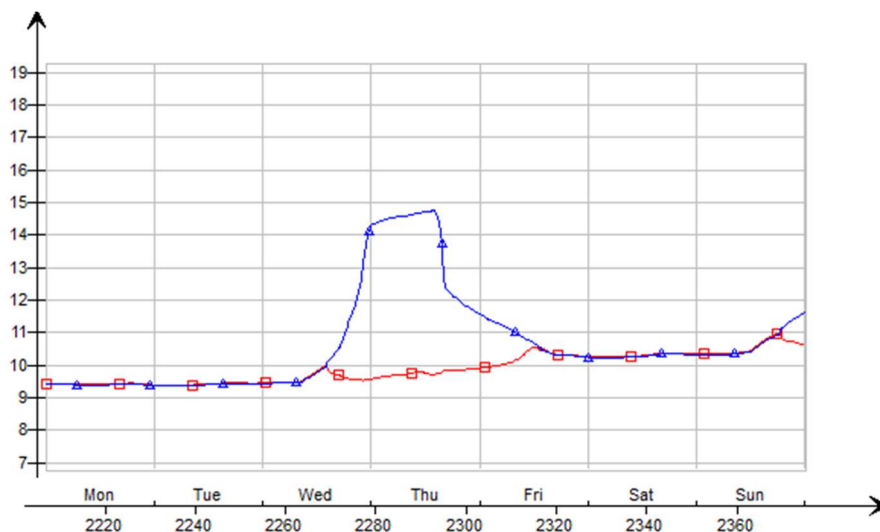


Joonis 17. Üldhoidla vertikaalne suhtelise niiskuse (y-telje väärtus x 100%) kihistumine talveperioodi 1 nädalase perioodi vältel. Roheline joon näitab alumist ja pruun joon ülemist õhukihti.

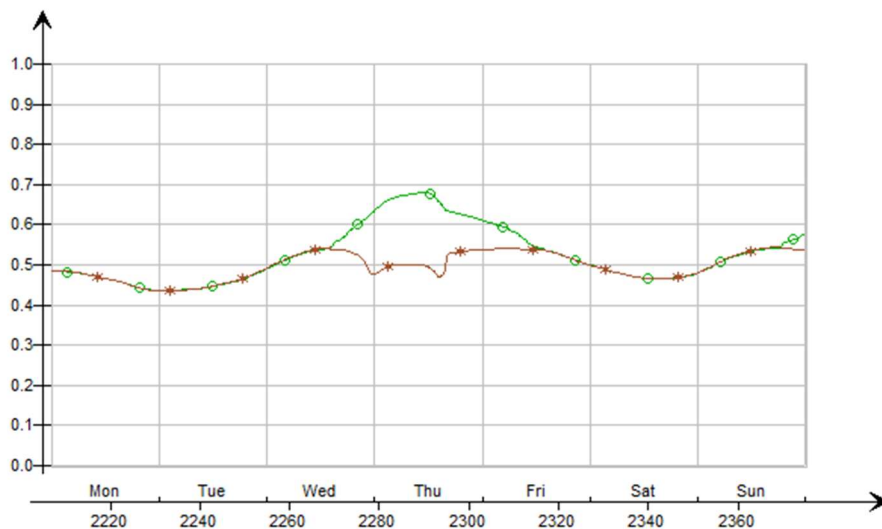
Juhul, kui lakke paigaldatud juga andvate sissepuhke õhujaotajate korral dimensioneerida need nii, et õhujoa kiirus põrandapinna lähistel on alla 0,3 m/s, siis muutub ruumi ülemise ja alumise osa vaheline vertikaalne temperatuurikihistumine oluliselt suuremaks ja võib ulatuda kuni 6 °C-ni. Vastavad üldhoidla vertikaalse temperatuuri- ja suhtelise niiskuse kihistumise simulatsioonitulemused talveperioodi ühe nädalase perioodi vältel on toodud vastavalt Joonis 18 ja Joonis 19. Tulemustest võib teha järelduse, et nii suur temperatuurikihistumine on tekitab olukorra, kus hoidla alumises tsoonis ületatakse suhtelise niiskuse taseme lubatud piirväärtust. Lisaks võib suur vertikaalne temperatuurikihistumine tähendada hoidla alumise tsooni sisetemperatuuri langemist alla minimaalse lubatud temperatuuri piirväärtuse.

Teostatud sisekliima CFD simulatsioonid näitavad, et teatud tüüpi õhujaotuse lahenduse korral võib kõrgete hoidlaruumide sisetemperatuuri vertikaalne kihistumine osutuda suureks ja sellest lähtuvalt tuleb antud tüüpi hoidlate õhujaotuse lahenduse projekteerimisele panna erilist tähelepanu. Kui projekteerimisel selgub, et sissepuhke õhujaotajate jugade kiirused on väikesed ja on oht suure vertikaalse temperatuurikihistumise tekkeks, siis võib hoidlaruumi lakke kaaluda vajaduspõhiselt töötavate laetiivikute panekut.

Samuti näitavad teostatud sisekliima CFD simulatsioonid, et kõrgete hoidlaruumide puhul võib olla otstarbekas valida minimaalne lubatud sisetemperatuuri väärtus kõrgem kui 0 °C. Nii saab ka mõelduka vertikaalse sisetemperatuuride kihistumise korral olla kindel, et temperatuurid jäävad kõigis ruumi punktides üle 0 °C. Antud uuringu tulemuste järgi võiks suure vertikaalse temperatuurikihistumise korral lubatud minimaalse sisetemperatuuri väärtus olla vahemikus 3-5 °C.



Joonis 18. Üldhoidla vertikaalne temperatuurikihistumine talveperioodi 1 nädalase perioodi vältel kui sissepuhke õhujoa kiirus põrandapinna lähisel on alla 0,3 m/s. Sinine joon näitab ülemist ja punane joon alumist õhukihti.



Joonis 19. Üldhoidla vertikaalne suhtelise niiskuse (y-telje väärtus x 100%) kihistumine talveperioodi 1 nädalase perioodi vältel kui sissepuhke õhujoa kiirus põrandapinna lähisel on alla 0,3 m/s. Roheline joon näitab alumist ja pruun joon ülemist õhukihti.

4 Kokkuvõte

4.1 Üldhoidlate optimaalse sisekliima tagamise lahenduse kirjeldus

Töö tulemused näitavad, et üldhoidlate puhul on sisekliima tagamiseks võimalik kasutada ringlusõhu baasil lihtsat ja energiaoptimaalset õhutöötlussüsteemi. Selle süsteemi puhul tagatakse sisekliima parameetrid konstantse minimaalse ringlusõhu vooluhulgaga $0,5-1,0 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$ ja süsteem kasutab madalat välisõhu vooluhulka (minimaalselt üks õhuvahetus kahe ööpäeva jooksul). Üldhoidla õhutöötlussüsteem koosneb ringlusõhu töötlemist tagavast retsirkulatsiooniseadmest ja välisõhu vahetuseks mõeldud seadmest. Retsirkulatsiooniseadmes toimub õhu filtreerimine, jahutamine, kuivatamine, soojendamise ja niisutamine. Välisõhuseade on soojustagastiga sissepuhke-väljatõmbeseade, kus külmal perioodil toimub väljatõmbeõhult soojuse ja niiskuse tagastus ning soojal perioodil saab hügrokoopse või sorptsioon tüüpi rootorsoojustagasti kasutamisel sissepuhkeõhule ka külma tagastada ja teatud määral ka välisõhku kuivatada. Üldhoidla jaoks optimaalse õhutöötlusseadme põhimõtteline skeem on toodud käesoleva töö Joonis 9.

4.2 Hiiumaa hoidla arvutuslikud kütte-, jahutus- ja niisutusvõimsused

Antud töö raames analüüsitud Hiiumaa hoidla õhutöötlussüsteemi arvutuslikud kütte-, jahutus- ja niisutusvõimsus koos vajaliku ringlusõhu vahetuse ning lubatud suhtelise niiskuse varieerumisega on välja toodud Tabel 7. Mõlema Tabel 7 kajastatud lahenduse puhul on suhtelise niiskuse varieerumine alla sisekliima lähteülesandes lubatud 5% piirväärtuse. Õhutöötlemisseadme komponentide dimensioneerimisel võiks lähtuda suurema õhuvooluhulgaga lahenduse korral arvatud võimsustest. Selline lähenemisviis tagab sisekliima parameetrite täitmise ka mõne lähtetingimuse muutumise korral (näiteks vaheuste pikemaajalisem avatus, arvutuslikus suurem välispiirete õhuleke või liiga kõrge vertikaalne temperatuurikihistumine). Juhul, kui sisekliima monitoorimise käigus selgub, et sisekliima parameetrid on tagatud ka minimaalse õhuvahetuse $0,5 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$ korral, siis on hoone eksploatatsiooni ajal siiski mõistlik väiksema seguõhu vooluhulga kasutamine.

Tabel 7. Üldhoidla arvutuslikud kütte-, jahutus- ja niisutusvõimsused.

| Õhutöötlemissüsteemi lahendus/süsteemi arvutuslik võimsus | Vajalik ruumi ringlusõhu õhuvahetus, $\text{l/(s}\cdot\text{m}^2)$ | RH varieerumine üle 10% ööpäevas, (h/aastas)/ (%) | Kütte-kalorifeeri võimsus, kW | Jahutus-patarei võimsus, kW | Aurniisuti niisutusvõimsus, kg/h |
|---|--|---|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Baasmudeli lahendus | 0,5 | 123/ 1,40 | 5,92 | 2,63 | 0,46 |
| Suurema õhuvahetusega lahendus | 1,0 | 67,1/ 0,77 | 9,88 | 2,70 | 0,46 |

4.3 Üldhoidla sisekliimaparameetrite tagamine

Hiiumaa hoidla maksimaalne suvine üldhoidla ruumi sisetemperatuur oli $20,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ja minimaalne talvine temperatuur vastavalt $6,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Valitud õhukonditsioneerimise lahendus tagab seega üldhoidla siseõhutemperatuuri jäämise lubatud piiridesse ($0-21 \text{ }^\circ\text{C}$). Baasmudeli maksimaalne ühe tunni pikkuse perioodi temperatuuri varieerumine on $0,22 \text{ }^\circ\text{C}$, mis jääb samuti lubatud piiridesse (maksimaalselt lubatud temperatuuri varieerumine $1 \text{ }^\circ\text{C/h}$).

Üldhoidla suhtelise niiskuse taseme püsivust lubatud vahemikus (35–60%) ja ka suhtelise niiskuse varieerumist (ööpäeva jooksul võib suhteline niiskus maksimaalselt muutuda 10% võrra) on võrreldes sisetemperatuuri tagamisega, oluliselt keerukam täita. Baasmudeli simulatsioonitulemused näitavad, et antud süsteemi korral on minimaalne talveperioodi suhtelise niiskuse tase 41,5% ja maksimaalne

suveperioodi suhtelise niiskuse tase 62%. Suhtelise niiskuse tase ületab suvist lubatud taset 11,7 h aastas ehk 0,1% ajast. Suhtelise niiskuse varieerumine on suurem kui lubatud 123 h ehk 1,4% ajast.

Üldhoidla sisekliima simulatsioonitulemuste osas saab teha järgmised kokkuvõtlikud järeldused:

- Töös välja toodud õhutöötlemislahendust kasutades on sisetemperatuuri ja selle stabiilsuse tagamise nõue tagatud
- Kõige keerulisem on suhtelise niiskuse ööpäevase varieerumise nõude tagamine.
- Hoidla õhuvahetuse suurendamine aitab suhtelise niiskuse ööpäevast varieerumist stabiliseerida.
- Hoidlaruumi õhupidavus on äärmiselt oluline, kuna see aitab ööpäevast hoidla temperatuuri ja suhtelise niiskuse tasemete varieerumist stabiliseerida.
- Välisõhu ventilatsiooniseadme puhul aitab kõrge niiskustagastusega hügrokoopne rootorsoojustagasti ööpäevast suhtelise niiskuse taseme varieerumist stabiliseerida.
- Kui välisõhu ventilatsiooniseadmel ei ole hügrokoopset soojustagastit või kui soojustagastit üldse ei ole, siis on suure tõenäosusega suhtelise niiskuse varieerumise stabiliseerimiseks vajalik hoidla ringlusõhuvahetust tõsta kõrgemaks kui minimaalne võimalik õhuvahetuse väärtus $0,5 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$.
- Õhutöötlusprotsesside tööpõhimõtete puhul on (eelkõige suhtelise niiskuse ööpäevase varieerumise mõttes) oluline, et protsesside juhtimine ei toimuks „on/off“ reguleerimisena täpselt lubatud minimaalsel ja maksimaalsel temperatuuri/suhtelise niiskuse väärtustel. Seega tuleb hoidla erinevate õhutöötlusprotsesside sujuvaks juhtimiseks kasutada regulaatori proportsionaalsusala väärtuste seadistamist.

4.4 Hoone energiasimulatsioonid

Vastavalt baasmudeli simulatsioonitulemusele on hoidla soojusenergia erikulu $7,9 \text{ kWh}/\text{m}^2$, jahutusenergia erikulu $3,2 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ja niisuti elektri erikulu $0,6 \text{ kWh}/\text{m}^2$. Hoidla kogu elektri erikulu soojuspumba ja külmamasina tehniliste näitajate korral $7,8 \text{ kWh}/\text{m}^2$. Hoidla ja ülejäänud hoone ruumide kogu elektri erikulu on baasmudeli tulemuste alusel kokku $25,4 \text{ kWh}/\text{m}^2$.

Vastavalt simulatsioonide tulemustele saab üldhoidla energiatarbimise kohta teha järgmised kokkuvõtlikud järeldused:

- Mida madalamad on nii välisõhu vooluhulk kui ka retsirkulatsiooni vooluhulk, seda energiatõhusama lahendusega tegu on.
- Hoone õhupidavusel on hoone üldisele energiatarbimisele selge mõju. Hoone (eelkõige üldhoidla) õhupidavus võiks minimaalselt olla baasmudelis toodud väärtusega $1 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ 50 Pa rõhuerinevuse juures.
- Energiatõhususe seisukohast võiks hoidla välisseinte soojusläbivuse väärtus olla alla $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.
- Energiatõhususe seisukohast võiks hoidla ja hoone ülejäänud ruumide vaheliste siseinte soojusläbivuse väärtus olla alla $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.
- Hoidla õhutöötlusseadme jahutuspatari järgset temperatuuri tuleks kindlasti juhtida vajaduspõhiselt.
- Hiiumaa hoidla põhiprojektis projekteeritud hoidla õhutöötlemise lahenduse korral (täppiskonditsioneer ja põrandküttega süsteem, sisetemperatuuri hoitakse aastaringelt seadeväärtusel $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ning välisõhu norväärtuseks on $0,35 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$) oleks soojusenergia tarbimine ligi 9 korda suurem kui baasmudeli lahenduses ja jahutusenergia tarbimine 2,7 korda kõrgem. Lisaks suureneks põhiprojekti järgse lahenduse puhul aurniisuti elektritarve 13 korda võrreldes antud töös välja töötatud baaslahendusega.

4.5 Hoidla sisekliima CFD simulatsioonid

Teostatud sisekliima CFD simulatsioonid näitavad, et teatud tüüpi õhujaotuse lahenduse korral võib kõrgete hoidlaruumide sisetemperatuuri vertikaalne kihistumine olla suur ($>6 \text{ }^\circ\text{C}$) ja sellest lähtuvalt tuleks üldhoidlate õhujaotuse lahenduse projekteerimisele osutada kõrgendatud tähelepanu. Kui projekteerimisel

selgub, et sissepuhke õhujaoajate jugade kiirused on liiga väikesed ja on oht suure vertikaalse temperatuurikihistumise tekkeks, siis võib hoidlaruumi lakke kaaluda vajaduspõhiselt töötavate laetiivikute panekut.

Samuti näitavad teostatud sisekliima CFD simulatsioonid, et kõrgete hoidlaruumide puhul võib olla otstarbekas valida minimaalne lubatud sisetemperatuuri väärtus kõrgem kui 0 °C. Nii saab ka mõõduka vertikaalse sisetemperatuuride kihistumise korral olla kindel, et temperatuurid jäävad kõigis ruumi punktides üle 0 °C. Uuringutulemuste järgi võiks suure temperatuurikihistumise korral üldhoidla minimaalse lubatud sisetemperatuuri väärtus olla vahemikus 3–5 °C.

4.6 Projekteerimisjuhised

4.6.1 Õhutöötlemise protsessid ja seadmed

Üldhoidla õhutöötlusseade võiks koosneda ringlusõhu töötlemist tagavast retsirkulatsiooniseadmest ja välisõhu vahetuseks mõeldud seadmest. Välisõhu seade on soovituslikult soojustagastiga mehaaniline sissepuhke/väljatõmbe ventilatsiooniseade, mis koosneb soojustatud labadega välisõhu klappidest, filtritest, soojustagastist, ventilaatoritest ja seadme juhtautomaatikast. Kuna välisõhku pole vaja lisaks soojendada, siis puudub vajadus sellesse seadmesse küttekalorifeeri lisamisel. Küll aga tuleb antud seadme dimensioneerimisel veenduda, et valitud soojustagasti tüüp talvisel ajal ei jäätuks ning seadmesse ette näha vastavad soojustagasti jäätumise vältimise/sulatuse meetmed. Antud seadme soojustagasti tööd on otstarbekas juhtida hoidla ruumitemperatuuri alusel nii, et sissepuhke temperatuur pärast rootorsoojustagastit on hoidla ruumitemperatuuriga võrdne. Süsteem teostatakse konstantse välisõhuhulgaga 0,035 l/(s*m²), mille jaoks kasutatakse oma välisõhuventilaatorit. Välisõhu minimaalne õhuhulk 0,035 l/(s*m²) peab olema täpselt seadistatav oma ventilaatoriga, sest süsteemi energiakasutus ja töötamine on välisõhu õhuhulga suhtes kriitiline. Eelnevast suurema minimaalse õhuhulga puhul ei pruugita sisekliima nõudeid täita. Süsteemi võib vajadusel dimensioneerida nii, et välisõhu vooluhulka saaks suurendada kuni 0,2 l/(s*m²), et hoidlast ehitusniiskust välja kuivatada. Filtritena võib kasutada standardseid jäme- ja peenfiltreid: välisõhule ePM1 60% (F7) ning väljatõmbeõhule ePM10 60% (M5). Väikeste hoidlaruumide puhul on välisõhu vooluhulk nii väike, et süsteemi võiks põhimõtteliselt välja ehitada ka ilma soojustagastuseta, kuid suuremates hoidlates on soojustagastus vajalik. Juhul kui soojustagastust ei taheta kasutada, tuleb teostada eraldi kuluoptimaalsuse arvutused.

Ringlusõhu tarvis on süsteemis retsirkulatsiooniseade, mis koosneb filtrisektsioonist (ePM1 60%), jahutuspatareist, küttekalorifeerist, ventilaatorist ja aurniisuti sektsioonist. Seade tagab hoidlas konstantse minimaalse õhuvooluhulga 0,5–1,0 l/(s*m²). Hoidla suhtelist niiskust kontrollitakse retsirkulatsiooniseadme küttekalorifeeriga, mida juhitakse vastavalt hoidlaruumi alumises osas mõõdetavale suhtelisele niiskusele. Kui hoidlaruumi suhteline niiskus ületab seadeväärtust (näiteks 55%), siis soojendatakse sissepuhkeõhku nii kaua kuni vastav seadeväärtus saavutatakse. Kui hoidlaruumi sisetemperatuur langeb talvisel perioodil alla lubatud piirväärtuse (näiteks 3–5 °C), siis on mõistlik retsirkulatsiooniseadme küttekalorifeeri abil hoidlaruumi mõningal määral lisaks kütta. Teostatud simulatsioonid näitasid, et baasmudeli lähteandmete puhul ei langenud hoidlaruumi sisetemperatuur alla 6,6 °C, mistõttu antud uuringus vaadeldud üldhoidla ruumi lisaks kütta vaja ei olnud.

Tagamaks hoidla temperatuuri püsimise suvel alla 21 °C ja suhtelise niiskuse taseme jäämist alla 60%, on tarvis soojal perioodil välisõhku jahutada ja kuivatada. Simulatsioonitulemused näitasid, et Hiiumaa hoidla puhul on piisav vajaduspõhine õhu jahutamine 13 °C-ni. Suuremate niiskuskooormustega üldhoidlate korral võib jahutuspatarei järgne vajalik temperatuur jääda vahemikku 11–13 °C. Jahutuspatarei vee temperatuurigraafik on seega ca 7/12 °C. Simulatsioonitulemused näitasid, et samaaegselt õhu jahutamisega on mõistlik seda ka kalorifeeriga järelsoojendada, mistõttu tuleb paralleelselt jahutuspatarei reguleeriventiili juhtimisele ka küttekalorifeeri soojusväljastust juhtida. Suvisel perioodil toimub kütteväljastuse juhtimine sama juhtimisalgoritmi alusel, mis talvel.

Kui väljatõmbeõhu suhteline niiskus on alla seadeväärtuse, siis soojendamist ei toimu ja suhteline niiskus püsib lubatud vahemikus (35-60%) tänu hoidla jahutamisele ning poorbetoonseinte ja hoiustatavate museaalide niiskusülekandele. Niiskuse langedes alla näiteks 40-45% rakendub aurniisuti. Süsteemi põhimõtteline lahendus koos peamiste andurite paiknemisega on eraldi välja toodud käesoleva aruande Joonis 9.

Õhujaotus tuleb teostada nii, et sissepuhkeõhujoad jõuavad põrandani, näiteks 6 m sammuga kõikidel hoidla seintel allapoole suunatud sissepuhkeotsikud 1 m kõrgusel põrandast, või alternatiivselt laest pikka juga andvatesissepuhke õhujaoturite abil. See on vajalik soojendatud sissepuhkeõhu efektiivseks segunemiseks ja temperatuuri- ning niiskuseerinevuste vältimiseks. Sissepuhkeõhu maksimaalne temperatuur ei tohiks üldhoidlates olla kõrgem kui 30 °C. Kui simulatsiooni arvutused seda lubavad, siis võiks võimalusel kasutada sissepuhkeõhu maksimaalset temperatuuri ligikaudu 25 °C, sest see aitab vähendada hoidla vertikaalset sisetemperatuuri ja niiskuse kihistumist. Kui projekteerimisel selgub, et sissepuhke õhujaotajate jugade kiirused on liiga väikesed ja on oht suure vertikaalse temperatuurikihistumise tekkeks, siis võib hoidlaruumi lakke kaaluda vajaduspõhiselt töötavate laetiivikute panekut.

Hoidlate ventilatsiooniseadmed liidetakse hoone automaatikasüsteemi ja varustatakse piisava arvu mõõtmispunktidega. Olulised mõõtmispunktid on väljatõmbeõhu suhteline niiskuse ja temperatuur, ventilaatorite seaded või vastavad õhuhulgad, sissepuhke temperatuur enne ja peale jahutuspatareid, küttekalorifeeri ja aurniisuti sektsiooni. Arvestades, et hoidla ei ole pidevalt viibitav ruum, peaks hoidlas olema CO₂ andur ja tabloo, kust on võimalik CO₂ taset monitoorida, juhul kui mingil põhjusel viibitakse ruumis kauem. Hoidla retsirkulatsiooniseadme temperatuuri ja suhtelise niiskuse juhtimine tuleb teostada hoidla alumises tsoonis paiknevate temperatuuri ja suhtelise niiskuse andurite alusel. Kõrgetes hoidlates ei tohi kindlasti seadme juhtimist teostada ainult väljatõmbeõhu kanalis paiknevate andurite näitude alusel.

Konserveerimislaboris kasutatakse portatiivset niisutit vastavalt vajadusele ja tsentraalset niisutust välja ei ehitata. Konserveerimislabori ruum tuleks lisaks varustada kohtaratõmme kohtaratõmbe elemendiga.

4.6.2 Passiivsete meetmete rakendamine: nõuded hoone tarinditele ja hoidlate paiknemisele

Hoidlate vaheseinad

Hoidlate vaheseinad ehitatakse mittekandeseintena poorbetoonist (nt Aeroc). Poorbetooni kasutamine vaheseinte materjalina tagab madala energiakuluga hoidlate ehitusfüüsikaliseks toimimiseks vajaliku niiskuspuhvri. Selle tõttu on hoidla seinapindade viimistlemine (värvimine) rangelt keelatud.

Hoidlate põrandad

Plaat pinnasel tüüpi põrand soojustatakse täies ulatuses vähemal 150 mm soojustusega.

Vahelaed

Põhikorruse ja hoidlate vahelised vahelaed soojustatakse vähemalt 100 mm soojustusega.

Hoidlate õhupidavus

Hoidlate suhtelise niiskuse kontroll eeldab, et hoidlad on ehitatud võimalikult hea õhupidavusega. Hoidlate välispiirete õhulekkearv ei tohi ületada $1 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ 50 Pa rõhkude erinevusel. Selle saavutamiseks tuleb tagada väliseinte ja katuslae liitumise õhupidavus.

Hoidlate paiknemine

Üldhoidlad tuleks võimalusel rajada ühe ruumina. Kasutada võib ülejäänud hoidla õhuruumi avatatud vahekorrustega lahendust.

Hoidlaruumi ja ülejäänud hoone ruumide vahelised siseüksed

Piisavalt suure pindalaga hoidlaruumi korral ei mõjuta vaheuste lühiajaline avamine olulisel määral hoidla sisekliima parameetrite tagamist. Seega ei ole üldjuhul eraldi lüüsi ruumi rajamine otstarbekas.

4.6.3 Üldhoidla ruumikaart

Tabel 8. Üldhoidla ruumikaart.

| | |
|--|--|
| Sisekliima klass | Pole määratud |
| Siseõhutemperatuuri lubatud vahemik | 0–21 °C |
| Siseõhu suhtelise niiskuse lubatud vahemik | 35 – 60% |
| Siseõhu temperatuuri muutumise kiirus | < 1°C/h |
| Siseõhu suhtelise niiskuse muutumise kiirus | < 10% ööpäevas |
| Sisekliima parameetrite püsimine lubatud vahemikes | Vähemalt 95%-il jooksul ruumide kasutusajast |
| Sisekliima parameetrite nõuete tagamise kontroll | Esitada kõigi ruumikaardil olevate sisekliima parameetrite püsivuse osas lubatud vahemikes ja nende muutumise kiiruse kohta dünaamilise simulatsiooniprogrammiga teostatud arvutused. |
| Õhuvahetus väärtused | Värske õhu normväärtus: 0,021 h ⁻¹ (0,5 korda ööpäevas). Ringlusõhu minimaalne normväärtus: 0,5 l/(s*m ²). |
| Õhutöötlusseadmete põhimõtteline lahendus | Eraldi soojustagastiga värskõhu seadmel ja ringlusseadmel (õhu jahutamine, soojendamise, kuivatamine) baseeruv lahendus, üldiselt konstantne ringlusõhu vooluhulk, värskõhu seadme soojustagasti vajadust võib hinnata kasutades selleks dünaamilisi simulatsioone. |
| Maksimaalne õhuliikumise kiirus hoidla töötsoonis | Pole määratud |
| Jahutus ja kuivatus | Tsentraalse õhutöötlusseadme baasil |
| Küte | Tsentraalse õhutöötlusseadme baasil |
| Välispiirete õhulekkearv | 1 m ³ /(h*m ²) 50 Pa rõhkude erinevusel |
| Ruumi temperatuuri ja suhtelise niiskuse reguleerimine | Hoidla alumises tsoonis paiknevate temperatuuri ja suhtelise niiskuse andurite alusel. Õhutöötlusseadme reguleeriine toimub läbi hooneautomaatika tsentraalselt. Hoidlaruumi erinevates punktides paiknevad sisetemperatuuri ja suhtelise niiskuse näitavad andurid peavad võimaldama vastavate parameetrite visuaalset kontrolli. Lisaks paikneb hoidlaruumis eraldi CO ₂ andur ja tabloo, kust on võimalik CO ₂ taset monitoorida. |