



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

HOIDLATE SISEKLIIMA TAGAMISE LAHENDUSTE VÕRDLUS

COMPARISON OF INDOOR CLIMATE ASSURANCE SOLUTIONS OF REPOSITORIES

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Rivo Olvet

Üliõpilaskood 153923EAKI

Juhendaja: Alo Mikola, nooremteadur

Tallinn 2021

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad,

kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

17. mai 2021

Autor: Rivo Olvet

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

17. mai 2021

Juhendaja: Alo Mikola

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

".....".....202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Rivo Olvet (sünnikuupäev: 23.10.1995)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Hoidlate sisekliima tagamise lahenduste võrdlus,

mille juhendaja on Alo Mikola,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

Rivo Olvet /allkirjastatud digitaalselt/

17.05.2021

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Rivo Olvet, 153923 EAKI

Õppekava, peeriala: EAKI02/15, Hoonete sisekliima ja veetehnika

Juhendaja(d): nooremteadur, Alo Mikola, 56647035

Konsultant: puudub

Lõputöö teema:

Hoidlate sisekliima tagamise lahenduste võrdlus

Comparison of indoor climate assurance solutions of repositories

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Hoidlate sisekliimalahendustega tutvumine varasemalt teostatud uurimistöode ja projekteeritud lahenduste baasil.
2. Hoidlaruumide energiakasutuse dünaamiline simulatsioon IDA ICE programmiga ja tulemuste analüüs.
3. Hoidlaruumides kasutatavate õhukonditsioneerimissüsteemide mudelite ja juhtimisloogikate koostamine.
4. Koostatud arvutusmudelite parameetiline analüüs
5. Erinevate hoidlate konditsioneerimislahenduste energiakulu ja sisekliima parameetrite võrdlemine
6. Konditsioneerimissüsteemi õhukanalite soojuskadude mõju uurimine süsteemi suhtelise niiskuse ja temperatuuriparameetrite tagamise täpsusele
7. Optimaalsete lahenduste/tulemuste analüüs ja järeldused, võimalike kitsaskohtade välja toomine ja lahenduste pakkumine.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teostada valdkonna kirjanduse, standardite, raamatute ülevaatus ja leida eri tüüpi hoidlatele kehtestatud nõuded. Kirjeldada olulisust energiatõhususe seisukohast, tutvuda Eesti Rahvusraamatukogu projektdokumentatsiooniga (hoidlate paiknemine ja tehnosüsteemid).	28.02
2.	Hoidlate konditsioneerimissüsteemide valik, mudelite lähteparameetrite ja simulatsiooni variantide valik. Kirjeldada erinevaid meetodikaid ja tööloike. Mudeli koostamine (geomeetria, hoone + konditsioneerimis-süsteemid)	27.03

3.	Võimalike tehniliste lahenduste analüüs, edasi arendatud variantide valik simulatsioonid. Koostada analüüsitavad variandid tulenevalt süsteemide eripärast, sh juhtimise loogikast, väliskliimast ja sisekeskkonna tingimustest. Analüüsida peamisi kitsaskohti ja pakkuda välja lahendusi. Tulemused graafiliselt ja/või tabeli kujul.	09.04
	Tulemuste analüüs/võrdlus energiatõhususe seisukohast. Süsteemide plussid/miinused. Analüüsida võimalikke kokkuhoiu lahendusi ja tulemusi. Tulemusena töö järeldused ja kokkuvõte	08.05
	Töö lõplik vormistus, esitamine kaitsmiseks, kaitsmiseks valmistumine.	17.05

Töö keel: Eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 17. mai 2021a

Üliõpilane: Rivo Olvet 17. mai 2021a
/allkirjastatud digitaalselt/

Juhendaja: Alo Mikola 17. mai 2021a
/ allkirjastatud digitaalselt /

Programmijuht: Martin Thalfeldt 17. mai 2021a
/ allkirjastatud digitaalselt /

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	8
Lühendite ja tähiste loetelu	9
SISSEJUHATUS.....	10
KIRJANDUSE ÜLEVAADE	12
1 HOIDLARUUMIDEGA HOONE SISEKLIIMA ALUSED.....	14
1.1 ARHIIVI HOIDLARUUMIDE SISEKLIIMA ÜLDISELOOMUSTUS, ERI TÜÜPI HOIDLAD JA SISEKLIIMA PARAMEETRID	14
1.2 TEMPERATUURI JA SUHTELISE NIISKUSE MÕJU HOIDLATES HOIUSTATAVATELE MATERJALIDELE	14
1.2.1 Temperatuur.....	15
1.2.2 Suhteline niiskus	15
1.3 HOIDLATE KONDITSIONEERIMISSÜSTEEMIDE KOMPONENDID	17
1.3.1 Konditsioneerimissüsteemide üldpõhimõtte	17
1.3.2 Jahutamine	18
1.3.3 Kütmine.....	18
1.3.4 Niisutamine	18
1.3.5 Kuivatamine	19
1.3.6 Öhu puhastamine	20
2 METOODIKA	21
2.1 UURMISOBJEKT	22
2.1.1 Eesti Rahvusraamatukogu ajalugu, arhitektuur ja paiknemine	22
2.1.2 Hoidlate tüübid ja paiknemine	23
2.2 SIMULATSIOONI GEOMEETRIAMUDEL JA LÄHTEPARAMEETRID	25
2.3 VABASOOJUSED JA KASUTUSPROFIILID.....	29
2.4 KONDITSIONEERIMISSEADMED JA MODELLERIMINE.....	31
2.4.1 Tüüphoidla simulatsioonid.....	31
2.4.2 Konditsioneerimissüsteem tüüp 1 (+15...21°C; RH 40...55%)	32
2.4.3 Konditsioneerimissüsteem tüüp 2 (+6...10°C; RH 30...45%).....	34
2.4.4 Konditsioneerimissüsteem tüüp 3 (-3...-7°C; RH 30...40%)	39
3 TULEMUSED JA ANALÜÜS	43
3.1 TÜÜPVARIANTIDE TULEMUSED TÜÜPHOIDLA BAASIL	43
3.1.1 Tüüp 1.....	43
3.1.2 Tüüp 2.....	48
Aurusti ja jahutuspatarei jäätumine.....	48
3.1.3 Regeneratsiooni kalorifeeri energiaallika võrdlus	54
3.1.4 Tüüp 3.....	55
3.2 SIMULATSIOONID EESTI RAHVUSRAAMATUKOGU HOIDLATE BAASIL	59
3.2.1 Piirdekonstruktsioonide soojuslähivus	60

3.2.2 Infiltratsioon.....	62
3.2.3 Välisõhu kogus.....	65
3.2.4 Õhukanalite soojuskadude mõju temperatuuri ja suhtelise niiskuse tagamisele	67
3.3 JÄRELDUSED.....	73
KOKKUVÕTE.....	77
SUMMARY.....	80
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU.....	83

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema valdkond on välja pakutud Alo Mikola poolt. Uurimistöö teema täpsemal sõnastamisel ja edasi arendamisel on saadud ideid käimasolevast Eesti Rahvusraamatukogu renoveerimisprotsessist. Töö on koostatud Tallinnas. Töö koostamisel kasutati peamiselt dünaamilise energiakasutuse simuleemistarkvara IDA-ICE ning tulemuste järel analüüsiks oli kasutusel tabelarvutustarkvara Microsoft Excel.

Sooviksin tänada magistritöö juhendajat Alo Mikolat huvitava teema, suunavate juhiste ning sisukate konsultatsioonide eest. Sooviksin tänada ka peret ning ülejäänud lähedasi, kes kiiretel ja rasketel hetkedel toeks olid ja motiveerisid pingutama. Lisaks soovin tänada tööandja OÜ GECC LP meeskonda toetava suhtumise eest magistritöö koostamise kiirematel perioodidel.

Võtmesõnad: hoidlate sisekliima, energiatõhusus, süsteemide optimeerimine, dünaamiline energiasimulatsioon, magistritöö

Lühendite ja tähiste loetelu

RH – suhteline niiskus, [%], (ingl k *Relative humidity*)

T – temperatuur, [°C]

ASHRAE – Ameerika kütte-, jahutus- ja õhu konditsioneerimise inseneride selts (ingl k *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*)

CLO – riietuse soojusisolatsioon, (ingl k *clothing insulation*)

MET – inimeste aktiivsuse näitaja, (ingl k *metabolic rate*)

Estonian TRY – Eesti energiaarvutuse baasaasta (ingl k *Estonian test reference year*)

U – tarindi soojusläbivustegur, [W/(m²*K)]

q_i– aasta keskmine infiltratsiooni õhuvooluhulk, [l/s]

q₅₀– hoone välispiirde keskmine õhulekkearv, [m³/(hm²)].

SISSEJUHATUS

Tänases maailmas on aktuaalseks probleemiks globaalne kliima soojenemine. Rahvusvahelisest Pariisi kliimakokkuleppest tulenevalt on seatud eesmärk hoida globaalne temperatuuri tõusmine alla 2°C võrreldes ajaga enne tööstusrevolutsiooni [1]. Euroopa Liidus on kliimaprobleemist tulenevate keskkonnamõtjude vähendamiseks võetud eesmärk välja töötada säästlik, konkurentsivõimeline ning väikse CO₂ jalajäljega energiasüsteem. Vastavalt Euroopa Liidu siseselt kehtestatud regulatsioonidele on liikmesriikidel kohustus liikuda vähem saastavama energiasüsteemi leidmise suunas ning lõpptulemusena aastaks 2050 saavutada kliimanetraalsus [2].

On teada, et Euroopa Liidu energia lõpptarbimisest võtab enda alla ligikaudu 50% kütte- ja jahutusenergia, mis 80% määral leiab kasutust hoonetes. Euroopa Liidus on kliimanetraalsuse saavutamisel üks olulisemaid aspekte hoonete energiatarbe vähendamine läbi vana hoonefondi renoveerimise ning uute energiatõhusate hoonete loomise [2]. Käesoleva töö kontekstis sobituvad hoidlad hästi hooneteks või hoone osadeks, mille energiatõhustamisega on võimalik saavutada märkimisväärne energiatarbe kokkuhoid.

Erinevat tüüpi hoidlahooned liigituvad hooneteks, millel esineb sageli kõrge energiatarve. Energiatarve tuleneb rangetest nõuetest, mida on vaja hoidlates sisekliimasüsteemidega tagada, et hoiustatavad materjalid riknemata säiliks. Hoidlate energiatõhususe võiks tinglikult jaotada kahte ossa. Energiatõhususe saavutamisel on oluline komponent see, mis on seotud hoidla kui hoonega. Tähtis on hoone paiknemine, millised on piirdetarindid ning üleüldine arhitektuurne kontseptsioon. Hoidlate konditsioneerimissüsteemide täpne ja teadmiste põhine kavandamine on teine oluline komponent, mis määrab ära hoidla energiatõhususe. Kasutust leidvate sisekliimasüsteemide erinevus seisneb asjaolus, et enamjaolt toimub sisekliima reguleerimine kindlaks määratud seadeparameetrite ranges vahemikus, mis muudab kasutatavad süsteemid keerukaks. Täpne ning vähete mõjutustega õhukonditsioneerimis lahenduste kasutamine on energiakulukas ja kallis, mistõttu hoidlate sisekliima süsteemide kavandamisel tuleb võimalike variantide seast leida võimalikult sobiv lahendus vastavalt konkreetsetele juhtudele.

Antud magistritöö keskendub eelkõige võimalike hoidlates kasutatavate õhukonditsioneerimis lahenduste võrdlemisele läbi dünaamiliste energiasimulatsioonide. Dünaamiliste energiasimulatsioonide teostamiseks on kasutusel simulatsioonitarkvara IDA-ICE. Lõputöös on vaatluse all enam levinud temperatuuri ja suhtelise niiskuse tingimustega hoidlatüübid. Hoidlatüüpide põhiselt on koostatud

võimalike konditsioneerimisseadmete konfiguratsioonide simulatsioonimudelid ning teostatud aastased energiasimulatsioonid. Seadme konfiguratsioonide võrdlus viiakse läbi loodud tüüphoidla baasil. Magistritöös on uuritud piirete soojusläbivuse, infiltratsiooni ja välisõhukoguse muutmise mõju süsteemide energiatõhususele. Lisaks on käsitletud õhukanalite soojuskadudest tuleneva mõju temperatuuri ja suhtelise niiskuse tagamise täpsusele. Parameetrilise analüüsi simulatsioonide läbiviimiseks on kasutusel Eesti Rahvusraamatukogu hoonest loodud osamudelid, et seostada tulemusi reaalse hoonega ning näha võimalikku mõju hoidlate paiknemisele.

Lõputöö esimeses peatükis antakse ülevaade hoidlate sisekliimast ning selle tagamise teoreetilistest alustest. Teine peatükk keskendub töös kasutatud meetodika kirjeldamisele ning selgitusele, millistel alustel simulatsioone teostati ning kuidas on ülesehitatud baasvariantide juhtimisloogikad. Kolmandas peatükis esitletakse simulatsioonidest saadud tulemusi, nende alusel loodud graafikuid ning viiakse läbi tulemuste analüüs ja formuleeritakse järeldused.

KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Hoidlate, muuseumite ning raamatukogude näol on tegemist hoonetega, kus sisekliima parameetreid tagatakse oluliselt täpsemas vahemikus kui tavapäraselt levinud. Hoidla funktsiooniga hoonetes on seatud kindlad seadeparameetrid temperatuurile, suhtelisele õhuniiskusele ja ruumiõhu kvaliteedile. Täpne sisekliima reguleerimine avaldab suurt mõju hoone energiatarbele. Peamised valdkonnas läbiviidud uuringud on seotud hoidlate energiatarbe vähendamise võimalikkusega. Täiendavalt on võimalik leida uurimusi hoidlate sisekliima parameetrite tagamisest tehniliste lahenduste võtmes. Hoidlatele keskenduvaid uurimusi on tehtud vähe, kuid muuseumite ja raamatukogude alaseid uurimusi on võimalik leida rohkemal määral. Autori poolt leitud kirjanduse põhjal ilmneb, et väliskirjanduse uuringud on küllaltki spetsiifilised ning üldistava iseloomuga.

T. Padfieldi ja P. K. Larseni artiklis [3] tuuakse välja põhilised aspektid, millele tuleb tähelepanu pöörata hoidlate sisekliima kavandamisel. Põhjalik ülevaade antakse temperatuuri ja suhtelise niiskuse seostest ning mõjutustest arhiivide sisekliimale. Täiendavalt tutvustatakse konstruktsioonilisi lahendusi, mis aitavad tagada stabiilsemat niiskuslikku olukorda. Kokkuvõtvalt tõdetakse, et on erinevaid meetodite kombinatsioone, mis aitavad saavutada sobiliku sisekliima hoidlates.

K. Kompatscher, R.P Kramer, B. Ankersmit, H.L. Schellen keskenduvad uurimustöös [4] hoidlate sisekliima süsteemide katkendliku ja dünaamilise seadesuuruse kasutamise võimalikkuse hindamisele. Tõdetakse, et täpne sisekliima kontroll toimub eelkõige hoiustatavate esemete tarbeks. Hinnatakse asjaolu, et sisekliima parameetrite tagamise seisukohast on oluline roll suurel kogusel hoiustataval hügroskoopsel materjalil. Töös pakutakse välja stsenaariumeid sisekliima ning energiatõhususe seisukohast. Tulemusena tuuakse välja erinevate lähenemiste kitsaskohad ja võimalikud energiasäästu potentsiaalid.

F. Ascione, L. Bellia, A.Capozzoli, F. Minichiello artiklis [5] tutvustatakse ohutegureid, mille mõju arhivaalidele on arutelu all kui kavandatakse muuseumi või hoidla otstarbelisi hooneid. Lisaks tutvustatakse tüüpilisemaid muuseumite konditsioneerimissüsteemide konfiguratsioone ja nende põhimõtteid. Väljatoodu erinevate süsteemide näidete baasil koostatakse süsteemide energia- ja kulutõhususe võrdlus ning täiendavalt analüüsitakse sisekliima tagamise võimekust.

R.Kramer, J. van Schijndel, H. Schellen esitavad läbiviidud uurimustöös [6] algoritmi temperatuuri ja suhtelise niiskuse seadesuuruse määramiseks arvestades igat kollektsiooni ja soojusliku mugavuse aspekte eraldiseisvalt. Esitatakse põhjalik ülevaade algoritmi kavandamise lähteparameetritest ning seisukohtadest. Algoritmi koostamisel

on aluseks võetud ASHRAE poolt esitatud muuseumite/hoidlate klassifikatsioon [7]. Vaadeldakse välja töötatud algoritmi toimimist erinevate asukohtade ning lähteparameetrite seisukohast. Kokkuvõtvalt antakse hinnang väljatöötatud algoritmi toimimisele ja erinevatele võimalikele rakendusvõimalustele.

H. Janssen, J. E. Christensen tegelevad artiklis [8] teguritega, mis muudavad paljud hoidlad suure energiatarbega hooneteks. Artiklis käsitletakse täieliku passiivse konditsioneerimise võimalikkust hoidla hoonetes. Tõdetakse, et pigem on passiivne konditsioneerimine illusioon, mida on raske saavutada. Artiklis kirjeldatakse võimalikke lahendusi, mille toimet võiks hoidlate konditsioneerimissüsteeme energiatõhusamaks muuta. Uurimustöö tulemusena leitakse, et õhu kuivatusvajadust on võimalik vähendada hoidla konstruktsiooniliste ja ehituslike tegurite koosmõjul.

P. K. Larsen, M. Ryhl-Svendsen, L. A. Jensen, T. Padfield analüüsisid artiklis [9] temperatuuri ja suhtelise niiskuse kontrollimise võimalusi. Tehtud analüüsi põhjal pakutakse kolm võimalikku lähenemist, mida võiks kaaluda hoidlate sisekliima kavandamisel. Välja pakutud meetodite väljatöötamine põhineb kolmel Taanis asuval hoidlal. Autorid leiavad, et välja pakutud lähenemised töötavad suhteliselt hästi. Töö kokkuvõttes esitatakse seisukoht, et kriitiliselt tuleks suhtuda laialt levinud normidesse ning vaadelda igat üksikut juhtumit olemasoleva materjali ja teadmiste põhiselt.

1 HOIDLARUUMIDEGA HOONE SISEKLIIMA ALUSED

1.1 ARHIIVI HOIDLARUUMIDE SISEKLIIMA ÜLDISELOOMUSTUS, ERI TÜÜPI HOIDLAD JA SISEKLIIMA PARAMEETRID

Inimkonna kultuurilis-ajaloolise päritolu mõistmiseks on tarvis säilitada raamatuid, kunstiteoseid ja üle jäänuid kultuuriliselt olulisi esemeid, millega inimkond on eelnevate ajaperioodide jooksul kokku puutunud. Hoidlates hoiustatavad objektid seovad endaga väärtusi, mida on sageli väga keeruline hinnata. Tingituna hoidlates leiduva ajaloolise materjali tähtsusest on oluline, et oleksid tagatud sobilikud sisekliima tingimused arhivaalide hoiustamiseks [7]. Hoidlates hoiustatakse eri tüüpi arhivaale, mis nõuavad säilitamiseks erinevaid keskkonnatingimusi, mille tõttu ei leidu väga sageli hoidla sisekliima kavandamiseks tüüplahendusi [10]. Hoiustavate objektide mitmekesisusest tulenevalt pole võimalik lihtsalt välja tuua täpseid sisekliima parameetreid, mida tuleks tagada, et arhivaalid säiliks võimalikult kaua minimaalsete kahjulike mõjutustega. Hoidlate kavandamisel tuleb koondada võimalikult palju ühte tüüpi keskkonnatingimusi nõudvaid objekte, et tagada neile sobilikud säilitustingimused. Hoidlate sisekliima seisukohast on kesksel kohal õhutemperatuur ja suhteline niiskus [11]. Üldistatult võib enamlevinud hoidlate tüübid jagada kolme alamkategooriasse. 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 hoiustamise sisekeskkonna tingimused tuleb paika panna arvestades iga hoidla spetsiifikat eraldi ning protsessist peab osa võtma spetsialist, kellel on pädevus hinnata sisekliimast tulenevaid ohtusid kollektsioonile [7].

1.2 TEMPERATUURI JA SUHTELISE NIISKUSE MÕJU HOIDLATES HOIUSTATAVATELE MATERJALIDELE

Õhutemperatuuri ja suhtelist õhuniiskust saab pidada otsesteks sisekliima komponentideks, mille väärtustest tulenevalt on võimalik hinnata hoidla sisekliima sobivust seal hoiustatavale materjalile. Ruumiõhu temperatuuri ja suhtelise niiskuse

omavaheline koosmõju määravad ära kahjustused, mis võivad esineda antud parameetrite äärmuste korral.

1.2.1 Temperatuur

Temperatuur on sisekliima parameeter, mille seadeväärtuse määramisel hoidlate kontekstis tuleb vaadelda eelkõige tegureid arhivaalidele, kuid teatud juhtudel tuleb arvestada ka inimestele sobilike sisekliima tingimuste loomisega [6]. On teada, et enamasti on toatemperatuuri kahjulik mõju tühine, kuid liigkõrged või madalad temperatuurid võivad esile kutsuda säilikute kahjustumise. Temperatuuri mõju seisukohast on halvem olukord, kui esinevad madalamad temperatuurid. Külmutumise tulemusena tekivad jääkristallid, mis võivad põhjustada objektide mikrostruktuuri hävinemist. Selliselt tekkivate kahjustuste ulatus sõltub materjali omadustest, niiskussisaldusest ning külmutumiskiirusest [11]. 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 [12]. Temperatuuri tagamise seisukohast on vajalik leida sobilik kesktee temperatuurist tingitud ohutegurite ning energiatõhususe vahel.

1.2.2 Suhteline niiskus

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 [13].

$$RH = \frac{X_{teg}}{X_{kül}} \times 100\% \quad (1.1)$$

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 materjal keskkonnas tasakaaluniiskuse. Tasakaaluniiskuse all mõistetakse niiskussisaldust antud keskkonna tingimustel, milles materjal ei loovuta niiskust ega omasta ruumi õhus leiduvat niiskust [14]. Absorbeerimisvõime materjalidel on erinev, kuid enamasti toimub protsess pika aja jooksul. Õhu suhtelise niiskuse muutumine suurtes piirides ning liiga

järsult põhjustab materjalide kahjustumist. On leitud, et lühikesed ja aeglaselt toimuvad suhtelise niiskuse kõikumised ei põhjusta materjalide säilitamise suhtes kahjulike protsesside teket [15]. 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 [16]. Õhu suhtelise niiskuse taseme kontrollimine toimub peamiselt läbi konditsioneerimissüsteemide töö, kuid tähelepanu tuleks pöörata ka soojus-niiskuslikele protsessidele, mis toimuvad ruumiõhu ja hoidlates paikneva hügrokoopse materjali vahel [17]. 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 hügrokoopne materjal annab ära endasse salvestunud niiskuse [18]. Niiskusvahetust ümbritseva keskkonnaga tuntakse kui suhtelise niiskuse puhverefekti.

Suhtelise õhuniiskuse 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 [11], [19]. Hallituse tekke üheks mõjuriks on hallituseente 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 [19],[20] ,[11].

Tabel 1.1 Pabermaterjalide säilitamiseks soovitatavad temperatuuri ja suhtelise niiskuse väärtused allika [11] põhjal.

Kirjandusviide	Temperatuur [°C]	Suhteline niiskus [%]
Arhiivieeskiri 1998[21]	+15...20	30...50
Soome arhiivieeskiri (Valtionarkiston 1984)[22]	+18...22	45...55
ANSI/NISO standard Z79199x (Wilson 1995)[23]	mitte üle +21	35...50
Inglismaa standard (British Standard 1989)[24]	+13...19	55...65
Rootsi arhiivieeskiri (Riksarkivets 1994)[25]	+16...20	30...50
ISO standard 1995 (Informatsioon 2005)[26]	+14...20	45...55

Kirjandusviide	Temperatuur [°C]	Suhteline niiskus [%]
Thomson 1978[27]	Madal	45...65
Baynes-Cope 1981[28]	+13...18	55...65
Wilson, Wessel 1984[29]	+20...21	25...30

Tabelis 1.1 esitatud andmete esmane kirjeldamise aeg on kohati küll ammune ja eeskirjad, standardid asendunud värskemate normidega, kuid sellest olenemata ilmestavad need pädevalt pabermaterjalide hoiustamisele esitatavaid tingimusi. Tabelis esitatud erinevatel allikatel põhinevad temperatuuri ja suhtelise niiskuse seadeparameetrid korreleeruvad omavahel piisavalt suurel määral, et olla lähtematerjaliks paberimaterjalidele sobilike tingimuste kavandamisel.

1.3 HOIDLATE KONDITSIONEERIMISSÜSTEEMIDE KOMPONENDID

Hoidlates nõutud rangete sisekliima parameetrite tagamiseks on vajalik kasutada konditsioneerimissüsteeme, mis oleksid võimelised tagama soovitud sisetemperatuuri ja suhtelist niiskust. Õhktüüpi sisekliima tagamise süsteemid on eelistatud, kuna vähendavad riske, mis kaasnevad vedelik- või aursoojuskandjal põhinevatel süsteemidel [30]. Hoidlates on oluline, et sisekliima tagamine oleks võimalikult väikeste mõjutustega, mistõttu süsteemid töötavad pidevalt. Hoidlate konditsioneerimissüsteemide pideva töötamise tõttu on tegemist süsteemidega, mille funktsioneerimiseks kulub palju nii elektri- kui soojusenergiat. Tingituna suurest energiatarbest on oluline, et konditsioneerimissüsteemid oleksid kavandatud energiatõhusalt ja keskkonda säästvalt. Hoidlates kasutust leidvad konditsioneerimissüsteemid erinevad tavapärastest ventileerimissüsteemidest, kuna ettenähtud sisekliima parameetrite kindlustamiseks on vajalik õhku töödelda. Soovitud parameetrite tagamiseks võib olla vajalik õhku kütta/jahutada, niisutada/kuivatada või puhastada õhku saasteainetest.

1.3.1 Konditsioneerimissüsteemide üldpõhimõte

Hoidlates toimub sisekliima tagamine peamiselt seal hoiustatavatele objektidele, millest tingituna on hoidlates võimalik kasutada konditsioneerimissüsteeme, kus võib kasutada retsirkulatsiooni õhku. Madal õhuvahetus väliskeskkonnaga on võtmetähtsusega parameetriks, mis aitab ära kasutada hoidlas olevat hügrokoopse materjali massi, et tagada siseõhu parameetrite sobivus [8]. Täiendavalt pakub väikse välisõhu koguse kasutamine märkimisväärset energia kokkuhoiu võimalust. Madala õhuvahetuse ja hea õhupidavusega hoidlates, kus hoiustatakse rohkelt hügrokoopseid arhivaale, on

võimalik õhu niisutamise ja kuivatamise kulusid vähendada suurusjärgus 30...40%. Kokkuhoid tuleneb hügrokoopse materjali niiskussisalduse potentsiaalst [16].

1.3.2 Jahutamine

Hoidlate konditsioneerimissüsteemides toimub õhu jahutamine peamiselt kahel eesmärgil. Õhku jahutatakse kuivatamise eesmärgil, et tagada hoidlale kehtestatud õhu niiskuse väärtust. Teine eesmärk, milleks õhu jahutamist kasutatakse, on hoidla temperatuuri nõude ülempiiri tagamine [4]. Õhu kuivatuseks on konditsioneerimissüsteemides kasutusel nii otseaurustusega kui ka vedelik külmakandja tüüpi jahutuspatareid. Vedelik külmakandja tüüpi jahutussüsteemi korral läbib madala temperatuuriline külmakandja jahutuspatareid, mille tulemusena jahutuspatarei pinnatemperatuur on madalam kui läbiva protsessiõhu temperatuur, mis läbi toimub õhu jahtumine või ka täiendav kuivatamine [31]. Otseaurustusega jahutussüsteemi korral on kasutusel kompressorjahutusseade. Kompressorseade koosneb kondensaatorist, aurustist, paisventiilist ning kompressorist, mille koostöös külmutusaine ringprotsess töötab. Jahutuseadmes toimuva ringprotsessi tulemusena jahutatakse jahutuspatareid läbivat õhku [32]. Jahutuspatareina käitub aurusti, kuna ringprotsessis külmaaine aurustumisel soojus neeldub ja seeläbi aurusti pinnatemperatuur on madalam protsessiõhu temperatuurist, mille tulemusena toimub õhu jahutamine.

1.3.3 Kütmine

Hoidlate konditsioneerimissüsteemid on väga sageli teostatud õhksüsteemidena, kus sisekliima parameetrid tagatakse õhu abil. Sellest tingituna on ruumiõhu kütmise üheks eesmärgiks ette nähtud temperatuurivahemiku tagamine [33]. Õhu temperatuuri tõstmine konditsioneerimisseadmes toimub küttekalorifeeris. Küttekalorifeer on õhutöötlusseadme komponent, läbi mille sisemise konstruktsiooni voolab kõrgema temperatuuriga soojuskandja kui seda on kalorifeeri välist pinda läbiva protsessiõhu temperatuur. Kalorifeeri energiaallikaks võib olla elekter, vedeliksoojuskandja või aur. Energiatõhususe seisukohast tuleks eelistada vedelik- või aurutüüpi soojusallikaid, kuna need võimaldavad kavandada süsteeme, mis on väiksema keskkonna jalajäljega [34].

1.3.4 Niisutamine

Niiskusrežiimi tagamine on hoidlate puhul äärmiselt oluline aspekt, millele tuleb tähelepanu pöörata. Parasvöötmelises kliimas, kus välisõhk on talviti külm ning kuiv, tekib vajadus õhu niisutamise järgi. Niisutamine on tarvilik õhuniiskuse alumise piiri tagamiseks [35]. Tööpõhimõttelt jagunevad niisutid põhiliselt kahte alamgruppi: isotermsed niisutid ja adiabaatsed niisutid. Isotermsed niisutid genereerivad välisenergia kaasabil veeauru, mida niisutamiseks õhuvoolu juhitakse. Isotermne

niisutusprotsess kulgeb mööda samatemperatuuri joont, mis tähendab, et temperatuur protsessi vältel sisuliselt ei muutu [36]. Teine tööpõhimõte niisutusvõimaluste juures on adiabaatne niisutamine. Adiabaatse niisutamise korral toimub niisutusvee aurustumine õhu ilmse soojuse toimetel. Niisutusprotsessi vältel õhu soojussisaldus ei muutu, kuna toimub ilmse soojuse muundumine varjatud soojuseks. Adiabaatse niisutusprotsessi tulemusena niiskussisaldus kasvab ja temperatuur alaneb [36].

1.3.5 Kuivatamine

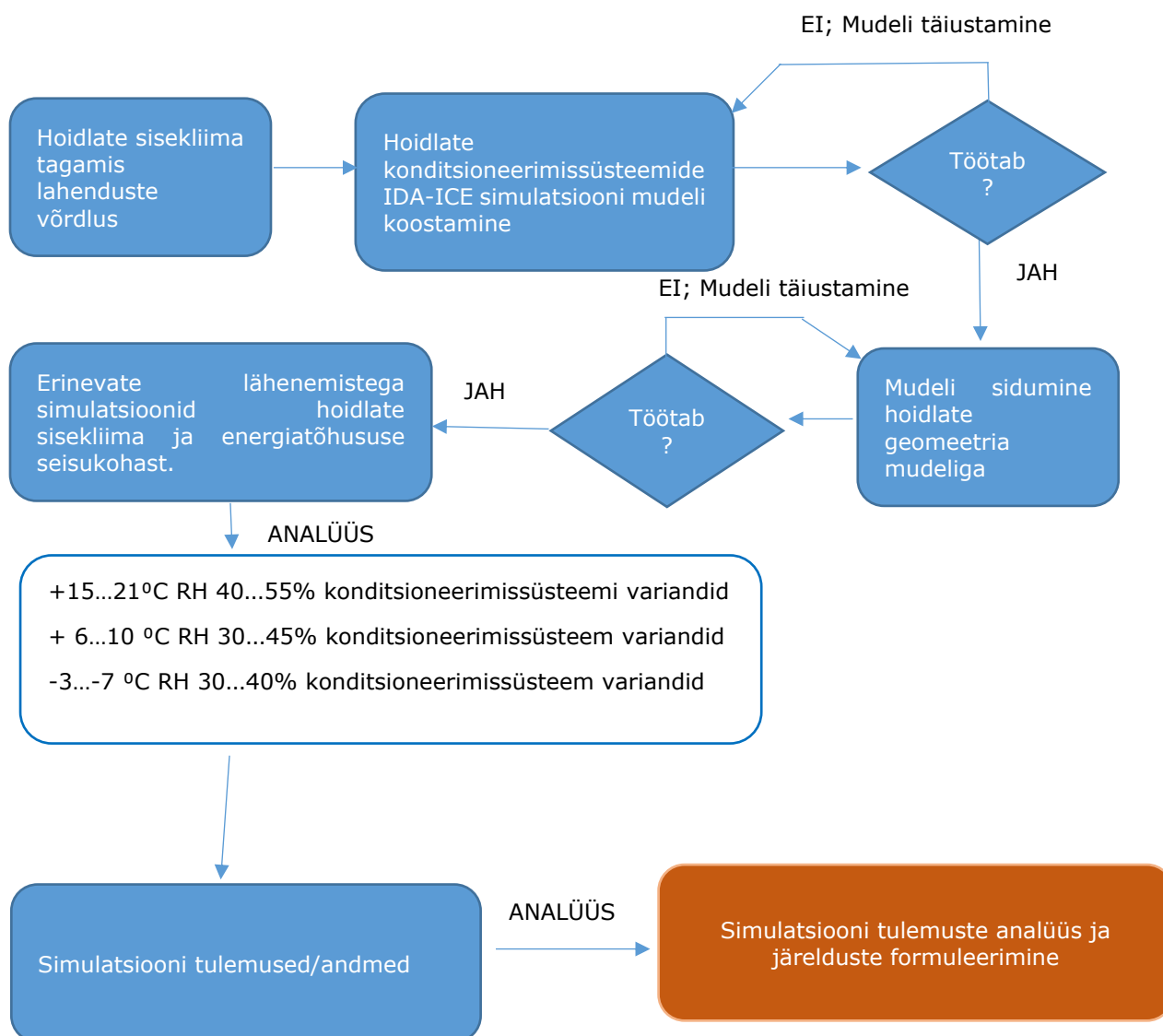
Niiskusrežiimi ülemise piirväärtuse tagamiseks on vajalik arvestada õhu kuivatamisega. Hoidlate korral ilmneb õhu kuivatusvajadus eelkõige perioodil, mil välisõhu absoluutne niiskussisaldus on suhteliselt kõrge ning välisõhu temperatuur on samuti kõrgema poolsem. Parasvöötmelises kliimas esineb kirjeldatud periood sageli hilissuvisel või varasügisel ajavahemikul [3], [37]. Tööpõhimõttelt on õhukuivatusseadmeid võimalik liigitada kahte suuremasse alamgruppi. Kuivatusmeetodid jagunevad kondensatsioon- ja kuivatusainel põhinevaks kuivatusviisiks [36]. Kondensatsioon põhimõttel kuivatusprotsessis juhitakse õhuvool läbi jahutuspatarei, mille pinnatemperatuur on madalam protsessiõhu kastepunkti temperatuurist ning tulemusena kondenseerub osa niiskust õhust välja. Jahutamisprotsessiga kaasneb ka märkimisväärne temperatuuri alanemine, millest tingituna on vajalik tihti kasutada õhu järelkütet, mis muudab jahutamise energiakulukaks. Tehniliste lahenduste poolest on võimalik kasutada nii vedelikkülmakandja tüüpi kui ka otseaurustuse tööpõhimõttel õhukuivatusseadmeid [36], [38]. Teine suurem kuivatusseadmete alamgrupp on kuivatusainel põhinevad seadmed. Nendes seadmetes on kasutusel spetsiaalsed sobilike niiskustehniliste omadustega materjalid/ained, mis ühes või teises tehnilise lahenduse kombinatsioonis seovad endasse õhus leiduvat niiskust ja seeläbi vähendavad õhu absoluutset niiskussisaldust. Kuivatusainel töötavate seadmete puhul eristatakse vedelik- ja tahkel kuivatusainel toimivaid süsteeme. Vedeliksüsteemide korral on kasutusel niiskust siduvate omadustega ainete lahused, mis ümbritsevast õhust niiskust enda struktuuridesse seovad ning hiljem regeneratsiooni faasis selle vabastavad [34]. Tahke kuivatusaine baasil töötavates kuivatites on kasutusel niiskust siduva struktuuriga materjalid, mis niiskest protsessiõhust liigse niiskuse endasse seovad ning regeneratsiooni faasis vabastavad. Kuivatusainel põhinevate kuivatusseadmete eripäraks on väline energiavajadus, mida on tarvis süsteemikomponentide niiskuse sidumisomaduste regenererimiseks. Väline energiavajadus on sageli kitsaskohaks, mis avaldab mõju selliste kuivatussüsteemide energiatõhusale töötamisele [34]. Väga sageli on konditsioneerimissüsteemides kasutusel kombinatsioonid erinevatest kuivatuslahendustest, et saavutada paremat energiatõhusust ja väikesemaid kulutusi süsteemi maksumuse [36].

1.3.6 Õhu puhastamine

Õhu puhtuse tagamine hoidlates on oluline kahe komponendi seisukohast. Sisekliima tagamine toimub väga sageli keerukate konditsioneerimissüsteemidega, mistõttu tuleb tagada selline õhu kvaliteet, mis välistaks nende seadmete häiringud. Täiendav komponent, miks õhupuhtuse kvaliteet peab kõrge olema, on seotud hoidlates hoiustatava materjaliga ja selle säilimisega [7], [39]. Hoidlates teostatava õhu filtreerimise võib jaotada kolme faasi. Õhu eelfiltreerimise eesmärgiks on ennetada häiringuid konditsioneerimissüsteemide ja süsteemiosade töös. Õhu eelfiltreerimise täiendav kasulikkus seisneb järgnevate õhufiltrite pikemas funktsioneerimises. Õhus leiduvate peenosakeste filtreerimist hoiustatavate materjalide paremaks säilimiseks saab nimetada hoidlate õhufiltreerimise teiseks etapiks. Õhust eemaldatavate kahjulike peenosakesete suurused ja toimed tuleks arvesse võtta lähtudes igast konkreetsest hoidlast ja selles hoiustatavatest materjalidest. Lisaks õhus leiduvatele peenosakestele leidub õhus alati gaasilisi saasteaineid, mis võivad põhjustada hoidlates leiduva tundliku materjali kiiremat hävinemist. Gaasiliste saasteainete eemaldamiseks on kasutusel gaasiliste saasteainete filtreerimine. Gaasiliste saasteainete filtreerimise tarvilikkus ning mõju tuleb arvesse võtta lähtudes igast konkreetsest juhust üksikult [7].

2 METOODIKA

Töös kasutatavad meetodid on kirjeldatud alloleval protsessiskeemil. Hoidlate sisekliima tagamise konditsioneerimissüsteemide võrdluse läbiviimiseks uuriti esmalt varem läbi viidud uuringuid ja varem projekteeritud lahendusi. Konditsioneerimissüsteemide energiatõhususe hindamiseks koostati dünaamilises energiasimulatsioonitarkvaras IDA-ICE konditsioneerimissüsteemide ning hoidlate geomeetrised mudelid. Koostatud konditsioneerimissüsteemide simulatsioonimudelite töötamise korral seoti mudel vastavate hoidlate geomeetriselise mudeliga ja seejärel liiguti edasi erinevate lähteparameetrite variatsioonidega simulatsioonide läbiviimiseni. Tehtud energiasimulatsioonide tulemuste analüüsi käigus teostati lahenduste toimivuse ja energiatarbe analüüs ja formuleeritakse lõplikud järeldused.



Joonis 2.1 Metoodika protsessiskeem

2.1 UURMISOBJEKT

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on uurida eri tüüpi hoidlate energiakasutust ning sisekliimat mõjutavaid tegureid dünaamilise energiasimulatsiooni alusel. Simulatsioonide läbiviimiseks oli kasutusel Rootsi firma EQUA Simulation AB poolt loodud simulatsioonitarkvara IDA ICE 4.8 SP2 IDA Indoor Climate and Energy. Läbiviidud aastaste energiasimulatsioonide aluseks oli Eesti kliima andmetega referentsaasta Estonian TRY.

Antud magistritöös on alusena kasutatud Eesti Rahvusraamatukogu hoones rekonstrueerimistöode käigus ehitatavaid hoidlaid. Magistritöö eesmärgiks on hinnata erinevat tüüpi hoidlate konditsioneerimissüsteemide energiakasutust ning toimivust. Magistritöö põhifookus seisneb hoidlate konditsioneerimissüsteemide mudelite koostamisel IDA ICE tarkvaras ning süsteemide energiakulu ja toimivuseanalüüsil. Töoga ei keskenduta detailsele Eesti Rahvusraamatukogu hoone energiakasutuse analüüsile hoidlate võtmes. Eesti Rahvusraamatukogu hoone kasutamine näiteobjektina on tingitud asjaolust, et antud hoones on esindatud võimalikult suurel määral eritüübilisi hoidlaid.

2.1.1 Eesti Rahvusraamatukogu ajalugu, arhitektuur ja paiknemine

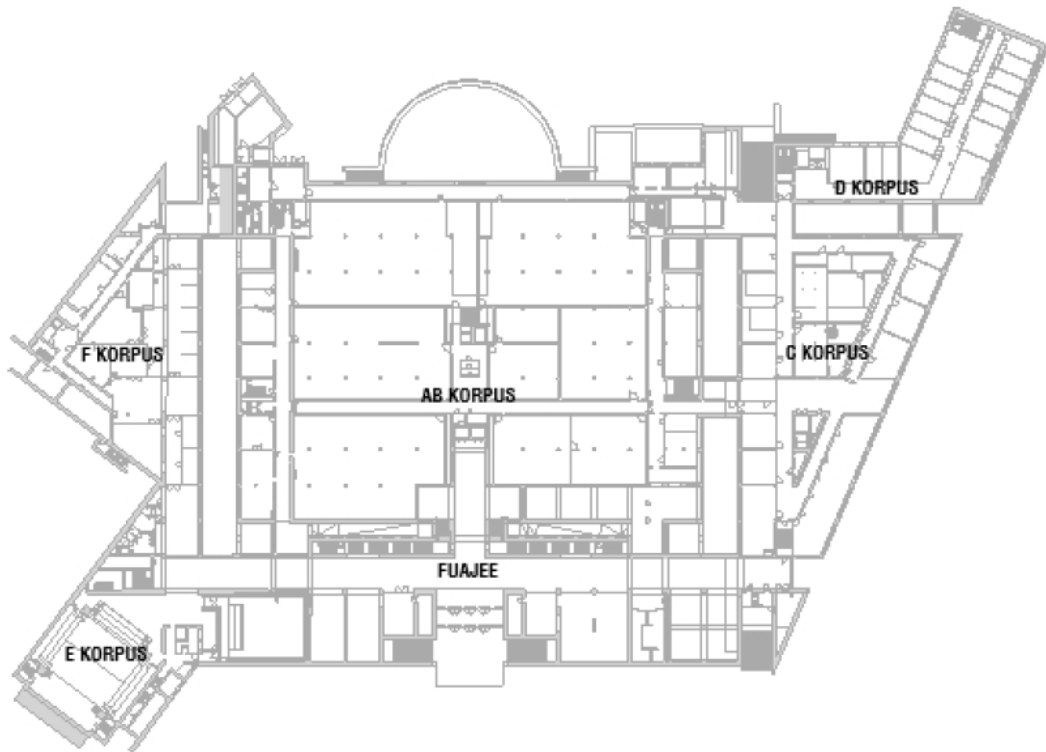
Eesti Rahvusraamatukogu paikneb aadressil Tõnismägi 2, Kesklinna linnaosa, Tallinn.

Hoone asub Tallinna kesklinnas, südalinna serval. Hoone on valdavalt ümbritsetud ühiskondlike- ja büroohoonetega. Hoone põhjasuunda jääb Kaarli kirik ning lõunast jätkub Rahvusraamatukogu hooviala Tuvi pargiga. Juurdepääs kinnistule on Endla, Tõnismäe ja Veetorni tänavalt.

Rahvusraamatukogu hoone valmis ajavahemikus 1985-1993. Hoone projekt on aastast 1984 ja selle koostajaks oli RPI Eesti Projekt, arhitekt Raine Karp ja sisearhitekt Sulev Vahtra. Hoone on tunnistatud ehitismälestiseks registreerimisnumbriga 30932.

Hoone on kaheksa maapealse ja kahe maa-aluse korrusega. Tulenevalt krundi reljeefist ja suurest kõrguse vahest on C ja D korpuse miinuskorrused realselt maapealsed. Korpuseid ühendavad tervikuks trepistikuga terrassid, mille kaudu pääseb hoone taga asuvasse parki.

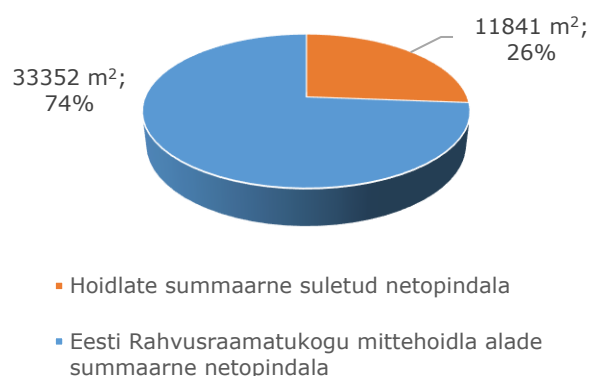
Hoone jaguneb viieks plokiks, mis täiendavad erinevaid funktsioone ja on mahuliselt eraldi hooneosadena eristatavad [40]. Hoone korpuste jagunemine tervik hoone suhtes on kirjeldatud joonisega 2.2.



Joonis 2.2 Rahvusraamatukogu korpuste paiknemine [40]

2.1.2 Hoidlate tüübid ja paiknemine

Eesti Rahvusraamatukogu hoone ruumide kasutusfunktsioon on äärmiselt mitmekesine. Hoonest võib leida nii büroosid, lugemissaale, avalikke meelelahutusliku suunitlusega üldalaseid kui ka hoidlapindasid. Hoidla pinnad on olnud ja jäävad ka läbi tervikrenoveerimise Eesti Rahvusraamatukogu keskseks elemendiks. Hoone projekteeritud suletud netopindala on 45192,6 m², millest enam kui veerandi võtavad enda alla eri tüüpi hoidlad [40], [41]. Hoidlate osakaal koguhoonest on kirjeldatud joonisel 2.3.

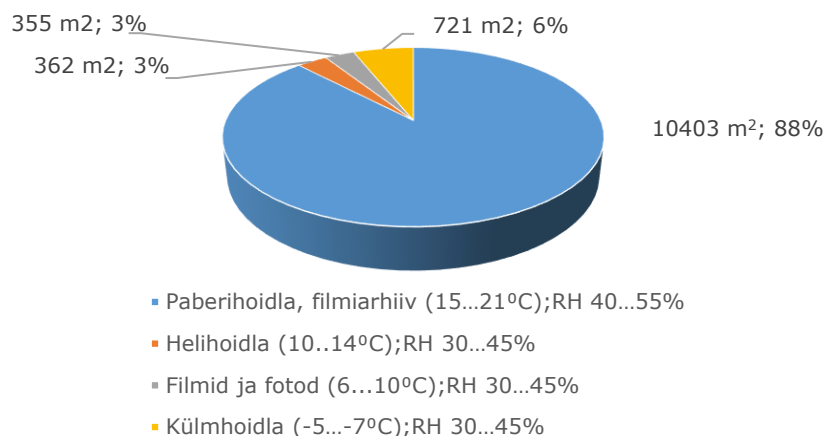


Joonis 2.3 Hoidlate osakaal kogu hoone suletud netopindalast

Eesti Rahvusraamatukogu hoones paiknevad hoidlad jagunevad tüübiti järgmiselt:

- Paberihoiud, filmiarhiivid; temperatuur 15...21°C; RH 40...55%
- Helihoiud; temperatuur 10...14°C; RH 30...45%
- Filmi ja fotohoiud; temperatuur 6...10°C; RH 30...45%
- Külmoiud; temperatuur -5...-7°C; RH 30...45%.

Hoiudate jagunemine tüüpide alusel on kirjeldatud joonisel 2.4.



Joonis 2.4 Hoiudate tüüpide jagunemine suletud netopindala alusel

Paberi- ja filmiarhiivi tüüpi hoiudate tarbeks on ette nähtud 27 ruumi. Hoiudad asuvad hoone AB ja CD korpustes. Suurem maht paberihoiudaid on paigutatud AB korpusesse. AB korpuses asetsevad hoiudad paiknevad -2 kuni 2 korrustel. Hoiudad paiknevad valdavalt hoone südames ja on ümbritsetud muuotstarbeliste siseruumidega. CD korpuses asetsevad paberi- ja filmihoiudad on paigutatud C osa 1. ja 2. korrustele. Hoiudad paiknevad enamasti ümbritsetuna hoone sisemiste üldaladega, välja arvatud 1. korrusel paiknevad hoiudad, millel on ka väliskeskkonnaga piirnevaid piirdetarindeid.

Helihoiudate tüüpi hoiudatele on hoone AB korpuses ette nähtud kaks ruumi ning samuti kaks ruumi C korpuses. AB korpuses asub üks hoiud -1. korrusel ja teine 1. korrusel. -1. korrusel paiknev hoiudad asub CD korpusega külgnevas alas ning 1. korruse hoiudad hoone keskosas. CD korpuse hoiudad paiknevad C osa 2. korrusel korpuse ülemineku alas hoone AB korpuseks. Seda tüüpi hoiudatel esineb mõningal määral väliskeskkonnaga piirnevaid piirdetarindeid, välja arvatud AB korpuse keskmises paiknev hoiudad.

Filmide ja fotode hoiudatele on ette nähtud neli ruumi CD ja üks hoiudad AB korpuses. CD korpuses paiknevad ruumid asuvad 2. korrusel ning külgnevad AB korpusega. AB korpuses asuv hoiudad asub hoone keskmises. CD korpuses paiknevatel hoiudatel on kõigil

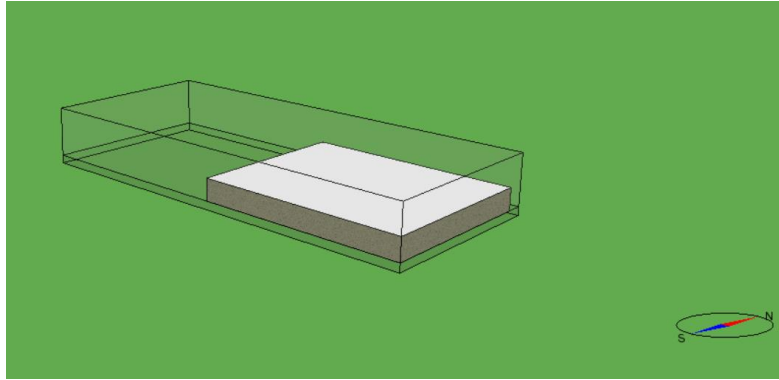
väliskeskkonnaga piirnevaid tarindeid. AB korpuse hoidla on ümbritsetud siseruumidega.

Külmhoidlad on koondatud kompaktselt CD korpuse 1. ja 2. korrusele. Valdav enamus külmhoidlaid asub CD korpuse 1. korrusel, välja arvatud 2. korrusel paiknev filmi- ja fotonegatiivide hoidla. 1. korrusel paiknevate hoidlate piirdekonstruktsioonid piirnevad suures osas väliskeskkonnaga. 2. korrusel paiknev külmhoidla on ümbritsetud siseruumidega [40], [42].

2.2 SIMULATSIOONI GEOMEETRIAMUDEL JA LÄHTEPARAMETRID

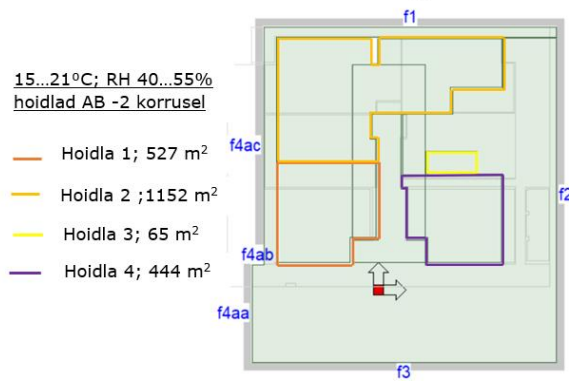
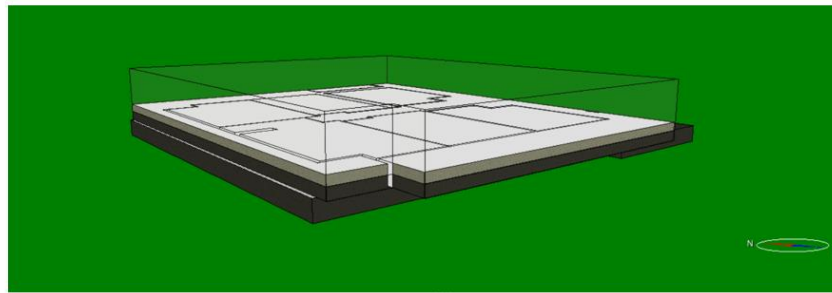
Hoidlate energiasimulatsioonide läbiviimiseks ning võimalike konditsioneerimisskeemide töö hindamiseks hoones on loodud lihtsustatud geomeetrilised mudelid Eesti Rahvusraamatukogu hoone osadest. Täiendavalt on loodud tüüphoidla, et hinnata erinevate konditsioneerimisskeemide esmast toimivust arvestamata geomeetria mudelist tulenevaid mõjutusi. Erinevate temperatuuri ja suhtelise niiskuse tingimustega hoidlate mitmekesise paiknemise tõttu hoones on loodud kaks hoone osamudelit. Hoidla tüüpide poolest on mudelid jaotatud kahte ossa. Esimese geomeetria mudeliga on kirjeldatud +15...21°C, RH 40...55% tingimustele vastavad hoidlaruumid. Antud osa kirjeldamiseks on valitud hoone AB korpuse -2 korrusel paiknevad vastavatüübilised hoidlad. Teine geomeetria mudel hõlmab endas +6...10°C, RH 30...45% ja -3...-7°C, RH 30...40% hoidla tüüpide geomeetrilise paiknemise kirjeldamist. Vastava osa iseloomustamiseks on mudeldatud hoone CD korpuse 1. ja 2. korrusel paiknevad vastavatüübilised hoidlad.

Tüüphoidla simulatsiooni mudel on defineeritud ühe arvutustsoonina, mille pindala mudelis on 500 m². Tüüphoidla piirdetarindid on määratud vastavalt tabelis 2.1 esitatud suurustele. Inimestest tulenev vabasoojus ja niiskuseraldised on arvesse võetud nii, et kasutusajal viibib hoidlas 5 inimest. Simuleerimiseks vajalikud vabasoojused ning kasutusprofiilid on esitatud ptk 2.3.



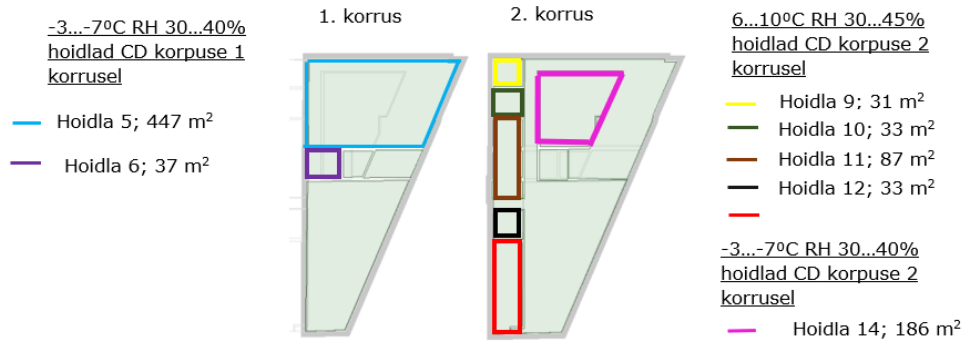
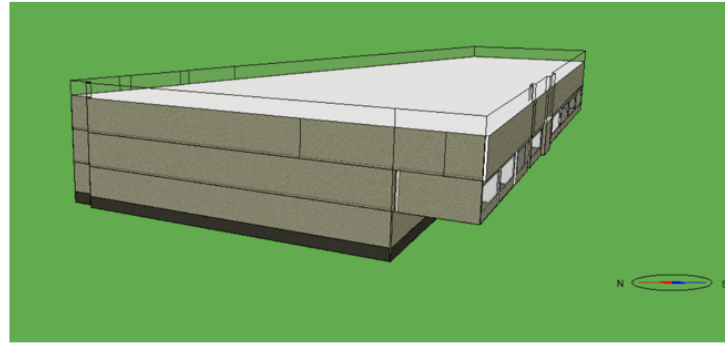
Joonis 2.5 Simuleeritava tüüphoidla 3D kujutis simulatsiooni tarkvaras

AB korpuse geomeetria mudeli eesmärgiks on kirjeldada -2. korrusel paiknevaid $+15...21^{\circ}\text{C}$, RH 40...55 % hoidlaid. Antud korrusel paikneb neli erineva pindalaga hoidlat, mis on ümbritsetud üldaladega. Mudeli 3D kujutis ja plaaniline paiknemine on kuvatud joonisel 2.6. Mudelis on uuritavad hoidlad defineeritud nelja tsooniga ning hoidlaid ümbritseva ala kohta on tehtud lihtsustus ning see on kirjeldatud ühe arvutustsoonina. Täiendavalt on mudelis kirjeldatud hoone -3 ja -1 korrused. Mudeli keerukuse vähendamiseks on külgnevate korruste kuvamisel tehtud samuti lihtsustus ning need on kirjeldatud võimaliku vähese arvu tsoonidega. Hoidlate tsoonides toimub temperatuuri ja suhtelise niiskuse kontrollimine vastavalt seal ette nähtud tingimustele. Hoidlates on kasutusel konditsioneerimisseadmed, mille täpsem kirjeldus on esitatud alates peatükk 2.4. Hoidlaid ümbritsevate alade kütmise-, jahutuse- ja ventilatsiooni õhuvooluhulga väärtuste määramisel on kasutatud dokumendis „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“ [43] avalikule hoonele määratud suuruseid. Ümbritsevates tsoonides on kasutatud simuleerimistarkvaras vaikimisi olevat ventilatsiooniseadme mudelit. Hoidlate plaaniline paiknemine on kujutatud joonisel 2.5. Hoone tarindi tüüpide kirjeldamisel mudelis on lähtutud arhitektuursest eelprojekti [40] parameetritest ning kasutatud tarinditüübid ja omadused on välja toodud tabelis 2.1.



Joonis 2.6 Simuleerimiseks valitud 15...21°C, RH 40...55% tüüpi hoidlate 3D simulatsioonimudel ning plaaniline paiknemine hoone korruse suhtes.

CD korpuse geometria mudeli eesmärgiks on kirjeldada 1. korrusel ning 2. korrusel paiknevaid +6...10°C, RH 30...45 ja -3...-7°C, RH 30...40% tüübilisi hoidlaid. 1. korrusel paikneb kaks külmhoidlat. Mudelis on antud hoidlad defineeritud kahe tsooniga. 2. korrusel paiknevad jahehoidlad ja üks külmhoidla. Mudelis on uuritavad jahehoidlad defineeritud viie tsooniga. Täiendavalt on üks tsoon ette nähtud 2. korrusel paikneva külmhoidla simuleerimiseks. Mudeli 3D kujutis ja plaaniline paiknemine on kuvatud joonisel 2.7. Hoidlaid ümbritseva ala kohta on tehtud lihtsustus ning see on kirjeldatud võimalikult väikse arvu tsoonidena. Kokku on 1. ja 2. korrusel üldaladena defineeritud viis tsooni. Hoidlate tsoonides toimub temperatuuri ja suhtelise niiskuse kontrollimine vastavalt seal ette nähtud tingimustele. Hoidlates on kasutusel konditsioneerimiseseadmed, mille täpsem kirjeldus on esitatud alates peatükk 2.4. Hoidlaid ümbritsevate alade kütmise-, jahutuse- ja ventilatsiooni õhuvooluhulga väärtuste määramisel on kasutatud dokumendis „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“ [43] avalikule hoonele määratud suuruseid. Ümbritsevates tsoonides on kasutatud simuleerimistarkvaras vaikimisi olevat ventilatsiooniseadme mudelit. Hoidlate plaaniline paiknemine on kujutatud joonisel 2.6. Hoone tarindi tüüpide kirjeldamisel mudelis on lähtutud arhitektuursest eelprojektis[40] parameetritest ning kasutatud tarinditüübid ja omadused on välja toodud tabelis 2.1.



Joonis 2.7 Simuleerimiseks valitud -3...-7, RH 30...40% ja 6...10°C, RH 30...45% tüüpi hoidlate 3D simulatsioonimudel ning plaaniline paiknemine hoone korruse suhtes.

Tabel 2.1 Geomeetria mudelis kasutatud piirdetarindite omadused vastavalt [40]

Piirdetarindi tüüp	U väärtus [W/m ² K]
Välissein	≤ 0,22
Jaehoidla sein	≤ 0,24
Külmhoidla sein	≤ 0,22
Sisesein	0,8... 1,5
Keldrisein	≤ 0,41
Põrand pinnasel	≤ 0,20
Põrand välisõhukohal	≤ 0,90
Jahe- ja külmhoidla vahelagi	≤ 0,18
Aken	≤ 0,8

Hoidlate aluseks oleva Eesti Rahvusraamatukogu hoone arhitektuurse keerukuse tõttu on käesolevas töös piirdetarindite tüüpide määramisel tehtud lihtsustus. Hoidlaid ümbritsevad piirdetarindid on defineeritud lihtsustatult vastavalt tabelis 2.1 esitatud väärtustele, arvesse võtmata reaalses hoones esinevaid konstruktsioonilisi ning arhitektuurilisi tarindite paiknemise eripärasusi.

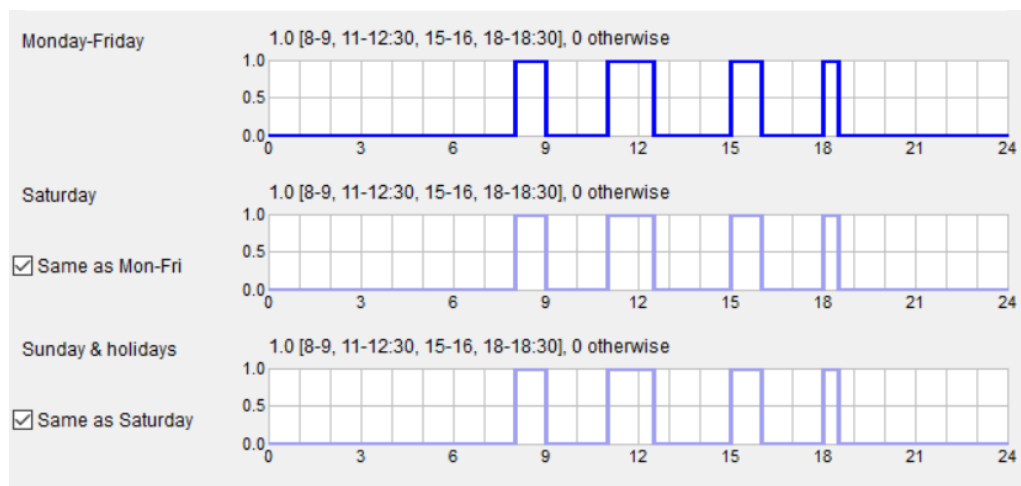
2.3 VABASOOJUSED JA KASUTUSPROFIILID

Dünaamiliste energiasimulatsioonide läbi viimiseks on vajalik simulatsiooni tarkvarasse sisestada kasutatavad vabasoojused ning nende kasutusprofiilid. Üldalade valgustusest, seadmetest ja inimestest tulenevate vabasoojuste määramise aluseks on võetud määrus "Hoonete energiatõhususe arvutamise meetodika" [44] ning kasutatud arvvaartused on esitatud tabelis 2.2. Loodud hoidlate simulatsioonimudelite vabasoojuste ja kasutusprofiilide loomisel on lähtutud allikatest [30],[5]. Hoidlaid ümbritsevate alade suhtes on tehtud simulatsioonimudelites lihtsustus ning nende vabasoojused ja kasutusprofiilid on defineeritud vastavalt avalikele hoonetele ettenähtud suurustele. Kasutatud kasutusprofiilide graafikud on välja toodud joonistel 2.8 ning 2.9.

Tabel 2.2 Dünaamilises energiasimulatsioonis kasutatavad vabasoojused

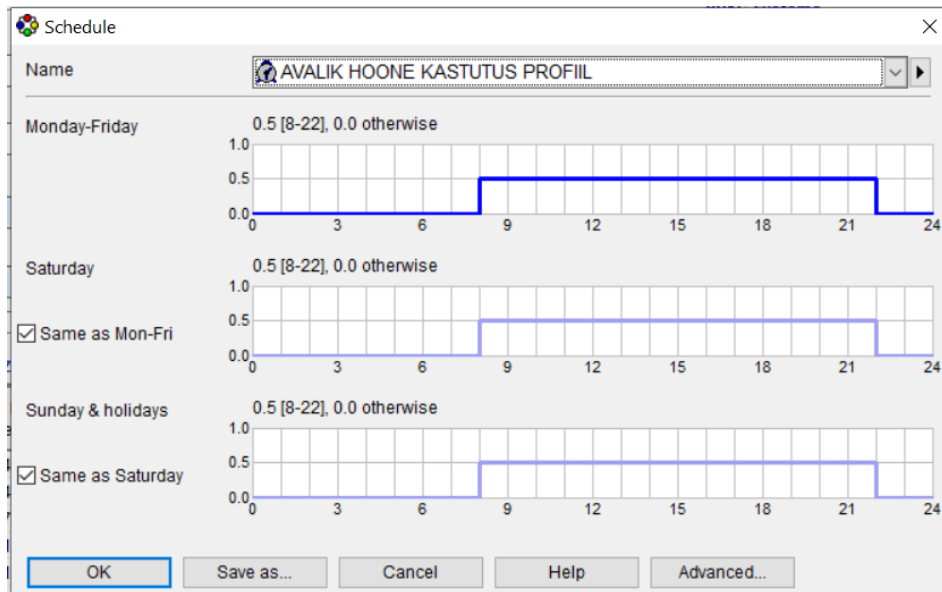
Hoone kasutusotstarve	Kasutusaste	Valgustus	Seadmed	Inimesed	
	[-]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]	[m ² /W]
Avalik hoone	0,5	14	0	5	17,3
Hoidla	1	10	0	*5 inimest kasutusajal	

Kasutusprofiilid on kasutusel inimeste, valgustuse ja tegeliku kasutamise kirjeldamiseks. Kasutusprofiiliga esitatakse ruumi vabasoojuste soojuseralduste kasutusaste suhtena võimalikku maksimaalsesse soojuseraldusse.



Joonis 2.8 Simulatsioonis kasutatud hoidla kasutusprofiil

Laohoone kasutusprofiil on esitatud ühtse kasutusprofiili graafikuna kõigile kolmele simulatsiooni tarkvaras defineeritud vabasoojuseliigile.



Joonis 2.9 Avaliku hoone kasutusprofiil vastavalt [44]

Avaliku hoone kasutusprofiil on esitatud ühtse graafikuna kõigile kolmele simulatsiooni tarkvaras defineeritud vabasoojuseliigile.

Joonis 2.10 kirjeldab inimese soojuseraldusühiku defineerimist simulatsiooni mudelis, milleks on võetud 1,5 met ning riietuse takistuseks on konstantselt määratud 1,1 clo.

Joonis 2.10 Simulatsiooni tarkvaras defineeritud inimeste seadeparaameetrid

Infiltratsiooni õhuhulk on arvestatud konstandina. Õhulekke õhuhulga suurus arvutati vastavalt „Hoonete energiatõhususe arvutamise meetodika“ toodud arvutusallustele [44].

$$q_i = \frac{q_{50}}{3,6 \times x} \times A \quad (2.1)$$

kus q_i – aasta keskmine infiltratsiooni õhuvooluhulk, [l/s]

q_{50} – hoone välispiirde keskmine õhulekkearv, [$m^3/(h \cdot m^2)$].

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, [m^2].

Baasmudelite lähteparemeetriteks õhulekkearvu leidmisele võeti $q_{50}=1,5 m^3/(h \cdot m^2)$ ning korruselisust iseloomustavale parameetrile $x=15$.

2.4 KONDITSIONEERIMISSEADMED JA MODELLERIMINE

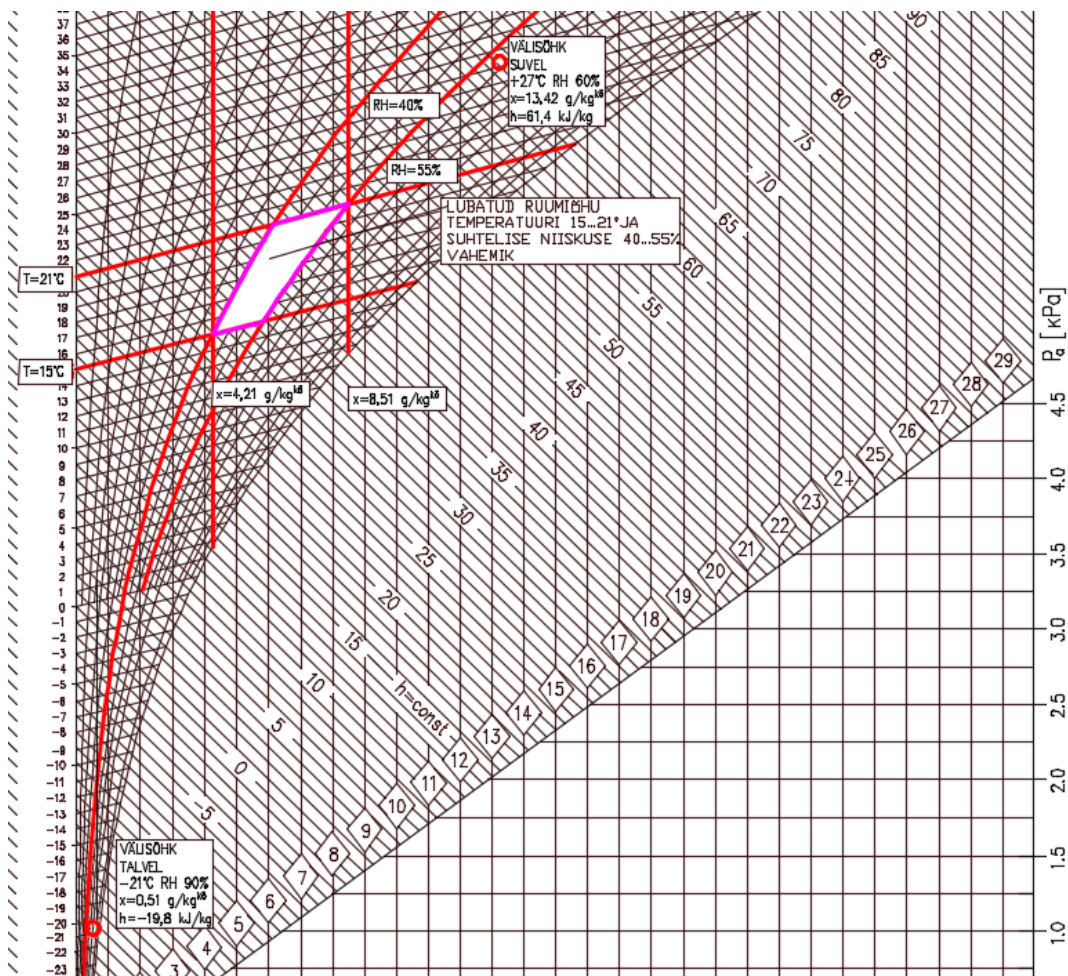
2.4.1 Tüüphoidla simulatsioonid

Erinevate tehniliste lahendustega hoidlate konditsioneerimissüsteemide dünaamiliste energiasimulatsioonide läbiviimiseks on loodud kolm erinevatele temperatuuri ning suhtelise niiskuse nõuetele vastavat hoidlate tüüpi. Simuleeritavad konditsioneerimissüsteemid on valitud põhimõttel, et simulatsioonide tulemustest oleks võimalik teha üldistusi enam kasutatud leidvate hoidlatüüpide sisekliima tagamise ja energiakasutuse kohta. Simuleeritavad hoidlate tüübid jagunevad järgmiselt:

- Tüüp 1 - konditsioneerimissüsteemid temperatuuri +15...21°C ning RH 40...55% tagamiseks
- Tüüp 2 - konditsioneerimissüsteemid temperatuuri +6...10 °C ning RH 30...45% tagamiseks
- Tüüp 3 - konditsioneerimissüsteemid temperatuuri -3...-7 °C ning RH 30...45% tagamiseks.

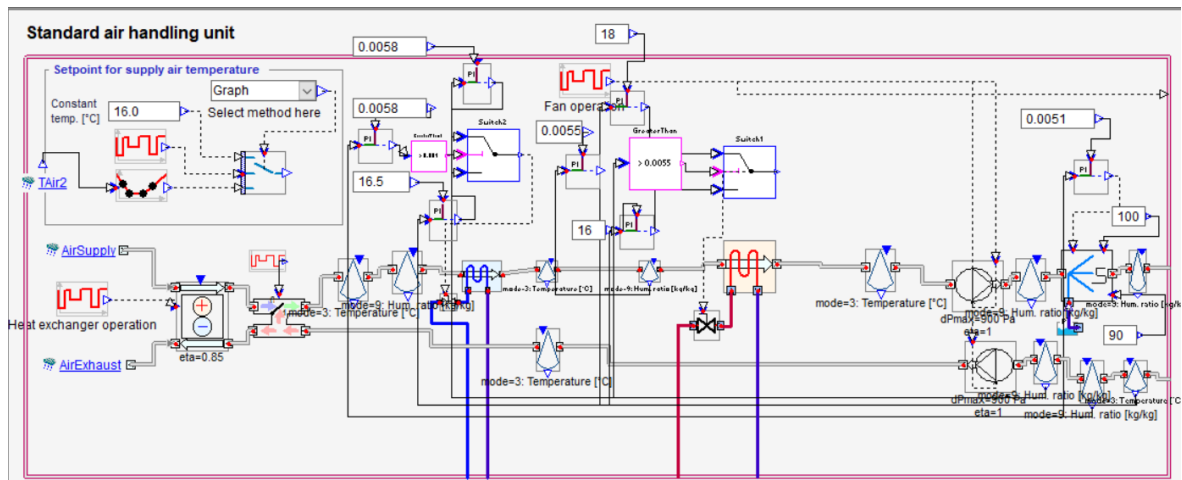
2.4.2 Konditsioneerimissüsteem tüüp 1 (+15...21°C; RH 40...55%)

Õhukuivatamise liigituse seisukohast on antud konditsioneerimisskeem baasmudeliks jahutuspatareiga õhu kuivatamise variandile. Baasmudeli lahenduseks on osalise tagastusõhuga konditsioneerimissüsteem. Seadme välisõhuvahetuse plokis on energiatõhususe suurendamiseks ning niiskus- ja külmatagastuseks ette nähtud rootorsoojustagasti. Soovitud sisekliima parameetrite tagamiseks on seadmes tarvilikud auruniisuti, jahutuskalorifeer ja küttekalorifeer. Jahutuskalorifeeril on seadmes kaks funktsiooni. Esiteks on jahutuspatarei vajalik temperatuuri ülemise nõude tagamiseks. Teiseks jahutuspatarei eesmärgiks on õhu kuivatamine suvisel perioodil. Süsteemikomponentide juhtimine on lahendatud lähtuvalt väljatõmbe õhus paiknevate temperatuuri ja niiskussisalduse andurite näitudest. Ilmestamaks antud hoidla temperatuuri ja suhtelise niiskuse tingimuste piiranguid on joonisel 2.11 esitatud piirkonnad, milles hoidla sisekliima peab tagatud olema.



Joonis 2.11 +15...21°C; RH 40...55% hoidla tüübi parameetri vahemikud H-X diagrammil

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 süsteemikonfiguratsioonis. Seadme simulatsiooni tarkvaras loodud kujutis on välja toodud joonisel 2.12.



Joonis 2.12 Konditsioneerimissüsteem tüüp 1 mudel simulatsiooni tarkvaras

Soojustagasti juhtimine on skeemi puhul korraldatud lähtuvalt välisõhutemperatuurist. Välisõhutemperatuuri põhine juhtimine võimaldab soojustagasti töötamist vajaduspõhisemalt. Välisõhust mõõdetud temperatuuri väärtust võrreldakse PI kontrolleris suurusega 18°C ning vastavalt võrdluse tulemusele edastakse soojustagastile kas 0 või 1 juhtsignaali väärtus.

Retsirkulatsiooni antud mudelis on teostatud simuleerimisprogrammis leiduva ühe sisendiga retsirkulatsiooni komponendi abil. Retsirkulatsioon töötab pidevalt põhimõttel 10% välisõhku ning 90% tagastuvat ruumiõhku. Retsirkulatsiooni komponendi juhtimine toimib konstantse juhtimisgraafiku alusel, mille lähtesuuruseks on 0,1.

Jahutuspatarei juhtimine toimib väljatõmbeõhu niiskussisalduse alusel. Väljatõmbe õhu niiskussisalduse väärtus saadetakse jahutuse juhtimistüübiga PI kontrollerisse, kus võrreldakse mõõdetud suurust seadesuurusega 5,8 g/kg^{K₀} ning edastatakse 0 või 1 signaal järgnevasse võrdluselementi. Võrdluselemendis võrreldakse esimese PI kontrolleri väljundsignaali ja võrdlussuurust 0,01. Võrdluselemendi väärtus edastatakse *switch* tüüpi loogikakomponenti. *Switch* komponendi esimest signaali eelistatakse juhul, kui eelnevast võrdluselemendist tulenev väärtus osutus tõeseks, muudel juhtudel eelistatakse *switch* komponendi teist signaali. *Switch* komponendi esimese signaali sisendiks on jahutuse juhtimistüübiga PI kontroller, mis võrdleb väljatõmbeõhu niiskussisaldust seadesuurusega 5,8 g/kg^{K₀} ning kontrollib ruumiõhu ülemise niiskussisalduse tagamist. *Switch* komponendi teise signaali sisendiks on jahutuse

juhtimistüübiga PI kontrollid, mis võrdleb väljatõmbeõhu temperatuuri seadesuurusega 16,5 °C ning kontrollib ruumiõhu ülemise temperatuuri piiri tagamist. *Switch* komponendist edastatakse signaali jahutuspatarei külmakandja vooluhulga suurendamiseks kuni väljatõmbe õhutemperatuur saavutab seadesuuruse.

Küttekalorifeeri töö toimimine on lahendatud lähtuvalt väljatõmbe õhu niiskussisaldusest ning temperatuurist. Esmalt saadetakse väljatõmbe niiskussisalduse väärtus võrdluselementi, kus võrreldakse mõõdetud suurust seadesuurusega 5,5 g/kg^{KÕ} ning edastatakse *switch* tüüpi loogika komponenti. *Switch* komponenti on ühendatud kaks PI kontrollid, mille juhtimise eesmärgiks on ülemise ja alumise ruumiõhu seadesuuruse saavutamine. Antud PI kontrollid on kütte juhtimistüübiga ning võrdlevad väljatõmbe õhutemperatuuri seadesuurusega ja vastavalt edastavad *switch* komponenti kas 0 või 1 signaali. Ülemise ruumiõhu seadesuurusega 18°C PI kontrolli signaali eelistatakse *switch* komponendis juhul, kui võrdluselemendist tulenev signaal osutub tõeseks. Ülejäänud juhtudel eelistab *switch* alumise ruumiõhu seadesuurusega 16° C PI kontrolli signaali. *Switch* komponendi edastatakse signaali küttekalorifeeri soojuskandja vooluhulga suurendamiseks kuni väljatõmbe õhutemperatuur saavutab seadesuuruse.

Auruniisuti juhtimisloogika on koostatud väljatõmbeõhust lähtuvalt niiskussisaldusest. Väljatõmbeõhust saadud niiskussisalduse väärtus edastatakse kütte juhtimistüübiga PI kontrollidesse, kus võrreldakse mõõdetud väärtust seadesuurusega 5,1 g/kg^{KÕ}. Kui niiskussisaldus on madalam kui seadesuurus, siis edastatakse töösignaal auruniisutile ca 100°C auru genereerimiseks kuni väljatõmbe niiskussisaldus ei saavuta niisutuse seadeväärtust.

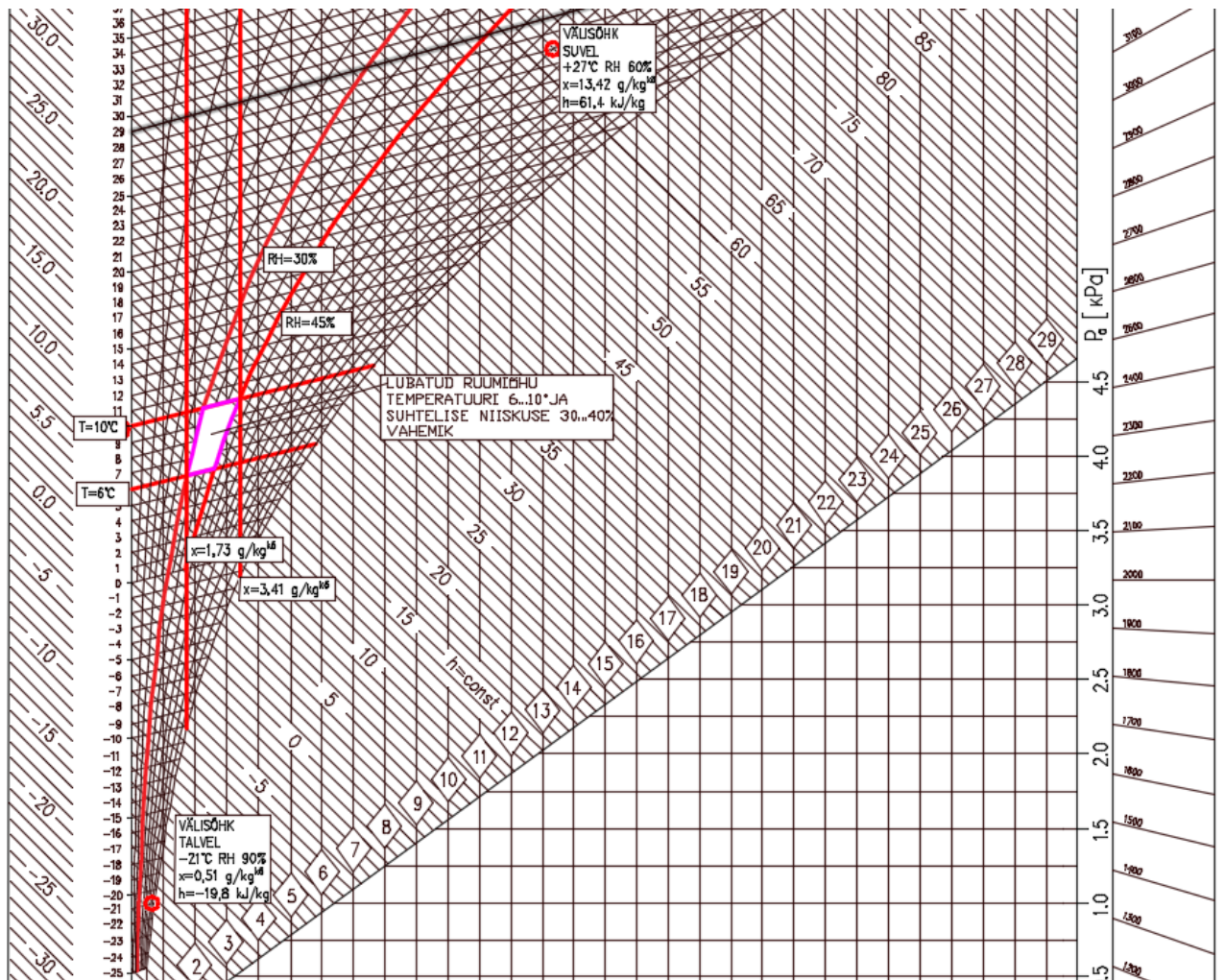
2.4.2.1 Õhukonditsioneerimisseadmete tehniliste lahenduste variatsioonid

Täiendavalt on võimalike õhukonditsioneerimise skeemide energiatõhususe ning toimivuse hindamiseks antud tingimuste tüübile loodud üks täiendav simulatsioonimudel. Teine simulatsioonimudel põhineb tüüp 2 baaslahendusel – kompressorkuivatusseadmega kuivatamisel. Täiendava simulatsioonimudeli juhtimisloogika on koostatud sarnaselt tüüp 1 baasvariandile.

2.4.3 Konditsioneerimissüsteem tüüp 2 (+6...10°C; RH 30...45%)

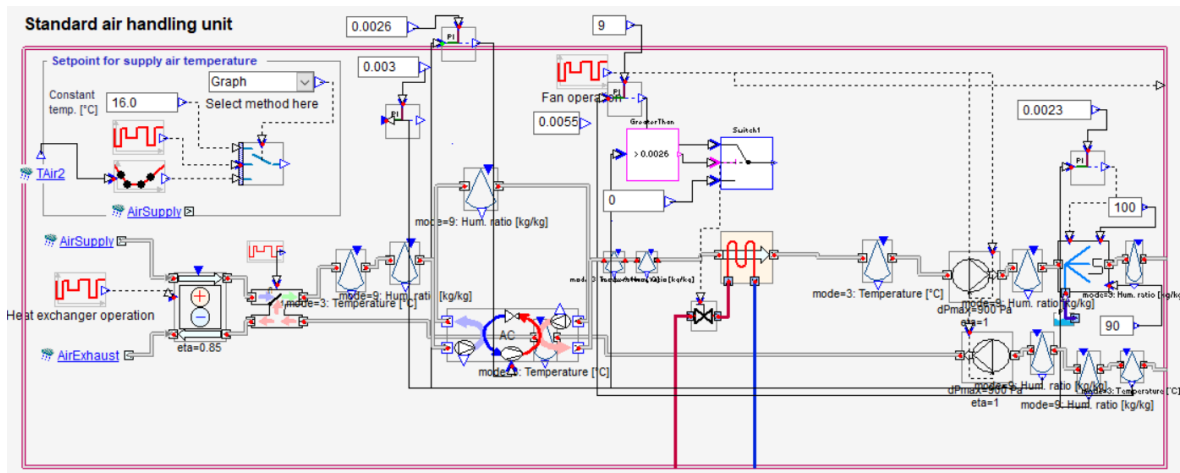
Õhukuivatamise liigituse seisukohast on antud konditsioneerimisskeem baasmudeliks kompressorkuivatusseadmega õhu kuivatamise variandile. Antud baasmudeli lahenduseks on osalise tagastusõhuga konditsioneerimissüsteem. Seadme välisõhuvahetuse plokis on energiatõhususe suurendamiseks ning niiskuse- ning külmatagastuseks ette nähtud rootorsoojustagasti. Soovitud sisekliima parameetrite

tagamiseks on seadmes tarvilikud auruniisuti, kompressorkuivatusseade ja järelkütte küttekalorifeer. Erinevusi võrreldes tüüp 1 konditsioneerimisseadmega seisneb kompressorkuivatusseadme kasutamises retsirkulatsioonisüsteemis. Juhtimine on lahendatud lähtuvalt väljatõmbe õhus paiknevate temperatuuri ja niiskussisalduse andurite näitudest. Ilmestamaks antud hoidla temperatuuri ja suhtelise niiskuse tingimuste piiranguid on joonisel 2.13 esitatud piirkonnad, milles hoidla sisekliima tagatud peab olema.



Joonis 2.13 $+6...10^{\circ}\text{C}$; $\text{RH } 30...45\%$ hoidla tüübi parameetri vahemikud H-X diagrammil

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 süsteemikonfiguratsioonis. Simulatsiooni tarkvaras loodud kujutis on välja toodud joonisel 2.14.



Joonis 2.14 Konditsioneerimissüsteem tüüp 2 mudel simulatsiooni tarkvaras

Soojustagasti juhtimine on skeemi puhul korraldatud lähtuvalt välisõhutemperatuurist. Välisõhutemperatuuri põhine juhtimine võimaldab soojustagasti töötamist vajaduspõhisemalt. Välisõhust mõõdetud temperatuuri väärtust võrreldakse PI kontrolleri suurusega 10°C ning vastavalt võrdluse tulemusele edastakse soojustagastile kas 0 või 1 juhtsignaali väärtus.

Retsirkulatsiooni antud mudelis on teostatud simuleerimisprogrammis leiduva ühe sisendiga retsirkulatsiooni komponendi abil. Retsirkulatsioon töötab pidevalt - põhimõttel 10% välisõhku ning 90% tagastuvat ruumiõhku. Retsirkulatsiooni komponendi juhtimine toimib konstantse juhtimisgraafiku alusel, mille lähtesuuruseks on 0,1.

Õhu kuivatamine on antud skeemi puhul lahendatud simuleerimistarkvaras sisalduva õhukonditsioneeris komponendi baasil. Retsirkulatsiooni komponendist väljuv õhuvool suunatakse konditsioneeris aurustisse, mis käitub nagu jahutuspatari. Aurustis toimub protsessiõhu jahutamine allapoole veeauru küllastuskõverat, mis läbi kondenseerub osa niiskust välja. Aurusti juhtimisloogika on koostatud PI kontrolleri baasil. Jahutuse juhtimistüübiga ning seadeväärtusega $2,6 \text{ g/kg}^{\text{K}^{\circ}}$ PI kontrolleri edastatakse mõõtesigaal väljatõmbe õhukanalisse paigaldatud niiskussisaldus andurist. PI kontrolleri toimub võrdlus seadesuurusega, ning edastatakse väljundsignaal aurusti töötamiseks. Aurusti töötab kuni väljatõmbeõhu niiskussisaldus ei ületa määratud seadesuurust väljatõmbeõhu niiskussisaldusele.

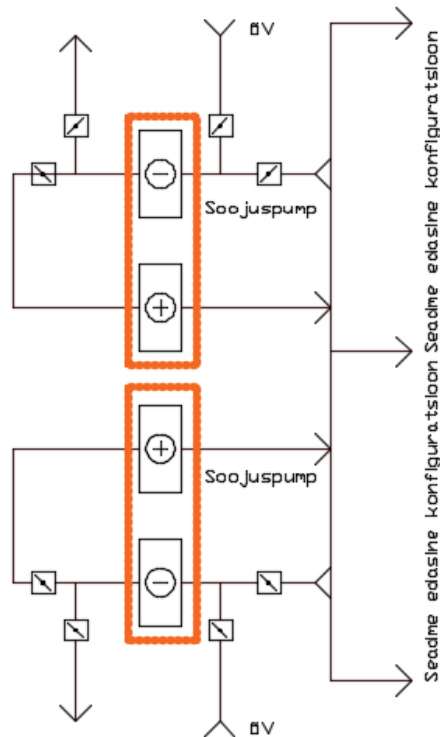
Järelküttekalorifeeri töö toimimine on lahendatud lähtuvalt väljatõmbe õhu niiskussisaldusest ning temperatuurist. Esmalt saadetakse väljatõmbe õhu niiskussisalduse väärtus võrdluselementi, kus võrreldakse mõõdetud suurust seadesuurusega $2,6 \text{ g/kg}^{\text{K}^{\circ}}$ ning edastatakse *switch* tüüpi loogika komponenti. *Switch*

komponenti on ühendatud PI kontrolleri, mille juhtimise eesmärgiks on temperatuuri seadesuurus 9°C tagamine. Antud PI kontrolleri on kütte juhtimistüübiga ning võrdleb väljatõmbe õhutemperatuuri seadesuurusega ja vastavalt edastab *switch* komponenti kas 0 või 1 signaali. Ruumiõhu seadesuurusega 9 °C PI kontrolleri signaali eelistatakse *switch* komponendis juhul, kui võrdluselemendi väljundsignaal osutub tõeseks. Ülejäänud juhtudel eelistab *switch* alumise signaali väärtust, milleks on 0, mis tähendab, et kalorifeer ei tööta. *Switch* komponendist edastatakse signaali küttekalorifeeri soojuskandja vooluhulga suurendamiseks kuni väljatõmbe õhutemperatuur saavutab seadesuuruse.

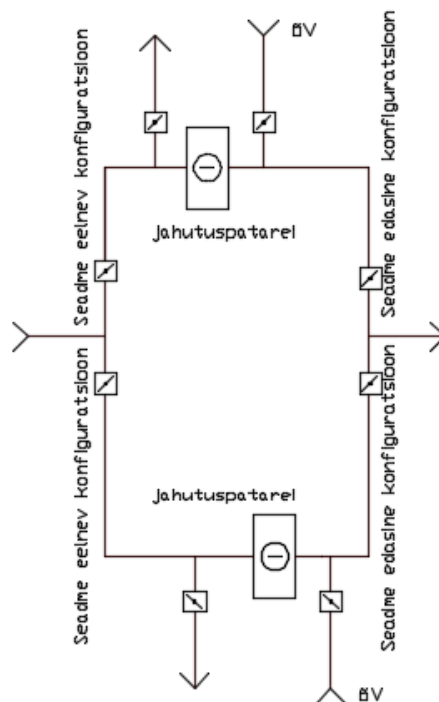
Auruniisuti juhtimisloogika on koostatud lähtuvalt väljatõmbeõhu niiskussisaldusest. Väljatõmbeõhust saadud niiskussisalduse väärtus edastatakse kütte juhtimistüübiga PI kontrolleri, kus võrreldakse mõõdetud väärtust seadesuurusega 2,3 g/kg^{KÖ}. Kui niiskussisaldus on madalam kui seadesuurus, siis edastatakse töösignaal auruniisutile ca 100°C auru genereerimiseks kuni väljatõmbe niiskussisaldus ei saavuta niisutuse seadeväärtust.

2.4.3.1 Õhukonditsioneerimisseadmete tehniliste lahenduste variatsioonid

Täiendavalt on võimalike õhukonditsioneerimise skeemide energiatõhususe ning toimivuse hindamiseks antud tingimuste tüübile loodud kaks täiendavat simulatsioonimudelit. Antud hoidla temperatuuri ning suhtelise niiskuse nõuetest tulenevalt tuleb antud skeemi puhul arvestada kompressorkuivatusseadme ning jahutuspatarei jäätumisevõimalusega - tingituna jahutuspatarei/aurusti madalast pinnatemperatuurist. Seadme võimalik tehniline lahendus on esitatud joonisel 2.15. Soojuspumba sulatuslahenduseks on võimalik kasutada kahte vaheldumisi töötavat soojuspumba tsüklit, mis töötavad vastavalt sulatusvajadusele. Võimalik põhimõtteskeem on esitatud joonisel 2.15. Aurusti sulatamislahenduseks oleks sooja õhu juhtimine läbi aurusti, mille toimel jäänud kondensaad sulaks. Samalaadne lihtsus on tehtud ka -3...-7°C, RH 30...40% hoidla soojuspumbaga konditsioneerimislahendusele. Jahutuspatareiga õhukuivatamise variandil esineb kondensaadi jäätmise oht jahutuspatareis, mistõttu on tarvilik selle lahenduse puhul arvestada jahutuspatarei sulatamise lahendustega. Jahutuspatarei puhul oleks võimalik kasutada kahte vaheldumisi töötavat jahutuspatareid, mis töötavad vastavalt sulatusvajadusele. Võimalik põhimõtteline lahendus on esitatud joonisel 2.16. Jahutuspatarei sulatamine toimiks sooja õhuvoolu läbijuhtimisel jahutuspatareist.



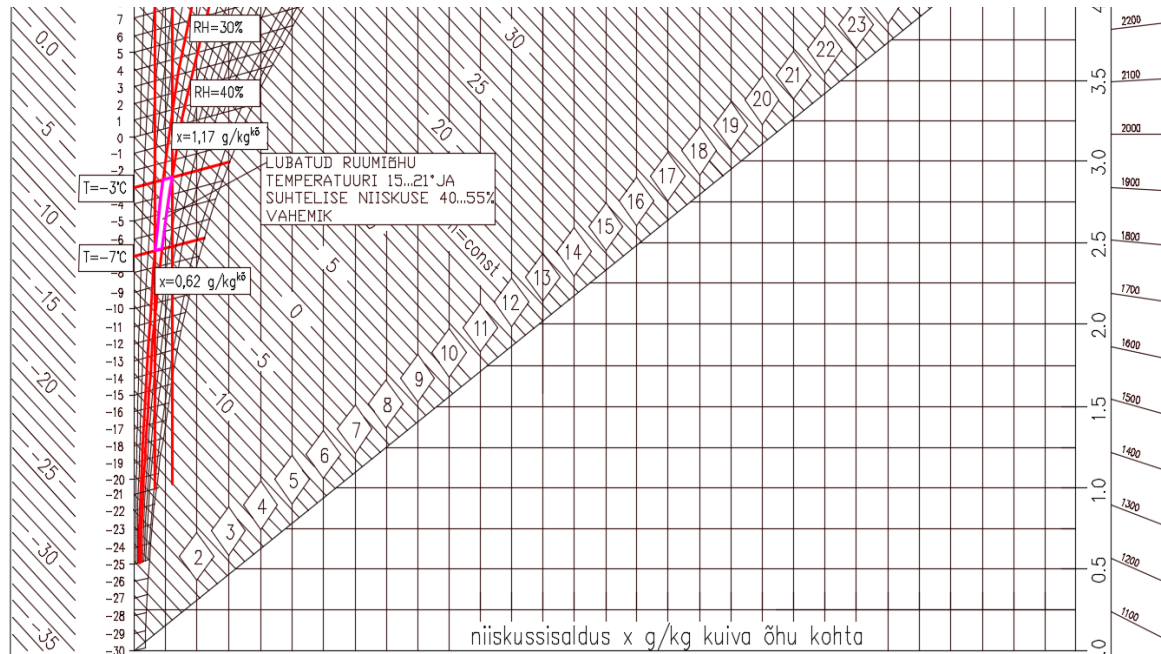
Joonis 2.15 Soojuspumbaga konditsioneerilahenduse aurusti põhimõtteline sulatuslahendus



Joonis 2.16 Jahutuspatarel põhimõtteline sulatuslahendus 6...10°C, RH 30...45% jahutuspatarel ja järelküttekalorifeeriga lahendusele

Esimene täiendav simulatsioonimudel põhineb tüüp 1 baaslahendusel – jahutuspatareiga õhukuivatamisel ning teine täiendav simulatsioonimudel põhineb tüüp 3 baaslahendusel rootorkuivatusseadmega kuivatamisel. Täiendavate

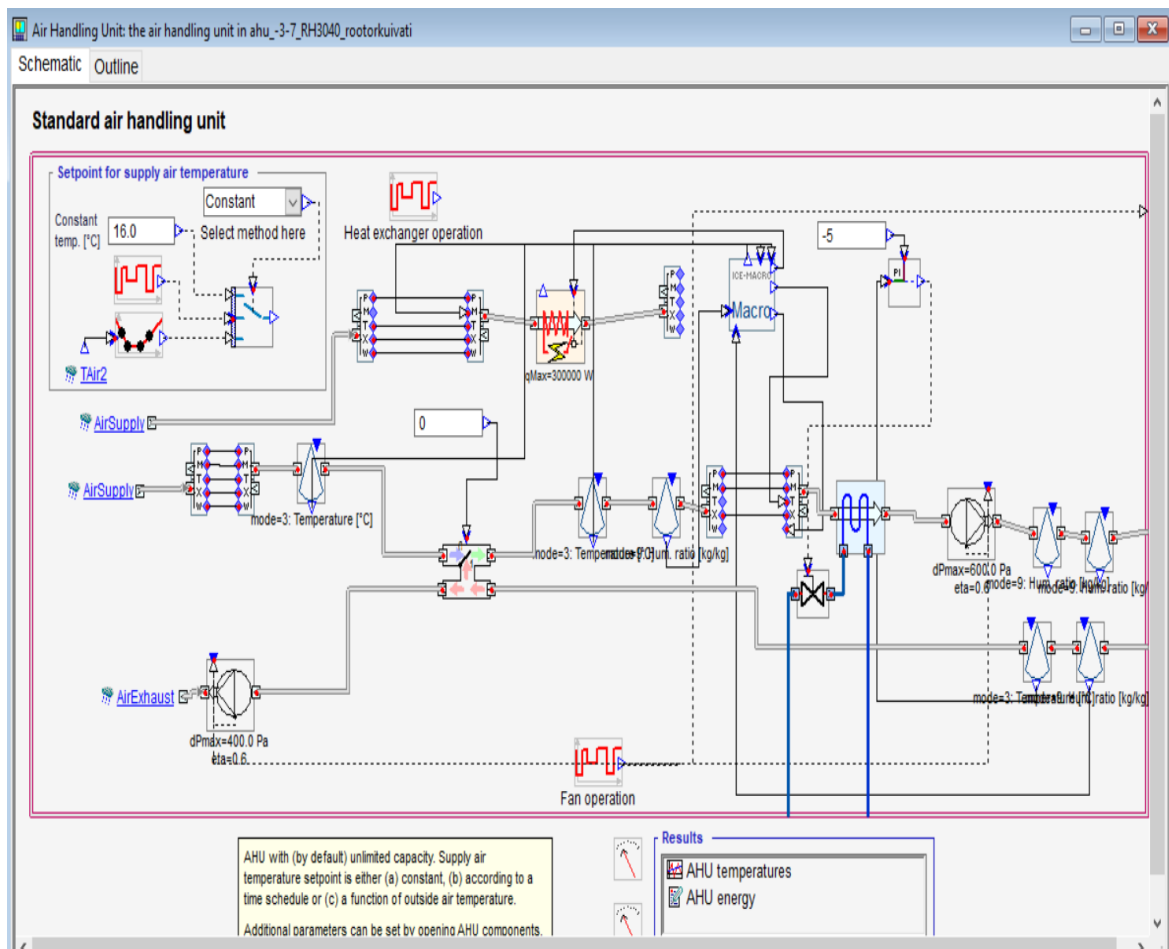
simulatsioonimudelite juhtimisloogikad on koostatud vastavalt tüüp 2 baasvariandile kooskõlas vastavate alammudelite juhtimisele. Ilmestamaks antud hoidla temperatuuri ja suhtelise niiskuse tingimuste piiranguid, on joonisel 2.17 esitatud piirkonnad, milles hoidla sisekliima tagatud peab olema.



Joonis 2.17 -3...-7°C; RH 30...40% hoidla tüübi parameetri vahemikud H-X diagrammil

2.4.4 Konditsioneerimissüsteem tüüp 3 (-3...-7°C; RH 30...40%)

Õhukuivatamise liigituse seisukohast on antud konditsioneerimisskeem baasmudeliks rootorkuivatusseadmega õhu kuivatamise variandile. Antud baasmudeli lahenduseks on tagastusõhuga konditsioneerimissüsteem. Soovitud sisekliima parameetrite tagamiseks on seadmes tarvilikud jahutuskalorifeer ja rootorkuivatusseade. Süsteemikomponentide juhtimine on lahendatud lähtuvalt väljatõmbe õhus paiknevate temperatuuri ja niiskussisalduse andurite näitudest. Erinevus võrreldes 1. ja 2. tüübi konditsioneerimisseadmetega on, et antud skeemi puhul on kasutusel täielik retsirkulatsioon, mis tähendab, et õhuvahetus väliskeskonnaga puudub. Erinevuseks eelnevalt kirjeldatud skeemidega on antud skeemi puhul ka eritüüpi rootorkuivatusseadme kasutamine konditsioneerimisseadme konfiguratsioonis. Seadme simulatsiooni tarkvaras loodud kujutis on välja toodud joonisel 2.18.



Joonis 2.18 Konditsioneerimissüsteem tüüp 3 mudel simulatsiooni tarkvaras

Retsirkulatsiooni antud mudelis on teostatud simuleerimisprogrammis leiduva ühe sisendiga retsirkulatsiooni komponendi abil. Selle tüübi baaslahenduse puhul õhuvahetus väliskeskkonnaga puudub, mistõttu retsirkulatsiooni komponent on häälestatud töötama põhimõttel 0% välisõhku ning 100% tagastuvat ruumiõhku.

Õhukuivatamine on antud baasmudeli puhul lahendatud rootorkuivatusseadme baasil. Rootorkuivati juhtimine on kavandatud viisil, et kuivatusseade tagaks ülemise ruumiõhu niiskussisalduse seadesuuruse $0,84 \text{ g/kg}^{\text{K}^{\circ}}$. Rootorkuivati töö juhtimine on ette nähtud väljatõmmatava ruumiõhu niiskussisalduse alusel. Juhul kui väljatõmmatava ruumiõhu niiskussisaldus on kõrgem kui seadesuurus $0,84 \text{ g/kg}^{\text{K}^{\circ}}$, aktiveeritakse rootori juhtsignaali andmisega rootorkuivati regenererimiskalorifeerile. Rootorkuivati töötab kuni tagastava õhu niiskussisaldus ei ületa enam seadesuurust $0,84 \text{ g/kg}^{\text{K}^{\circ}}$. Rootorkuivati töötamise modelleerimiseks on kasutatud makrot, kus on kasutatud simuleerimistarkvara loogika ning matemaatilisi komponente. Kuivatusseadme töötamise loogika on ülesehitatud artiklis [45] esitatud arvutusvalemite baasil. Artiklis on esitatud rootorkuivati töötamise kirjeldamiseks võimalikud seosed. Käesolevas töös on rootorkuivati simulatsiooni mudeli ülesehitamisel kasutatud arvutusseoseid rootori

erivõimsuse, regeneratsiooniõhu soojendamise võimsuse ning rootorkuivati temperatuuri suhtarvu leidmiseks. Valemid ja nende selgitused on välja toodud järgnevalt:

$$RSHI = \frac{Q_{reg}}{\Delta x * L_{m,pro}} \quad 2.2$$

kus RSHI – erivõimsus, [kJ/g]

Q_{reg} – regeneratsiooniõhu soojendamise võimsus, [kW]

Δx – niiskussisalduste vahe enne ja pärast rootori läbimist protsessiõhu poolel, [g/kg^{KÕ}]

$L_{m,pro}$ – protsessiõhu massivooluhulk, [kg/s]

$$Q_{reg} = L_{m,reg} * (t_{reg,out} - t_{reg,in}) \quad 2.3$$

kus Q_{reg} – regeneratsiooniõhu soojendamise võimsus, [kW]

$L_{m,reg}$ – regeneratsiooni massivooluhulk, [kg/s]

$t_{reg,out}$ – regeneratsiooni kalorifeerist väljuva õhu temperatuur, [°C]

$t_{reg,in}$ – regeneratsiooni kalorifeeri siseneva õhu temperatuur, [°C]

$$\eta_t = \frac{(t_{pro,out} - t_{pro,in})}{(t_{reg,in} - t_{pro,in})} \quad 2.4$$

kus η_t – rootorkuivati temperatuuri suhtarv, [-]

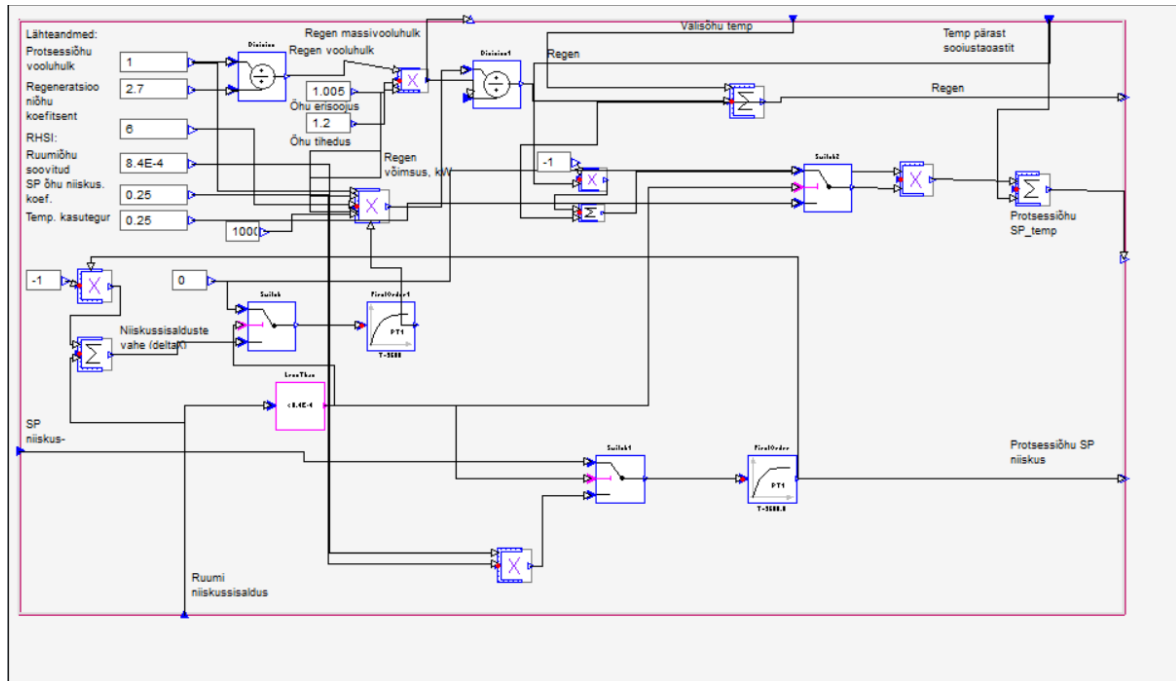
$t_{reg,out}$ – regeneratsiooni kalorifeerist väljuva õhu temperatuur, [°C]

$t_{pro,in}$ – rootorisse siseneva protsessi õhu temperatuur, [°C]

$t_{pro,out}$ – rootorist väljuva protsessiõhu temperatuur, [°C]

Rootorkuivati simulatsioonimudel töötab simulatsiooni lähteparameetrite ning täiendavate rootorkuivati makrosse sisestatud sisendandmete abil. Simulatsioonide teostamisel leitakse makrosse sisestatud seoste baasil protsessiõhu temperatuur,

niiskuslikud parameetrid, regeneratsiooniõhu temperatuuri seade arv ja regeneratsiooniõhu massivooluhulk. Makros välja arvatud väärtused tagastatakse simulatsiooni mudelisse, kus toimub kogu tervik konditsioneerimiseseadme mudeldamine.



Joonis 2.19 Rootorkuivati kirjeldus simulatsioonitarkvaras

Jahutuspatarei juhtimine toimib väljatõmbeõhu temperatuuri alusel. Väljatõmbe õhu temperatuuri väärtus saadetakse jahutuse juhtimistüübiga PI kontrollerisse, kus võrreldakse mõõdetud suurust seadesuurusega -5°C . Juhul kui temperatuur on suurem kui seadesuurus, siis antakse signaal jahutuspatareis külmakandja vooluhulga suurendamiseks kuni väljatõmbe temperatuur ei ületa enam seadesuurust.

2.4.4.1 Õhukonditsioneerimiseseadmete tehniliste lahenduste variatsioonid

Täiendavalt on õhukonditsioneerimise võimalike skeemide energiatõhususe ning toimivuse hindamiseks antud tingimuste tüübile loodud üks täiendav simulatsioonimudel. Täiendav simulatsioonimudel põhineb tüüp 2 baaslahendusel kompressorkuivatuseadmega kuivatamisel. Täiendava simulatsioonimudeli juhtimisloogika on koostatud vastavalt tüüp 3 baasvariandile kooskõlas vastavate alammudelite juhtimisega.

3 TULEMUSED JA ANALÜÜS

Peatükis esitletakse simulatsioonide tulemusi ja viidakse läbi tulemuste analüüs. Simulatsiooni tulemuste esitamine jaguneb kahte ossa. Esmalt antakse ülevaade tüüphoidlaga teostatud simulatsioonide tulemustest, mis on teostatud süsteemide esmase võrdlemise eesmärgiga. Eesti Rahvusraamatukogu hoidlate baasil teostatud simulatsiooni tulemusi esitatakse süsteemide optimeerimise võtmes ning viiakse läbi analüüs süsteemide toimivuse ja energiatõhususe osas. Tulemusena pakutakse lähenemisviise, millest lähtuda hoidlate konditsioneerimissüsteemide kavandamisel.

3.1 TÜÜPVARIAANTIDE TULEMUSED TÜÜPHOIDLA BAASIL

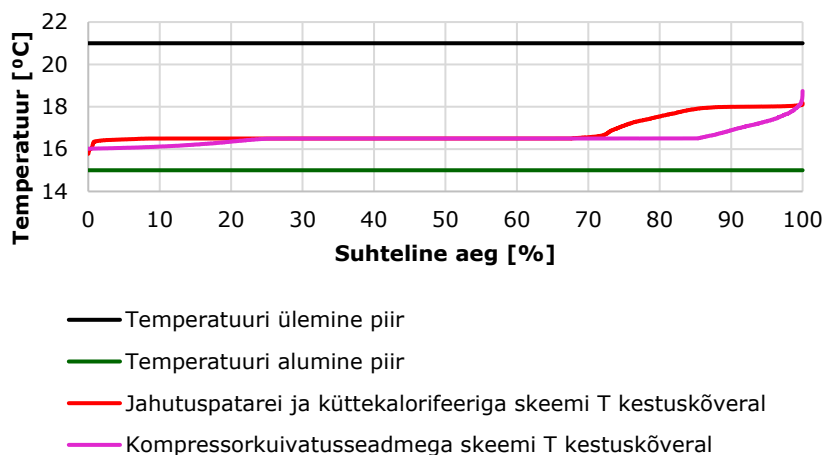
3.1.1 Tüüp 1

1 hoidla tüübi (15...21°C; RH40...55%) tehniliste lahenduste toimivuse ja esmase energiatõhususe hindamiseks teostati aasta pikkused dünaamilised energiasimulatsioonid 2 süsteemi variandiga. Esimeseks variandiks valiti jahutuspatareil ja järelküttekalorifeeril põhinev konfiguratsioon. Teise variandina teostati simulatsioon kompressorkuivatusseadmega.

Simulatsioonidega selgitati mõlema skeemi toimivus temperatuuri ja suhtelise niiskuse tagamise osas. Energiatõhususe seisukohast vaadeldi küttele, jahutusele ning niisutusele kuluvat energiat. Täiendavalt võeti arvesse energiakulu nii elektrile kui ka soojusenergiale ning samuti vaadeldi summaarset energiatarvet.

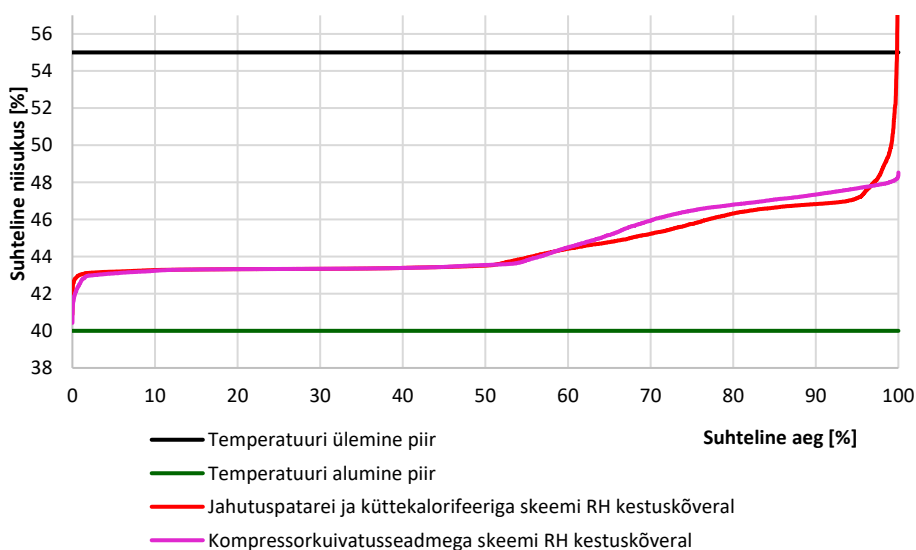
Simuleeritud temperatuur ja suhteline niiskus on esitatud kestusgraafikude kujul. Täiendavalt on graafikutele märgitud vastava suuruse ääretingimused. Süsteemide võrdlemiseks esitatakse küttele ja jahutuse netoenergiatarve, niisutuseks tarvilik elektrienergia tarve ning kaalutud summaarne energiakasutus. Energiatarbe väärtused on taandatud hoidla põrandapinna ruutmeetritele. Tulemused on esitatud aasta pikkuse perioodi kohta kuude lõikes.

Joonisel 3.1 on kujutatud ruumiõhu temperatuurid kestuskõveral tüüphoidlas. Vertikaalsel teljel on ruumiõhu temperatuur ning horisontaalsel teljel suhteline aeg arvestades aasta pikkust perioodi. Jooniselt on võimalik järeldada, et mõlema simuleeritud variandi puhul on nõutud temperatuur kogu perioodi vältel tagatud. Samuti nähtub jooniselt, et suures osas kestuskõverad kattuvad ning mõlema variandi puhul on olemas mõningane varu temperatuuri kõikumisteks.



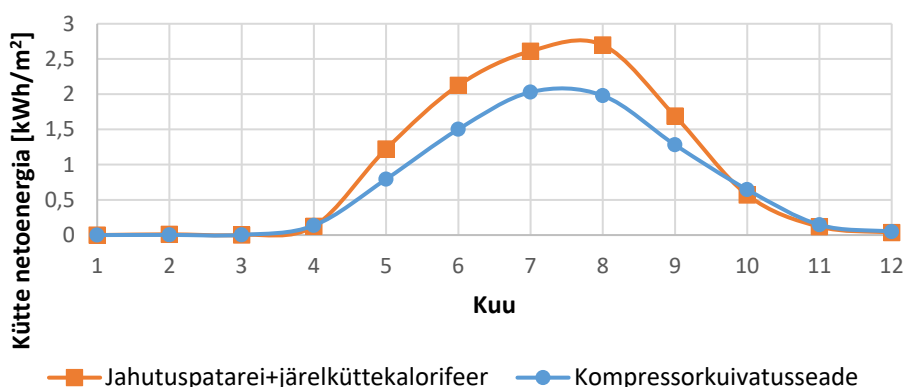
Joonis 3.1 15...21°C, RH 40...55% hoidla temperatuur kestusgraafikul

Joonisel 3.2 on kujutatud ruumiõhu suhteline niiskus kestuskõveral tüüphoidlas. Vertikaalsel teljel on ruumiõhu suhteline niiskus ning horisontaalsel teljel suhteline aeg arvestades aasta pikkust perioodi. Jooniselt on võimalik järeldada, et mõlema simuleeritud variandi puhul on nõutud RH kogu perioodi vältel tagatud sobilikus vahemikus. Jahutuspatarei ja küttekalorifeeriga skeemi puhul võib täheldada mõningast ülemise piirväärtuse ületamist, kuid piirväärtuse ületamise ajaline väärtus on tühine (2%). Samuti nähtub jooniselt, et suures osas kestuskõverad kattuvad ning mõlema variandi puhul on olemas mõningane varu temperatuuri kõikumisest tuleneva suhtelise niiskuse muutumisele.



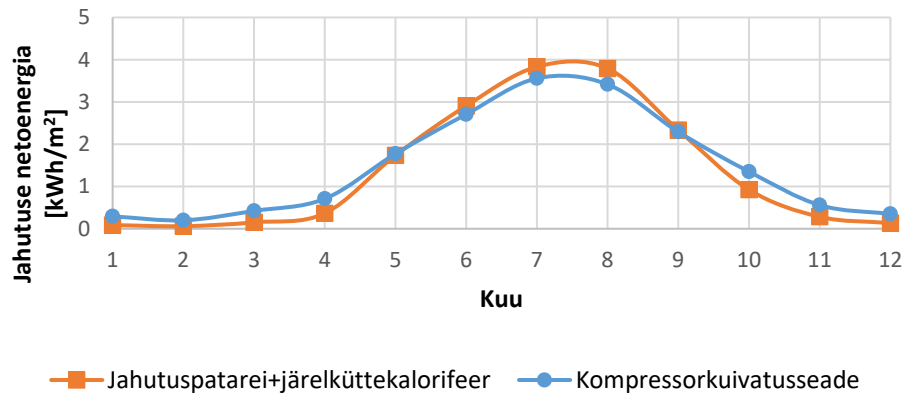
Joonis 3.2 15...21°C, RH 40...55% hoidla temperatuur kestusgraafikul

Joonisel 3.3 on kujutatud ruumiõhu kütmiseks tarvilik kütte netoenergia kuude lõikes. Vertikaalsel teljel on esitatud energia ning horisontaalsel teljel ajaline periood kuudes. Graafikult on näha, et mõlema skeemi puhul on maksimaalne kütte netoenergia tarbimine suvisel perioodil juulist septembrini. Suur kütte netoenergia vajadus suvisel ajal on põhjendatav järelkütmise vajadusega pärast kondenseerumist põhimõttel kuivatamist. Veel järeldeb jooniselt, et kompressorkuivatusseadmega konfiguratsiooni puhul on saavutatud väiksem kütteenergia vajadus, mis on selgitatav soojuspumba kondensaatori jääsoojuse kasutamisega osaliselt järelkütteks. Tulenevalt suhteliselt madalast temperatuurist seadesuurusest on talvisel perioodil mõlema variandi puhul tarvilik minimaalses määras kütteenergiat.



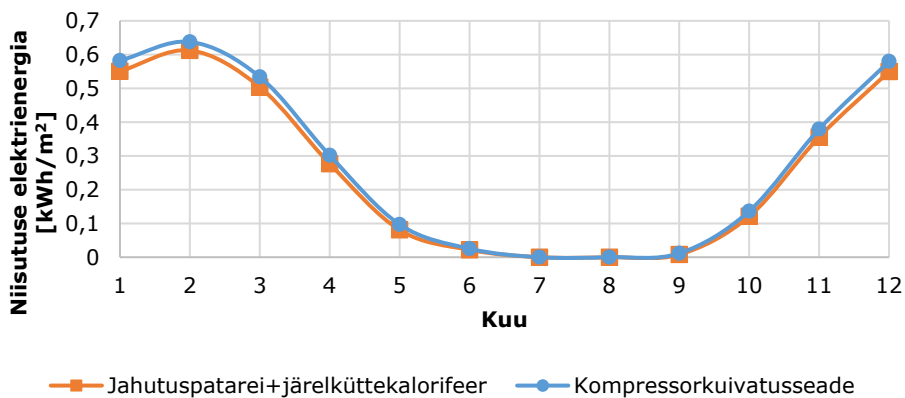
Joonis 3.3 15...21°C, RH 40...55% hoidla konditsioneerimisskeemide kütte netoenergiavajadus

Joonisel 3.4 on kujutatud ruumiõhu jahutamiseks ning kuivatamiseks tarvilik energia kuude lõikes. Vertikaalsel teljel on esitatud jahutuse netoenergia ning horisontaalsel teljel ajaline periood kuudes. Graafikult on näha, et mõlema skeemi puhul on maksimaalne jahutuse netoenergia tarbimine suvisel perioodil juulist septembrini. Jahutuse netoenergia vajadus suvisel ajal on põhjendatav õhu kuivatusvajadusega. Õhukuivatamine toimub simuleeritud variantide puhul kondensatsiooni meetodil, millest tulenevalt tuleb õhku maha jahutada, et saavutada soovitud niiskussisaldus. Graafikult selgub ka, et ruumiõhu jahutamine toimub pidevalt kogu aasta lõikes. Kui suvisel perioodil toimub kuivatamine õhu kuivatamise eesmärgiga siis talvisel perioodil on jahutatamine vajalik ruumitemperatuuri sobilikus vahemikus hoidmiseks. Kahe süsteemi võrdluses on jahutuse netoenergia tarbimine kuude lõikes küllaltki sarnane, sest keskmine erinevus jääb ligikaudu 10% piiresse.



Joonis 3.4 15...21°C, RH 40...55% hoidla konditsioneerimisskeemide jahutuse netoenergiavajadus

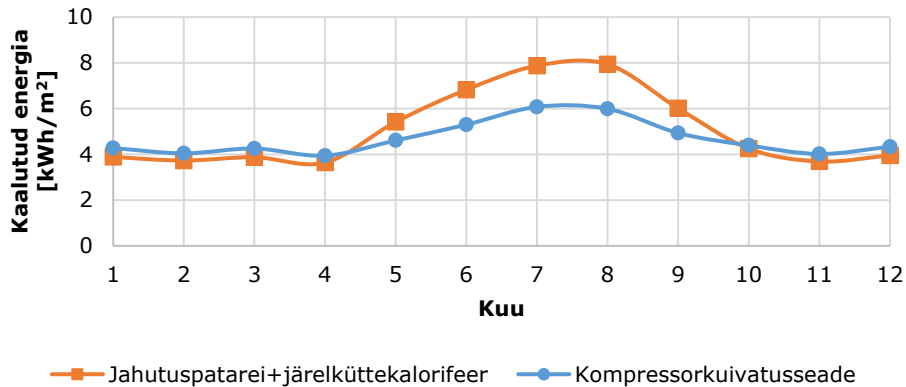
Joonisel 3.5 on kujutatud ruumiõhu niisutamiseks tarvilik elektrienergia kuude lõikes. Vertikaalsel teljel on esitatud niisutuse elektrienergia ning horisontaalsel teljel ajaline periood kuudes. Graafikult ilmneb, et peamine niisutusvajadus esineb talvisel perioodil. Maksimaalne niisutuse elektrienergia tarve mõlema skeemi puhul on perioodil, kui välisõhk on kõige kuivem ning esineb suurim niisutusvajadus. Mõlema vaadeldud süsteemi variandi niisutuseks vajalik elektrienergia tarve kuude lõikes on sisuliselt samasugune, keskmine erinevus on ligikaudu 7%.



Joonis 3.5 15...21°C, RH 40...55% hoidla konditsioneerimisskeemide niisutuse elektrienergia vajadus

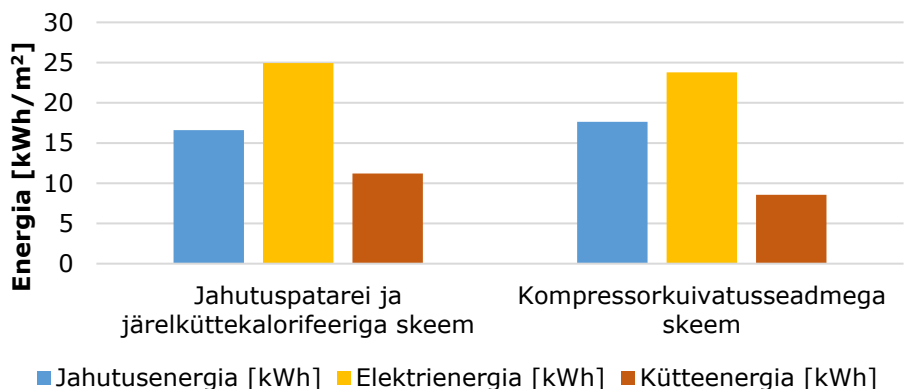
Joonisel 3.6 on esitatud simuleeritud süsteemide summaarne kaalutud energiatarve, mis on saadud kaalutud soojus- ja elektrienergia väärtuste summeerimisel. Tarnitud soojusenergia soojusallikana on arvestatud kaugküte ning energiakasutuse kaalumistegurina on kasutatud väärtust 0,9. Soojusenergia komponent tuleneb kütte netoenergia vajadusest, täiendavalt on arvesse võetud kütte primaarsoojusallika kasutegur, milleks on vaikumisi arvestatud 0,9. Kaalutud elektrienergia teisendustel on kasutatud kaalumistegurit 2,0. Elektrienergia komponent tuleneb jahutus- ja

niisutusenergiast ning ventilaatorite ja pumpade energiatarbest. Soojuspumba energiakulu määramisel on arvestatud COP=3,5. Eelpool esitatud joonistelt jäeldub, et kompressorkuivatusseadme energiatarve on sarnase profiiliga nagu jahutuspatarei ja järelküttekalorifeeriga variandil. Peamine erinevus seisneb madalamas energiatarbes kuivatusperioodil, mis tuleneb soojuspumba kondensaatori jääksoojuse utiliseerimisest jälsoojendusprotsessis.



Joonis 3.6 15...21°C, RH 40...55% hoidla konditsioneerimisskeemide summaarne kaalutud energiakasutus

Joonisel 3.7 on esitatud jahutus-, elektri-, ja kütte netoenergia kulu jagunemine. Tulemustest jäeldub, et kompressorkuivatusseadme aastane energiatarve on ca 20% väiksem kui jahutuspatarei ja järelküttekalorifeeriga variandi puhul. Energiakulu erinevus tuleneb eelkõige madalamast kompressorseadme soojusenergia vajadusest ning vähemal määral väiksemast elektrienergia tarbimisest.



Joonis 3.7 15...21°C, RH 40...55% hoidla konditsioneerimisskeemide neto energiakulu jagunemine jahutus-, elektri- ja kütteeenergia lõikes

3.1.2 Tüüp 2

Aurusti ja jahutuspatarei jäätumine

6...10°C, RH 30-45% ja -3...-7°C, RH 30-40% hoidlate soojuspumba ning 6...10°C, RH 30-45% jahutuspatarei ja järelküttekalorifeeri skeemi puhul on tehtud simulatsioonimudelites lihtsustus ja jäetud jahutuspatarei/aurusti jäätumine simulatsioonimudelites modelleerimata. Jäätumise mõju hindamiseks on tehtud arvutus, milles vaadeldakse kui palju kondenseerub koguseliselt jahutuspatareis või aurustis niiskust välja. Väljakondenseerunud niiskuse koguse põhjal teostatakse hinnanguline arvutus kui suur võiks olla lisaenergia, mida on vaja aurusti või jahutuspatarei sulatamiseks. Esmalt arvutatakse niiskussisalduste vahe vastavalt valemile 2.5 [46]. Niiskussisalduste vahe, protsessi massivooluhulga ning vaadeldava ajaperioodi väärtuste alusel leitakse välja kondenseeruv niiskuse mass. Vastavad valemid on esitatud 2.6 - 2.7 [46]. Sulatamiseks tarvilik lisaenergia leitakse lähtuvalt valemist 2.8, kus kondensaadi koguse, jää sulamissoojuse ja varuteguri abil leitakse hinnanguline täiendav lisaenergia vajadus [47]. Antud lähenemises on arvestatud lihtsustatult, et jahutuspatarei või aurusti pinnatemperatuur on pidevalt madalam kui 0°C, mis tähendab, et sulatusvajadusega on vajalik arvestada kogu aasta lõikes. Vastav arvutus on läbi viidud kuude lõikes ning tulemused lisatud soojusenergia tarbe väärtustele.

$$\Delta X = X_1 - X_2 \quad (2.5)$$

kus ΔX – niiskussisalduste vahe enne ja pärast jahutuspatareid, [kg/kg^{kõ}]
 X_1 – protsessiõhu niiskussisaldus enne jahutuspatareid, [kg/kg^{kõ}]
 X_2 – protsessiõhu niiskussisaldus pärast jahutuspatareid, [kg/kg^{kõ}].

$$w = L_m * \Delta X \quad (2.6)$$

kus w – ajaühikus jahutuspatareis väljakondenseeruv niiskus, [kg/s]
 ΔX – niiskussisalduste vahe enne ja pärast jahutuspatareid, [kg/kg^{kõ}]
 L_m – protsessiõhu massivooluhulk, [kg/s].

$$W = w * t \quad (2.7)$$

kus W – jahutuspatareis väljakondenseeruv niiskuse kogus, [kg]
 w – ajaühikus jahutuspatareis väljakondenseeruv niiskus, [kg/s]
 t – vaadeldav ajaperiood, [s].

$$E_{jää.s} = \frac{W * \lambda}{3600} * 1,2 \quad (2.8)$$

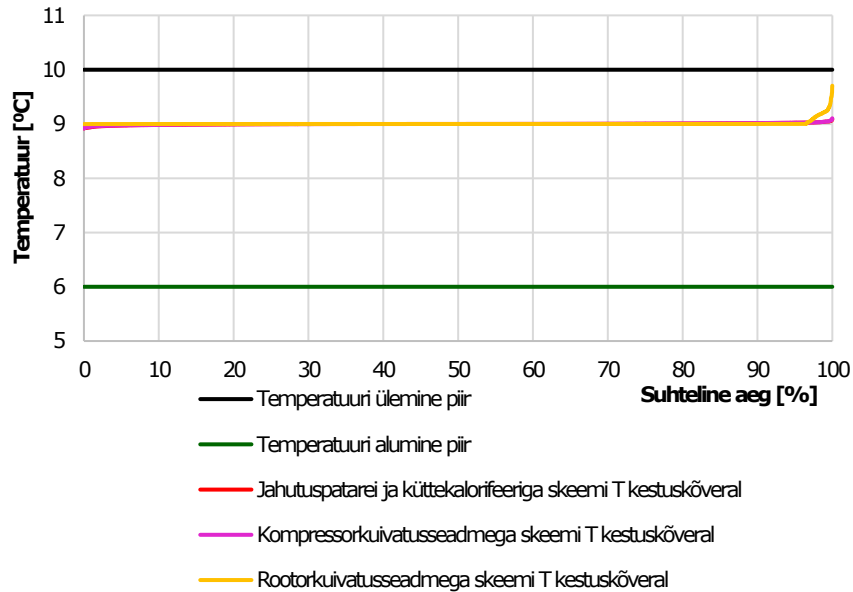
kus $E_{jää.s}$ – energia, mis on vajalik jahutuspatareis tekkiva jää sulatamiseks, [kWh]
 W – jahutuspatareis väljakondenseeruv niiskus, [kg]
 λ – jää sulamissoojus 330 kJ/kg, [kJ/kg]
 1,2 – varutegur
 3600 – kJ teisendustegur kWh.

2. hoidla tüübi (6...10°C; RH30...45%) tehniliste lahenduste toimivuse ja energiatõhususe hindamiseks teostati aasta pikkused dünaamilised energiasimulatsioonid kolme erineva konditsioneerimissüsteemi variandiga. Esimeseks variandiks valiti jahutuspatareil ja järelkütte kalorifeeril põhinev konfiguratsioon. Teise variandina teostati simulatsioon kompressorkuivatusseadmega. Kolmas simulatsioon viidi läbi rootorkuivatil põhineva konditsioneerimisseadme mudeliga.

Simulatsioonidega selgitati kõigi kolme skeemi toimivus temperatuuri ja suhtelise niiskuse tagamise osas. Energiatõhususe seisukohast oli simulatsiooni eesmärk jälgida küttele, jahutusele ning niisutusele kuluvat energiat. Täiendavalt võeti arvesse enegiakulu nii elektri- kui ka soojusenergiale, ning samuti vaadeldi summaarset energiatarvet.

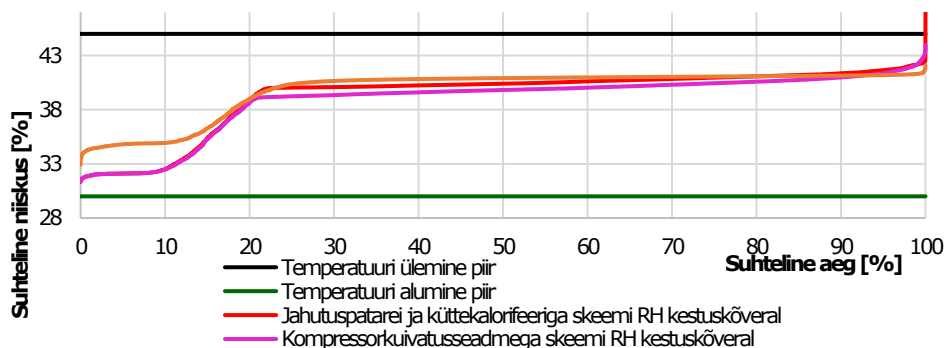
Simuleeritud temperatuuri ja suhtelist niiskust on esitatud kestusgraafikute kujul. Täiendavalt on graafikutele märgitud vastava suuruse ääretingimused. Süsteemide võrdlemiseks esitatakse küttele ja jahutuse netoenergiatarve, niisutuseks tarvilik elektrienergia tarve ning kaalutud summaarne energiakasutus. Energiatarbe väärtused on taandatud hoidla põrandapinna ruutmeetritele. Tulemused on esitatud aasta pikkuse perioodi kohta kuude lõikes.

Joonisel 3.8 on kujutatud tüüphoidla simuleeritud ruumiõhu temperatuurid kestuskõveral. Vertikaalsel teljel on ruumiõhu temperatuur ning horisontaalsel teljel suhteline aeg arvestades aasta pikkust perioodi. Jooniselt järeldub, et kõigi kolme variandi puhul on temperatuur kogu perioodi vältel nõutud vahemikus. Simuleeritud variantide sarnaste juhtimisloogikate mõjul on kõikide süsteemide tagatav ruumiõhu temperatuur kogu aasta vältel väikeste kõrvalekalletega ning ülemise piirnormi lähedal, kuid siiski on olemas varu temperatuuri kõikumisteks.



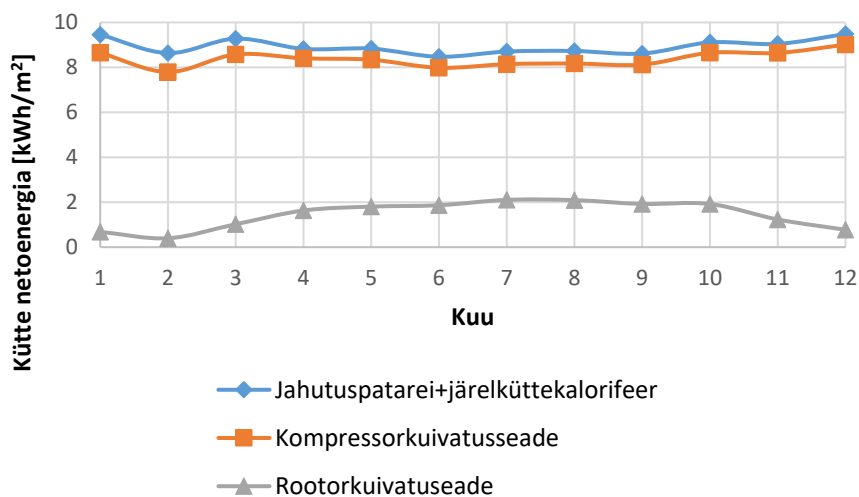
Joonis 3.8 6...10°C, RH 30...45% hoidla temperatuur kestusgraafikul

Joonisel 3.9 on kujutatud ruumiõhu suhteline niiskus kestuskõveral tüüphoidlas. Vertikaalsel teljel on esitatud ruumiõhu suhteline niiskus ning horisontaalsel teljel on kuvatud suhteline aeg arvestades aasta pikkust perioodi. Võimalik on järeldada, et mõlema simuleeritud variandi puhul on nõutud RH kogu perioodi vältel tagatud sobilikus vahemikus. Kõigi kolme variandi simuleeritud suhtelise niiskuse väärtused kestusgraafikul on samuti võrdlemisi sarnased ning on olemas varu temperatuuri kõikumisest tingitud RH muutusteks. Simuleeritud suhtelise niiskuse väärtused ei ületa ette nähtud alumist piirnormi, täheldada on minimaalset ülemise seadeväärtuse ületamist lühikese ajaperioodi vältel. Ülemise piirnormi ületamise kestus jääb alla 5% kogu ajast ning see toimub lühiajaliselt, mis kokkuvõttes on aksepteeritav tulemus.



Joonis 3.9 6...10°C, RH 30...45% hoidla temperatuur kestusgraafikul

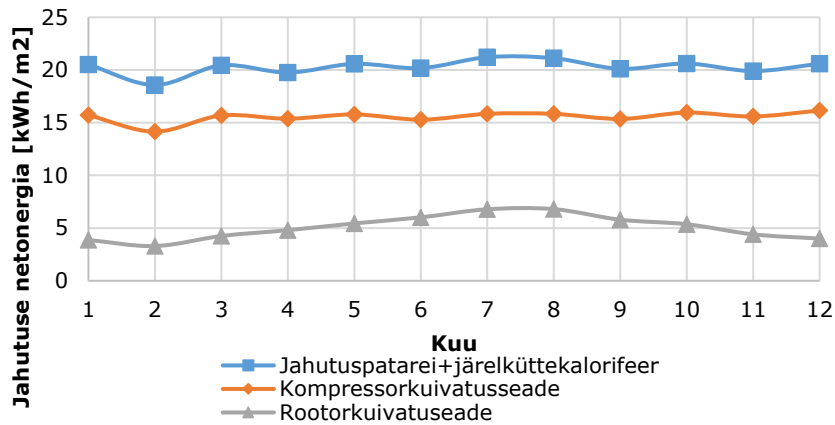
Joonisel 3.10 on kujutatud ruumiõhu kütmiseks tarvilik kütteenergia kuude lõikes. Vertikaalsel teljel on esitatud energia ning horisontaalsel teljel ajaline periood kuudes. Graafikult järeldub, et väljakondenseerumise põhimõttel toimivate kuivatusseadmetega konditsioneerimisskeemide kütte energiatarve on küllaltki sarnane kogu aasta lõikes. Aastane kütteenergia vajaduse erinevus jääb viie protsendi piirsesse kompressorkuivatusseadme kasuks. Simuleeritud rootorkuivatiga konditsioneerimisskeemil on kütte energiatarve märkimisväärselt väiksem, kuna antud skeemi puhul toimub kuivatamine teisel põhimõttel ning pole vajalik õhu järelkütmine pärast kuivatusprotsessi. Kõigi kolme variandi juhtimisloogika ülesehituse sarnasus väljendub kütteenergia kulu graafikute sarnases profiilis kogu aasta lõikes, mis on tingitud õhu temperatuuri tõstmise vajadusest pärast jahutuspatarei läbimist, et saavutada nõutud seadesuurus.



Joonis 3.10 6...10°C, RH 30...45% hoidla konditsioneerimisskeemide kütte netoenergia vajadus

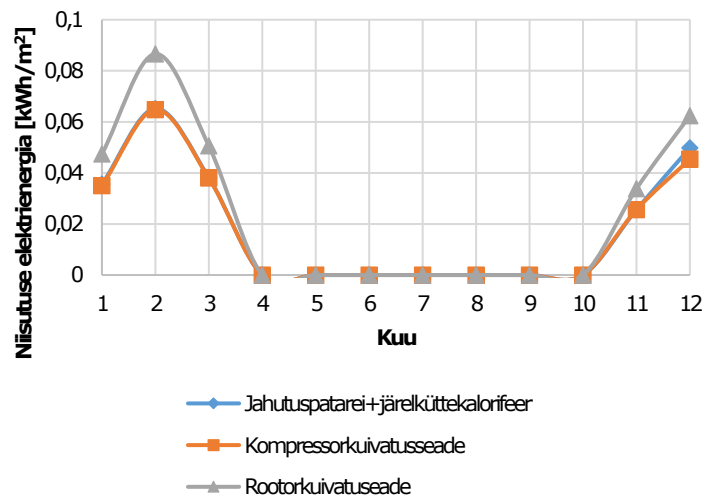
Joonisel 3.11 on kujutatud ruumiõhu jahutamiseks ning kuivatamiseks tarvilik energia kuude lõikes. Vertikaalsel teljel on esitatud jahutusenergia ning horisontaalsel teljel ajaline periood kuudes. Väljakondenseerumise põhimõttel toimivate konditsioneerimisskeemide jahutuseks vajalik energiatarve on kogu aasta lõikes suhteliselt sarnane. Jahutusenergia vajaduse maksimaalsed väärtused jäävad suvisesse perioodi, mil esineb kõige suurem kuivatusvajadus, mis tingib suurenenud jahutusenergia tarbe. Simuleeritud rootorkuivatusseadmel põhineva skeemi jahutusenergia vajadus on enam kui 50% väiksem kui esimesel kahel variandil. Kuid siiski kõigi kolme variandi jahutusenergia graafikud on sarnase profiiliga. Rootorkuivatusseadmega konditsioneerimissüsteemi mõne võrra suurem suvine jahutusenergia on põhjendatav suvise niiske õhu kuivatamisega, mil kuivatusrootori

regeneerimiseks on tarvis kõrgema temperatuuriga regeneratsiooniõhku, mis läbi suureneb järeljahutuse vajadus ning jahutusenergia kasv.



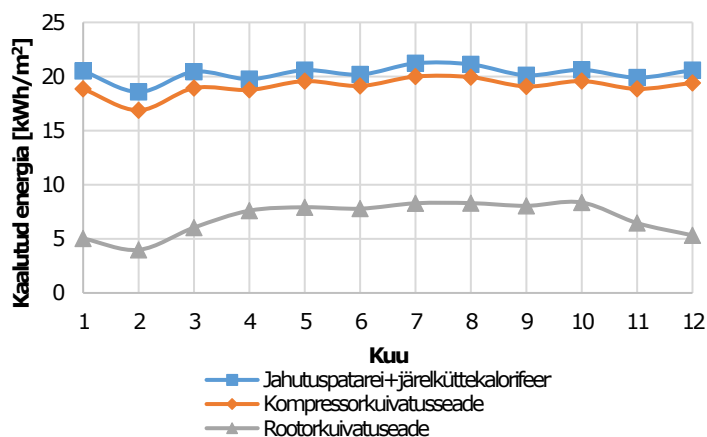
Joonis 3.11 6...10°C, RH 30...45% hoidla konditsioneerimisskeemide jahutuse netoenergia vajadus

Joonisel 3.12 on kujutatud ruumiõhu niisutamiseks tarvilik energia kuude lõikes. Vertikaalsel teljel on esitatud niisutusenergia ning horisontaalsel teljel ajaline periood kuudes. Graafikult on näha, et niisutusperioodi kestus, mis on viis kuud kogu aastast (va aprill - oktoober). Maksimaalne niisutuseks vajalik energiatarve kõigi skeemide puhul esineb perioodil, kui välisõhk on kõige kuivem ning esineb suurim niisutusvajadus. Vaadeldud süsteemide niisutusenergiatarve kuude lõikes on võrdlemisi sarnane. Kogu energiatarbest moodustab niisutusenergia kulu kõige väiksema osa.



Joonis 3.12 6...10°C, RH 30...45% hoidla konditsioneerimisskeemide niisutus elektrenergia vajadus

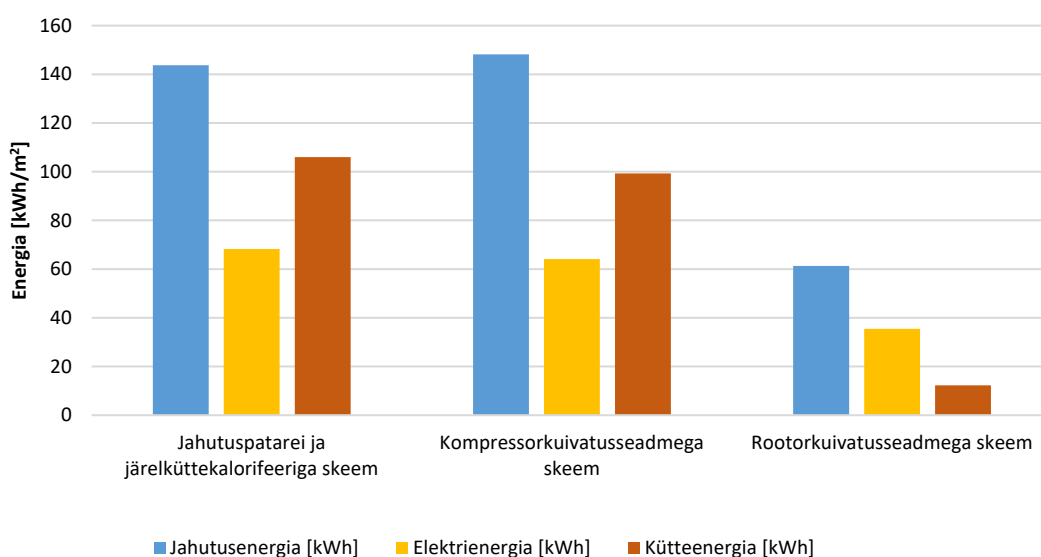
Joonisel 3.13 on esitatud simuleeritud süsteemide summaarne kaalutud energiatarve, mis on tuletatud kaalutud soojus- ja elektrienergia väärtuste summeerimisel. Tarnitud soojusenergia soojusallikana on arvestatud kaugkütet ning energiakasutuse kaalumistegurina on kasutatud väärtust 0,9. Soojusenergia komponent tuleneb kütteenergia kulust. Täiendavalt on arvesse võetud kütteprimaarsoojusallika kasutegur, milleks on vaikimisi simulatsioonitarkvaras arvestatud 0,9. Kaalutud elektrienergia teisendustel on kasutatud kaalumistegurit 2,0. Elektrienergia komponent tuleneb jahutus- ja niisutusenergiast ning ventilaatorite ja pumpade energiatarbest. Soojuspumba energiakulu määramisel on arvestatud COP=3,5. Summaarse energiatarbe poolest osutus kõige suurema energiatarbega variantiks jahutuspatarei ja järelkütte kalorifeeriga skeem. Kogu energiatarbe poolest teisele kohale jäi kompressorkuivatusseadet sisaldav skeem.



Joonis 3.13 6...10°C, RH 30...45% hoidla konditsioneerimisskeemide summaarne kaalutud energiatarve

Skeemide neto energiakulu jahutus-, kütte- ja elektrienergiale on esitatud joonisel 3.14. Kompressorkuivatusseadme summaarne energiatarve kogu aasta lõikes jäi suurusjärgus 10% madalamaks kui jahutuspatareil ja järelküttekalforifeeril põhinev variant. Kompressorkuivatusseadmega variandi madalamat energiatarvet on võimalik põhjendada soojuspumba kondensaatori jääsoojuse kasutamise järelkütteks ning sealt saadava energiasäästuga. Kõigist simuleeritud variantidest osutus kõige efektiivsemaks rootorkuivatusseadmega konfiguratsioon. Antud variandi summaarne energiatarve võrreldes jahutuspatarei ja järelküttekalforifeeri variandiga osutus ligi 65% väiksemaks. Väiksem energiatarve on põhjendatav väiksema jahutusvajadusega kogu aasta lõikes ning samuti on tarvilik vähem kütteenergiat, kuna antud seadme

konfiguratsioonis kulub õhu järeltöötlemisele pärast kuivatusprotsessi märkimisväärselt vähem energiat.

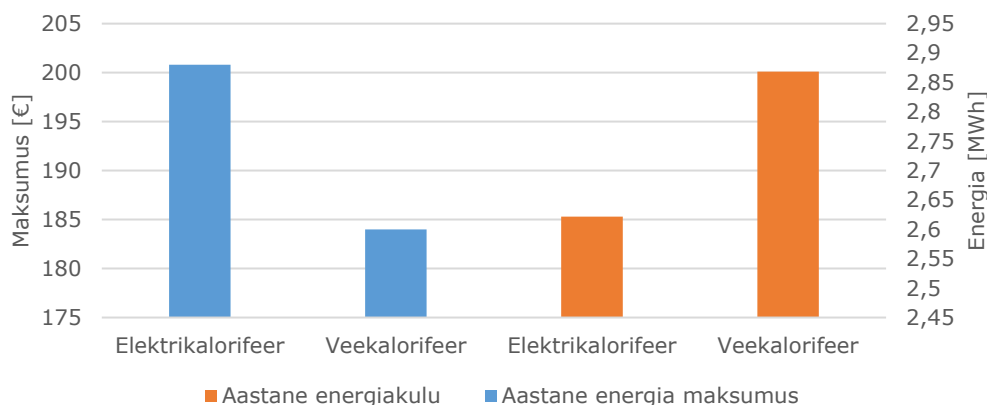


Joonis 3.14 6...10°C, RH 30...45% hoidla konditsioneerimisskeemide neto energiakulu jagunemine jahutus-, elektri-, ja kütteenergia lõikes

3.1.3 Regeneratsiooni kalorifeeri energiaallika võrdlus

Rootorkuivatusseadmetel on väga sageli regeneratsiooni kalorifeeri energiaallikana kasutusel elektrikalorifeer. Energiatõhususe seisukohast on elektrikalorifeeri kasutamine kulukas ning ebaefektiivne lahendus. Kaugkütte olemasolul hoidla hoonetes ja sobilike kaugkütte temperatuuride režiimide sobivusel on võimalik kasutada regeneratsioonikalorifeeri energiaallikana kaugkütet. Joonisel 3.15 on esitatud antud tüüphoidla baasilt tehtud võrdlus, millisesse suurusjärku jääb kulu kalorifeeri soojusenergiale nii elektrikalorifeeri korral kui ka vee baasil regeneratsiooni kalorifeerile. Lähtesuurusena on kasutatud simulatsioonist tulenevat regeneratsiooni vajalikku soojusenergia kulu 2,59 MWh/a. Kaugkütte kasuteguriks on arvestatud 0,9 ning elektrikalorifeerile 1,0. Energiahinnad on määratud Statistikaameti andmete baasilt [48]. Elektrienergia ühikhinnana on kasutatud 0,077 €/kWh ja soojusenergia ühikmaksumuseks on võetud 0,064 €/kWh. Graafikul on kujutatud regeneratsioonikalorifeeri aastast summaarset energiakulu nii elektri kui vee baasil kalorifeeri lahendusele. Lisaks kirjeldab graafik mõlema variandi aastast kulu. Joonisel 3.15 esitatud tulemustest järeldub, et elektrikalorifeeri puhul on energiatarve küll väiksem ca 10%, kuid tingituna elektrienergia kallimast hinnast, on lõppkulu veekalorifeeri lahendusest omakorda ligikaudu 10% võrra kallim. Võrdlustulemustest lähtuvalt tuleks eelistada vee baasil kalorifeeri kasutamist kuna nii saavutatakse madalamad ekpluatatsioonikulud. Täiendava plussina tagab veekalorifeer ka sujuvama

võimsuse reguleerimise kui elektrikalorifeer. Veekalorifeeri suurimaks miinuseks on kalorifeeri üledimensioneerimis vajadus, mis tuleneb kaugkütte madalast murdepunkti temperatuurist. Kalorifeeri suure üledimensioneerimise tõttu on veebaasil rootorkuivati hind oluliselt kallim võrreldes elektrikalorifeeri variandiga.



Joonis 3.15 Regeneratsioonikalorifeeri energiaallika võrdlus

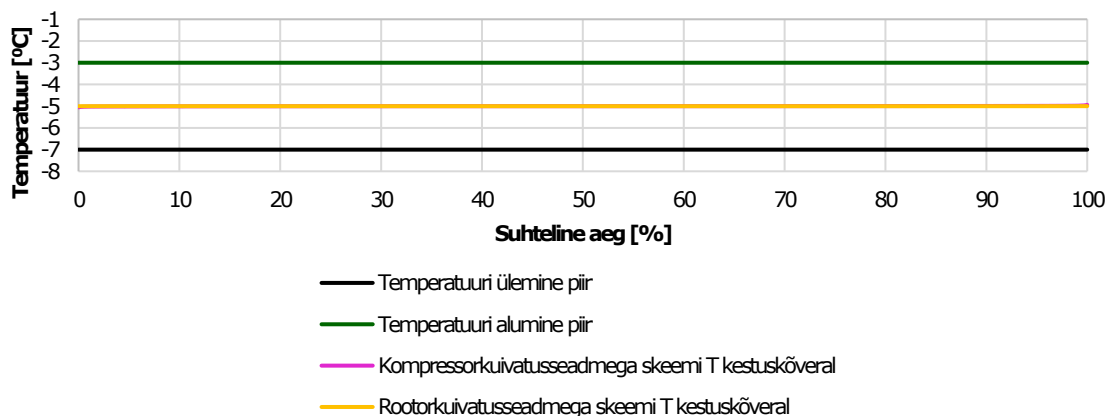
3.1.4 Tüüp 3

-3...-7°C; RH30...40% hoidlate süsteemide tehniliste lahenduste toimivuse ja esmase energiatõhususe hindamiseks teostati aasta pikkused dünaamilised energiasimulatsioonid 2 süsteemi variandiga. Esimeseks variandiks valiti kompressorkuivatusseadmel põhinev konfiguratsioon. Teise variandina teostati simulatsioon rootorkuivatusseadet sisaldava konditsioneerimiseseadme skeemiga.

Simulatsioonidega selgitati mõlema skeemi toimivust temperatuuri ja suhtelise niiskuse tagamise osas. Energiatõhususe seisukohast vaadeldi küttele ja jahutusele kuluvat energiat. Täiendavalt võeti arvesse energiakulu nii elektri- kui ka soojusenergiale ning samuti vaadeldi summaarset energiatarvet. Energiatarbe väärtused on taandatud hoidla põrandapinna ruutmeetritele

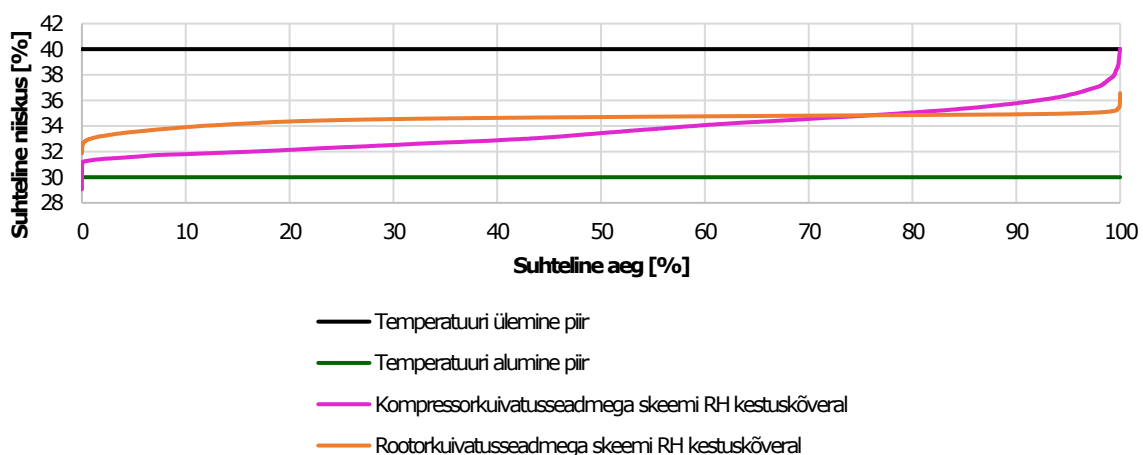
Simuleeritud temperatuuri ja suhtelise niiskuse väärtused on esitatud kestusgraafikute kujul. Täiendavalt on graafikutele märgitud vastava suuruse ääretingimused. Süsteemide võrdlemiseks esitatakse küttele ja jahutuse netoenergiatarvet ning kaalutud summaarne energiakasutus. Tulemused on esitatud aasta pikkuse perioodi kohta kuude lõikes. Joonisel 3.16 on kujutatud ruumiõhu temperatuurid kestuskõveral tüüphoidlas. Vertikaalsel teljel on ruumiõhu temperatuur ning horisontaalsel teljel suhteline aeg arvestades aasta pikkust perioodi. Jooniselt on võimalik järeldada, et mõlema simuleeritud variandi puhul on nõutud temperatuur kogu perioodi vältel tagatud. Samuti

nähtub jooniselt, et sisuliselt kestuskõverad kattuvad ning mõlema variandi puhul on olemas piisav varu temperatuuri kõikumisteks.



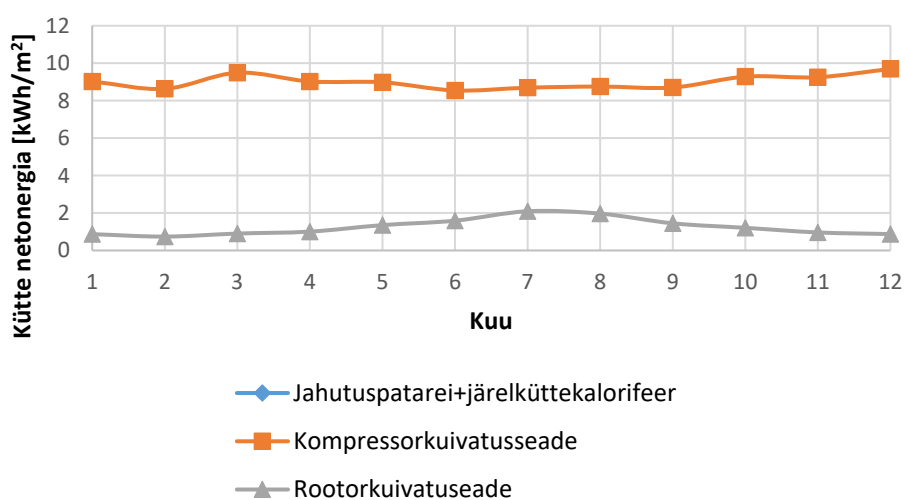
Joonis 3.16 -3...-7°C, RH 30...40% hoidla temperatuur kestusgraafikul

Joonisel 3.17 on kujutatud ruumiõhu suhteline niiskus kestuskõveral tüüphoidlas. Vertikaalsel teljel on esitatud ruumiõhu suhteline niiskus ning horisontaalsel teljel on kuvatud suhteline aeg arvestades aasta pikkust perioodi. Tulemustest järeldub, et mõlema variandi puhul on nõutud RH kogu perioodi vältel tagatud sobilikus vahemikus. Graafikult järeldub, et rootorkuivatusseadmega on tagatud mõnevõrra ühtlasem suhteline niiskus kui kompressorkuivatusseadmega konditsioneerimisskeemi puhul. Simuleeritud suhtelise niiskuse väärtustest on võimalik järeldada, et on olemas piisav varu temperatuuri muutusest tingitud suhtelise niiskuse muutusele. Mõlema variandi puhul esineb minimaalsel määral alumise ja ülemise suhtelise niiskuse normi ületamist. Lubatud vahemiku ületamise ajaline kestus jääb mõlemal juhul alla 5% ning on lühiajaline, mistõttu on asjaolu aksepteeritav.



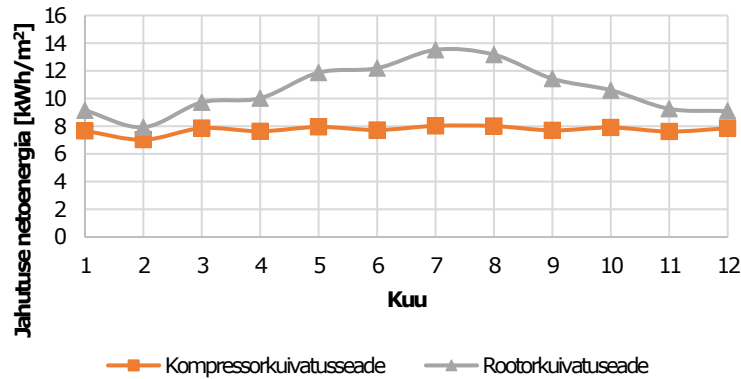
Joonis 3.17 -3...-7°C, RH 30...40% hoidla temperatuur kestusgraafikul

Joonisel 3.18 on kujutatud ruumiõhu kütmiseks tarvilik kütte netoenergia kuude lõikes. Vertikaalsel teljel on esitatud kütte netoenergia ning horisontaalsel teljel ajaline periood kuudes. Simuleeritud süsteemi variantide kütte energiakulu võrdlusest selgub, et süsteemide kütte netoenergiavajadus erineb mitmekordselt. Kompressorkuivatusseadmega konditsioneerimisskeemi suur kütteenenergia vajadus on selgitatav peamiselt õhu järelkütte ning mõningal määral ka soojuspumba aurusti jäätumise tõttu lisakütteenenergia vajaduse suurenemisega. Rootorkuivatusseadet sisaldava konditsioneerimisskeemi puhul on kütteenenergia tarvilik rootorkuivati regeneratsioonikalorifeeri funktsioneerimiseks.



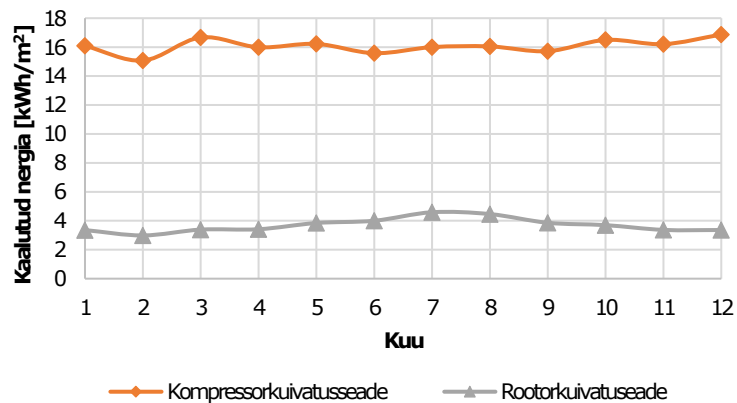
Joonis 3.18 -3...-7°C, RH 30...40% hoidla konditsioneerimisskeemide kütte netoenergia vajadus

Joonisel 3.19 on kujutatud ruumiõhu jahutamiseks tarvilik netoenergia kuude lõikes. Vertikaalsel teljel on esitatud jahutuse netoenergia ning horisontaalsel teljel ajaline periood kuudes. Tingituna hoidlale seatud temperatuuri vahemikust on jahutamine tarvilik aastaringiselt. Kompressorkuivatusseadme puhul toimub seadme aurustis ka õhu kuivatamine, mille tõttu jahutuse energiatarve suureneb. Rootorkuivatusseadmega konditsioneerimisskeemil on jahutamine tarvilik soovitud ruumiõhu seadesuuruse hoidmiseks, kuna pärast rootorkuivati läbimist on protsessiõhk üldjuhul kõrgema temperatuuriga kui vajalik. Mõlema süsteemi konfiguratsiooni jahutuse netoenergia maksimaalsed väärtused jäävad suvisesse perioodi (juuni-september), mis on tingitud vastava perioodi kõrgemast välisõhu niiskussisaldusest ning temperatuurist.



Joonis 3.19 -3...-7°C, RH 30...40% hoidla konditsioneerimisskeemide jahutuse netoenergia

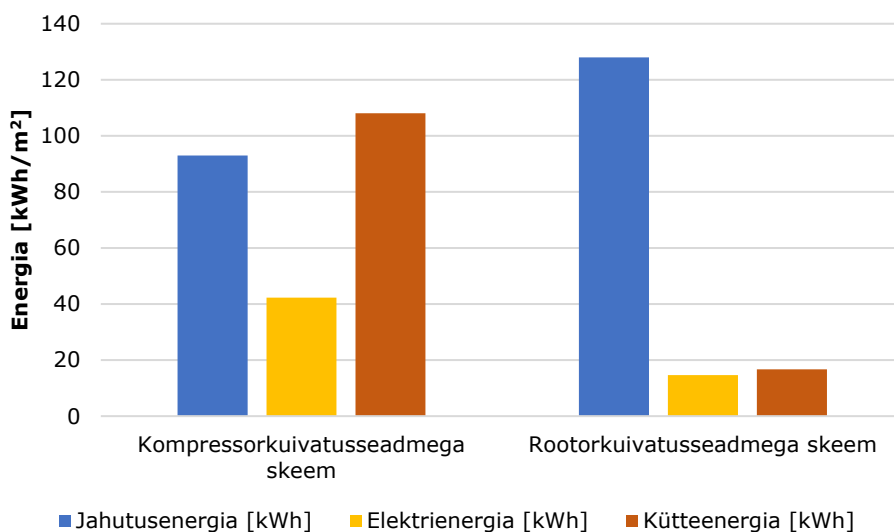
Joonisel 3.20 on esitatud simuleeritud süsteemide summaarne kaalutud energiatarve, mis on saadud kaalutud soojus- ja elektrienergia väärtuste summeerimisel. Tarnitud soojusenergia soojusallikana on arvestatud kaugküte ning energiakasutuse kaalumisteguriks on määratud 0,9. Soojusenergia komponent tuleneb kütte netoenergia kulist, täiendavalt on arvesse võetud kütte primaarsoojusallika kasutegur, milleks on vaikumisi simulatsioonitarkvaras arvestatud 0,9. Kaalutud elektrienergia teisendustel on kasutatud kaalumistegurit 2,0. Soojuspumba energiakulu määramisel on arvestatud COP=3,5. Elektrienergia komponent tuleneb jahutusenergiast ning ventilaatorite ja pumpade energiatarbest.



Joonis 3.20 -3...-7°C, RH 30...40% hoidla konditsioneerimisskeemide summaarne kaalutud energiatarve

Joonis 3.21 on esitatud skeemide netoenergia kulu jahutus-, kütte- ja elektrienergiale. Summaarse energiatarbe poolest vaadeldud skeemid erinevad suurusjärgus 30%. Energiatarbe erinevuse põhjused tulenevad eelkõige tarnitud soojusenergia suurest erinevusest. Kompressorkuivatusseadme suurem soojusenergia kulu võrreldes rootorkuivatusseadmega on selgitatav õhujärelkütte vajaduse ning aurusti sulatamiseks

tarviliku lisaenergia tarbimisega. Summaarne elektritarve on rootorkuivatusseadmel ligikaudu 2 korda suurem, mis tuleneb peamiselt suurest jahutusenergia vajadusest.



Joonis 3.21 -3...-7°C, RH 30...40% hoidla konditsioneerimisskeemide neto energiakulu jagunemine jahutus-, elektri- ja kütteenergia lõikes

3.2 SIMULATSIOONID EESTI RAHVUSRAAMATUKOGU HOIDLATE BAASIL

Käesolevas peatükis esitletakse hoidlate energiatõhususe optimeerimise seisukohast vaadeldud variante ja läbiviidud simulatsioonide tulemusi. Hindamaks hoidlate energiakasutust reaalse hoone kontekstis, on simulatsioonid teostatud kasutades alusena Eesti Rahvusraamatukogu hoone osamudeleid. Mudelite koostamise ülesehitus on esitatud käesoleva töö ptk 2.1. Antud tööga piirduti kolme komponendi optimeerimisega. Optimeerimise seisukohast teostati simulatsioone erinevate välisõhu seadesuurustega, et hinnata, millises vahekorras võiks olla välisõhu kasutamine ning kuidas muutub summaarne kaalutud energiakasutus. Hoidlate õhupidavuse seisukohast teostati simulatsioone erinevate õhulekkearvu väärtustega. Erinevate õhulekke väärtustega simulatsioonide eesmärgiks oli hinnata, millisel määral mõjutab õhupidavus hoidla summaarset energiakasutust. Hoidla piirdetarindite alasel teostati simulatsioone erinevate piirdetarindite soojuslähivuse väärtustega, et hinnata piirdetarindite mõju eritüüpi hoidlate energiatarbes. Täiendavalt vaadeldi õhukanalite soojuskadude mõju temperatuuri ja suhtelise niiskuse tagamise täpsusele.

Simulatsioonide mahu vähendamiseks teostati optimeerimisalased simulatsioonid ptk 3.1 tüüpmodelite kõige energiatõhusamaks osutunud konditsioneerimisskeemide konfiguratsioonidega. Simulatsioonid teostati järgmiste konfiguratsioonidega:

- Kompressorkuivatusseadmega konditsioneerimissüsteem temperatuuri +15...21°C ning RH 40...55% tagamiseks
- Rootorkuivatusseadmega konditsioneerimissüsteem temperatuuri +6...10 °C ning RH 30...45% tagamiseks
- Rootorkuivatusseadmega konditsioneerimissüsteemi temperatuuri -3...-7 °C ning RH 30...45% tagamiseks.

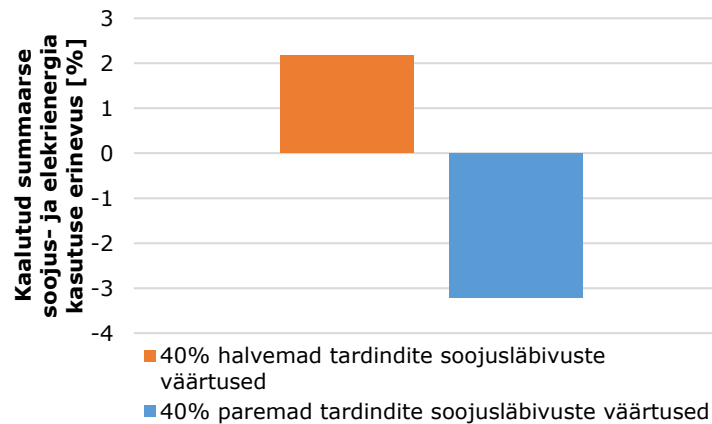
3.2.1 Piirdekonstruktsioonide soojuslähivus

Erinevate soojuslähivuse väärtusega piirdetarindite mõju hindamiseks teostati simulatsioone kolme soojuslähivuse väärtuse grupiga. Simuleeritud mudelites muudeti ainult piirdetarindite soojuslähivuse väärtusi ning tulemusena vaadeldi energiakasutuse muutust. Baassoojuslähivuse väärtusena kasutati tabelis 2.1 esitatud väärtuseid. Soojuslähivuse väärtuste muutmise mõju hindamiseks on koostatud baaslahendusest 40% suuremad ning 40% väiksema U väärtusega piirdetarindite kombinatsioonid. Arendatud piirdetarindite soojuslähivused on esitatud tabelis 3.1. Lähiviidud simulatsioonide tulemused on esitatud võrdluses baaslahenduse kaalutud summaarse energiakasutusega. Simulatsioonide tulemused on koondatud kaalutud summaarseks soojus- ja elektrienergia kasutuseks ning piirdetarindite tervikmõju on kirjeldatud kaalutud summaarse soojus- ja elektrienergia protsentuaalse erinevusena võrreldes baaslahendusega.

Tabel 3.1 Piirdekonstruktsioonide võrdlussimulatsioonides kasutatud soojuslähivus väärtused

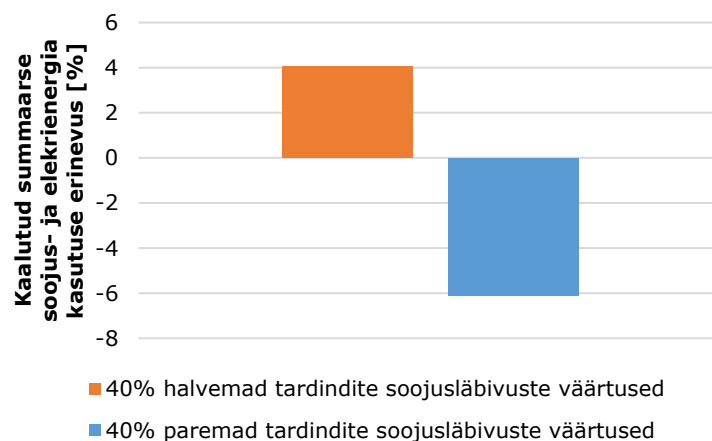
Piirdetarindi tüüp	40% madalam U väärtus [W/m ² K]	U väärtus [W/m ² K]	40% kõrgem U väärtus [W/m ² K]
Välissein	≤ 0,13	≤ 0,22	≤ 0,31
Jaehoidla sein	≤ 0,14	≤ 0,24	≤ 0,34
Külmhoidla sein	≤ 0,13	≤ 0,22	≤ 0,31
Sisesein	0,5... 0,9	0,8... 1,5	1,12...2,1
Põrand pinnasel	≤ 0,12	≤ 0,20	≤ 0,28
Põrand välisõhukohal	≤ 0,54	≤ 0,90	≤ 1,26
Jahe- ja külmhoidla vahelagi	≤ 0,11	≤ 0,18	≤ 0,25
Aken	≤ 0,8	≤ 0,8	≤ 0,8

Joonisel 3.22 on kujutatud madalamate ja kõrgemate soojuslähivuse väärtustega piirdetarindite kasutamise mõju energiatarbele. Lähiviidud simulatsioonide tulemustest järeldus, et antud hoidlatüübil põhjustab 40% piirdetarindi soojuslähivuse muutmine vaid paari-kolme protsendilist kaalutud energiakasutuse erinevust. Antud hoidlatüübi puhul on summaarse energiakasutuse muutuste peamiseks põhjuseks erinevate piirdetarindite soojuslähivusest tingitud erinev kütteenergia vajadus.



Joonis 3.22 15...21°C, RH 40...55% tüüpi hoidla piirdetarindite soojuslähivuste muutumise mõju energiatarbele

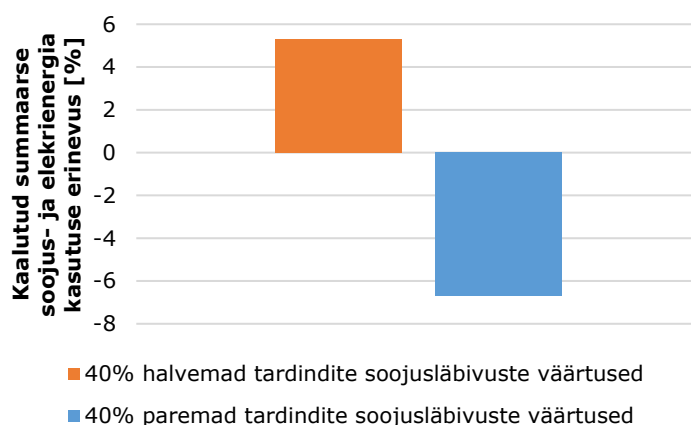
Joonisel 3.23 on esitatud erinevate piirdetarindite soojuslähivuse väärtustega simulatsioonitulemuste tuletatud summaarne kaalutud energiakasutuse erinevus. Antud hoidlatüübi simulatsiooni tulemustest järeldus, et läbi 40% piirdetarindite soojuslähivuste parendamise on võimalik summaarset kaalutud energiakasutust vähendada suurusjärgus 6%. Energiakasutuse vähenemine tuleneb peamiselt soojusenergia vajaduse vähenemisest, kuna paremate soojuslähivustega piirdetarindite mõjutusena on tarvilik väiksemal määral kütteenergiat. Piirdekonstruktsioonide soojustehniliste omaduste 40% halvendamise mõjuks on vastavalt läbi viidud simulatsiooni tulemustele suurenemine. Energiakasutuse suurenemise põhjusena on võimalik välja tuua nii kütte- kui ka jahutusenergia vajaduse suurenemine.



Joonis 3.23 6...10°C, RH 30...45% tüüpi hoidla piirdetarindite soojuslähivuste muutumise mõju energiatarbele

Joonisel 3.24 on välja toodud -3...-7°C, RH 30...40% hoidlatüübi piirdetarindite kombinatsioonide mõju kaalutud energiakasutusele. Joonisel esitatud simulatsiooni tulemustest järeldub, et enam mõjutab kaalutud energiakasutust 40% paremate soojuslähivuse näitajatega piirdetarindite kasutamine. Võrreldes baaslahendusega on

võimalik paremate soojustehniliste omadustega piirdetarinditega energiakasutuselt kokku hoida ligikaudu 7%. Baaslahendusest kehvemate piirdekonstruktsioonide kombinatsiooniga suureneb kogu energiakasutus ligikaudu 5%. Mõlema variandi puhul on summaarse energiakasutuse muutuste põhjuseks kasutatud jahutusenergia vähenemine või suurenemine tingituna piirdetarindite soojuslähivuslike omaduste muutustest.



Joonis 3.24 -3...-7°C, RH 30...40% tüüpi hoidla piirdetarindite soojuslähivuste muutumise mõju energiatarbele

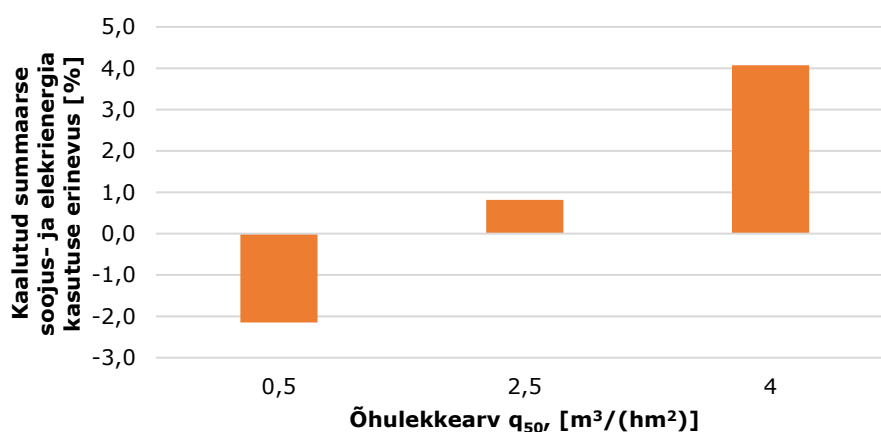
Kõigi kolme eelnevalt kirjeldatud hoidlatüübi piirdekonstruktsiooni kombinatsioonidega teostatud simulatsioonide tulemused sarnanesid suurel määral. Madalamate piirdekonstruktsioonide soojuslähivuse väärtustega saavutati vahemikus 4-7% summaarse energiakasutuse vähenemine. Peamiselt tulenes paremate soojuslähivustega piirdetarinditest tulenev energiakasutuse vähenemine soojusenergia vajaduse vähenemisest ning vähesel määral ka elektrienergia vajaduse vähenemisest. Võrreldavast baaslahendusest halvemate soojuslähivuse näitajatega saavutati keskmiselt 2-4% suurem summaarne energiakasutus. Energiakasutus suurenes peamiselt soojusenergia vajaduse kasvust. Simulatsiooni tulemustest tuleneb, et väiksemate soojuslähivustega piirdetarindite kasutamine mõjutab enam madalatemperatuuriliste hoidlate energiakasutust.

3.2.2 Infiltratsioon

Piirdekonstruktsioonide õhupidavuse mõju hindamiseks energiakasutusele teostati simulatsioone nelja erineva õhulekkearvu väärtusega. Läbi simuleeriti simulatsioonimudelid, kus õhulekkearvu väärtuseks oli määratud 0,5, 1,5, 2,5 ja 4 m³/(hm²). Simuleeritud mudelites muudeti ainult infiltratsiooni väärtust ning tulemusena vaadeldi energiakasutuse muutust. Baas õhulekkearvu väärtusena kasutati suurust 1,5 m³/(hm²), mille suhtes ülejäänud variante võrreldi. Läbiviidud simulatsioonide tulemused on esitatud võrdluses baaslahenduse kaalutud summaarse

energiakasutusena. Simulatsioonide tulemused on koondatud kaalutud summaarseks soojus- ja elektrienergia kasutuseks ning infiltratsioonist tulenev energiakasutuse tervikmõju on kirjeldatud kaalutud summaarse soojus- ja elektrienergia protsentuaalse erinevusena võrreldes baaslahendusega.

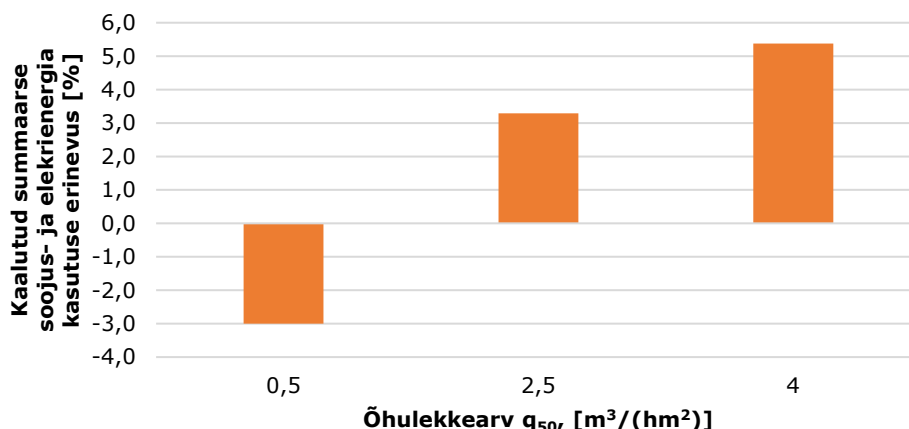
Joonisel 3.25 on esitatud 15...21°C, RH 40...55% hoidlatüübi õhulekkearvu muutmisest tingitud energiakasutuse erinevused võrreldes baasvariandiga. Läbiviidud simulatsioonidest järeldus, et õhulekke arvuga 0,5 m³/(hm²) on võimalik saavutada ligikaudu 2% energiakasutuse vähenemist. Energiakasutuse vähenemine tuleneb peamiselt kütteks kuluva soojusenergia vähenemisest. Väiksemat mõju energiakasutuse vähenemisel avaldab niisutuseks kuluva elektrienergia vajaduse vähenemine. Baaslahendusest suurema õhulekkearvuga 2,5 ja 4 m³/(hm²) variantide puhul energiakasutus suurenes ligikaudu 1 ja 4%. Energiakasutuse suurenemine on tingitud suurenenud kütteenergia vajadusest ning väiksemal määral suurendab energiakasutust suurenenud niisutusvajadus.



Joonis 3.25 15...21°C, RH 40...55% tüüpi hoidla õhupidavuse muutumise mõju energiatarbele

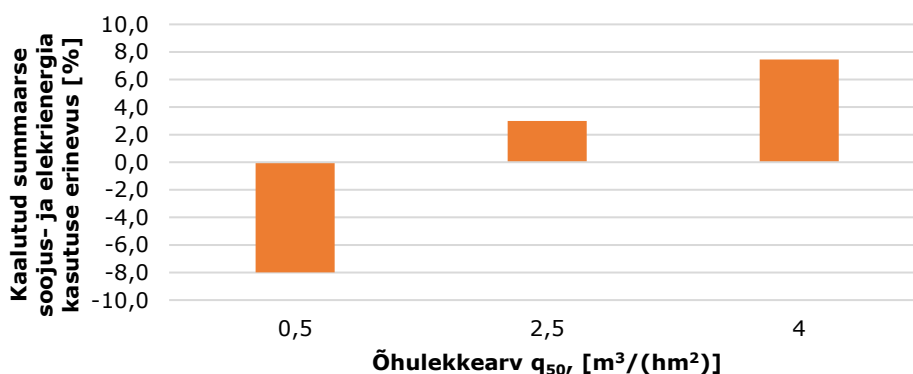
Joonisel 3.26 on presenteeritud 6...10°C, RH 30...45% hoidlatüübi õhulekkearvu muutmisest tulenev mõju kaalutud summaarse energiakasutuse erinevusele. Võrdluslahendusest suuremate õhulekke väärtustega saavutati ligikaudu 3-5% summaarse energiakasutuse suurenemist. Suurema infiltratsiooni õhuvooluhulga korral on õhuvahetus väliskeskkonnaga suurem võrreldes baaslahendusega, mille tulemusena kasvab niisutuseks tarbitav elektrienergia kui ka ruumiõhu soojendamiseks tarvilik soojusenergia. Õhulekkearvu väärtusega 0,5 m³/(hm²) saavutati ligikaudu 3% väiksem summaarne energiakasutus võrdluses baaslahendusega. Väiksem energiakasutus

tuleneb madalast õhuvahetusest väliskeskkonnaga ning sellest tulenevast madalamast soojusenergia vajadusest.



Joonis 3.26 6...10°C, RH 30...45% tüüpi hoidla õhupidavuse muutumise mõju energiatarbele

Joonisel 3.27 on välja toodud -3...-7°C, RH 30...40% hoidlatüübi õhulekkearvust tingitud summaarse energiakasutuse erinevus võrdluses baaslahendusega. Tulemustest järeldub, et antud hoidlatüübi puhul on madalama õhulekkearvu kasutamist tulenev energiakasutuse vähenemine kõige suurem. Vastav kokkuhoid võrreldes baaslahendusega on ligikaudu 8%. Energiakasutuse vähenemine tuleneb jahutusenergia vähenemisest, mis omakorda tingib väiksema elektrienergia kasutuse. Suurema õhulekkearvuga läbi viidud simulatsioonidest tulenes, et energiakasutus suureneb suurusjärgus 3-8%. Energiakasutuse muutuse põhjus on vastupidine madalama õhulekkearvuga saavutatud tulemusele. Nimelt energiakasutus suureneb jahutusenergia vajaduse suurenemise tõttu, mis tingib elektrienergia vajaduse suurenemise.



Joonis 3.27 -3...-7°C, RH 30...40% tüüpi hoidla õhupidavuse muutumise mõju energiatarbele

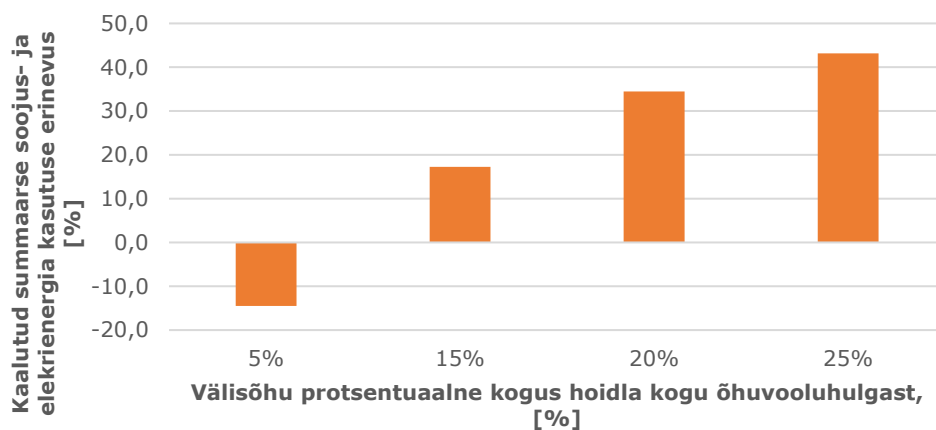
Eelnevalt kirjeldatud hoidlatüübi õhulekkearvu kombinatsioonidega teostatud simulatsioonide tulemused sarnasesid võrdlemisi suurel määral. Igati loogiliselt

saavutati madalamate õhulekkearvu väärtustega energiakasutuse vähenemine, mis jäi suurusjärku 2-8%. Tulemustest järeldus, et mida madalamaid temperatuuri vahemike hoidlas tagatakse, seda suurem on energiakasutuse vähenemine kui on kasutusel madalad õhulekkearvu väärtused. Baaslahendusest suuremate õhulekkearvude kasutamisest tulenev energiakasutuse suurenemine jäi vahemikku 4-8%. Suuremate õhulekkearvu väärtuste kasutamine on eelkõige õigustatud tavatemperatuuriliste hoidlate korral.

3.2.3 Välisõhu kogus

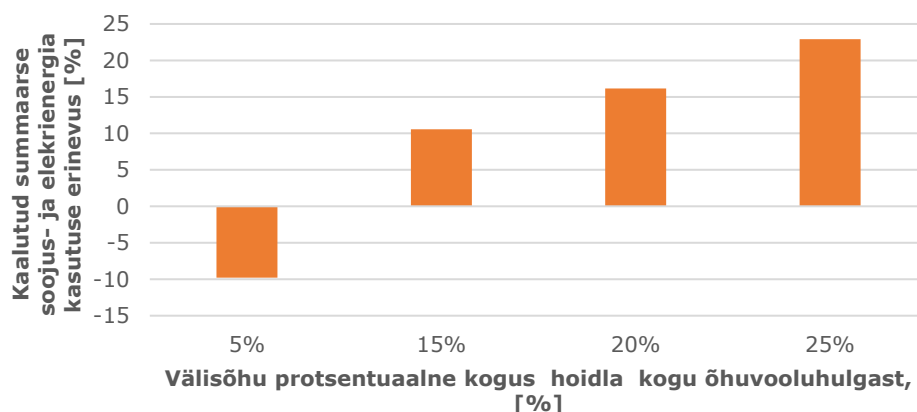
Konditsioneerimisskeemides kasutatava välisõhu kogusest tuleneva energiakasutuse muutuste hindamiseks teostati simulatsioone viie erineva välisõhukoguse väärtusega. Läbi simuleeriti simulatsioonimudelid, kus välisõhukoguseks kogu õhuvooluhulgast oli defineeritud vahemik 5% -25% ning muutuse sammuks 5%. Simuleeritud mudelites muudeti ainult välisõhu kogust ning tulemusena vaadeldi energiakasutuse muutust. Baas värske õhu väärtusena kasutati väärtust 10%, mille suhtes ülejäänud variante võrreldi. Läbiviidud simulatsioonide tulemused on esitatud võrdluses baaslahenduse kaalutud summaarse energiakasutusena. Simulatsioonide tulemused on koondatud kaalutud summaarseks soojus- ja elektrienergia kasutuseks ning infiltratsioonist tulenev energiakasutuse tervikmõju on kirjeldatud kaalutud summaarse soojus- ja elektrienergia protsentuaalse erinevusena võrreldes baaslahendusega.

Joonisel 3.28 on esitatud 15...21°C, RH 40...55% hoidlatüübi erinevast välisõhu kogusest tingitud energiatarbe erinevused võrreldes baasmodeliga. Tulemustest järeldub, et mida väiksem on välisõhu protsentuaalne kogus, seda enam muutub summaarne energiakasutus. Välisõhu koguse muutmine 5% väiksemaks võrreldes baasvariandiga aitab kogu energiakasutust vähendada suurusjärgus 15%. Seevastu nähtub tulemustest asjaolu, et välisõhu koguse suurendamine 15% muudab kogu energiakasutust märkimisväärselt kõrgemaks. Väiksemast välisõhu kogusest tingitud energiatarbe vähenemine tuleneb suurel määral niisutusvajaduse vähenemisest, mis läbi väheneb niisutuseks tarvilik elektrienergia tarbimine. Vähemal määral on kogu energiatarbe vähenemine tingitud soojusenergia vajaduse vähenemisest, mille tingib väiksem kütte vajadus. Välisõhu koguse suurendamisest tulenev energiakasutuse kasv on eelkõige seotud niisutuseks kuluva elektrienergia suurenemisega. Vähemal määral avaldab mõju soojusenergia vajaduse kasv.



Joonis 3.28 15...21°C, RH 40...55% tüüpi hoidla välisõhu koguse muutumise mõju energiatarbele

Joonisel 3.29 on presenteeritud 6...10°C, RH 30...45% hoidlatüübi välisõhu koguse muutmisest tingitud energiatarbe erinevused võrreldes baasmudeliga. Võrdluses 15...21°C, RH 40...55% tüüpi hoidlaga on saadud tulemused küllaltki sarnased. Peamine erinevus seisneb mõnevõrra teises suurusjärgus kogu energiakasutuse erinevustes. Ligikaudu 10% energiakasutuse vähenemist on võimalik saavutada 5% välisõhu koguse alandamisega. Peamiselt on energiakasutuse vähenemise põhjuseks niisutuseks tarviliku elektrienergia vähenemine, kuid minimaalsel määral omab mõju ka jahutusenergia vähenemine. Vahemikus 10-25% energiakasutuse suurenemisest on põhjustatud välisõhu koguse suurendamine 5-15%. Neil juhtudel tuleneb energiakasutuse kasv suurenenud elektrienergia vajadusest, mida tingib niisutus- ja jahutusenergia muutumine. Minimaalsel määral omab mõju ka suurenenud soojusenergia vajaduse kasv.



Joonis 3.29 6...10°C, RH 30...45% tüüpi hoidla välisõhu koguse muutumise mõju energiatarbele

Mõlema läbi simuleeritud hoidlatüübi puhul saadud tulemustest järeldub, et madalama energiakasutuse saavutamiseks on tarvilik õhuvahetus väliskeskkonnaga hoida

võimalikult väiksel tasemel. Täiendavalt selgub simulatsiooni tulemustest, et juba 5% välisõhu koguse muutmist kutsub esile summaarse energiakasutuse muutusi vahemikus 10-15%. Simulatsioonide tulemustest ilmnes, et peamiselt suurendas energiatarvet suurenenud niisutusvajadus, millest tulenevalt kasvab elektrienergia tarbimine. Vähemal määral omab mõju ka välisõhu kogusest tingitud soojusenergia vajaduse muutumine.

3.2.4 Õhukanalite soojuskadude mõju temperatuuri ja suhtelise niiskuse tagamisele

Reaalsete konditsioneerimissüsteemide korral on enamasti sissepuhke- ja väljatõmbetorustikud erinevate pikkustega. Erinevatest süsteemiosade pikkusest tulenevad erinevad soojuskadod ning temperatuuri muutused süsteemi eri osade vahel. Õhukanalid kulgevad sageli ka erinevates temperatuurilistes tingimustes, mis on ka põhjuseks soojuskadudele. Hoidlate puhul toimub konditsioneerimine rangelt piiritletud temperatuuri ja suhtelise niiskuse vahemikes, mille pärast on torustike soojuskadude tõttu toimuva temperatuuri muutustega arvestamine oluline aspekt. Käesolevas töös on antud probleemi mõju hindamiseks teostatud käsitsi torustiku soojuskadude arvutus ning simulatsioonimudelites muudetud vastavate tsoonide sissepuhke ja väljatõmbe temperatuure. 6...10°C, RH 30...45% hoidla puhul vaadeldi soojuskadude mõju kolme arvutustsooni lõikes ning -3...-7°C, RH 30...40% hoidla puhul kolme arvutustsooni ulatuses. Temperatuuri muutused kestusgraafikutel on esitatud mõlema hoidla kõige kriitilisemaks osutunud juhtumite kohta ning täiendavalt on esitatud kõikide vaadeldud tsoonide temperatuuri tagamine soojuskadudega arvestava juhu korral ja korrigeeritud juhtimisega lahendusel.

Õhukanalite soojuskadudest tingitud temperatuuri muutuste arvutamisel on tehtud lihtsustus ning soojuskadod on arvutatud lähtuvalt statsionaarsest olukorrast. Temperatuuri muutuste arvutused on teostatud veebikalkulaatori [49] baasil. Kriitilisemate juhtumite alg- ja lõpptemperatuur, arvestatud torustiku pikkus ja temperatuuri muutus on kajastatud tabelis 3.2. Süsteemi torustike pikkuse määramisel on suures osas Eesti Rahvusraamatukogu vastavate süsteemiosade ligikaudsed pikkused. Täiendavalt on arvestatud tingimustega:

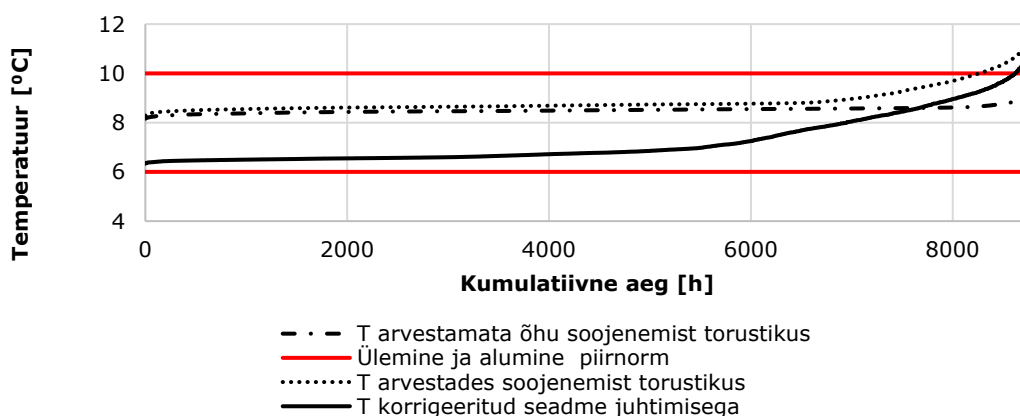
- soojusisolatsiooni paksus 50mm 6...10°C, RH 30...45% hoidlate korral
- soojusisolatsiooni paksus 80mm -3...-7°C, RH 30...40% hoidlate korral
- soojusisolatsiooni soojuserijuhtivus $\lambda=0,030$ W/mK
- torustikuna on arvestatud ümarristlõikega torudega läbimõõdus 160mm – 500mm

- torustik paikneb keskkonnas $T=21^{\circ}\text{C}$, $\text{RH}=50\%$

Tabel 3.2 Kriitilisema tsooni sissepuhke ja väljatõmbe torustike temperatuuri muutused

6...10°C, RH 30...45% hoidla süsteemi osade temperatuuri muutused					
Arvutustsoon 1					
Süsteem	Sissepuhe	Ühik	Süsteem	Väljatõmme	Ühik
Torustiku pikkus	70	m	Torustiku pikkus	50	m
Alg temperatuur	7,5	°C	Alg temperatuur	7,5	°C
Lõpp temperatuur	10,1	°C	Lõpp temperatuur	9,4	°C
Muutus	2,6	°C	Muutus	1,9	°C
-3...-7°C, RH 30...40% hoidla süsteemi osade temperatuuri muutused					
Arvutustsoon 1					
Süsteem	Sissepuhe	Ühik	Süsteem	Väljatõmme	Ühik
Torustiku pikkus	30	m	Torustiku pikkus	27	m
Alg temperatuur	-8	°C	Alg temperatuur	-8	°C
Lõpp temperatuur	-7,0	°C	Lõpp temperatuur	-7,1	°C
Muutus	1,0	°C	Muutus	1,1	°C

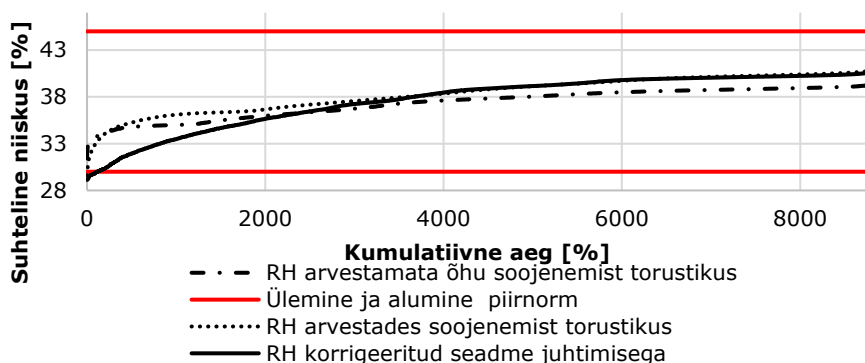
Joonisel 3.30 on kirjeldatud 6...10°C, RH 30...45% arvutustsoon 1 temperatuuri dünaamika tingituna õhu soojenemisest süsteemi torustikes. Jooniselt järeldeb, et arvestamine torustikus toimuva temperatuuri tõusuga tingib olukorra, kus ülemist temperatuuri piirväärtust ületatakse ligikaudu 9% ajast. Ülemise piirväärtuse liigne ületamine tingib vajaduse temperatuuri juhtimise muutmiseks. Korrigeeritud temperatuuri juhtimisega vaadeldud variandi puhul saavutati temperatuuri tagamine 95% ajast, mis on aksepteeritav tulemus.



Joonis 3.30 6...10°C, RH 30...45% arvutustsoon 1 konditsioneerimissüsteemi õhukanalite soojuskadudest tulenev mõju temperatuuri tagamisele

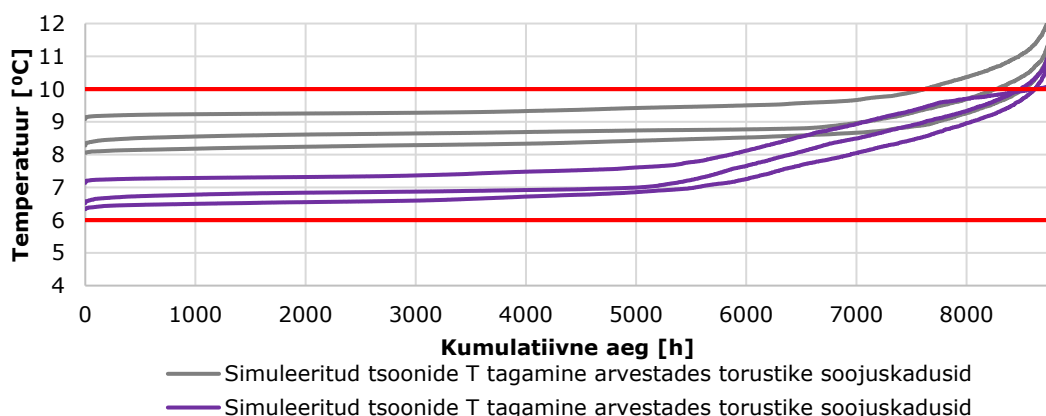
Joonisel 3.31 on kujutatud 6...10°C, RH 30...45% arvutustsoon 1 suhtelise niiskuse väärtused kestusgraafikul. Erinevalt temperatuuri kestusgraafikust on suhteline niiskus

kõigil kolmel vaadeldud juhul tagatud. Suhteline niiskus on tagatud 97-99% ajast. Tulemustest järeldub, et suhteline niiskus on kõikidel juhtudel võrdlemisi sarnases vahemikus. Et saavutada sobilik suhteline niiskus seadme korrigeeritud juhtimisest, oli vaja korrigeerida ka seadme kuivatuse seadesuurust.



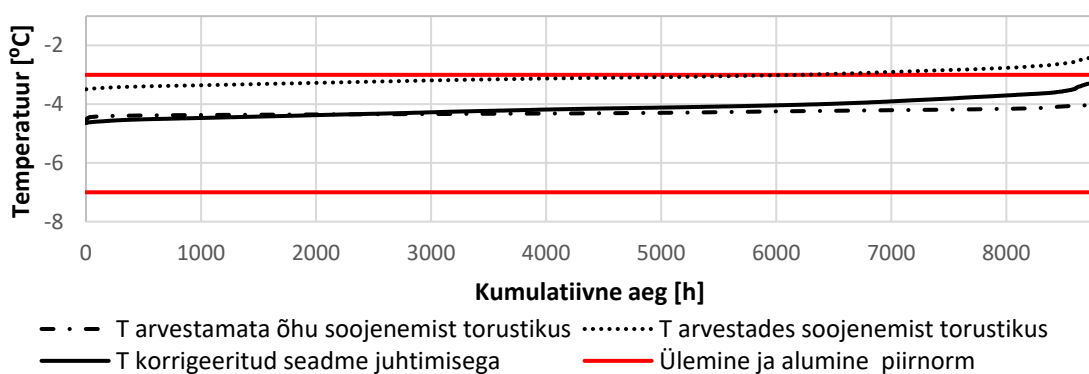
Joonis 3.31 6...10°C, RH 30...45% arvutustsoon 1 konditsioneerimissüsteemi õhukanalite soojuskadudest tulenev mõju suhtelise niiskuse tagamisele

Joonisel 3.32 on esitatud temperatuuri tagamine kestusgraafiku kujul. Temperatuuri piirnormi ületamine tingis vajaduse korrigeerida seadme juhtimise parameetreid. Korrigeeritud juhtimise puhul langetati jahutuskalorifeeri seadeväärtust 2,5°C võrra, et kompenseerida torustikes toimuvat õhu soojenemist. Korrigeeritud skeemide puhul saavutati kogu perioodi vältel mõne võrra madalamad temperatuuri vahemikud. Täiendavalt ilmses vajadus ka rootorkuivati kuivatuse seadeväärtuse alandamiseks 0,3 g/kg^{K_õ}, mis tuleneb korrigeeritud skeemi mõnevõrra madalamast temperatuuri tagamispiirkonnast. Väiksem niiskussisalduse väärtus on tarvilik, et tagada madalama ruumiõhu temperatuuri korral ruumiõhu jäämine piirnormide vahemikku.



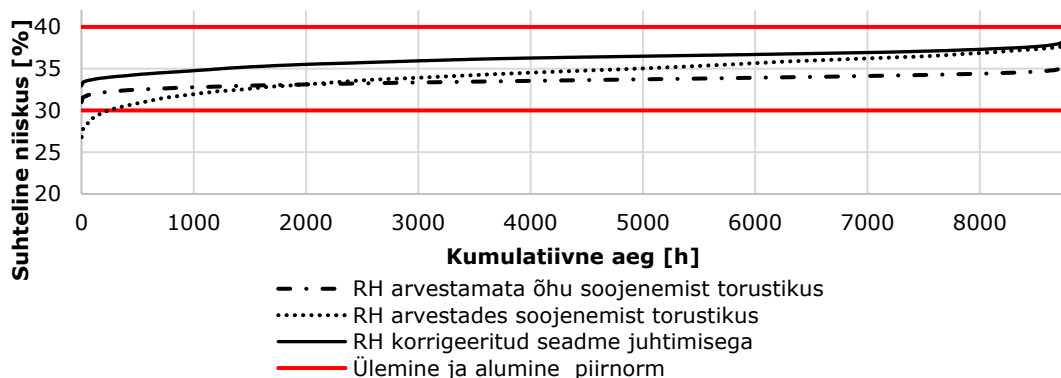
Joonis 3.32 6...10°C, RH 30...45% hoidla tüübi läbi simuleeritud arvutustsoonide konditsioneerimissüsteemi T muutumine

Joonisel 3.33 on kujutatud $-3...-7^{\circ}\text{C}$, RH 30...40% arvutustsoon 1 temperatuuri tagamist tingituna torustike soojuskadudest kestusgraafikul. Jooniselt nähtub, et torustikes õhu soojenemisega arvestamine põhjustab temperatuuri tõusu. Soojuskadude tõttu ei tagata ette nähtud temperatuuri vahemike, mis tingib asjaolu, et temperatuuri juhtimist tuleb korrigeerida nii, et saavutataks sobilik temperatuur kogu perioodi lõikes. Joonisel esitatud korrigeeritud lahenduse puhul tagatakse temperatuuri suhteliselt sarnases vahemikus kui ilma soojuskadusid arvestamata. Peamine, mis temperatuuri juhtimise puhul korrigeerimist vajab, on jahutuspatarei seadesuurus.



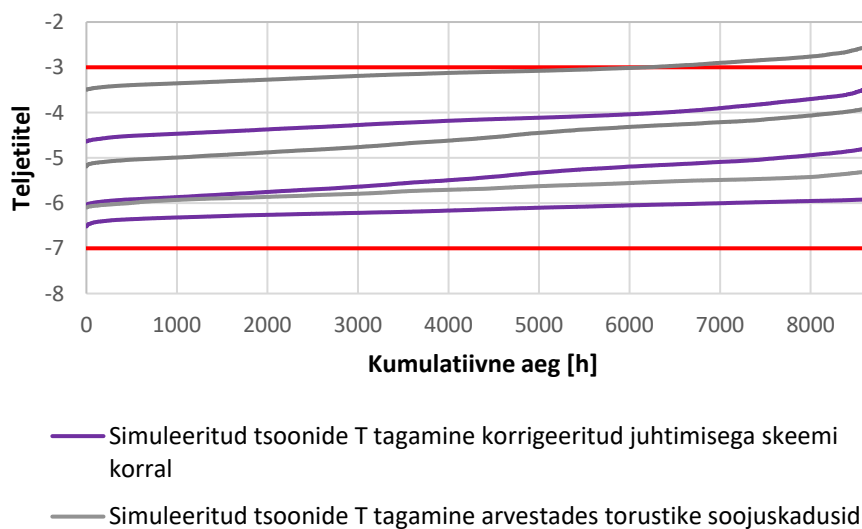
Joonis 3.33 $-3...-7^{\circ}\text{C}$, RH 30...40% arvutustsooni 1 konditsioneerimissüsteemi õhukanalite soojuskadudest tulenev mõju temperatuuri tagamisele

Joonisel 3.34 on kajastatud suhtelise niiskuse dünaamika tulenevalt õhu soojenemisest torustikes. Jooniselt selgub, et tulenevalt temperatuuri tõusust torustikus, tõuseb ka ruumiõhu temperatuur, mis põhjustab suhtelise niiskuse taseme langust. Soojuskadudega arvestava variandi puhul jääb suhteline niiskus alla poole nõutud piirnormist ligikaudu 3-5% koguajast. Suhtelise niiskuse tagamiseks nõutud piiride vahemikes oleks tarvilik korrigeerida samuti kuivatuse seadesuuruseid.



Joonis 3.34 $-3...-7^{\circ}\text{C}$, RH 30...40% arvutustsooni 1 konditsioneerimissüsteemi õhukanalite soojuskadudest tulenev mõju suhtelise niiskuse tagamisele

Joonisel 3.35 on esitatud temperatuuri tagamine kestusgraafiku kujul. Jooniselt järeldub, et soojuskadudega arvestades kõikides vaadeldud tsoonides temperatuur kogu perioodi vältel tagatud pole. Temperatuuri piirnormi ületamine tingib vajaduse korrigeerida seadme juhtimise parameetreid. Tulenevalt temperatuuri piirnormi ületamisest tulenes vajadus korrigeerida seadme juhtimist, et temperatuur ja suhteline niiskus oleksid tagatud vähemalt 95% ajast. Korrigeeritud juhtimise puhul langetati jahutuskalorifeeri seadeväärtust 1,5C võrra, et kompenseerida torustikes toimuvat õhu soojenemist. Tehtud muudatuse tõttu saavutati sobilik temperatuuri vahemik kõigis vaadeldud tsoonides. Antud hoidlatüübi minimaalsetest niiskussisalduse väärtustest tulenevalt oli tarvis korrigeerida ka rootorkuivati kuivatuseseadeväärtust, et tagada suhtelise niiskuse püsimine optimaalses piirkonnas. Rootorkuivati kuivatuse seadeväärtust alandati 3×10^{-5} g/kg^{KÕ} võrra.



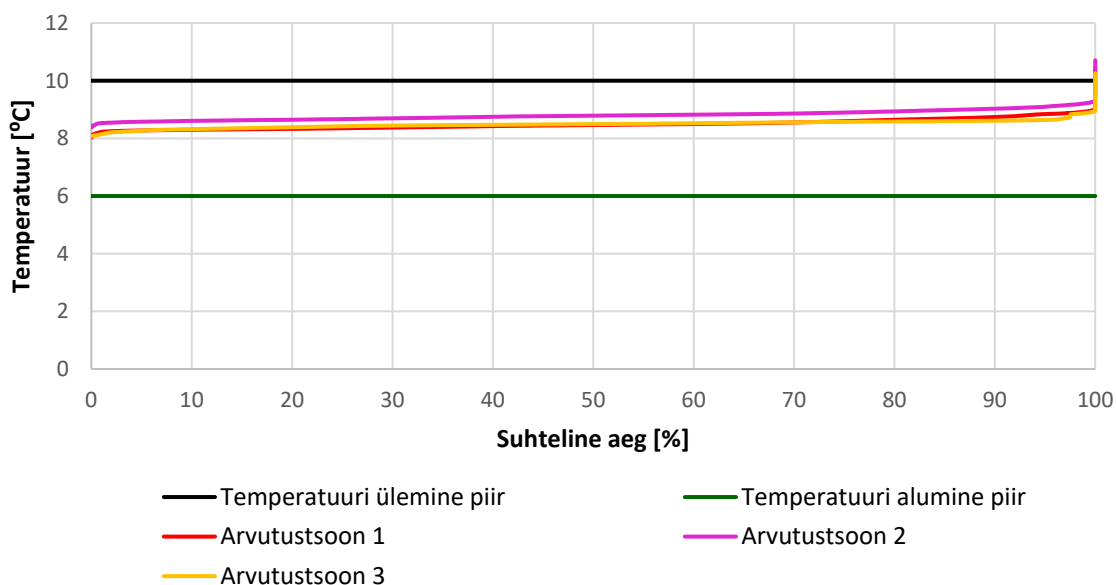
Joonis 3.35 -3...-7°C, RH 30...40% hoidla tüübi läbi simuleeritud arvutustsoonide konditsioneerimissüsteemi T tagamine

Läbi simuleeritud juhtumite põhjal ilmnes, et taoliste temperatuuri tingimustega hoidlate puhul on äärmiselt oluline arvestada õhu soojenemisega sissepuhke- ja väljatõmbetorustikes. Arvestamata torustikes toimuvat õhusoojenemist saavutatakse üldjuhul temperatuuri tagamine täpsusega, mis ületab ette nähtud piirnorme märkimisväärselt. Torustikes õhusoojenemise vältimiseks tuleks torustikud kavandada võimalikult lühikesed ning tsoonidesse, kus temperatuuri erinevus väliskeskkonna ja torustikes liikuva õhu vahel oleks võimalikult väike. Torustike soojuskadude ja esinevate temperatuuri muutuste täpsemaks hindamiseks tuleks teostada vastavaid arvutusi võttes arvesse sissepuhke- ja väljatõmbe torustikes toimuvad temperatuuri kõikumised.

Lähtuvalt korrigeeritud juhtimisloogikaga simulatsioonide tulemustest ilmnes, et temperatuuri ja suhtelise niiskuse muutuste kompenseerimiseks oleks tarvilik kasutada

dünaamilist juhtimist, kus väljatõmbe seadeväärtust muudetakse kriitilise tsooni anduri näidu baasilt. Võimalik oleks kasutada kolmeastmelist juhtloogikat, kus defineeritaks kolm seadesuuruste taset. Tasemed jaguneksid järgnevalt normaaltase, kõrgem kui normaaltase ja madalam kui normaaltase. Tavaolukorras kui temperatuur ja RH hoidlas tagatud, siis töötaks seade normaaltasemel. Hoidla temperatuuri ja RH anduri näidu langedes alumise piirnõrmi lähedusse, siis tõstetakse väljatõmbeõhu temperatuuri või RH seadesuurus tasemele kõrgem kui normaaltase. Hoidla temperatuuri ja RH anduri tõustes ülemise piirnõrmi lähedusse, siis langetatakse väljatõmbeõhu temperatuuri või RH seadesuurus tasemele madalam kui normaaltase. Antud töös läbi simuleeritud variantide puhul saadi temperatuuri ja suhtelise niiskuse muutuste vajalikeks suurusteks $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ ja $\text{RH} \pm 5\%$ $6\text{...}10^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} 30\text{...}45\%$ hoidla korral ning $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ ja $\pm 3\%$ $-3\text{...}-7^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} 30\text{...}40\%$ hoidlate puhul.

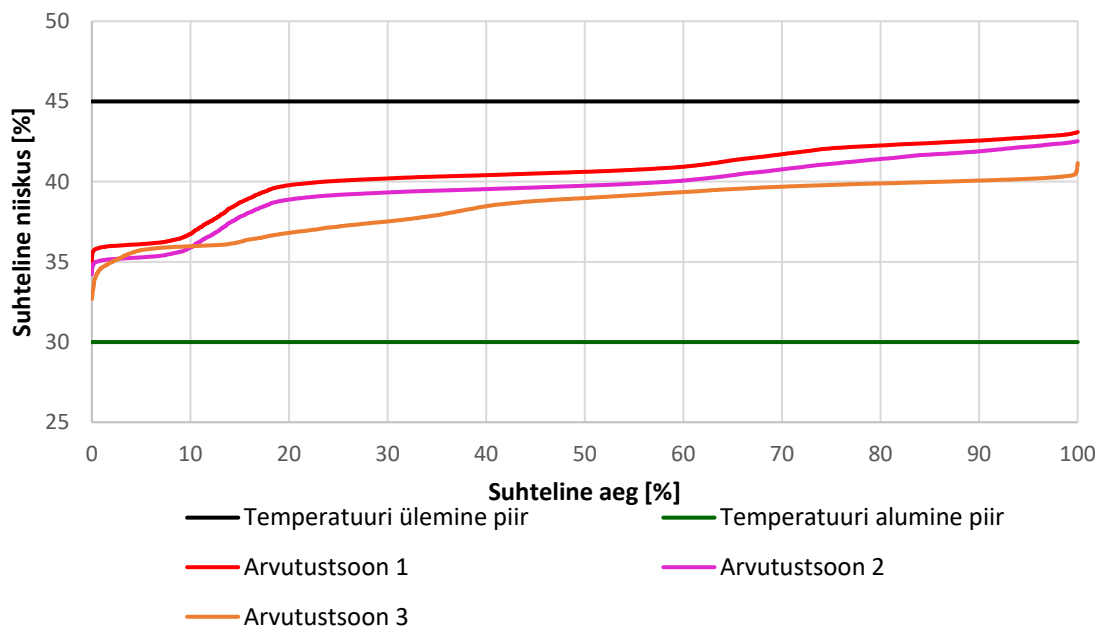
Joonisel 3.36 esitatud kestusgraafikul on kirjeldatud ülalpool väljatoodud juhtimisloogikal põhinevad simulatsiooni tulemused. Simulatsioon viidi läbi kolme $6\text{...}10^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} 30\text{...}45\%$ hoidlaga. Temperatuuri tagamine toimub kõigis hoidlates keskmisel tasemel, sest ruumiõhu temperatuur jääb valdavalt 8°C lähedusse. Temperatuuri püsimisel 8°C ümbruses on olemas varu nii mõningaseks temperatuuri tõusuks või langemiseks. Juhtimisloogika astmete vahelist ümberlülitust kasutati juhul kui maksimaalse temperatuuri väärtusega tsoonis saavutati tulemus $\pm 1^{\circ}\text{C}$ piirnõrmit. Juhtimise toimimist kinnitab asjaolu, et temperatuuri tagatakse vahemikus $7\text{--}9^{\circ}\text{C}$.



Joonis 3.36 $6\text{...}10^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} 30\text{...}45\%$ hoidla temperatuuri tagamine astmelise juhtimise korral

Joonisel 3.37 on esitatud kestusgraafikul kujutatud suhtelise niiskuse tagamine arendatud juhtimisloogika teostatud $6\text{...}10^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} 30\text{...}45\%$ hoidlaga läbiviidud simulatsioonides. Juhtimisloogika toimimist hinnati kolme hoidla koosmõjul.

Tulemustest järeldub, et suhtelist niiskust tagatakse antud lahenduse puhul heal tasemel. Astmete vahelist ümberlülitust kasutati kui maksimaalse RH väärtusega tsoonis saavutati RH väärtus $\pm 2\%$ piirnormidest. Simuleeritud suhtelise niiskuse väärtused jäävad vahemikku 33-43%, millest tingituna on olemas paari-kolmeprotsendine varu suhtelise niiskuse muutumisele.



Joonis 3.37 6...10°C, RH 30...45% hoidla suhtelise niiskuse tagamine astmelise juhtimise korral

3.3 JÄRELDUSED

Magistritöö raames uuriti erineva temperatuuri ja suhtelise niiskuse tagamise nõuetega hoidlate võimalike konditsioneerimiskeemide toimimist ja energiatõhusust. Konditsioneerimissüsteemide tehniliste lahenduste poolt vaadeldi eelkõige erinevate õhukuivatuslahenduste süsteemide energiatarvet kindlaks määratud hoidla tingimustes. Võimalike konditsioneerimissüsteemide võrdlemine toimub ühte tüüpi hoidlate põhiselt. Tulemusi vaadeldi kütte ja jahutuse netoenergia, niisutuse elektrienergia ning kokkuvõtlikult summaarse kaalutud energiakasutuse võtmes. Täiendavalt hinnati hoidlate summaarse energiakasutuse muutusi tingituna piirdetarindite soojuslähivuse, õhulekkearvu ning kasutatava välisõhu koguse optimeerimisest. Tulemusi vaadeldi kaalutud summaarse energiakasutuse erinevusena võrrelduna defineeritud baaslahendusest.

Käsitletud konditsioneerimisseadmed jagunesid kolme põhilisse alamgruppi. Jahutuspatari ja järelküttekalorifeeriga kuivatus lahenduse toimuvust ja energiatõhusust hinnati kahe hoidla tüübi puhul. Kompressorkuivatusseadmel põhineva

konditsioneerimisskeemi toimivust ja tõhusust hinnati kõigi kolme antud töös kajastatud hoidla tüübi korral. Rootorkuivatil baseeruva seadmekonfiguratsiooni töötamine ja efektiivsus oli vaatluse all 6...10°C, RH 30...45% ja -3...-7°C, RH 30...40% hoidlate simulatsioonide läbiviimisel.

Töö tulemuste põhjal osutus 15...21°C, RH 40...55% hoidla võimalikest konditsioneerimisskeemidest kõige energiatõhusamaks kompressorkuivatusseadmega lahendus. Lähtuvalt antud töö tulemustest võib kompressorkuivatusseadme kasutamine vähendada summaarset energiakasutust suurusjärgus kuni 20%, mistõttu taoliste hoidlate kavandamisel tuleks võimalike lahendusena antud varianti kaaluda. Täiendavalt tuleks arvesse võtta seadmete alginvesteeringu maksumused, mis antud töö mahtu ei kuulu.

6...10°C, RH 30...45% hoidlate puhul saavutati käesolevas töös vaadeldud variantidest energiatõhususe mõttes kõige paremad tulemused rootorkuivatusseadmel põhinevate seadmekombinatsiooniga. Samuti -3...-7°C, RH 30...40% hoidlate konditsioneerimisskeemidest osutus kõige paremaks vaadeldud rootorkuivatusseadmel põhinev seade. Rootorkuivatusseadmel põhinevate õhuvahetuskeemide energiatarve osutus võrreldes alternatiivsete seadmeskeemidega märkimisväärselt madalamaks, millest tingituna antud hoidlate konditsioneerimisskeemide kavandamisel tuleks esmase võimaliku variandina eelistada rootorkuivatusseadmel põhinevat seadet. Rootorkuivatusseadme regeneratsiooni tuleks energiaallikana esmavõimalusel eelistada veebaasil kalorifeeri, kuna see tagab odavama energiaallika ning tagatud on ka sujuvam reguleerimisvõime. Seadme lõpliku tasuvuse hindamiseks tuleb arvesse võtta samuti seadmete alginvesteeringu maksumus, millega käesolevas magistris töös arvestatud ei ole.

Piirdekonstruktsioonide optimeerimiseks ning energiatarbe muutuste hindamiseks läbiviidud simulatsiooni tulemustest järeldus, et piirdekonstruktsioonide erinevate soojusläbivuse väärtustest tulenev mõju energiatarbele jääb vahemikku 2-7%. Väiksemate tarindite soojusläbivuste väärtuste kasutamine omab mõnevõrra suuremat mõju madalatemperatuuriliste hoidlate puhul, millest tulenevalt taoliste hoidlate piirdetarindite soojusläbivus tuleks kavandada võimalikult madal kuid samas optimaalselt võttes arvesse alginvesteeringu maksumuse. Tavatemperatuuri nõuetega hoidlate puhul piirdetarinditest tulenev energiatarbe muutused jäävad minimaalseteks, mis tingib asjaolu, et teatud juhtudel saab taoliste hoidlate puhul kasutada mõnevõrra kehvemate soojustehniliste näitajatega tarindite kombinatsioone. Kokkuvõtlikult on piirdekonstruktsioonide soojusläbivuse muutusetest tulenevad energiatarbe mõjutused

suhteliselt väikesed, kuid siiski on tegemist olulise asjaoluga sumarse energiatõhususe kontekstis, mida ei tohiks tähelepanuta jätta.

Erinevate õhulekkearvu väärtustega läbiviidud simulatsioonide tulemustest tulenes, et antud töös käsitletud hoidlate puhul saavutati infiltratsioonist tulenev kogu energiatarbe muutus 1% kuni 8%. Tulemuste analüüsi loogilise järeldusena selgus, et õhulekkearvu suurendamine põhjustab energiakasutuse suurenemist ning madalama õhulekke väärtuse kasutamine vastupidist efekti. Lähtuvalt simulatsioonide tulemustest tuleneb, et kõrge õhupidavuse kavandamine on eelkõige tähtsam madalatemperatuuriliste tingimuste korral. Antud hoidlates pakub kõrge õhupidavus kuni 8% summaarset energiakasutuse vähenemist. 15...21°C, RH 40...55% hoidla baasil teostatud simulatsiooni tulemustest selgus, et võrreldes baas õhulekkearvuga (1,5 m³/(hm²)) ei oma õhulekkearvu mõningane muutmine niivõrd suurt mõju kui teiste vaadeldud hoidlate korral. Seetõttu taoliste hoidlate kavandamisel oleks võimalik kasutada lahendusi, millega tagatakse mõnevõrra suurem infiltratsioon.

Läbiviidud erinevate välisõhu kogusega simulatsioonide eesmärgiks oli seatud energiakasutuse muutumise hindamine ja võimalik optimeerimine. Simulatsiooni tulemustest ilmnes, et energiakasutus väheneb vaid võimalikult madala välisõhu koguse kasutamise korral. Juba mõneprotsendilised muutused võivad esile kutsuda ligikaudu 15% kogu energiatarbe muutumise. Suurema välisõhu osakaaluga simulatsioonides oli üheks suuremaks energiatarbe kasvu põhjuseks niisutusvajaduse kasv kuna niisutusperioodil suurenes kuiva välisõhu kogus protsessiõhus, mis on põhjuseks niisutusvajaduse kasvuks. Väiksemal määral suurenes summaarne energiatarbe suuremast niiske välisõhu kogusest tulenevast kuivatusvajaduse muutumisest. Antud töös käsitleti välisõhu koguse seadesuurust konstandina. See tähendab, et simulatsioone teostati kindla välisõhukogusega. Täiendavat uurimist vajaks retsirkulatsiooni juhtimise lahendamise lähtuvalt välisõhu niiskussisaldusest ning sellest tulenev potentsiaalne energiakasutuse kokkuhoid.

Oluline aspekt, millega hoidlate konditsioneerimisskeemide puhul arvestada tuleks on torustike soojuskaost tulenev temperatuuri muutus ning selle mõjutus suhtelise niiskuse ja temperatuuri tagamisele. Eri pikkusega sissepuhke- ja väljatõmbetorustikud muudavad süsteemide juhtimist keerukamaks kui juhtimine on kavandatud lähtuvalt väljatõmbe temperatuurist. Eelistada tuleks võimalikult lühikesi ning pikkuselt sarnaseid torustikke. Paigutuse pooles peaksid torustikud olema paigutatud võimalikult suurel määral niimoodi, et temperatuuri erinevus torustiku õhu ja välisõhu vahel oleks võimalikult minimaalne, et vähendada soojuskadusid ja temperatuuri muutuseid.

Seadmete juhtimisloogikate ülesehitusel oleks otstarbekas lähtuda dünaamilisest juhtimisest väljatõmbeõhu alusel.

Hoidlate konditsioneerimissüsteemide kavandamisel tuleks esmalt vaatluse alla võtta tingimused, mida on vaja tagada, et leida võimalikult hästi sobituv seadme konfiguratsioon. Konditsioneerimisseadme tehnilise lahenduse kõrval mängib rolli seadme juhtimisloogika ning kuidas juhtimine toimima saadakse. Hoidlate energiatõhusa toimimise aspektist kesksel kohal asjaolud, mis on seotud hoidlate paiknemisega hoonetes, piirdetarindite lahendustega ja hea õhupidavusega. Võrreldes tehnilisest lahendusest tulenevat energiakasutuse kokkuhoidu hoidla piirdekonstruktsioonide optimeerimisest tuleneva kokkuhoiduga, siis on teada, et tehnilisest lahendusest tuleneb peamine ökonoomsus. Antud olukorras on oluline mõista, et kogu süsteemi tõhusaks töötamiseks tuleb tegeleda optimaalsete lahenduste otsimisega ka nendel aladel, mis ei ole seotud ainult konditsioneerimisseadme tehnilise lahendusega. Kokkuvõtlikult hoidlate sisekliima tagamise lahenduste väljatöötamisel esineb teatud määral suuremaid ning põhimõttelisemaid valikute kohti ning vähem tähtsaid valdkondi, mis tähelepanu vajavad. Siiski kogu süsteem töötab tervikuna, mis tingib asjaolu, et arvestada tuleks kõikide muutujate mõju, et lõpptulemusena saavutada võimalikult hea ja optimaalne lahend.

KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös uuriti hoidlates kasutatavate konditsioneerimiseadmete konfiguratsioonide energiatõhusust ja toimivust. Süsteemide hindamiseks on loodud juhtimisloogikad, mis on kavandatud optimaalse energiatõhususe ning hoidlale kehtestatud nõuete saavutamise eesmärgiga. Süsteemide võrdlemiseks olid kasutusel kolm laialt levinud temperatuuri ja suhtelise niiskuse nõuetega hoidla klassi. Tööst saadud tulemused baseeruvad simulatsioonide tulemustel ning on üldistatavalt kohaldatavad sarnaste tingimustega hoidlatele. Täpsemas pildis on iga hoidla siiski küllaltki ainulaadne ning täpsem tehniline lahend ja juhtimisloogika tuleks teostada vastavalt igale konkreetsele juhule.

15...21°C, RH 40...55% hoidlatüübi puhul teostati simulatsioone kahe võimaliku konditsioneerimissüsteemi skeemiga. Tulemustest järeldus, et energiatõhusamaks variandiks osutus kompressorkuivatusseadmega skeem. Mõnevõrra suurema energiatarbega skeemiks osutus süsteemikonfiguratsioon jahutuspatarei ja järelküttekalorifeeriga. Temperatuuri ja suhtelise niiskuse tagamise poolest olid võrreldavad skeemid küllaltki sarnased. Energiatarbe peamine erinevus tuleneb kompressorkuivatusseadme kondensaatori jääksoojuse kasutamises järelkütte protsessis. Kompressorkuivatusseadmega variant on ligikaudu 20% madalama summaarse energiatarbega kui jahutuspatarei ja järelküttekalorifeeriga lahendus.

6...10°C, RH 30...45% tingimustele sobivate konditsioneerimiseadmete analüüsiks viidi läbi simulatsioon kolme võimaliku seadme koosseisuga. Kõige energiatõhusamad tulemused saavutati rootorkuivatusseadet sisaldava seadme ülesehitusega. Summaarse energiatarbe poolest oli rootorkuivatusseadega variant ligikaudu 65% efektiivsem kui vaadeldud jahutuspatarei ja järelküttekalorifeeriga skeem. Teisele kohale jäi kompressorkuivatusseadmega süsteemikonfiguratsioon. Kompressorkuivatusseadme summaarne energiatarve jäi suurusjärgus 10% väiksemaks võrreldes jahutuspatarei ja järelküttekalorifeeri variandiga. Temperatuuri ja suhtelise niiskuse tagamine kõikide skeemide puhul saavutati sisuliselt samasugune. Rootorkuivatusseadme regeneratsioonikalorifeeri energiatarbe alusel teostati võrdlus kalorifeeri energiaallika suhtes. Tulemustes järeldus, et võimaluse korral tuleks alati eelistada veebaasil kalorifeeri elektrikalorifeerile.

-3...-7°C, RH 30...40% tingimuste tagamiseks teostati simulatsioone kahe võimaliku seadme konfiguratsiooniga. Vaatluse all olid rootorkuivatusseadmega ja kompressorkuivatusseadmega skeemid. Parem energiatõhusus saavutati rootorkuivatusseadmega variandi puhul. Rootorkuivatusseadme summaarne

energiatarve jäi suurusjärgus 30% madalamaks võrreldes kompressorkuivatusseadmega. Erinevus tuleneb eelkõige madalamast soojusenergia tarbimisest. Kestusgraafikutel kujutatud temperatuuri ja suhtelise niiskuse graafikutest järeldus, et temperatuur ja suhteline niiskus tagatakse sobilikes piirides ja küllaltki sarnaselt.

Piirdetarindite soojuslähivuste muutustest tulenevate mõjude hindamiseks loodi 40% suuremate ja väiksemate soojuslähivuse väärtustega piirdetarindite lahendused. Läbiviidud simulatsioonidest järeldus, et 40% paremate piirdetarindite soojuslähivuste kasutamine aitab vähendada summaarset energiakasutust 4-7%. Piirdetarindite halvendamine 40% põhjustas summaarse energiatarbe kasvu 2-4%. Piirdetarinditest tulenev mõju energiatarbele oli suurem just madalama temperatuuriliste tingimustega hoidlate korral.

Hoidlate õhulekkearvu muutustest põhjustatud mõjude teada saamiseks teostati simulatsioone nelja õhulekke arvu väärtusega. Võrdlused viidi läbi õhulekke arvu $q_{50}=1,5 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ suhtes. Üldistatult aitas madalama õhulekkearvu kasutamine vähendada summaarset energiatarvet 2-8%. Kõrgematest õhulekke väärtustest tulenev energiatarbe kasv jäi vahemikku 4-8%. Suuremat energiatarbe vähenemist võis täheldada madalatemperatuuriliste hoidlate korral.

Välisõhu koguse mõju hindamiseks viidi läbi simulatsioone viie erineva välisõhu koguse väärtusega. Simulatsioonide tulemustest ilmnes, et hea energiatarbimise saavutamiseks on tarvilik välisõhuvahetus hoida minimaalsel tasemel. Parimad tulemused saavutati vaadeldud minimaalsete välisõhu koguste korral. Simulatsioonide tulemused kinnitasid, et mõne protsendiline välisõhu koguse suurendamine kutsus esile märkimisväärse energiatarbe suurenemise.

Õhujaotustorustikes toimuva õhu soojenemise mõju hindamiseks teostati statsionaarne soojuskadude ja temperatuuri muutuste arvutus. Arvutustulemid kohaldati simulatsioonidesse ning hinnati soojuskadude mõju. Tulemustest ilmnes, et soojuskadudel on märkimisväärne mõju süsteemide toimimisele ning nende mõju ei saa arvestamata jätta. Tulenevalt õhu soojenemisest torustikes on tarvilik korrigeerida süsteemide juhtimist, et hoidlatele kehtestatud temperatuuri ja suhtelise niiskuse nõuded oleksid tagatud.

Antud lõputöös keskenduti tehniliste lahenduste võrdlusele ja toimivuse hindamisele. Hoidlate temaatika keeruka sisu poolest oleks tulevikus võimalik edasi arendada veel täpsemaid ja vajaduspõhisemaid juhtimisloogikaid seadmete optimaalsemaks

töötamiseks. Täiendavat uurimist vajaksid lisaks ka optimeerimisalased ülesanded, mis oleksid seotud nii hoidlate paiknemisega kui ka piirdetarindite täpsema analüüsiga.

SUMMARY

In this master's thesis the energy efficiency and the performance of air conditioning configurations used in repositories were investigated. To evaluate the performance of the systems, control logics, which are designed to achieve optimal energy efficiency and storage requirements, have been developed. Three widely spread storage classes with temperature and relative humidity requirements were used to compare the systems. The results obtained from the work are based on the simulations and are generally applicable to repositories with similar conditions. In a more detailed view each repository is quite unique and so should a more precise technical solution and control logic be implemented on a case-by-case basis.

For 15...21°C, RH 40...55% of the repository type, simulations were performed with two possible conditioning system schemes. The results concluded that a scheme with a compressor dryer proved to be a more energy efficient option. The system configuration with a cooling coil and a post-heating coil turned out to be a somewhat higher energy consumption circuit. The comparable schemes were quite similar in terms of temperature and relative humidity. The main difference in energy consumption is due to the use of residual heat from the condenser of the compressor dryer in the post-heating process. The version with a compressor dryer is about 20% lower in total energy consumption than a solution with cooling coil and post-heating coil.

For the analyses of air conditioning solutions suitable for 6...10°C, RH 30...45% conditions, simulations were performed with three possible device configurations. The most energy-efficient results were achieved with the design of the device containing the desiccant wheel. In terms of total energy consumption desiccant wheel was about 65% more efficient than the scheme with observed cooling coil and post-heating coil. The system configuration with compression dryer was in the second place. The total energy consumption of the compressor dryer remained on the order of 10% lower than cooling coil and post-heating coil variant. The provision of temperature and relative humidity was essentially the same for all schemes. A comparison was made with respect to the energy source of the coil based on the heat energy consumption of the regeneration coil of this storage type desiccant wheel. The results concluded that whenever possible, a water-based coil should always be preferred to an electric heater.

Simulations with two possible device configurations were performed to ensure -3...-7°C, RH 30...40% conditions. The desiccant wheel and the compressor dryer were under observation. Better energy efficiency was achieved with desiccant wheel version. The total energy consumption of the desiccant wheel remained on the order of 30% lower

compared to the compressor dryer. The difference is mainly due to the lower heat consumption. It was concluded from the temperature and relative humidity plots shown on the duration schedule, that the temperature and relative humidity are provided within appropriate limits and in a fairly similar manner.

To assess the effects in thermal conductivity of structures, a solution for structures with 40% higher and lower thermal conductivity values was created. The simulations concluded that the use of 40% better thermal conductivity of structures helps to reduce the total energy consumption by 4-7%. A 40% deterioration in structure thermal conductivity led to a 2-4% increase in total energy consumption. The impact of structures on energy consumption was greater in case of storage facilities with lower temperature conditions.

Four different air leakage rates were used in simulations to assess effects caused by changes in the air leakage rate of the repositories. Comparisons were performed with the ratio of air leakage number $q_{50}=1,5 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$. In general, the use of a lower air leakage rate helped to reduce the total energy consumption by 2-8%. The increase in energy consumption due to higher air leakage values was in the range of 4-8%. A greater reduction in energy consumption was observed with lower temperature storage.

Simulations with five different amounts of outdoor air were done to evaluate the effect of the amount of outdoor air. The results of the simulations showed that it is necessary to keep the outdoor air exchange to minimum to achieve energy efficiency. The best results were obtained with the observed minimum amounts of outdoor air. The results of the simulations confirmed that a few percent increase in the amount of outdoor air causes a significant amount of energy consumption.

A stationary calculation of heat losses and temperature changes was performed to assess the effect of air heating in the air distribution ducts. The calculation results were applied to the simulations and the effect of heat losses was evaluated. The results showed that heat losses have a significant impact on the operation of the systems and their impact cannot be ignored. Due to the heating of the air in the ducts, it is necessary to adjust the control of the systems to ensure the temperature and relative humidity requirements set for the repositories.

In this master's thesis the comparison of technical solutions and evaluation of performance were focused. Due to the complex content of repository issues, it would be possible to develop further even more precise and needs-based control logics for more optimal operation of the devices in the future. Further research would also be needed

in the field of optimization, which would be related to both the location of repositories and a more detailed analysis of boundary structures.

.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] U. Nations, "The Paris Agreement." 2016.
- [2] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeriumi, "Eesti riiklik energia- ja kliimakava aastani 2030." 2019.
- [3] T. Padfield and P. K. Larsen, "Low energy air-conditioning of archives," *J. Soc. Arch.*, vol. 27, no. 2, pp. 213–226, 2006, doi: 10.1080/00379810601101293.
- [4] K. Kompatscher, R. P. Kramer, B. Ankersmit, and H. L. Schellen, "Intermittent conditioning of library archives: Microclimate analysis and energy impact," *Build. Environ.*, vol. 147, no. September 2018, pp. 50–66, 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.10.013.
- [5] F. Ascione, L. Bellia, A. Capozzoli, and F. Minichiello, "Energy saving strategies in air-conditioning for museums," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 29, no. 4, pp. 676–686, 2009, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.03.040.
- [6] R. Kramer, J. van Schijndel, and H. Schellen, "Dynamic setpoint control for museum indoor climate conditioning integrating collection and comfort requirements: Development and energy impact for Europe," *Build. Environ.*, vol. 118, pp. 14–31, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.03.028.
- [7] *ASHRAE Handbook - HVAC Applications 2015.* .
- [8] H. Janssen and J. E. Christensen, "Hygrothermal optimisation of museum storage spaces," *Energy Build.*, vol. 56, pp. 169–178, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.08.043.
- [9] M. Ryhl-Svendsen, L. Jensen, P. Larsen, and T. Padfield, "Does a standard temperature need to be constant," *Meddelelser om Konserv.*, vol. 1, pp. 13–20, 2010.
- [10] RKAS, "Muuseumide sisekliima nõuded." .
- [11] K. Konsa, *Artefaktide säilitamine.* 2007.
- [12] P. K. R.-S. M. Larsen, "Low-Energy Museum Storage," *Mech. Art Mater. Its Futur. Herit. Sci.*, 2019, doi: 10.5479/si.11342126.v1.
- [13] "Engineering toolbox." https://www.engineeringtoolbox.com/relative-humidity-air-d_687.html.
- [14] J. Tetreault and P. Begin, "Silica Gel: Passive Control of Relative Humidity Technical Bulletin," 2018. [Online]. Available: <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/conservation-preservation-publications/technical-bulletins/silica-gel-relative-humidity.html#a6b>.
- [15] M. F. Mecklenburg and C. S. Tumosa, "Temperature and relative humidity effects on the mechanical and chemical stability of collections," *ASHRAE J.*, vol. 41, no. 4, pp. 77–82, 1999.
- [16] A. Kupczak, A. Sadłowska-Sałęga, L. Krzemień, J. Sobczyk, J. Radoń, and R. Kozłowski,

- "Impact of paper and wooden collections on humidity stability and energy consumption in museums and libraries," *Energy Build.*, vol. 158, pp. 77–85, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.10.005.
- [17] S. H. Hong, M. Strlič, I. Ridley, K. Ntanos, N. Bell, and M. Cassar, "Climate change mitigation strategies for mechanically controlled repositories: The case of The National Archives, Kew," *Atmos. Environ.*, vol. 49, pp. 163–170, 2012, doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.12.003.
- [18] H. Derluyn, H. Janssen, J. Diepens, D. Derome, and J. Carmeliet, "Hygroscopic behavior of paper and books," *J. Build. Phys.*, vol. 31, no. 1, pp. 9–34, 2007, doi: 10.1177/1744259107079143.
- [19] S. Guild, M. MacDonald, and T. Strang, "Mould Prevention and Collection Recovery: Guidelines for Heritage Collections – Technical Bulletin 26," Canadian Conservation Institute, 2004.
- [20] N. Valentín, "Valentín Microbial Contamination in Archives and Museums: Health Hazards and Preventive Strategies Using Air Ventilation Systems Contribution to the Experts' Roundtable on Sustainable Climate Management Strategies, held in Microbial Contamination in Archi," no. April, pp. 1–26, 2007, [Online]. Available: <http://www.getty.edu/conservation/science/climate/>.
- [21] *Arhiivieskiri 1998*. VVm RT I, 1998, pp. 118–120.
- [22] *Valtionarkiston arkistitilaohjeet valtion virkaarkistoille, kunnallisille arkistoille sekä valtionapua saaville yksityisluontoisille arktistoille*. Helsinki, 1984.
- [23] W. . Wilson, "Environmentl Guidelines for the Storage of Paper Records NISO Technical Report 1," Bethesda, Maryland, U.S.A.
- [24] B. S. Institution, *British Standard Recommendations for Storage and Exhibition of Archival Documents*. 1989.
- [25] *Riksarkivets förfatningssambling*. Stockholm, 1994.
- [26] E. Standardikeskus, *Informatsioon ja dokumentatsioon. Arhiivi- ja raamatukogumaterjalide hoiunõuded*. 2005.
- [27] G. Thomson, *The Museum Environment*, Second edi. London et al: Butterworth Heinemann, 1986.
- [28] D. Baynes-Cope, "Caring for Books and Documents," *British Library Publishing*, 1989.
- [29] W. . Wilson and C. Wessel, "GUidelines for Environmental Conditions in Archives and Libraries," Washington D.C, 1984.
- [30] L. Bellia, A. Capozzoli, P. Mazzei, and F. Minichiello, "A comparison of HVAC systems for artwork conservation," *Int. J. Refrig.*, vol. 30, no. 8, pp. 1439–1451, 2007, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2007.03.005.
- [31] W. P. Jones, "Air Cooler Coils," in *Air Conditioning Engineering*, Elsevier, 2001, pp. 279

- [32] W. P. Jones, "The Fundamentals of Vapour Compression Refrigeration," in *Air Conditioning Engineering*, Elsevier, 2001, pp. 241–278.
- [33] T. Padfield, M. Ryhl-Svendsen, P. K. Larsen, and L. Aasbjerg Jensen, "A Review of the Physics and the Building Science which Underpins Methods of Low Energy Storage of Museum and Archive Collections*," *Stud. Conserv.*, vol. 63, no. sup1, pp. 209–215, 2018, doi: 10.1080/00393630.2018.1504456.
- [34] S. K. Wang, *Air Conditioning Systems: System Classification, Selection, and Individual Systems*. 2001.
- [35] "Air-conditioning," in *Faber & Kell's Heating and Air Conditioning of Buildings*, Elsevier, 2002, pp. 373–408.
- [36] ASHRAE, *Heating, Ventilating and Air-Conditioning; SYSTEMS AND EQUIPMENT*. 2012.
- [37] E. Bas, *Indoor Air Quality A Guide for Facility Managers*, Second Edit. 2004.
- [38] R. Chhabara and V. Shankar, *Coulson and Richardson's Chemical Engineering, Volume 1B: Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, Seventh Ed. 2018.
- [39] L. Mašková, J. Smolík, J. Ondráček, L. Ondráčková, T. Travníková, and J. Havlica, "Air quality in archives housed in historic buildings: Assessment of concentration of indoor particles of outdoor origin," *Build. Environ.*, vol. 180, no. March, pp. 1–10, 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107024.
- [40] "Eesti Rahvusraamatukogu Arhitektuurne eelprojekt; Sirkel & Mall OÜ; Töö nr: 19064; 22.06.2020." .
- [41] VL Sisearhitektuur OÜ, "Eesti Rahvusraamatukogu hoone renoveerimise projekterimistööd; Sisearhitektuuri eelprojekt." Tallinn.
- [42] J. Fadejev, A. Mikola, and J. Kurnitski, "Eesti Rahvusraamatukogu Hoidlate sisekliima tagamise kontseptsioon ja juhtimispõhimõtted," 2020.
- [43] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi, "Hoone energiatõhususe miinimumnõuded," 2020.
- [44] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi, *Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika*. 2020.
- [45] U. Eicker *et al.*, "Experimental investigations on desiccant wheels Introduction to desiccant wheel characterisation," *Appl. Therm. Eng.*, 2012.
- [46] T.-A. Kõiv, *Õhu konditsioneerimine. I, Õhutöötlemisprotsessid*. 2006.
- [47] "https://www.engineeringtoolbox.com/latent-heat-melting-solids-d_96.html." .
- [48] "<http://andmebaas.stat.ee/Index.aspx?lang=et&DataSetCode=KE08>." .
- [49] "<https://www.remak.eu/en/thermal-insulation-and-ductwork-heat-loss-calculation>." .
- [50] "Eesti Rahvusraamatukogu hoone renoveerimise projekterimistööd; Energiatõhusus; IDEARUM OÜ; 22.06.2020." .