

**PROJEKTEERIMISE JA
EHITUSE VÄLTEL TEHTUD
MUUDATUSTE MÕJU HOONE
JAHUTUSSÜSTEEMIDELE**

Üliõpilane: Kristo Õunap

Üliõpilaskood: 144435EAKI

Juhendaja: Alo Mikola, Nooremteadur

Tallinn 2020

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Kristo Õunap, 144435EAKI

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

Juhendaja(d): Nooremteadur, Alo Mikola (amet, nimi, telefon)

Lõputöö teema:

Projekteerimise ja ehituse vältel tehtud muudatuste mõju hoone jahutussüsteemide toimimisele

The impact of design and construction changes on performance of cooling systems

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Vaadelda büroohoone jahutussüsteemi projekteerimis- ja ehitusprotsessi
2. Dokumenteerida kõik jahutussüsteemi ehitus- ja projekteerimisprotsessis teostatud muudatused ning asendused
3. Koostada büroohoone jahutussüsteemi simulatsioonimudel
4. Kalibreerida simulatsioonimudel vastavalt aasta pikkuse perioodi jahutusenergia ja soojusenergia kulule
5. Analüüsida simulatsioonimudeli abil erinevate büroohoone jahutussüsteemi projekteerimis- ja ehitusprotsessi ajal teostatud muudatuste ja asenduste mõju jahutussüsteemi energiatõhususele ja ruumide jahutusvõimsustele
6. Projekteerimis- ja ehituse vältel tehtud muudatuste mõju hinnang hoone jahutussüsteemide toimivusele

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Vaadelda büroohoone jahutussüsteemi projekteerimis- ja ehitusprotsessi Dokumenteerida kõik jahutussüsteemi ehitus- ja projekteerimisprotsessis teostatud muudatused ning asendused	01.02.20 20
2.	Koostada büroohoone jahutussüsteemi simulatsioonimudel	03.02.20 20
3.	Kalibreerida simulatsioonimudel vastavalt aasta pikkuse perioodi jahutusenergia ja soojusenergia kulule	01.04.20 20
4.	Analüüsida simulatsioonimudeli abil erinevate büroohoone jahutussüsteemi projekteerimis- ja ehitusprotsessi ajal teostatud muudatuste ja asenduste mõju jahutussüsteemi energiatõhususele ja ruumide jahutusvõimsustele	14.05.20 20
5.	Projekteerimis- ja ehituse vältel tehtud muudatuste mõju hinnang hoone jahutussüsteemide toimivusele	20.05.20 20

Töö keel:Eesti..... **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "..25.."..05..2020..a

Üliõpilane:Kristo Õunap. /Allkirjastatud digitaalselt/ "..25.."..05..2020..a
/allkiri/

Juhendaja:Alo Mikola.. /Allkirjastatud digitaalselt/ "..25.."..05..202..a
/allkiri/

Konsultant: ".....".....201....a
/allkiri/

Programmijuht: Martin Thalfeldt /Allkirjastatud digitaalselt/.."..25.."..05..2020....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

Lühendite ja tähiste loetelu	6
SISSEJUHATUS	7
1. JAHUTUSSÜSTEEM	8
1.1 Jahutussüsteemi dimensioneerimine	8
1.1.1 Inimesed	9
1.1.2 Seaded	10
1.1.3 Valgustus	10
1.1.4 Aknad	10
1.1.5 Infiltratsioon	11
1.2 Jahutusvõimsus	11
1.3 Jahutustalad	12
1.4 Fan coil süsteem	13
1.5 VAV süsteem	14
2. MEETODID	15
2.1 Uurimisobjekti kirjeldus	17
2.2 HOONE MODELLEERIMINE	18
2.2.1 Büroohoone simulatsioon	19
2.2.2 Kalibreerimine	23
2.2.3 Muudetud arvutussimulatsioonid	28
2.2.4 Komponentide analüüs	30
2.2.5 Finantsarvutused	31
3. TULEMUSED	32
3.1 Jahutusvõimsused erinevate muudatuste puhul	32
3.2 Jahutusenergia kalibreerimine	38
3.3 Komponentide analüüsi tulemused	42
3.3.1 Seadmete soojuseraldus	43
3.3.2 Inimeste arv ruutmeetri kohta	44
3.3.3 Jahutustemperatuuride muutmine	45
3.3.4 Valgustuse soojuseraldus	46
3.3.5 Akende valgusläbivuse muutmine	46
3.4 Maksumus	48
KOKKUVÕTE	55
SUMMARY	56
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	57

Lühendite ja tähiste loetelu

JS	Jahutussüsteem
JT	Jahutustalad
FC	Fan coil
VAV	(ingl.) <i>Variable air volume</i> = muutuva õhuvooluhugaga süsteem
JV	Jahutusvõimsus
KVJ	Küte, ventilatsioon, jahutus
JE	Jahutusenergia
IDA ice	(ingl.) <i>Ida Indoor Climate and Energy</i> = energia simulatsiooni programm

Rooma tähed

U_g	Aknaklaasi soojusjuhtivus	$[W/(m^2 \cdot K)]$
g	Päikese kiirguse kogu läbivus tegur	-
R_{fr}	Raami osakaal akna pindalas	[%]
U_{tot}	Akna soojusjuhtivus	$[W/(m^2 \cdot K)]$
U_{fr}	Raami soojusjuhtivus	$[W/(m^2 \cdot K)]$
D	Päevavalgustegur	[%]

Kreeka tähed

Ψ_j	Joonkülmasildade lisakonduktants	$[W/(m \cdot K)]$
----------	----------------------------------	-------------------

SISSEJUHATUS

Hoonete energia tarbimisel esineb hulgaliselt probleeme. Tänapäeval on jätkuv vajadus tõsta energiatõhusust ja dekarboniseerida energiavarustus, sest energiatarbimine suureneb. Peale selle oleme jätkuvalt sõltuvad fossiilsetest kütustest. Euroopas tarbivad hooned 40 % kogu tarbitavast energiast. [1] Hoonete sektor kasvab maailmas 1,3 % aastas. 2018. aasta kogu maailma tarbitavast energiast moodustas hoonete sektor 20 %. 2050 aastaks prognoositakse, et hoonete energiakasutus moodustab 22%. [2]

Jahutusenergia mängib suurt rolli hoone kogu tarbitavast energiast. JS moodustab 30 kuni 40 % kogu tarbitavast energiast. [3] Tegelikule olukorrale ligilähedasetl projekteeritud JS aitab saavutada süsteemi töökindluse, väikse energiatarbimise ja kulu. Tavapärase meetodi järgi projekteerimisel projekteeritakse JS kogemuste põhjal. Valitud süsteemi toimivus võib erineda tegelikkusest, sest jahutuskoormused võivad varieeruda. [4]

Uurimistöö eesmärk on analüüsida kuidas ja millisel määral muutuvad hoone jahutusvõimsused projekteerimis- ja ehituskäigus tehtavatest muudatustest. Uurimist alustati sobivate objektide valikuga. Muudatuste väljaselgitamiseks koostati intervjuu ning ühe konkreetse büroohoone puhul teostati muudatuste simulatsioonid. Hoonel mõõdeti tarbitud jahutusenergiat ning mille põhjal koostati kalibreeritud simulatsioon, millega saab võrrelda simulatsiooni väärtusi. Peale selle tuuakse välja soovitusi, millele peaks projekterimise käigus tähelepanu pöörama.

1. JAHUTUSSÜSTEEM

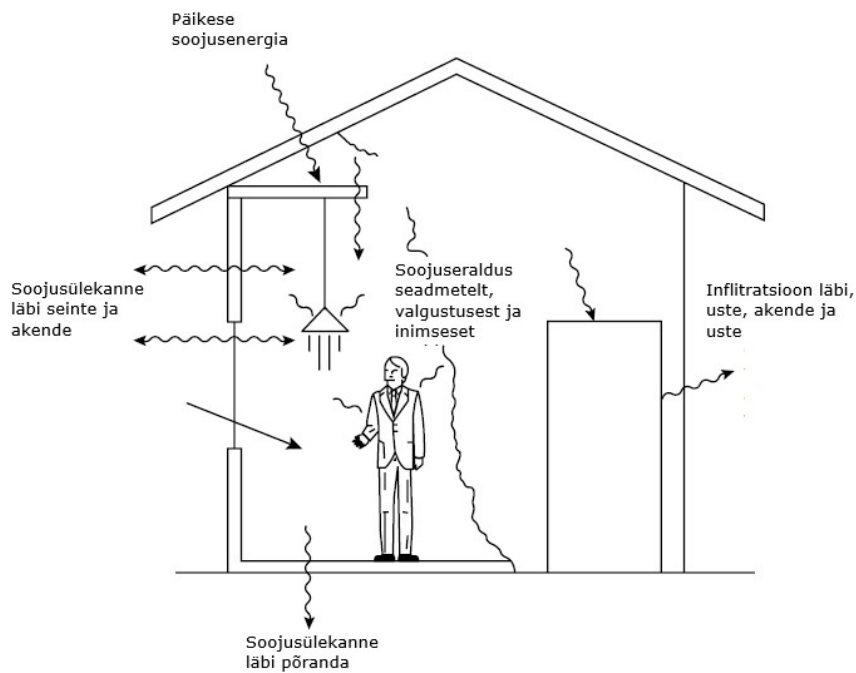
Tavalises KVJ süsteem koosneb järgnevatest osadest: jahutusvee ringist ja hoone sisesest ringist. Jahutusvee ring koosneb kondensaatori osadest, milleks on soojusvaheti, külmajaam, pumbad ja ventilaatorid. Soojusvaheti kannab siseõhust tuleva soojuse edasi jahutusveele. [5]

Kõige tähtsam osa JS energia tarbimise juures on JS õige valik ja dimensioneerimine. ASHRAE käsiraamatu järgi on jahutusmasina soojusmahtuvus sõltuv järgmistest parameetritest: jahutusvee peale- ja tagasivoolu temperatuurist, jahutusseadet läbiva õhu kastepunktist ja vee vooluhulgast. Projekteeritud jahutusvee vooluhulk oleneb jahutuskooormusest kindlas tööpunktis. Projekteeritud jahutusvõimsus võib-olla suurem kui tegelik jahutusvõimsuse tipp, sest projekteeritud võimsusel on arvestatud ka määramatustega nagu ilm, kasutatavus ja vabasoojuslisa. [5]

1.1 Jahutussüsteemi dimensioneerimine

JS energia tarbimine on mõjutatud paljudest näitajatest: kliimast, hoone konstruktsioonist, seadmete kasutamisest ja kasutajate käitumisest. Kõige tähtsam osa JS energia tarbimise juures on JS õige valik ja dimensioneerimine. [5]

Hoonet saab vaadelda kui termodünaamilist süsteemi. Kogu energia, mis hoonesse siseneb, muutub soojusenergiaks ja selle tulemusena hakkab temperatuur ruumis tõusma. Osa energiast siseneb ja väljub ruumist soojusenergiana. Hoone sisenev ja väljuv energia on näidatud all oleval joonisel (Joonis 1.3). Jahutuskooormus sõltub välistest teguritest, milleks on päike, soojusülekanne ja infiltratsioon, ning sisemistest teguritest, inimesed, seadmed ja valgustus. [6]



Joonis 1.3 Hoone soojusenergia [4]

Selleks, et vähendada kasvuhuone gaaside eraldust ja energia tarbimist on vaja täiustada JS energia efektiivsust. Seda on võimalik saavutada, kui kasutada efektiivset ja uut tehnoloogiat ning parandada JS dimensioneerimist ja kasutamist. Asjakohane JS projekteerimine mängib suurt rolli, et parandada energia kasutust. See mõjutab alget investeeringut ja hilisemaid hoolduskulusid. [4]

1.1.1 Inimesed

Uurimused on ühisel arusaamal, et üks suurimaid faktoreid hoone energia kasutuse ja vabasoojuse hindamise seisukohalt on inimeste käitumise hindamine. [3] Ärihoonete puhul on teada, et inimeste tegevust on raske ette prognoosida, näiteks tulede põlema või seamete tööle jätmine. Selle tulemusena kulub 56 % energiast, kui hoonet ei kasutata, ja 44%, kui hoone on kasutuses. Uurimused on näidanud, et raiskava käitumisviisiga inimesed tarbivad 4 korda rohkem energiat kui säästva mõtteviisiga inimesed. [7]

Eramajade sektoris toovad uurimused välja, et inimeste kohalolek ja käitumine toovad samas hoones ja blokis välja ligi 3 erinevat energia kasutust. Uurimused toovad välja, et suvine jahutusenergia kasutus võib erineda rohkem kui 10 korda sarnaste korterite puhul. Inimeste kohaloleku roll on veel kriitilisem ligi null energia majade puhul. Oodatava süsteemi kasu sõltub palju inimeste ootustest seoses sisekliima mugavusele ja rahulolule. Samuti inimeste soovid kasutada passiivseid lahendusi (loomuliku

ventilatsiooni ja päikese valgust) või kõrge efektiivsusega tehnoloogiat nagu nutikat valgustust või kütte ja jahutuse termostaati. [3]

1.1.2 Seaded

Kasutusel on erinevaid ajastus strateegiaid seadmete sisse ja välja lülitamiseks. Näiteks varajane välja lülitamisstrateegia, lülitab mõnikord KVJ süsteemid välja enne kasutuse lõppu, et sisekliima parameetrid jääksid soovitud vahemiku, täpselt enne aktiivset perioodi (ettemääratud süsteem). Nõudluse vähendamise strateegia hõlmab endas eeljahutust tundidel, kus inimesi on vähe, et vähendada jahutuse vajadust tipptundidel, kus kõik on kohal. Sellega vähendatakse kasutatud energia maksumust, sest tarbitakse öist elektri energia tariife. Tavapärane ja vahest ka kõige rohkem kasutatav strateegia on seadeväärtuste strateegia, kus antakse ette süsteemide temperatuurid ettemääratud tööaegadel. [3]

1.1.3 Valgustus

Valgustus kasutab umbes ühe kolmandiku elektri kasutusest ärihoonetel. Iga hoone omaniku huvides on valgustuse poolt tarbitava elektri kasutus viia võimalikult madalale. Büroohooned peaks olema projekteeritud nii, et saaks piisavalt päevavalgust.[8]

Valgustuse poolt tekitatav soojus on ligikaudselt võrdne valguskoormusega. Amasyali ja El-Gohary kasutasid *Support Vector machine'i*, et ennustada valgustuse poolt kasutatud energiat kahel juhul: päeva tüüp ja keskmine pilvisus. Nende mudel võimaldab ainult ennustada valgustuse koormust päeval ajal. Zhoe analüüsis valgustuse poolt tarbitavat energiat 15 suuremas büroos ja leidis, et tarbitav energia on suuresti seotud inimeste kasutusprofiilidega kui valgusteguriga. [9]

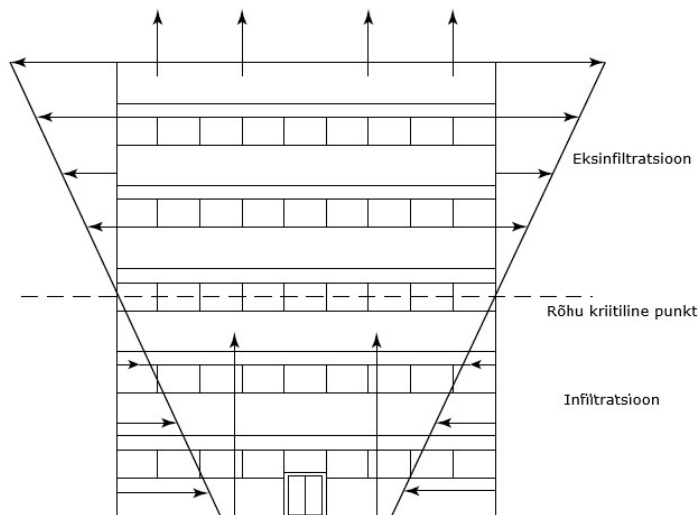
1.1.4 Aknad

Hoonete aknad mõjutavad suurel määral kütte- ja jahutusenergia tarbimisest. Klaasakna omadusi määratletakse peamiselt juhtivusena (U-arv), päikese soojusenergia koefitsient (g-arv) ja nähtava valguse läbilaskvus. Akna energiatõhusust mõjutab kõige rohkem g-arv. G-arv näitab, kui suur osa päikese energiast jõuab hoonesse. G-arvu arvvärtus on 0 ja 1 vahel. Mida väiksem on arvuline väärtus seda efektiivsemalt tõkestab aken päikese energiat ning mida suurem seda paremini pääseb päikese energia siseruumidesse. Seega tõuseb ka jahutusenergia vajadus. Mõned riigid on kehtestanud kindlad reeglid akendele ja reguleerinud energia efektiivsust, see hõlmab endast lisaks ka maksimaalse g-arvu limiteerimist. Ettenähtud g-arvu väärtust saab saavutada

efektiivse klaaside abil või kasutada varjestust. Selles uurimistöös on muudetud akna g väärtust, et vaadelda, kuidas muutub sellest jahutusenergia. [10]

1.1.5 Infiltratsioon

Infiltratsioon on välisõhu kontrollimatu liikumine hoonesse läbi pragude ja teiste fassaadi tehtud avade nagu näiteks uske ja aknad. Teistpidise õhuliikumise puhul sisemine õhk liigub hoone seest välisõhu poole. Kõikide hoonete puhul õhuvooluhulk, mis tuleb hoonesse sisse, on võrdne õhuvooluhulgaga, mis liigub hoonest välja. All oleval joonisel (Joonis 1.1) on näha, et kõrgematel hoonetel allkorrustel liigub välisõhk ruumi poole (infiltratsioon) ning ülemistel korrustel välja (eksinfiltratsioon). Madalamatel hoonetel infiltratsiooni külg on tuule poolne külg ja vastas küljel toimub eksinfiltratsioon. [6]



Joonis 1.1 Kõrgema hoone infiltratsioon [6]

Infiltratsioon mängib suurt rolli KVJ süsteemi projekteerimisel, eriti jahutus- ja küttevõimsuse arvutamisel. Infiltratsioon sõltub välisõhu ja siseõhu temperatuuri erinevusest. [6]

1.2 Jahutusvõimsus

Õige projekteerimislahendus tagab jahutussüsteemi õige toimivuse ning madala energia tarbimise ning maksumuse. Tavapärase projekteerimismeetodi puhul KVJ valdkonnas, valitakse JS teatud jahutuskoormusele ning kasutatakse varasemat kogemust. Valitud JS toimivus võib erineda määramatuse tõttu. Tavaline jahutusvõimsuse projekteerimine järgib järgmisi meetodeid: [4]

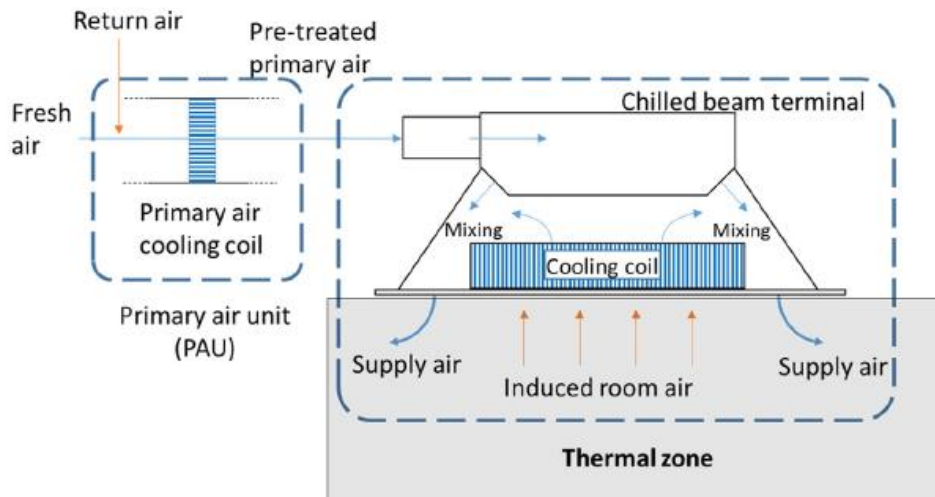
- JS kogu jahutusvõimsus määratakse kindla juhendiga ja eeldatava kliimatingimustega. Jahutuskooormuse määramisel antakse ohutegur, millega võetakse arvesse ebakindlused. [4]
- Seadmete võimsus ja arv on tavaliselt valitud tuginedes kogemustele või kindlaid reegleid kasutades. [4]
- Tagavara seadmed on lisatud selleks, et tagada piisav JV juhul, kui süsteemis peaks tekkima rike. [4]

Lisatud jahutusvõimsus külmajaamale, seoses soojuslisade erinevusest ja sisemise temperatuuride erinevusest, võib viia selleni, et projekteeritud jahutusvõimsus ja külmajaam on üle dimensioneeritud, millega raisatakse energiat. [5]

1.3 Jahutustalad

Jahutustalad koguvad üle maailma aina rohkem populaarsust energia efektiivse jahustehnoloogiaga hoonetel. JT süsteemi puhul on automaatika keeruline, sest peab tagama mitme palgi koos toimivuse. Selle pärast JT süsteem reageerib suhteliselt aeglaselt jahutuskooormuse dünaamikale. Paljud uurimused näitavad, et JP on võimalik hoida kokku 30 % energiat võrreldes tavapärase JS nagu fancoil. All oleval joonisel (Joonis 1.2) on ära toodud JT skeem, kus esimene jahutuspatarei asub ventilatsioonigregaadis, mille funktsioon on tegeleda kogu varjatud jahutuskooormusega ning osaliselt ka ilmse jahutuskooormusega. JT jahutuspatarei tööks on ülejäänud ilmne jahutuskooormus. Selline paigutus jagab ilmse jahutuskooormuse ventilatsioonigregaaadi ja JT oleva patarei vahel ära. Lahendus on vastupidine FC, kus sama jahutuspatarei tööks on ilmne ja varjatud jahutuskooormus. Ventilatsioonigregaaati läbinud õhk antakse läbi jahutuspalgi siseruumi. JT segunemistsoonis tekib madalrõhu ala, mille tulemusena ruumi õhk läbib JT jahutuspatareid. Selle tulemusena on jahutamiseks vajav õhuhulk väiksem ning ventilaator tarvitab vähem energiat võrreldes FC süsteemiga. JT jahutuspatarei kasutavad kõrgemat temperatuuri (13-17 °C) võrreldes tavalise FC süsteemiga (4-7 °C). Kõrgem pealevoolu temperatuur võimaldab külmajaamal töötada energiatõhusamalt. [11]

Suur väljakutse JP süsteemis on kondensaadi tekkimine jahutuspatareil. Samuti tekitab väiksem vooluhulk aeglast reageerimist dünaamilisele jahutuskooormusele, mis viib märkimisväärsele energia ja soojusmugavuse vähenemisele süsteemis. [11] Kuna JT on külmi pindu, siis pinnatemperatuur ei tohi olla madalam, kui kastepunkti temperatuur. Tavaliselt on hoitakse pinnatemperatuur 16-18 °C juures, mis on 3 – 5 °C üle ruumi kastepunkti. [6]



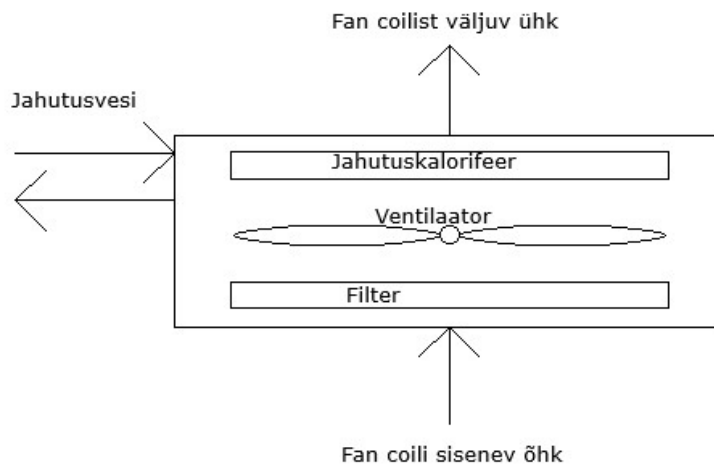
Joonis 1.2 Jahutuspalgi skeem [6]

1.4 Fan coil süsteem

FC süsteem on laialdaselt kasutatel büroohoonetes, elamutes ja kaubanduskeskustes. Kogu energia kasutus päris suur, sest süsteemi kasutatakse intensiivselt. FC on üks ruumijahutusüsteemidest. Struktuuri on võimalik muuta vastavalt olukorrale, näiteks õhuvooluhulga suunda ja kogust on võimalik reguleerida. [12]

FC süsteemi puhul asub igas jahutust vajavas ruumis siseosa ning termostaadid, millega saab kontrollida ruumi temperatuuri. FC koosneb filtrist, ventilaatorist ja jahutuspatareist (Joonis 1.3). Jahutuspatareil on lamell ribidega kalorifeer, mille abil suurendatakse soojusvahetust õhu ja vedeliku vahel. Peale jahutuspatarei läbimist õhk suunatakse tagasi siseruumi. Termostaadi signaal suunatakse edasi automaatika süsteemi, mis reguleerib ventilaatori kiirust ja ventiili avatust. [13], [14]

FCS on kahte varinati: Kahetoru süsteem ja neljatoru süsteem. Neljatoru süsteemi puhul on võimalus, et FC on varustatud korruga nii jahutus- kui ka küttepatareiga. Kahe torusüsteemi korral on üks patarei, töötab vastavalt vajadusele, kas jahutusena või küttena. [14]



Joonis 1.3 Fan coilist töötamise põhimõte [15]

1.5 VAV süsteem

VAV süsteem definitsiooni kohaselt on konditsioneerimissüsteem, mis hoiab teatud temperatuuri või CO₂ taset ventilatsiooni õhuvooluhulkasid muutes. Seetõttu muudavad VAV süsteemid konstantsel temperatuuril õhuvoolu hulkasid, et tagada ruumi kindel temperatuur. [16]

Tavaliselt kuuluvad VAV süsteemi osadesse järgmised seadmed: ventilatsiooniagregaat, mille ventilaatorid on muutuva kiirusega ventilaatorid, jahutus- ja/või küttepatarei, kontrollerid, filtrid, rõhualanduskast, ventilatsiooni torud, VAV klapp või plafoon, mis on ühendatud termostaadiga. Väljatõmbe süsteem koosneb samuti plafooniga, VAV klapist ning torustikust, mis ühendub ventilatsiooniagregaati. [16]

VAV süsteem töötab põhimõttel, kus avatakse ja suletakse klappe vastavalt sellele, kas ruumi on vaja rohkem või vähem külma õhku. Näiteks, kui teatud ruum vajab rohkem jahutust, siis sellisel juhul VAV klapp avaneb ning suurendab õhuvoolu hulka ruumi. Sellisel juhul tekitab rõhu langus kanalis, mis annab ventilaatorile signaali, et on vaja tõsta õhuvoolu hulka. Vastupidisel juhul, kui ruum on liiga külm, siis vähendatakse õhuvooluhulkasid. Klapi sulgedes tõuseb torustikus rõhk, mis omakorda annab ventilaatoritele signaali, et on vaja vähendada õhuvooluhulka. Selle tulemusena vähendatakse õhuvooluhulkasid, millega omakorda säästetakse elektrit ventilaatorite pealt. [16]

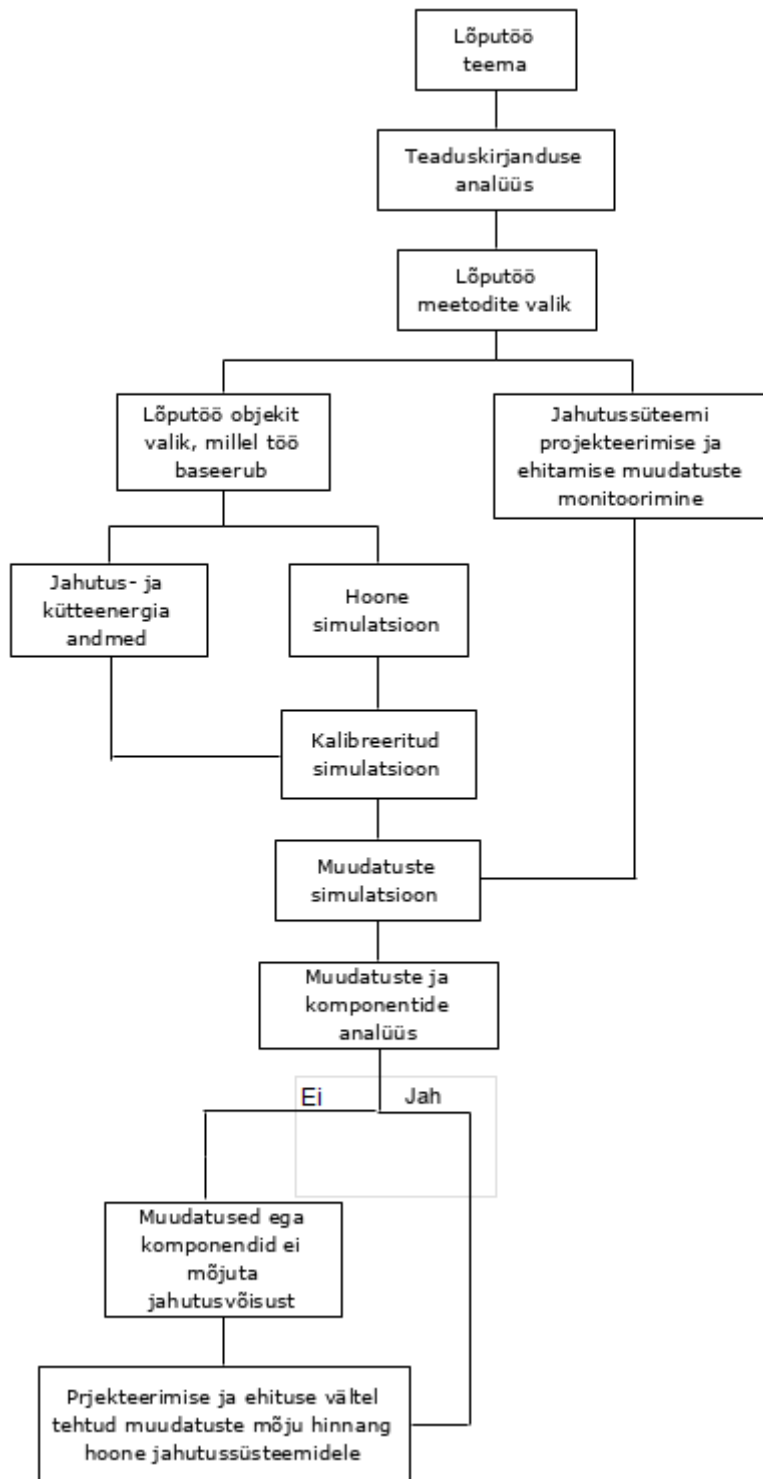
2. MEETODID

Uurimistöö eesmärgiks on projekteerimise ja ehituse käigus tehtud muudatuste mõju hindamine hoone jahutuskoormusele ja maksumusele. Tööd alustati kirjanduse ülevaate tegemisega. Peale teadusartiklite ülevaate hakati valima hooneid, mis sobiksid uurimisobjektideks. Objektide valikul lähtuti sellest, et objektideks oleksid büroohooned.

Peale büroohoonete valikut tehti büroohoonete projektijuhtidega intervjuu. Intervjuu eesmärk oli välja selgitada, milliseid muudatusi on tehtud projekteerimise ja ehitamise käigus. Paralleelselt hoonete muudatuste kaardistamisega, hakati koostama büroohoone simulatsiooni IDA ice programmis. Simulatsioon tehti büroohoonel, mis võeti uurimistöö aluseks. IDA ice programmis tehti algselt 2 simulatsiooni. Esimene simulatsioon tehti bürooandmete põhjal. Teine simulatsioon tehti kalibreerimise eesmärgil. Simulatsiooni kalibreerimiseks kasutati hoone kütte ja jahutuse arvestite poolt mõõdetud jahutus- ja kütteenergiat. Kalibreerimise eesmärgiks oli tulemused saada võimalikult täpseks. Lubatud suurim viga võis olla 15-20 %. kalibreeritud mudel on selleks, et veenduda reaalse tarbimise/võimsuste ja mudeldatud võimsuste vastavust. Lisaks saab kalibreeritud mudelite põhjal hinnata komponentide varieeruvust.

Peale simulatsiooni kalibreerimist alustati muudatuste simulatsioonide tegemist IDA ice arvutusprogrammis. Kõikide muudatuste kohta teostati erinevad mudelid, et välja selgitada, kui palju mõjutavad muudatused jahutusvõimsust. Bürooandmete simulatsioon võeti aluseks muudatuste mõju hindamiseks. Peale muudatuste teostati komponentide võrdlus. Komponentide võrdluste eesmärgiks oli teada saada, kui palju komponendid mõjutavad hoone jahutusvõimsust. Komponentide analüüs tehti seadmete soojuseralduste ja inimeste arvu kohta.

Kui kõik jahutusvõimsuse tulemused oli kätte saadud hakati tulemusi omavahel võrdlema ning analüüsima. Võrdluse alusteks võeti algandmetega tehtud simulatsioon. Peale jahutusvõimsuste erinevust võrreldi ka ehitusmaksumust



Joonis 2.1 Lõputöö vooskeem

2.1 Uurimisobjekti kirjeldus

Käesoleva magistritöö uurimisobjektideks on erinevates büroohonetes teostatud jahutussüsteemide projekteerimise ja ehitamise ajal teostatud muudatused. Büroohonete puhul uuriti, milliseid muudatusi on teostatud jahutussüsteemide projekteerimise ja ehitamise käigus. Selleks, et välja selgitada, milliseid muudatusi on teostatud, uuriti erinevate valmis ehitatud büroohonete jahutussüsteemi projektdokumentatsiooni, võrreldi omavahel esialgseid põhiprojekte, tööprojekt ning teostusdokumentatsiooni. Lisaks intervjueriti ühe peatöövõtu ettevõtte jahutussüsteemide ehitus- ja projekteerimise projektijuhte ja küsiti neilt jahutussüsteemide muudatustööde kohta küsimusi. Intervjuude põhjal selgus, et jahutussüsteemidel on teostatud mitmeid muudatusi. Muudatused on toodud peatükis 2.2.3. Muudatuste simulatsioonid teostati ühe konkreetse büroohoone juures.

Büroohonete valiku puhul lähtuti järgmisest kriteeriumitest. Kõik büroohood olid kõrgemad, kui 5 korrust. Hoonete ruumid jagunevad järgmiselt: koridorid, teenindusalad, puhkealad ja kööginurgad. Üks kriteeriumitest oli, et välisseintest on kaetud akendega ligikaudu 40%, millel varjestus puudub (Tabel 2.1).

Tabel 2.1 Büroohonete keskmised akende osakaalud

Ilmakaar	Osakaal, %
Põhi	52
Ida	22
Lõuna	52
Lääs	59

Hoonete kandekarkassiks on monoliitset raudbetoonist postid, seinad ja vahelaed. Kandvad siseseinad on 200 mm paksusest monoliitbetoonist. Mittekandvate siseseinte materjaliks on kipsplaadid ning helitõke/karkass paksusega 50 mm. Vahelaed on samuti 200 mm paksusest monoliitbetoonist. Hoone katuslae kandekonstruktsiooniks on põhiliselt monoliitne raudbetoon. Välisseinad on puitkonstruktsioonist.



See foto, autor: Tundmatu autor, litsents: CC BY-SA

Joonis 2.2 Illustreeriv foto

2.2 HOONE MODELLEERIMINE

Uurimistöös kasutati hoone modelleerimiseks IDA ICE 4.8 tarkavara. IDA ICE programmi kasutatakse hoone sisekliima kui ka energia kasutus hindamiseks hoones. Tavaliselt kasutatakse programmi ühe või mitme tsooni simuleerimiseks. [17] Kõrval hooned võivad tekitada varju modelleeritavale hoonele. Simuleerimisel kasutatakse Eesti baasaasta kliimafaili ning Eesti 2019 kliimafaili. Eesti baasaasta kliimafaili koostamisel analüüsiti 6 erineva ilmajaama tulemusi 31 aastase perioodi jooksul. [18]

Hoonest koostati mitu erinevat simulatsiooni. Esimene mudel tehti algandmete ja Hoone energiatõhususe arvutus meetodika järgi. Kõikide järgnevate simulatsioonide puhul kasutati samasugust meetodikat, et oleks võimalik tulemusi võrrelda.

Peale eelnevate mudelite koostamist koostati kombinatsioonide simulatsioonid selleks, et võrrelda, kuidas erinevad seadeväärtused mõjutavad jahutusvõimsust. Selleks, et kombinatsioonide mudeleid paremini võrrelda, teostati need lähtudes algandmete simulatsioonist. Arvutusmudeli juures hakati muutma seadmete poolt eralduvat soojuseraldust, inimeste arvu pindala kohta, akna g arvu, jahutustemperatuuri väärtusi ning valgustuse poolt eralduvat soojusenergiat.

Peale eelnevate simulatsioonide koostati ka mudel reaalse jahutusvõimsuse arvutamiseks. Selleks mõõdeti büroohoone poolt tarbitud jahutusenergiat. Kalibreerimise eesmärgiks oli saada tulemused võimalikult ligilähedaseks mõõdetud tulemustele.

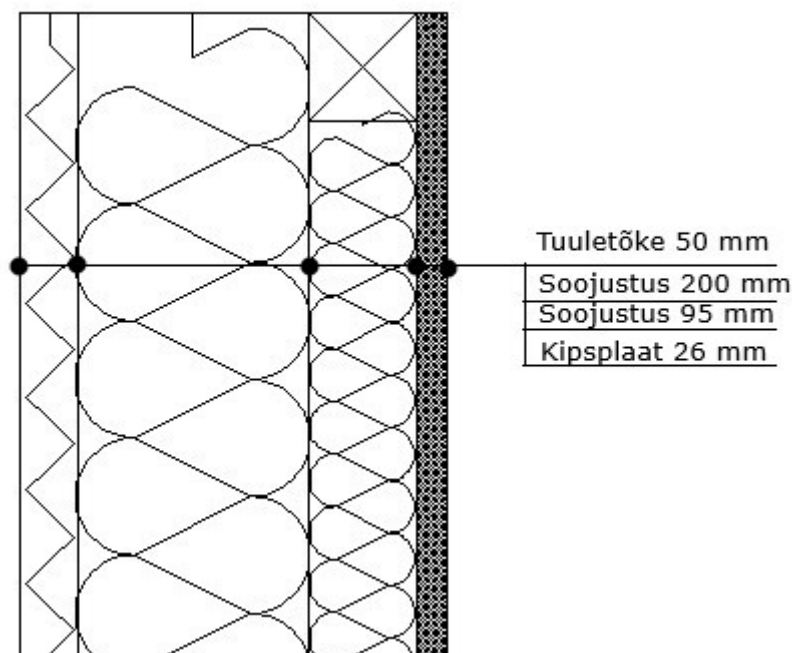
2.2.1 Büroohoone simulatsioon

Büroohoone jahutusvõimsused arutati ühe büroohoone puhul. Simulatsiooni koostamiseks võeti lähteandmed büroohoone andmetest ning Hoone energiatõhususe arvutuse metodikast. Simulatsiooni koostati kokku 89 tsooni. Eraldi tsoonideks jagati kabinetid, avatud kontorid, koosoleku ruumid, WC-d, kööginurgad ja šahtid.

Põhiliste ruumide arvutuslikud keskmised suvised siseõhu temperatuurid on võetud vastavalt Eesti Standardile EVS 844:2004 ning vastavalt lähteülesandele: büroohoones on siseõhu temperatuur nii suvel kui ka talvel $+22^{\circ}\text{C}$. Suvised arvutuslikud välisõhu parameetrid on $+27^{\circ}\text{C}$ ja suhteline õhuniiskus 60%, sest kasutati kondensaadi vaba süsteemi.

2.2.1.1 Konstruktsioon

Välisseinad ning siseseinad on kergkonstruktsioonist. Välisseina soojusjuhtivus on $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (Joonis 2.3). Siseseinad on mineraalvillaga täidetud teraskarkass seinad, mis on kaetud kipsplaatidega, ning nende soojusjuhtivus on $0,59 \text{ W}/\text{m}^2$.



Joonis 2.3 Puitkonstruktsiooni tüüpjoonis

Hoone kandev konstruktsiooniks on monoliitbetoonist kandvad seinad ning postid. Mõnel juhul on kasutatud kandekonstruktsiooni puhul ka monoliitset raudbetoonist talasid. Vahelagede konstruktsiooniks on kasutatud monoliitset raudbetoonist vahelagesid. Vahelagede soojusjuhtivus on $3,57 \text{ W}/\text{m}^2$. Katuslae kandekonstruktsioon

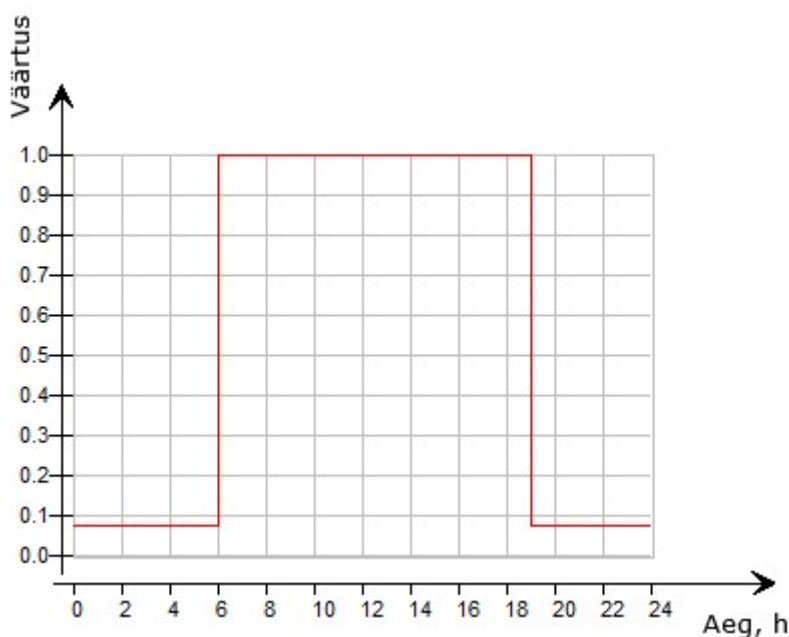
on monoliitne raudbetoon paksusega 200 mm. Katus on soojustatud ning soojusjuhtivus on $0,11 \text{ W/m}^2$.

2.2.1.2 Ventilatsioon

Büroohoones on kasutusel tsentraalne õhuvahetussüsteem. Ventilatsiooni seadmete poolt sisse puhutav temperatuur on $+16 \text{ }^\circ\text{C}$ ja ventilatsiooniagregaadi rootorsoojusvahti kasutegur on võetud 73 %. Arvutustes arvestati ka külmatagastusega. Põhiruumide õhuvahetused on järgnevad:

- Tehnilised ruumid $0,5 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$
- WC 20 l/(s) poti kohta
- Büroo $1,5 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$
- Koosoleku ruumid $4 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$
- Koridor $0,5 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$

WC-de puhul on kasutatud ainult mehhaanilist väljatõmmet, mis ei ole seotud ventilatsiooniagregaadiga. Simulatsioonis kasutatav ventilatsiooniagregaadi ja WC ventilaatorite kasutusprofiil on joonisel (Joonis 2.4). Nädala sees on töötundidel kasutusprofiili väärtused 1,0 ning töövälisel ajal 0,075. Nädalavahetustel ja pühadel on kasutusprofiili väärtuseks kogu aeg 0,075.



Joonis 2.4 Ventilatsiooni kasutusprofiil.

Hoone infiltratsiooni koefitsient on võetud algandmetest. Koefitsiendis on arvesse võetud tuulest tingitud täielikult varjatud hoone infiltratsiooni koefitsient. Infiltratsiooni koefitsient on 50 Pa rõhuerinevuse juures $0,05556 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2 \text{ välispinna kohta)}$.

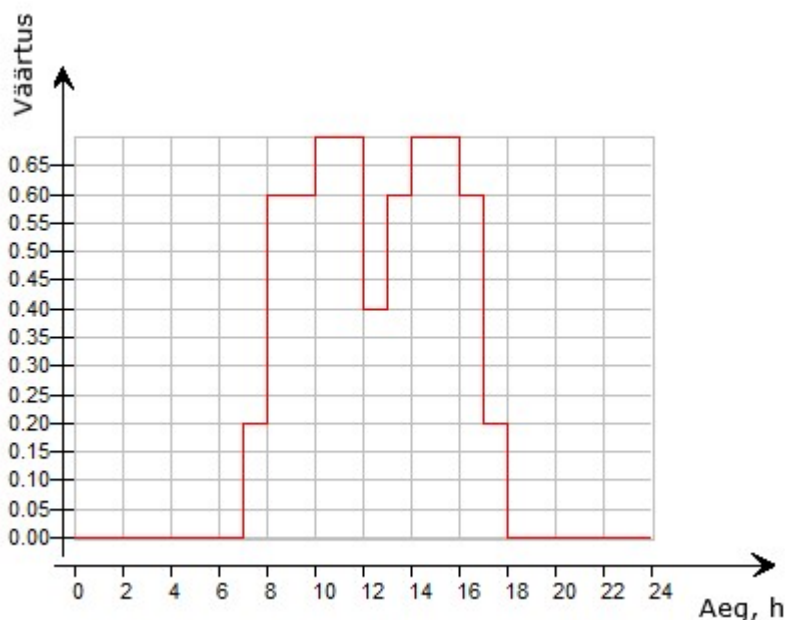
2.2.1.3 Jahutussüsteem

Büroohoonele on ette nähtud üks külmajaam, mis teenindab nii ventilatsiooniagregaati kui ka jahutuspalke. Ventilatsiooniagregaadi jahutuspatarei külmakandjaks on vesi temperatuuriga 7/12 °C. Jahutustalade külmakandjaks on samuti vesi temperatuuriga 14/17 °C. Simulatsioonis on sisestatud tsooni külmakandaja keskmiseks temperatuuriks 15 °C.

Arvutuslikud väliõhu parameetrid jahutusvõimsuse määramiseks on 27 °C ja 60 %. IDA ice programmi sisestades peab veenduma, et muudetakse märjaõhu temperatuur 27 °C ja 60 % juures. Märjaõhu temperatuur võeti Hx diagrammilt ning väärtuseks saadi 21,1 °C.

2.2.1.4 Vabasoojused

Vabasoojuste lisa on võetud „Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika“ määrusest. Kontorihoone tüüpilised soojuslisad on valgustusel 10 W/m² ja seadmetel 12 W/m². Inimese soojuseraldus ühikuks on 1,2 met, millele vastab kogusoojuseraldus 125 W, millest ilmne soojuseraldus on 85 W. Ühe inimese poolt hõivatud põranda pind on 17,0 m² (Tabel 2.2). Inimeste, seadmete kui ka valgustuse puhul kasutatud sama kasutusprofiili (Joonis 2.5). Arvutustes ei ole kasutatud ühtlustamise funktsiooni. [19]



Joonis 2.5 Inimeste, seadmete ja valgustuse kasutusprofiilid.

Tabel 2.2 Vabasoojuslisad ruumides

	Hoone	Inimesed m ² /inim.	Seadmed, W/m ²	Valgustus, W/m ²
1	Büroohoone	17	12	10

2.2.1.5 Aknad

Akende osakaal fassaadist on võetud 43 %. Simulatsiooni tehti läbi 4 mm kirkas klaas akendega, mis on argoon täitega. Klaasiks on 3 kordne klaaspakett argoontäitega. Akende soojajuhtivus $U_{tot}=1,353$ W/m²K. Raami osakaal aknast on $R_{fr}=26$ % ning raami soojusjuhtivus on $U_{fr}=2.0$ W/m²K. Valguse läbivus 74 %, päikese kiirguse otseläbivus 60 % ja päikese energia kogu läbivus 68 %.

2.2.1.6 Külmasillad

Külmasillad mudelile on võetud vaikeväärtusena IDA ice Eesti lisast. Külmasildade väärtused on üle kontrollitud külmasildade kataloogist. Näiteks on külmasildade kataloogis välisseina sisepinna liitekohtade joonsoojusläbivus $\Psi_j=-0,06$ W/(m·K). Vastav väärtus on arvutusmudelil sama. Külmasildade väärtused on toodud all oleval joonisel (Joonile 2.6). [20]



Joonis 2.6 Külmasildade väärtused simulatsioonis

2.2.2 Kalibreerimine

Büroohoones mõõdeti jahutusenergiat ning kütteenergia kulu (Tabel 2.3). Kalibreerimise eesmärgiks oli simulatsiooni poolt tarbitav jahutusenergia saada võimalikult ligilähedaseks tegelikule jahutusenergia tarbimisele ning sama ka kütteenergia puhul. Kalibreeritud simulatsiooni ja hoone jahutus- ja kütteenergia erinevus on 15 kuni 20 %. Simulatsioonis jagati hoone 89-ks tsooniks.

Tabel 2.3 Hoone tarbitud jahutus- ja kütteenergia

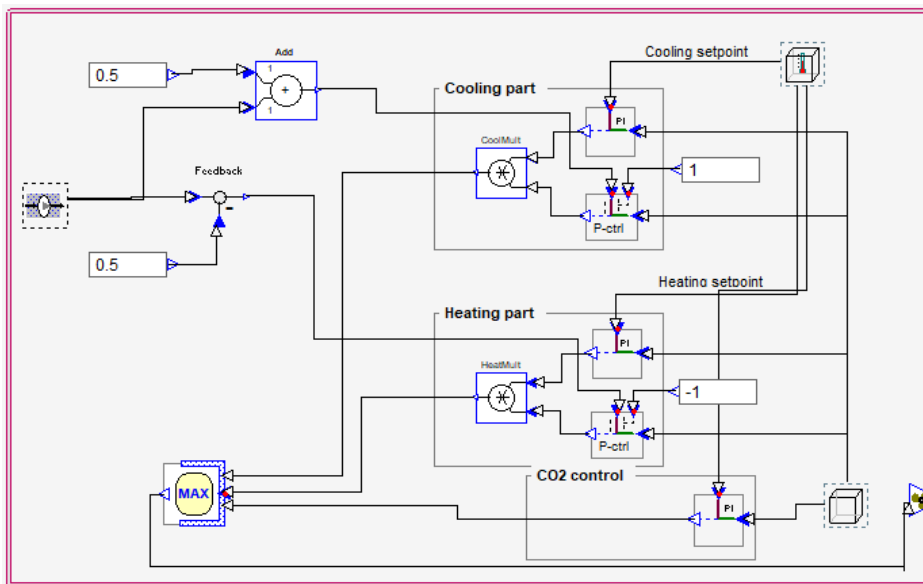
Kuu	Jahutusenergia, kWh/m ²	Kütteenergia, kWh/m ²
Jaanuar	0,43	6,87
Veebruar	0,52	5,22
Märts	0,96	4,74
Aprill	2,09	2,70
Mai	1,96	1,57
Juuni	4,30	0,43
Juuli	2,61	0,48
August	1,57	0,52
September	0,96	1,91
Oktoober	0,61	4,09
November	0,57	6,17
Detsember	0,52	6,78

2.2.2.1 Tehnosüsteemid

Ventilatsiooniagregaadi puhul kasutati sama kasutusprofiili nagu punktis 2.2.1.1. Ventilatsiooni õhuvooluhulgad on veidikene väiksemad kui algandmete põhjal. Külmakandjate temperatuurid on samasugused nagu punktis 2.2.1.4. Ainsa muudatusena muudeti jahutustemperatuuri. Algselt oli aastaringselt jahutustemperatuur 22 °C. Väärtus muudeti 5. augustist kuni 13. septembrini 24 °C juurde.

2.2.2.2 VAV süsteem

Mudelis on kasutatud VAV süsteemi koosoleku ja kontori puhul. Vastavalt Eesti Standardile EVS 844:2004 ning ventilatsiooni vooluhulkadele on võetud maksimaalsed vooluhulgad. Minimaalsed vooluhulgad on 70 % madalamad. VAV klappide juhtimine toimub CO₂ ja temperatuuri anduritega. Kontrollerile on antud CO₂ maksimaalseks väärtuseks 1000 ppm. VAV süsteemi juhtimisalgoritm on toodud joonisel (Joonis 2.7).



Joonis 2.7 VAV juhtimise algoritm

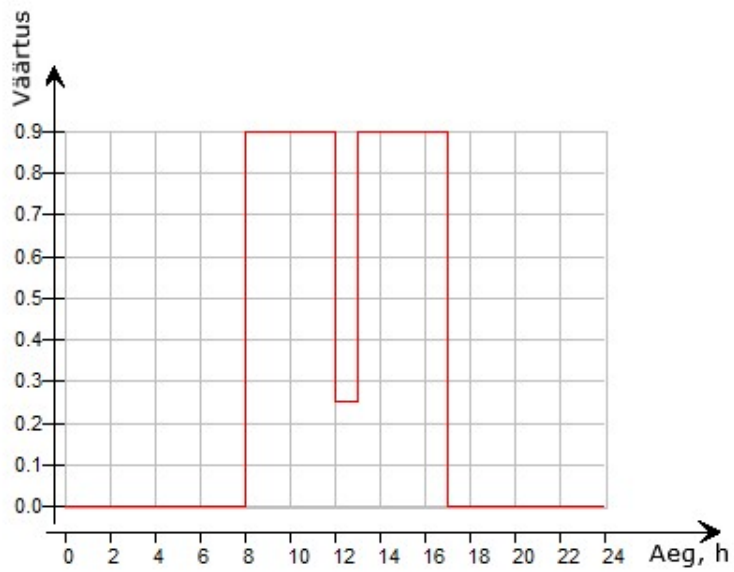
2.2.2.3 Vabasoojused

Vabasoojuste lisa analüüsi plaanidelt, kuhu oli jahutus projekteeritud. Plaanide pealt võeti ruumide töökohtade arvu. Inimeste arvuks arvestati, et üks töökoht võrdub ühe inimesega. Inimese kohta võeti seadmete soojuslisaks nõupidamisruumis 50 W ja kabinetis 80 W. Valgustuse poolt lisanduv soojust võeti 10 W/m² kohta [19]. Vabasoojuste lisad on toodud tabelis (Tabel 2.4). Teistes ruumides arvestati vabasoojuste lisa järgnevalt: seadmed 12 W/m² ja valgustus 10 W/m². Inimese poolt hõivatud pindala on 17 m² ning inimese soojuseraldus ühikuks on 1,2 met, millele vastab kogusoojuseraldus 125 W, millest ilmne soojuseraldus on 85 W [19].

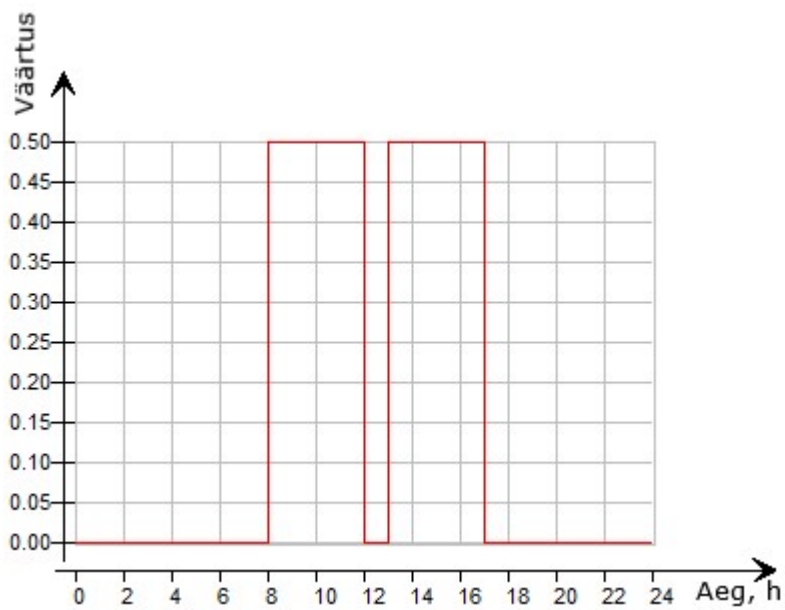
Tabel 2.4 Kalibreeritud simulatsiooni vabasoojuste lisad ruumides

Jrk nr.	Inimeste arv, inim./m ²	Seadmed, W/m ²	Valgustus, W/m ²
1	11	5	10
2	2	26	10
3	2	29	10
4	2	28	10
5	8	10	10
6	8	11	10
7	7	11	10
8	13	6	10
9	2	24	10
10	2	22	10
11	7	12	10
12	20	4	10
13	20	4	10
14	26	3	10
15	20	4	10
16	6	12	10
17	20	4	10
18	20	4	10
19	18	4	10
20	7	11	10
21	20	4	10
22	2	20	10
23	18	4	10
24	7	11	10
25	20	4	10
26	2	20	10
27	7	0	10
28	12	7	10
29	16	12	10
30	13	12	10

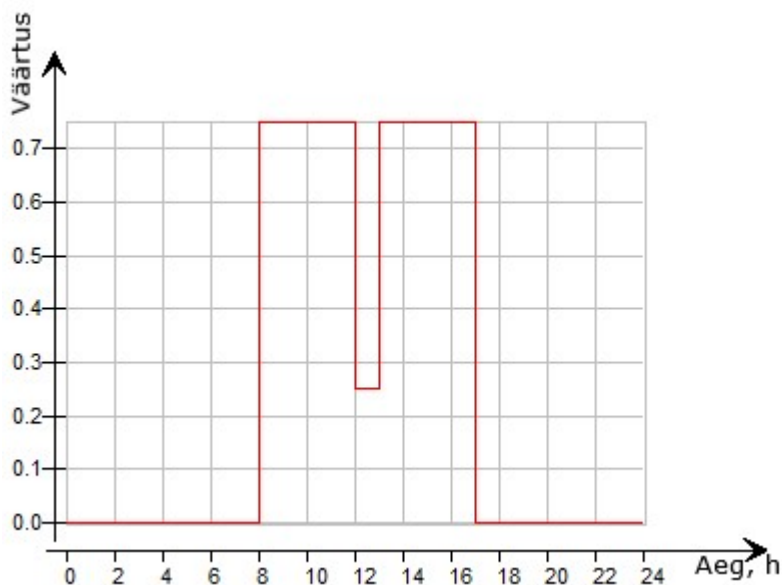
Kasutusprofiilide puhul on võimalikult täpselt jäljendatud reaalselt olukorda. Selleks, et jäljendada reaalselt olukorda kasutati kasutusprofiilide ühtlustamist. Ühtlustamise parameetriks võeti 3 ehk 36 minuti jooksul saavutatakse kasutusprofiili väärtus. Büroo ja kabinettide inimeste, seadmete ja valgustuse kasutusprofiilid on toodud joonistel (Joonis 2.8, 2.9 ja 2.10). Nädalavahetustel ja pühadel ruume ei kasutata ehk kasutusprofiilis on kõik väärtused võrdsed nulliga. Teistes ruumides jäeti kasutusprofiilid samaks büroohoone simulatsiooni omadega (peatükk 2.2.1.4).



Joonis 2.8 Kabineti kasutusprofiil 1. jaanuar kuni 14. juuni ning 15. september kuni 31. detsember.



Joonis 2.9 Kabineti kasutusprofiil 15. juuni ning 14. september.



Joonis 2.10 Nõupidamisruumide kasutusprofiil 1. jaanuar kuni 31. detsember,

2.2.2.4 Aknad

Hoone fassaadis moodustavad 43 % aknad. Kalibreeritavale mudelile puhul kasutati päikesekaitsega aknaid. Akende soojusjuhtivus on $U_{tot}=0,79 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Raami osakaal aknast on $R_{fr}=26 \%$ ning raami soojusjuhtivus on $U_{fr}=1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$. Valguse läbivus 59 %, päikese kiirguse otseläbivus 30 % ja päikese energia kogu läbivus 38 %.

2.2.2.5 Infiltratsioon

Infiltratsiooni koefitsiendi määramiseks kasutati büroohoone õhuleke testi väärtust. Testi tulemuseks oli õhulekke arv 50Pa juures $q_{50}=2,366 \text{ (m}^3/\text{h/m}^2)$. Infiltratsiooni õhuvooluhulk määrati valemiga (1) ning õhuvooluhulgaks on $0,158 \text{ (m}^3/\text{h/m}^2)$,

$$q_i = \frac{q_{50}}{x} \quad (1) \quad [19]$$

,kus

q_i – infiltratsiooni õhuvooluhulk ($\text{m}^3/\text{h/m}^2$)

q_{50} – õhulekke arv ($\text{m}^3/\text{h/m}^2$)

x – tegur, mis on viie- või enamakorruselisel hoonel 15

2.2.3 Muudetud arvutussimulatsioonid

Simulatsioonide tegemisel võeti arvesse muudatusi, mida tehti projekteerimise ja ehitamise käigus, mis on toodu peatükis 2.1. Muudatuste puhul väljuti antud hoone raamistikust. Simulatsioonide eesmärk on teada saada, kui palju mõjutavad erinevad muutused jahutusvõimsust. Kõik muutused on tehtud büroohoone simulatsiooni peal. Selleks koostati kokku 9 erinevat mudelit erinevate muudatuste kohta (Tabel 2.5).

Tabel 2.5 Muudatuste simulatsioonid

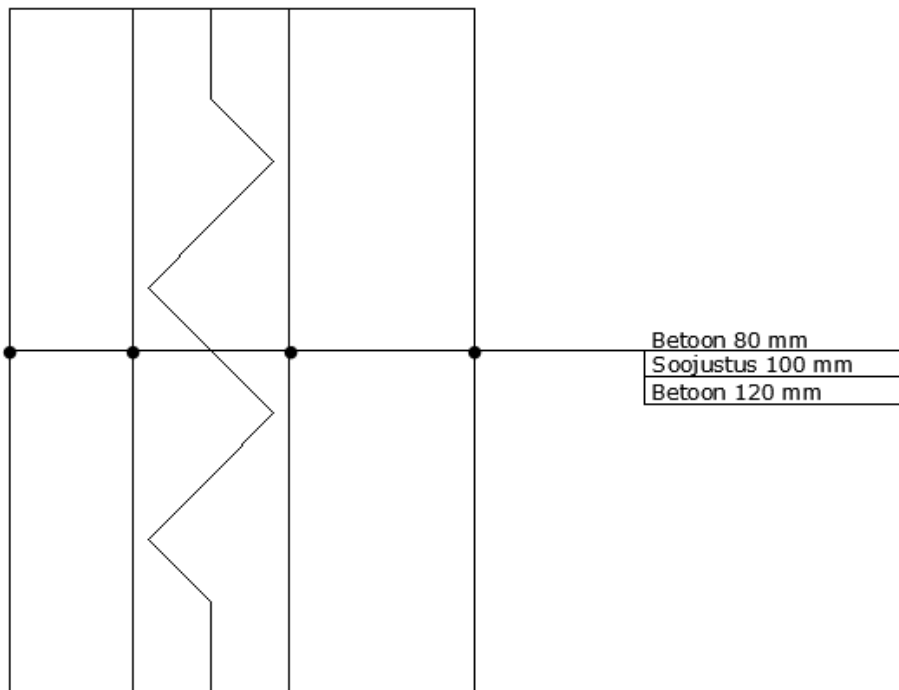
Jrk nr.	Simuleeritud mudelid
1	Muudetud aknad
2	Jahutustemperatuur 25 °C
3	Konstruktiooni muutus
4	Fan coil süsteem
5	VAV süsteem koosolekud
6	VAV süsteem koosolekud + kabinetid
7	Plaaniline muutus
8	Plaaniline muudatus varjetuseta
9	Kalibreeritud simulatsioon

Akende muudatuse juures muudeti 3 kordse kirka klaasiga aknad päiksekattega akendeks. Muutused on toodud tabelis (Tabel 2.6).

Tabel 2.6 Akende tehnilised andmed

Klaas	U_{tot} , (W/m ² K)	Valguse läbivus, %	Päikese kiirguse otseläbivus, %	Päikese energia kogu läbivus, %
Kolmekordne kirkas	1,1	74	58	76
Päikese kaitsega	0,79	59	30	38

Algandmete puhul oli jahutustemperatuur 22 °C. Järgneva muudatuse puhul tõsteti jahutustemperatuur 25 °C peale. Konstruktiooni muutuse käigus muudeti välisseina puitkarkass tarind betoon tarindiks. Uus konstruktsiooni on toodud all oleval joonisel (Joonisel 2.11).



Joonis 2.11 Betoon konstruktsioon

Järgmisena teostati simulatsioon Fan coil süsteemiga. Süsteemi puhul olid kõik sisestatavad parameetrid samasugused nagu algandmete puhul. Ainsana erines jahutusvee temperatuuri graafikut, mis alanes 7/12 °C peale. IDA ice programmis määrati keskmine külmakandja temperatuur 9 °C.

Viienda muudatusena lisati jahutustaladele juurde VAV klapid koosoleku ruumidele. Kuuenda muutusena lisati VAV klapid ka kabinetidele. Simulatsioonis kasutati VAV algoritmi, mis on samasugune nagu punktis 2.2.2.3.

Seitsmenda muutusena muudeti plaanilist lahendust. 1. korruse puhul muudeti pooled büroopinnad üheks suureks müügipinnaks. 2. korrusel suurendati põhjaküljel oleva kabineti suurus kaks korda suuremaks ning lõunaküljel olevatel kahe kabinetil eemaldati vahesein. Peale selle muudeti võrreldes algse lahendusega 2. – 5. korruse kööginurgad ja suitsunurk ühiseks ruumiks. 7. korruse bürooruumid muudeti ümber puhketoaks ning spordikompleksiks. Kaheksas muudatus tehti läbi olukorras, kui eemaldati seitsmenda muudatuse juures ka kõrval paiknevad hooned.

Viimase simulatsioonina tehti läbi jahutusarvutus kalibreeritud mudeliga, kus kõik sisestatud parameetrid jäid samaks, mis kalibreerimise simulatsiooni juures (Peatükk 2.2.2). Ainsana muudeti Eesti 2019 kliimafail Eesti baasaasta kliimafailiks. Muudatuse eesmärgiks oli see, et võimaldas analüüsida tegelikku jahutusvõimsust muudatuste omadega.

2.2.4 Komponentide analüüs

Komponentide analüüsil hakati büroohoone simulatsiooni juures muutma seadmete poolt eralduvat soojuseraldust, inimeste arvu pindala kohta, akna g arvu, jahutustemperatuuri väärtusi ning valgustuse poolt eralduvat soojusenergiat. Teostatud komponentide analüüsi erinevad on toodud tabelis (Tabel 2.7).

Tabel 2.7 Moodustatud komponendid

Jrk nr.	Seadmete soojuseraldused
1	Inimeste arv pindala ühiku kohta
2	Jahutustemperatuurid
3	Valgustuse soojuseraldus
4	Akna g arv

Esimese komponendina teostati seadmete soojuseralduste simulatsioonid. Mudelid koostati järgnevate soojuseralduste juures: 5 W/m², 10 W/m², 12 W/m², 15 W/m² ja 25 W/m². Järgmise komponendina uuriti, kuidas muutub JV, kui muuta inimeste arvu pindalaühiku kohta. Ühe inimese poolt hõivatavad pindalad olid 10 m², 15 m², 17 m² ja 25 m². Kolmandana võrreldi jahutustemperatuuride väärtusi, milleks olid 22 °C, 23 °C, 24 °C ja 25 °C. Eelviimase variandina vaadeldi valgustuste soojuseralduse mõju. Valgustite soojuseraldus on LED lampide puhul 5W/m² ning 10 W/m², kui luminofoorlamdi on ripplakke monteeritud. Valgustite soojuslisa on 15 W/m², kui LED lamp on lakke riputatud. [21] Kõige viimase teostati muudatused akende g arvu juures. Akende väärtused on näha tabelis (Tabel 2.8) ning on võetud IDA ice programmist.

Tabel 2.8 Akende väärtused

Aknad	U _{tot} , W/m ² ·K	G, -	T, Päikese kiirguse otseläbivus, %	T _{vis} , Päikese energia kogu läbivus, %
Ühekordne kirkas klaas	5,80	0,85	83	90
Kolmekordne kirkas klaas	1,10	0,74	58	76
Päikese kaitsega	0,95	0,46	38	84

2.2.5 Finantsarvutused

Finantsarvutuste eesmärk on välja selgitada, kui palju on erinevate jahutuskoormuste juures ehitusmaksumus. Ehitusmaksumuse hindamiseks on analüüsitud mitme erinevate büroohoone jahutussüsteemide ehitusmaksumusi. Ehitusmaksumus arvutati välja kolmele erinevale süsteemile: jahutustalad, FC ja VAV.

Jahutustalade puhul on hinda arvestatud külmamasin, jahutustorustik jahutustaladele kui ka ventilatsiooniagregaadile ning jahutustaladega. VAV puhul on sisse arvestatud jahutustalad, jahutustorustik, VAV klapid ning kontrollid. FC süsteemi korral on arvestatud jahutustorustiku maksumusega kui ka ventilatsiooni selle osaga, mis muutub jahutustalade asendamisel fan coilidega. FCS puhul muutub kallimaks ventilatsioon, kuhu lisatakse plafoonide ja rõhualanduskastide maksumus.

Teades mitme erineva hoone kogu jahutusvõimsust ning pindala on võimalik ehitusmaksumuse hind välja selgitada. Ehitusmaksumus arvutati pindala ühiku peale. Büroohoone simulatsiooni tulemused võeti jahutusvõimsuse arvutus aluseks.

3. TULEMUSED

Tulemustes on toodud ruumide jahutusvõimsused hoone üldpindala kohta. Tulemustes ei ole arvestatud üheaegsusega ehk on liidetud kokku kõikide ruumide JV maksimaalsed väärtused. Ventilatsioonagregaadi ja külmajaama JV puhul on arvestatud üheaegsusega ja arvutatud hoone üldpindala peale.

3.1 Jahutusvõimsused erinevate muudatuste puhul

Selleks, et selgitada välja, kui palju muudavad ruumide, ventilatsiooniagregaadi ning külmajaama jahutusvõimsused, koostati 11 erinevat mudelit, mida võrreldi büroohoone mudeliga (Tabel 3.1). Muudatuste mõju jahutusvõimsusele on näha joonisel (Joonis 3.3). Büroohoone mudeli puhul on ruumide jahutusvõimsus kokku 38 W/m². Ventilatsioonagregaadi JV on 31 W/m².

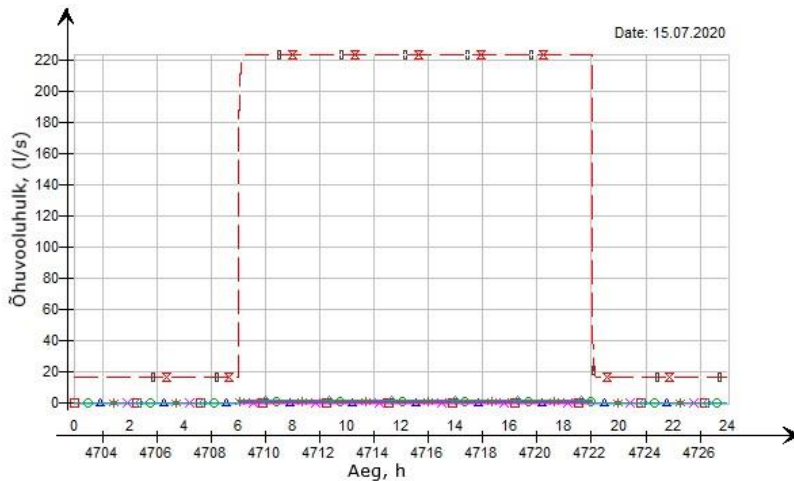
Muudetud akende simulatsiooni puhul kasutati päikesekaitsega aknaid. Päikesekaitse vähendas jahutusvõimsust ruumide puhul 5 W/m² kohta. Jahutusvõimsuse vähenemine on ootuspärane, sest päikesekate puhul siseneb hoonesse vähem päikese energiat. Kasutades välisõhu parameetrit 27 °C ja 50 %, siis sellisel juhul jääb siseruumide JV kokku samaks, aga ventilatsiooni oma väheneb 6 W/m² võrra.

Kõige vähem mõjutasid jahutussüsteemide JV plaaniline muudatus ja konstruktsiooniline muutus. Plaaniline muudatus ei mõjutanud jahutusvõimsust ning konstruktsiooniline muutus vähendas jahutusvõimsust 4 W/m². Plaanilise muutuse puhul vähenes ventilatsiooni JV 4 W/m² kohta, sest ruumide otstarbed muutusid. Külmajaama JV vähenes plaanilise muutuse korral samuti kokku 4 W/m².

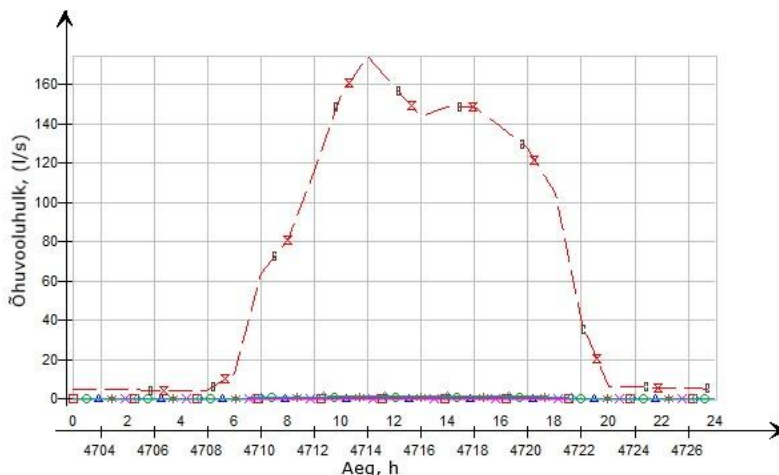
Kõige rohkem vähendasid JV hoones jahutustemperatuuri tõstmine 25 °C peale ning akende muutmine. Jahutustemperatuuri muutmisel vähenes JV 10 W/m² kohta. Akende vahetamisel päikese kaitsega akna vastu vähenes JV 5 W/m². Kõige rohkem suurendas JV plaanilise muutuse simulatsioon, kus ei ole arvestatud kõrval asuvate hoonetega. Võrreldes büroohoone simulatsiooni tulemusega suurenes ruumide JV 16 W/m². Ventilatsioonagregaadi JV on sarnane plaanilise muutuse tulemusega, erinevus oli kokku 2 W/m².

Muutes jahutussüsteem FC peale suurenes ruumide JV sellest 8 W/m². Paigaldades JT juurde ka VAV klapid, siis ruumi JV tõusis 6 W/m², aga ventilatsiooni JV vähenes 9 W/m².

Kasutades peale jahutustalade ka VAV süsteemi koosolekute ruumides, siis sellest suurenes ruumi jahutusvõimsus kokku 1 W/m^2 ning ventilatsiooni jahutuspatarei JV vähenes 4 W/m^2 . Lisades VAV klapid ka kabinetitesse, siis sellest tõusis ruumi JV 6 W/m^2 , aga ventilatsiooniagregaadi JV vähenes 9 W/m^2 , sest õhuvooluhulgad on väiksemad võrreldes algandmetega (Joonis 3.1 ja Joonis 3.2).

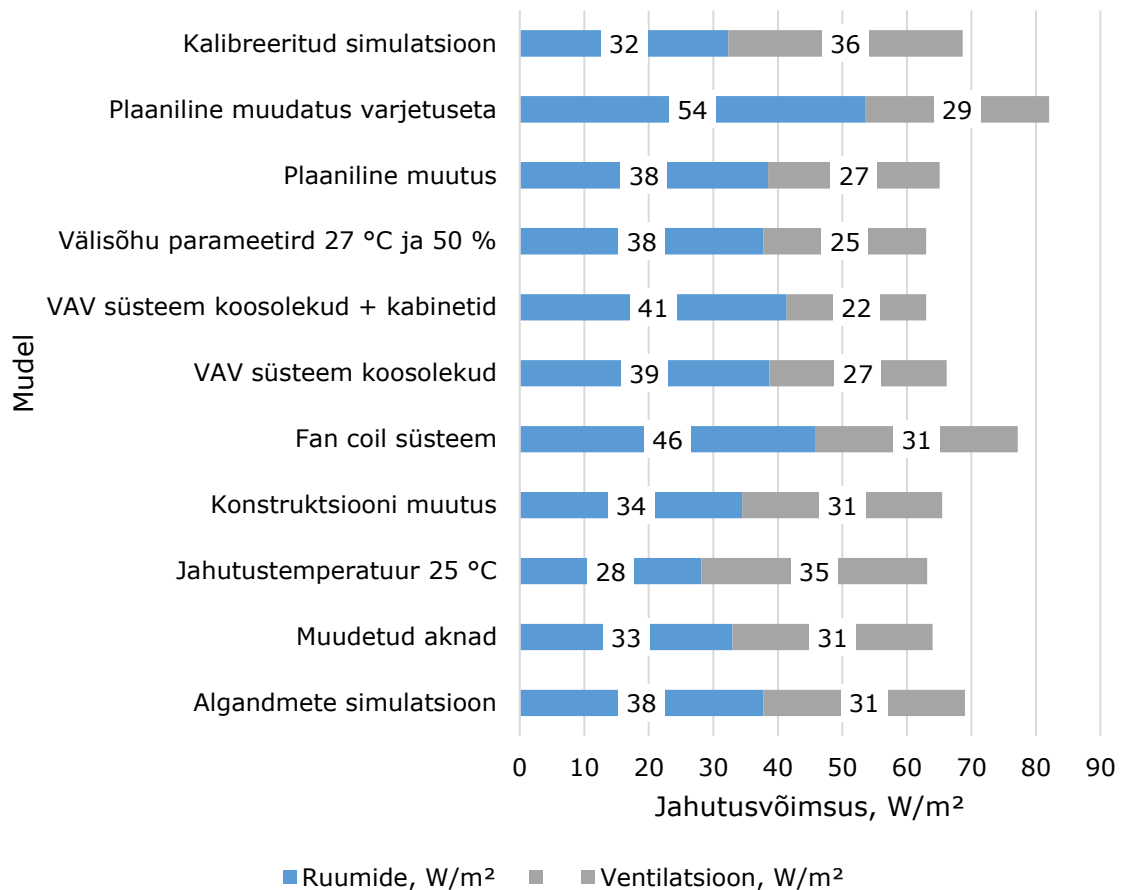


Joonis 3.1 Kontori õhuvooluhulk algandmete juures



Joonis 3.2 Kontori õhuvooluhulk VAV süsteemi puhul

Kalibreeritud simulatsiooni juures on ventilatsiooniagregaadi JV kõige suurem, sest ventilatsiooni õhuvooluhulgad on suuremad kui algandmete puhul. Ruumide JV on väiksem 11 W/m^2 . Ruumide JV on kõige rohkem mõjutanud inimeste arvud, seadmete soojuseralduste kui ka akent iseloomustavate väärtuste erinevus. Hoone JV kokku on sarnane algandmete omadega, mis on 1 W/m^2 väiksem.



Joonis 3.3 Muudatuste mõju summaarsele jahutusvõimsusele

Muudatuste mõju ruumide JV on toodud all oleval joonisel (Joonis 3.4). Jooniselt on näha kui palju mõjutavad erinevad tegurid konkreetse ruumi JV. Rohelise joonega on tähistatud kõige minimaalsemad tulemused, mis on saadud jahutustemperatuuri muutmisel 25 ° peale. Musta joonega on tähistatud büroohoone simulatsiooni tulemused, millega võrreldaks ruumide JV. Kõige suuremaid ruumi JV tähistab oranž joon, mis on saadud FC süsteemi mudeliga.

Jooniselt on selgelt näha, et muudatused mõjutava väga palju ruumi JV. Ruum nr. 6 puhul ei ole jahutust üldse vaja, kui JV määramiseks on kasutatud jahutustemperatuuri 25 °C. Bürooandmete puhul on ruumi JV 4 W/m². Ruumide 1, 2,3,4 ja 5 puhul muutub ruumide JV märgatavalt. Kõige rohkem erineb JV ruumi number 5 puhul, kus JV varieerub vahemikus 133 W/m² kuni 204 W/m².

Järgmisena erineb JV ruumides 10, 14, 18 ja 22. Ruumide puhul saab välja tuua, et büroohoone mudel on ligilähedane maksimaalsele väärtusele. Teiste puhul on büroohoone simulatsiooni jahutusvõimsused suhteliselt keskel. Nendest ruumidest on kõige suurema erinevusega ruum 22, kus ruumi JV jääb 0 ja 53 W/m² vahele. Ruumid

8, 9, 12, 13, 16, 17, 20, 21, 24 ja 25 puhul on maksimaalse ja minimaalse JV vahe kõige väiksem, milleks on 13 W/m^2 . Kõik nimetatud ruumid asuvad põhjapoolses hoone osas.

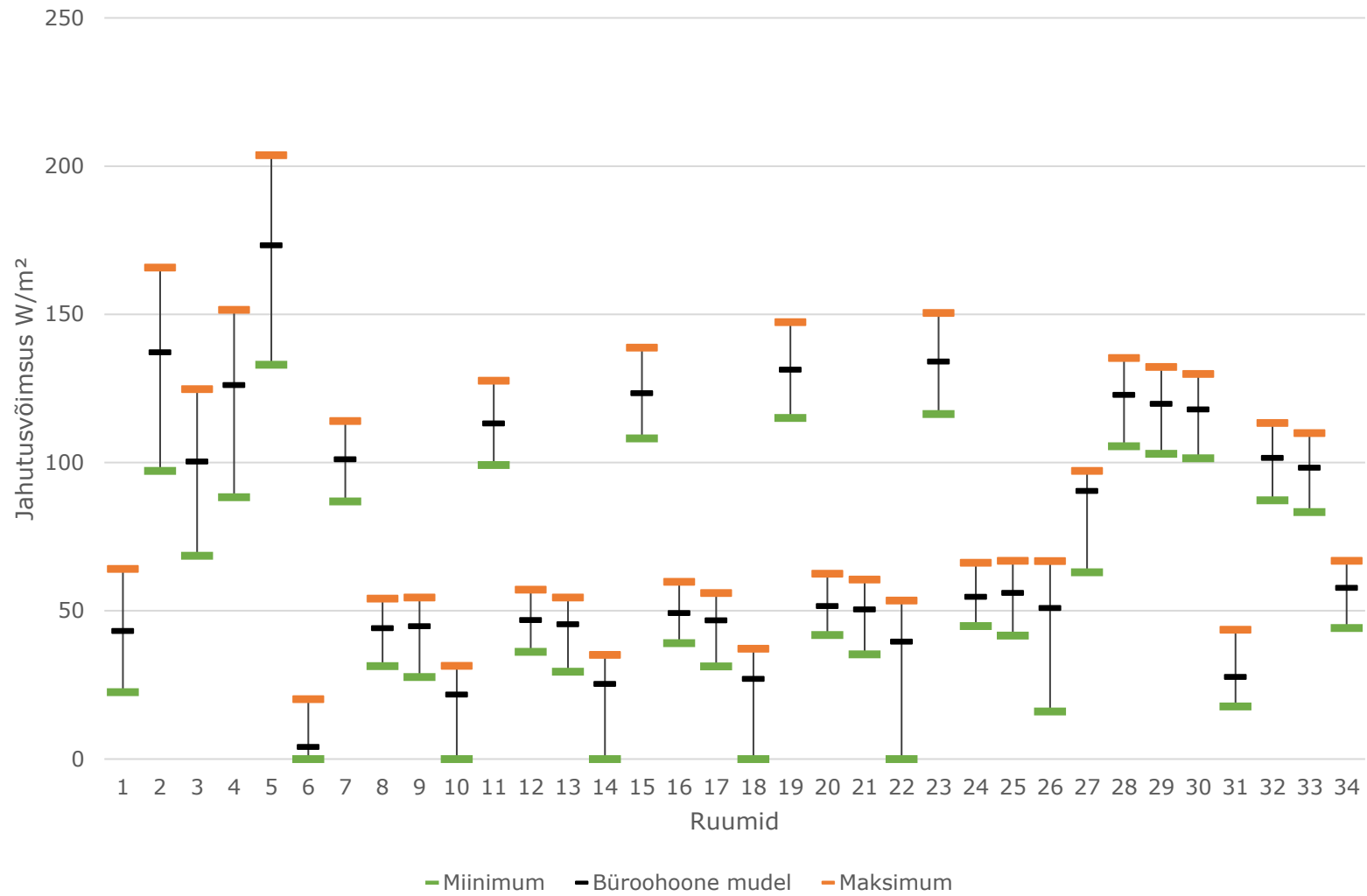
Plaanilise muutuse JV võrreldi kalibreeritud JV tulemustega ning olukorraga, kus ei ole arvestatud kõrvalhoonetega (Joonis 3.5). Joonisel on näha, kuidas ruumide JV, mis on arvutatud kalibreeritud ja plaanilise muudatuse mudeli põhjal, on paljude ruumide JV sarnased, näiteks ruumi 3, 7, 5, 8, 10, 15, 21 ja 22. Ruumidel 22 ja 29 on JV plaanilise muudatuse puhul sarnane maksimaalsega. Kõige rohkem erinevad plaanilise ja kalibreeritud mudeli tulemused ruumides 8, 15, 21 ja 25. Kõige suurem vahe ruumi JV on ruumis 8, mille väärtuseks on 11 W/m^2 . Kui jätta modelleerimisel arvestamata kõrval paiknevad hooned, siis sellest suureneb ruumide JV hüppeliselt. Kohati erineb minimaalse ja maksimaalse ruumi JV vahe 104 W/m^2 .

Tulemused näitavad, et igasugused muudatused hoone tehnosüsteemides, konstruktsioonis või arhitektuuris mõjutavad hoone JV. Tulemustest tuleb välja, et kõige rohkem mõjutab hoone JV jahutustemperatuuri tõstmine. Jahutustemperatuuri tõstes on vaja hoone mahajahutamiseks vähem külmajaam võimsust, milleks oli 68 W/m^2 . Üks suurimaid JV alandajatest oli ka akna muutmine.

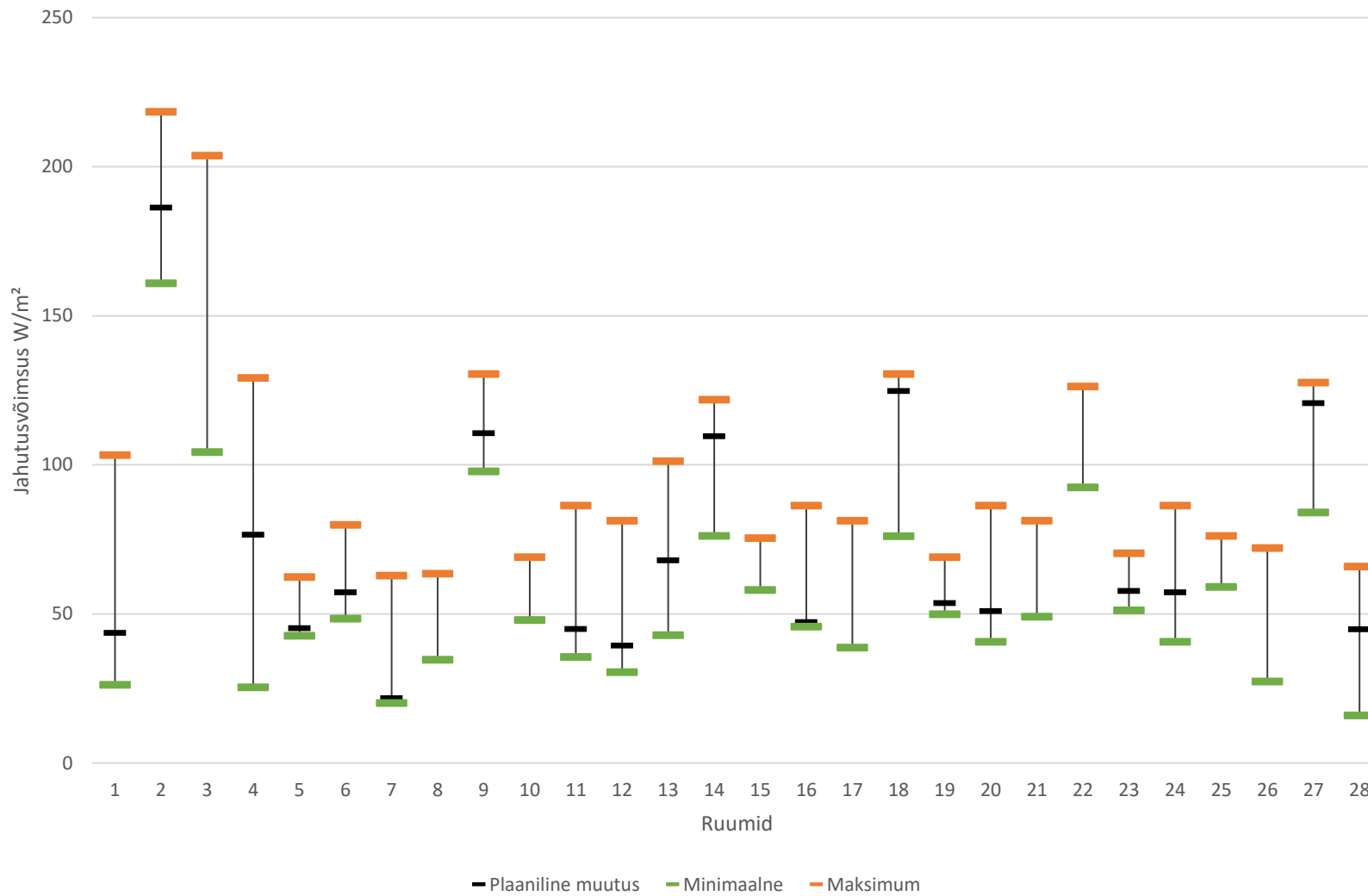
Suhteliselt sarnaseks jäid JV konstruktsiooni ja plaanilise muutuse korral. Konstruktsiooni puhul muutus ruumi soojusmahtuvus. Betoonil on suurem soojusmahtuvus kui kergkonstruktsioonil, mille tulemusena maksimaalne jahutusvõimsus saavutatakse pikema aja möödudes. Plaanilise lahenduse muutmisel muudeti ruumide suuruseid, mis ei avaldanud suurt mõju ruumide JV. Ventilatsiooni puhul on vastupidi, kus ruumide muutmine mõjutab õhuvooluhulkasid. Muutes kabinetid, mille õhuvooluhulk on $1,5 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$, koosolekute ruumiks, mille õhuvooluhulk on $4 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$, siis ventilatsiooni JV suureneb õhuvooluhulkade kasvamisest.

Fancoil süsteemi ning VAV süsteemide puhul ruumide JV suurenevad. Fancoil süsteemi puhul tõuseb Külmajaama JV sellepärast, et külmakandja temperatuurid on madalamad. VAV puhul on näha ruumide tulemustest, et õhuvooluhulgad ei suurene üldse ühtlase ventilatsiooni süsteemi puhul. Selle tulemusena jahutatakse ruumi vähem maha selliseks olukorraks, kui tekib vajadus maksimaalseks jahutusvõimsuseks.

Kõrval hooned simulatsioonis mitte arvestades on JV palju suuremad kui büroohoone simulatsiooniga. Kui ei ole arvestatud projekteerimisel kõrval hoonetega, siis antud simulatsiooni näitel suurenes ruumi JV ruumis 30 % ning külmamasina võimsus 17%. Sellised JV suurenemised mängivad olulist rolli ehitusmaksumuses.

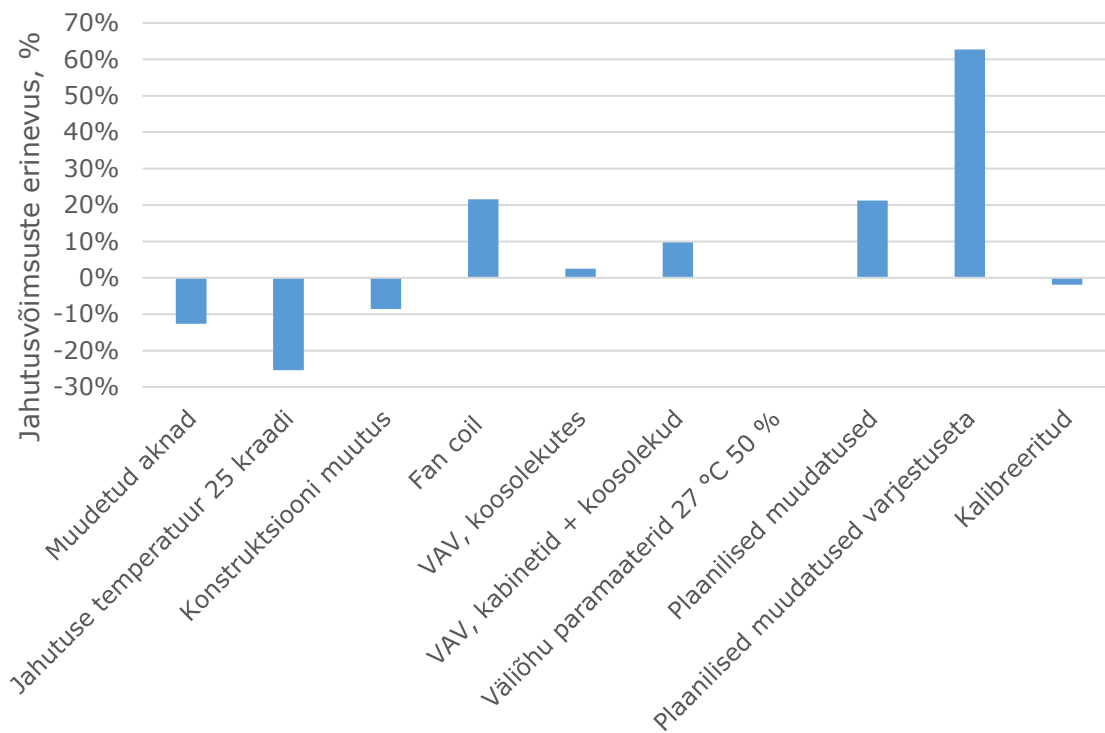


Joonis 3.4 Ruumide jahutusvõimsuse muutus



Joonis 3.5 Plaanilise muutuse ruumide jahutusvõimsuse erinevused

Üldiselt protsendiliselt muutub kõikide ruumide jahutusvõimsus erinevatel muudatustel erinevalt. Jooniselt (Joonis 3.6) on näha, et enamus muudatusi muudab JV suhteliselt palju. Plaaniline muudatus ilma varjestus suurendab 63 %. Kõige vähem vähendab JV akende muutmise, mille tulemusena langeb JV 25 %.



Joonis 3.6 Ruumide kogu jahutusvõimsuse erinevus büroo simulatsiooniga võrreldes

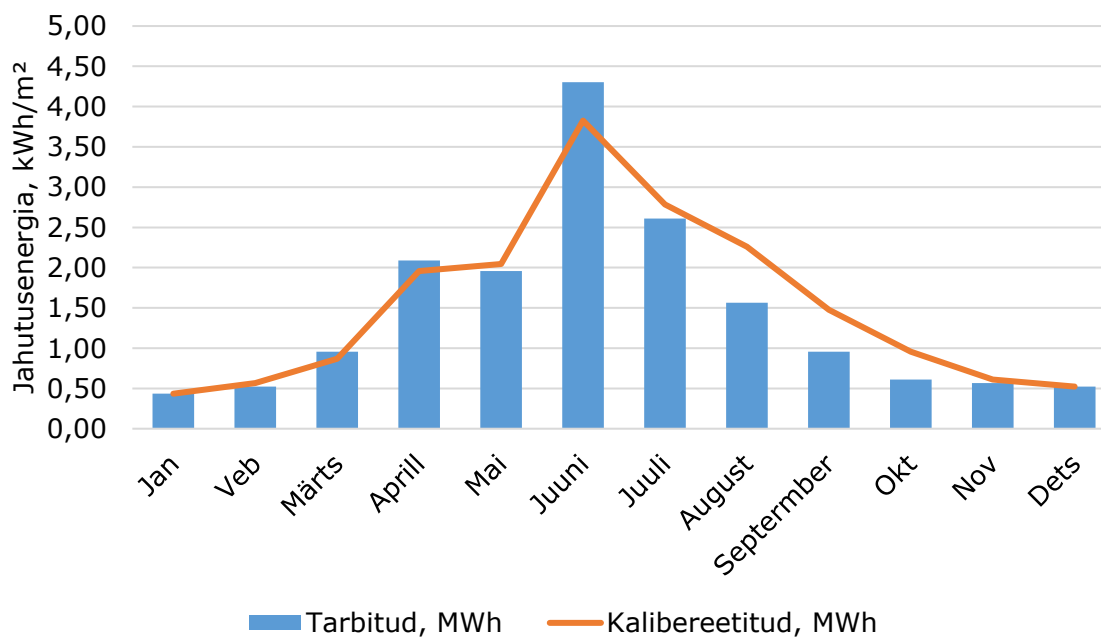
3.2 Jahutusenergia kalibreerimine

Mudeli kalibreerimisel on eesmärgiks saada võimalikult ligilähedased tulemused tarbitud jahutusenergiale ning peale kalibreerimist jahutusvõimsuse arvutamine. Kalibreerimistulemused saab jagada kahte etappi:

- I etapp: jahutustemperatuur on aastaringselt 22 °C
- II etapp: jahutustemperatuur on 5. august kuni 13. september 25 °C

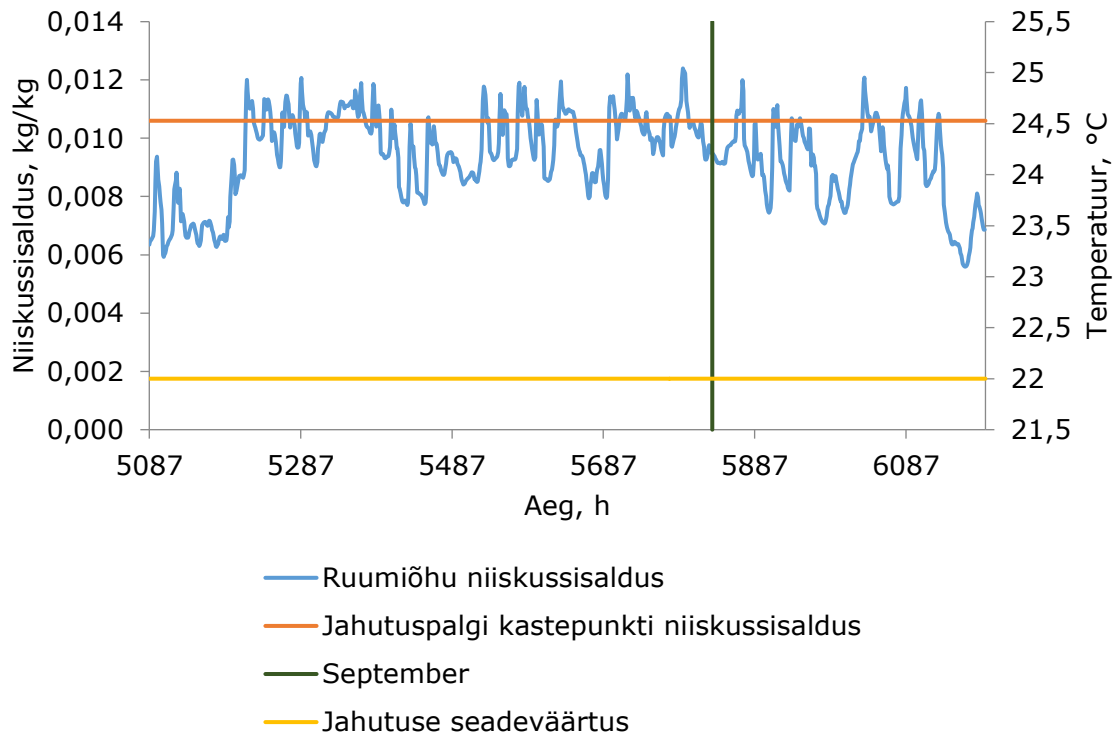
I etapi tulemused olid suhteliselt sarnased tarbituga jahutusenergiaga (Joonis 3.7). Eesmärgiks oli saada kõik tulemused 15-20 % sisse. Jaanuarist kuni mai kuuni oli tulemuste erinevused maksimaalselt 8 %. Näiteks aprilli kuus oli tarbitud jahutusenergia 2,09 kWh/m² ning kalibreeritud simulatsiooni tulemus samuti 2,09 kWh/m².

Juuni kuus oli tarbitud JE ja kalibreeritud simulatsiooni JE vahe suurem, aga jäi 15 % sisse. Tarbimine juuni kuus oli 4,30 kWh/m² ja arvutusmodeli väärtus vastavalt 3,83 kWh/m². Kõige suuremad erinevused olid JE tarbimistes augusti ja septembri kuu jooksul. Augusti kuus oli erinevus 44 %. Tarbitud ja simuleeritud tulemused olid vastavalt 1,57 kWh/m² ja 2,26 kWh/m². Septembri kuus oli kahe tulemuse vahelised erinevused kõige suuremad. Tarbitud JE oli 0,96 kWh/m² ja simulatsiooni tulemus oli 1,48 kWh/m². Tulemuste erinevused teevad veaks 54 %, mis on ilmselgelt liiga suur.



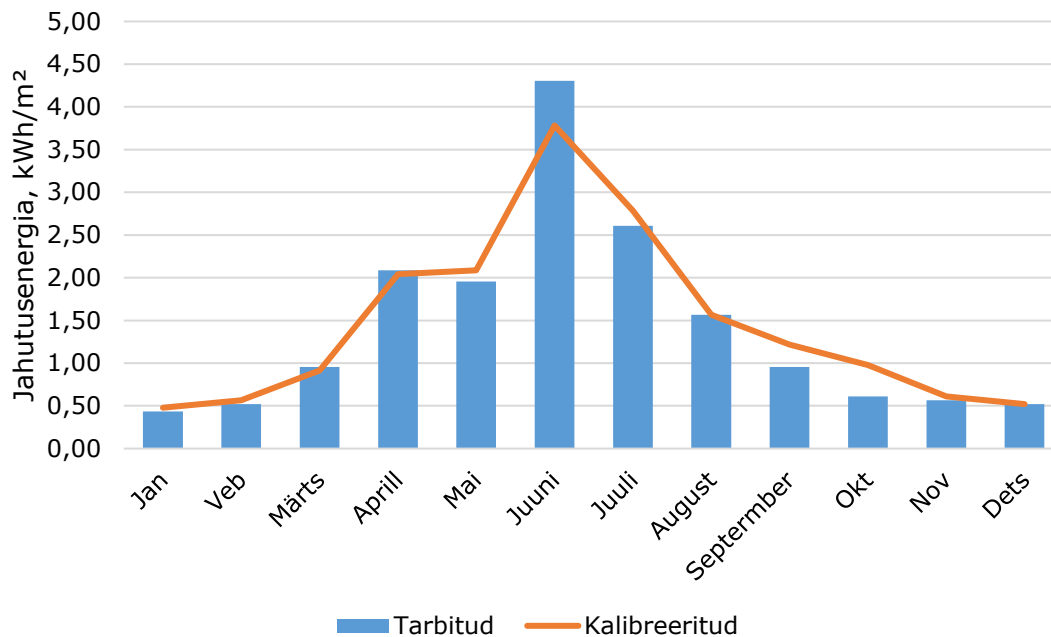
Joonis 3.7 Esimene kalibreerimise tulemus

Selleks, et paremini analüüsida augusti ja septembrikuud, logiti kuudes välja siseõhu niiskussisaldus. Niiskussisalduse logimise tulemusena saab hinnata, kas on võimalus, et tekib kondensaadi oht (Joonis 3.8). Joonisel on vasakpoolsel vertikaalteljel ruumi niiskussisaldus kg/kg kuiva õhu kohta ning parempoolsel jahutus temperatuuri väärtus. Jahutusvee temperatuur on keskmiselt 15 °C. 15 °C ja 100 % õhuniiskuse juures on kastepunkti niiskussisaldus 0,0106 kg/kg kuiva õhu kohta. Jahutusvee kastepunkt on ajas konstantne. Samale teljele on iga tunniajase vahemiku jooksul logitud ruumi niiskussisaldused kg/kg kuivaõhu kohta. Punktides, kus niiskussisaldus ruumis on väiksem kui 0,0106 kg/kg kuiva õhu kohta, ei ole kondensaadiga probleemi. Punktides, kus ruumi niiskussisaldus on suurem, kui 0,0106 kg/kg kuivaõhu kohta, vajab tähelepanu kondensaadi tekke oht. Tulemustena saab välja tuua, et kondensaadi tekke oht oli 5. august kuni 13. september.



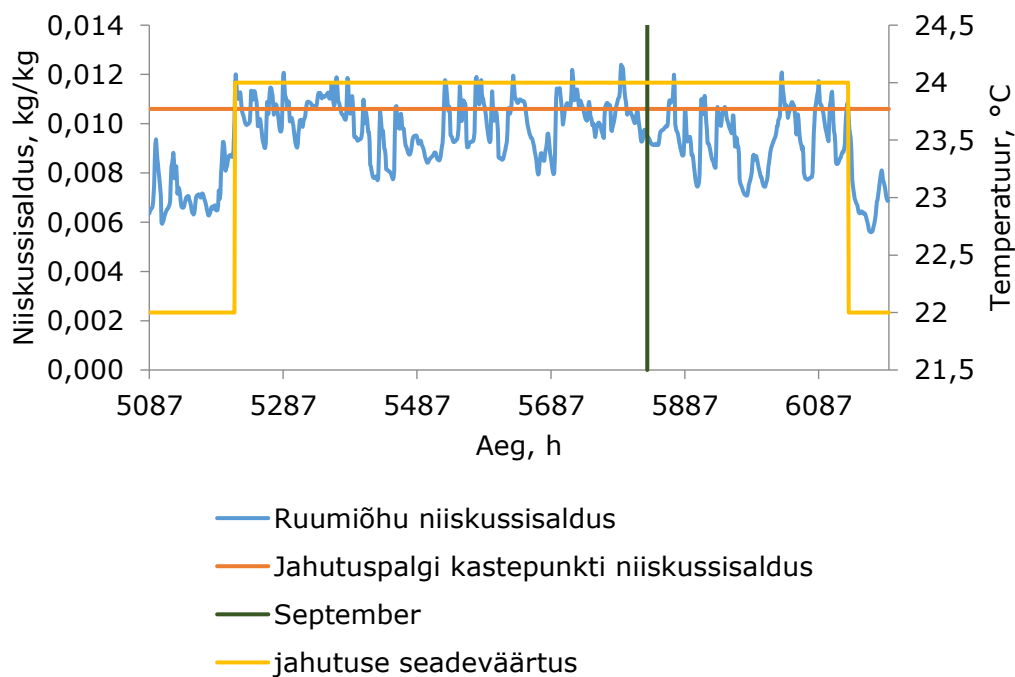
Joonis 3.8 Kriitilise tuumi niiskussisaldus

II etapi puhul muudeti 5. augusti ja 13. septembri jahutustemperatuur 24 °C peale. Ülejäänud kuudel jäeti jahutustemperatuur muutumata ehk 22 °C. Jahutustemperatuuri muutmisega muutus ka JE tarbimine nendel kuudel. Ülejäänud kuude JE tarbimine jäi samaks nagu I etapi puhul (Joonis 3.9). Peale jahutustemperatuuri muutmist oli simulatsiooni JE tarbimine ja tegelik tarbimine võrdsed vastavalt 1,57 W/m². Septembri kuu JE tarbimise erinevus oli 21 %, mis on ligilähedane eesmärgiga. JE tarbimine kalibreerimisel 1,22 W/m² ja tarbitud JE 0,96 W/m².



Joonis 3.9 Jahutusenergia tarbimine peale kondensaadi tekke analüüsi

II etapi puhul olid ruumi niiskussisalduste väärtused aja hetketel sama, mis I etapi puhul (Joonis 3.10). Jooniselt leiti jahutusvee kastepunkti joone ja ruumi niikussisaldusjoone lõikepunktid. Jooned lõikusid 5214 ja 6092 tunnil, mis on vastavalt 5. august ja 13. september. Nendel kuudel muudeti jahutustemperatuur 24 °C peale.



Joonis 3.10 Kriitilise ruumi niiskussisaldus ja jahutustemperatuur II etapis

Simulatsiooni kalibreerimisel muudeti inimeste arvu pindalaühiku kohta, kasutusprofiile ja seadmete poolt eralduvat soojust. Seadeväärtusi muutes saadi küllatki ligilähedane tulemus, mille viga oli alla 15 %. Kahe kuu puhul tekkis, aga probleem, kus jahutusenergia tarbimine oli rohkem üle kui lubatud viga.

Augusti ja septembri kuud lähemalt uurides selgus, et tekib kondensaadiga probleeme. Kondensaadi tekke analüüsiks logiti välja ruumisisesed niiskussisaldused. Kui külmakandja temperatuur on 15 °C, siis niiskussisaldusel 100 % on veeauru sisaldus õhus 0,0106 kg/kg kuivaõhu kohta. Tulemustes selgus, et 5. augustist kuni 13. septembrini oli pidevalt niiskussisaldus üle kriitilise piiri.

Kui siseõhu temperatuur on 22 °C, siis simulatsioon võttis kondenseerunud veeauru arvesse varjatud soojusena, mille tulemusena tõusis simulatsioonis augusti ja septembri tarbitud jahutusenergia kõrgemaks. Tõstes temperatuuri 24 °C peale, siis sellisel juhul ei võta simulatsioon enam tekkinud soojust arvesse kui varjatud soojust.

Kondensaadi tekke ohust lähtuvalt on vaja kõikidesse ruumidesse paigaldada kondensaadi andur. Kõige parem oleks paigaldada andur igasse ruumi, mille tulemusena on JT süsteemid üksteisest eraldatud. Kalibreeritud mudeli ja büroohoone mudeli JV olid ligilähedased, millest saab järeldada, et Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika järgi arvatud jahutusvõimsus on täpsed.

3.3 Komponentide analüüsi tulemused

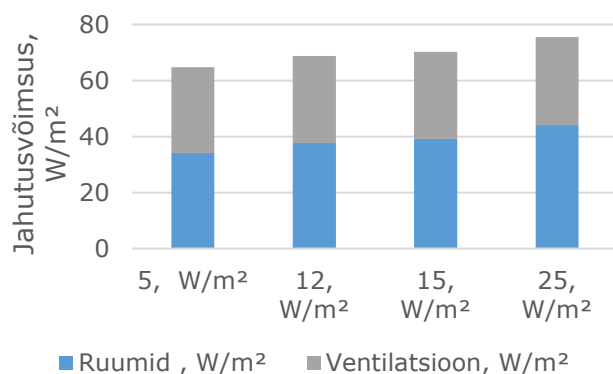
Kõikide komponentide tulemusi võrreldi büroohoone simulatsiooniga. Komponentide analüüsi tulemustest saab välja tuua, et kõik komponendid mõjutavad ruumi JV erinevalt (Tabel 3.1). Kõige vähem muutis protsendiliselt valgustuse soojuseralduse ja ühe inimese poolt hõivatud pindala muutmine. Vastavalt suurendab JV 6 % või vähendab JV 10 %. Järgmisena mõjutas ruumi JV seadmete eraldatav vabasoojus, mis vähendab JV 10 % või tõstab 19 %. Jahutustemperatuuri muutmine mõjutas samuti JV. Tulemuseks saadi 22 °C puhul 0 % ning 25 °C juures -18 %. Kõige rohkem mõjutas konkreetse ruumi JV akna g väärtuse muutmine, mille tulemusena alanen JV 12 % või suurenes 25 % võrreldes büroohoone simulatsiooniga.

Tabel 3.1 Ruumi jahutusvõimsuse muutus

Ruumi jahutusvõimsus erinevate kombinatsioonidega		
Mudel	Ruumi JV; W/m ²	Erinevus, %
Algandmete mudel	51	0
Seaded, 5 W/m ²	46	-10%
Seaded 15, W/m ²	53	4%
Seaded 25, W/m ²	61	19%
Valgustus, 5 W/m ²	46	-10%
Valgustus, 15 W/m ²	54	5%
Inimesed, 10 inim/m ²	50	-3%
Inimesed, 15 inim/m ²	51	-1 %
Inimesed 25 °C	54	6%
Jahutustemp 23 °C	46	-10%
Jahutustemp 24 °C	45	-13%
Jahutustemp 25 °C	42	-18%
Akna g vaatus 0,86	57	12%
Akna g väärtus 0,46	38	-25%

3.3.1 Seadmete soojuseraldus

Esimesena vaadeldi komponentide analüüsi põhjal seadmete soojuseralduste muutuse mõju JV (Tabel 3.2). Esimene simulatsioon arvutati väärtusega 5 W/m². Simulatsiooni tulemusel oli ruumi JV 34 W/m² kohta. Teine simulatsioon on tehtud büroohoone väärtusega, milleks on 12 W/m². Simulatsiooni tulemuseks saadi 38 W/m². Esimese simulatsiooni väärtus vähenes võrreldes teise mudeliga 4 W/m². Kolmanda simulatsioon puhul on seadmete poolt eralduv soojus 15 W/m². Ruumide JV suurenes sellest tulenevalt 39 W/m² peale, mis on 1 W/m² rohkem kui büroohoone simulatsiooni puhul. Neljanda simulatsiooni puhul tõsteti seadmete poolt eraldatav soojuseraldus 25 W/m² peale. Büroohoone simulatsiooniga võrreldes suurenes ruumi JV 38 W/m² pealt 44 W/m² peale. See on 6 W/m² rohkem. Kõik tulemused on näha jooniselt 3.6, kus on hästi aru saada, et kõige väiksem on JV, kui seadmete soojuseraldus on 5 W/m². Kõige suurem on jahutusvõimsus on juhul, kui soojuseraldus seadmetelt 25 W/m² (Joonis 3.11).



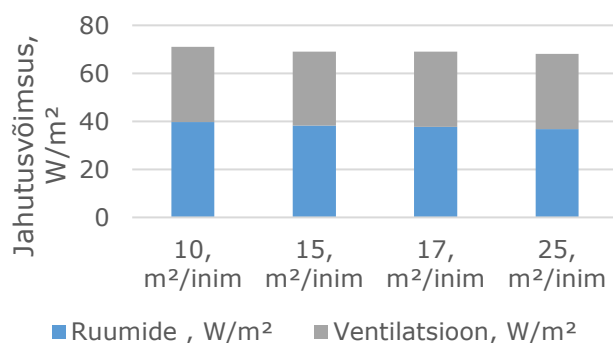
Joonis 3.11 Seadmete soojuseralduste mõju hoone jahutusvõimsusele

Tabel 3.2 Erinevate seadmete soojuseralduste mõju JV

Mõõdetav jahutusvõimsus	Seadmete soojuseraldused			
	5, W/m²	12, W/m²	15, W/m²	25, W/m²
Ruumide , W/m²	34	38	39	44
Ventilatsioon, W/m²	31	31	31	31
Külmajaam, W/m²	69	74	76	83

3.3.2 Inimeste arv ruutmeetri kohta

Teisena teostati kombinatsiooni analüüs inimeste arvu kohta ruutmeetril (Tabel 3.3). Esimesena teostati simulatsioon 10 m²/inim. Simulatsiooni tulemuseks saadi ruumi JV 40 W/m². Teine arvutusmudel koostati 15 m²/inim ning mudeli tulemuseks tuli 38 W/m². Kolmanda simulatsioonina sisestati inimeste arvuks 12 m²/inim, mis on sama nagu algandmete puhul. Ruumide JV on sellisel juhul 38 W/m². Sisestades inimeste arvuks 25 m²/inim peale langeb ruumide JV 37 W/m² juurde. Tulemus on 1 W/m² kohta väiksem kui inimeste arv on 12 m²/inim (Joonis 3.12).



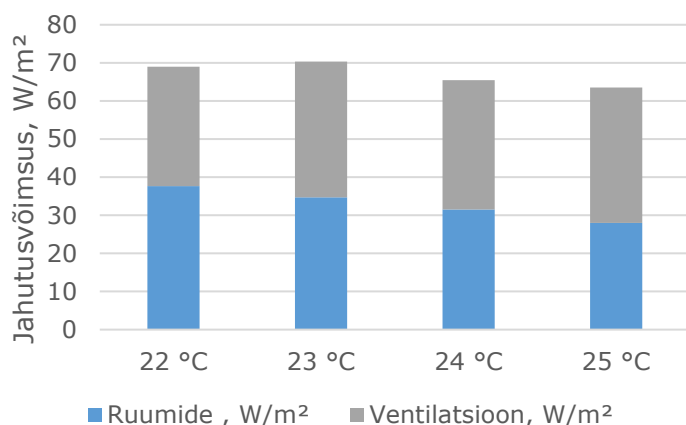
Joonis 3.12 Inimeste arvu mõju jahutusvõimsusele

Tabel 3.3 Jahutusvõimsused erinevate inimeste arvu juures

Mõõdetav jahutusvõimsus	Inimeste arv			
	10, m ² /inim	15 m ² /inim	17, m ² /inim	25, inim/m ²
Ruumide , W/m ²	40	38	38	37
Ventilatsioon, W/m ²	31	31	31	31
Külmajaam, W/m ²	77	74	74	73

3.3.3 Jahutustemperatuuride muutmine

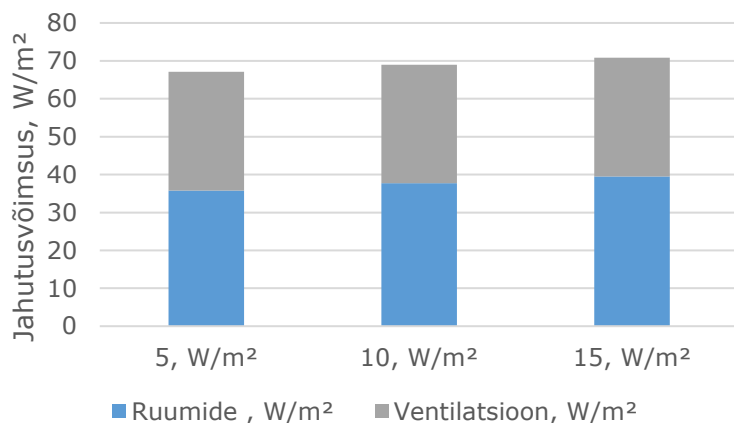
Jahutustemperatuuride muutmisel oli lähteandmete mudeli ruumide JV 38 W/m² (Tabel 3.4). Tõstes jahutustemperatuur 23 °C peale, langes JV 35 W/m² peale, mis on 3 W/m² vähem. Kui tõsta veelgi jahutustemperatuuri 1 °C võrra, siis langes ruumide jahutus samuti 3 W/m². Kõige rohkem alanes jahutusvõimsus 25 °C juures, mille tulemusena vähenes ruumide JV võrreldes 22 °C kokku 10 W/m² (Joonis 3.13).

**Joonis 3.13** Jahutustemperatuuride mõju jahutusvõimsusele**Tabel 3.4** Hoone jahutusvõimsused erinevatel jahutustemperatuuride

Mõõdetav jahutusvõimsus	Jahutustemperatuurid			
	22 °C	23 °C	24 °C	25 °C
Ruumide , W/m ²	38	35	32	28
Ventilatsioon, W/m ²	31	36	34	36
Külmajaam, W/m ²	74	70	70	67

3.3.4 Valgustuse soojuseraldus

Valgustuse soojuseralduste kombineerimisel muudeti valgustuste soojuseraldusi (Tabel 3.14). Esimesena teostati arvutus, kui soojuseraldus valgustusel oli 5 W/m^2 , ning ruumi JV tuli 36 W/m^2 . Kui soojuseraldus muuta 10 W/m^2 peale, siis selle tulemusena tõuseb ruumi JV 2 W/m^2 võrra. Tõstes soojuseralduse 15 W/m^2 peale, siis suureneb ruumi JV 1 W/m^2 võrreldes seadeväärtusega 10 W/m^2 (Joonis 3.14).



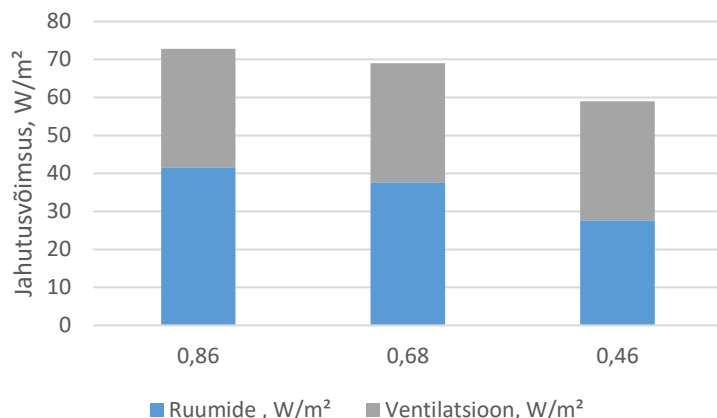
Joonis 3.14 Valgustuse soojuseralduse mõju jahutusvõimsusele

Tabel 3.5 Jahutusvõimsused erinevatel valgustuste soojuseraldustel

Mõõdetav jahutusvõimsus	Valgustuse soojuseraldus		
	5, W/m^2	10, W/m^2	15, W/m^2
Ruumide, W/m^2	36	38	39
Ventilatsioon, W/m^2	31	31	31
Külmajaam, W/m^2	72	74	77

3.3.5 Akende valguslätivuse muutmine

Akende puhul muudeti g väärtus ning sellest tulenevalt ka muid väärtusi (Tabel 3.6). Kui ruumi g arv suurendada $0,86$ peale, siis võrreldes sellega, kui g arv on $0,68$ muutus jahutusvõimsus 3 W/m^2 võrra suuremaks. Kasutades aknaid g arvuga $0,46$, siis sellest vähenes ruumide jahutusvõimsus 10 W/m^2 võrra (Joonis 3.15).



Joonis 3.15 Akna g väärtuse mõju jahutusvõimsusele

Tabel 3.6 Akna parameetrid ja jahutusvõimsused

Mõõdetav jahutusvõimsus	Akna g väärtus		
	0,86	0,68	0,46
Ruumi jahutusvõimsus, W/m ²	41	38	28
Ventilatsiooni jahutusvõimsus, W/m ²	31	31	31
Külmajaam, W/m ²	74	74	63

Komponentide analüüsi juures saab välja tuua, et kõige väiksemgi muudatus hoone juures mõjutab JV. Sellegi poolest mõjutavad mõned komponendid jahutusvõimsust rohkem ja teised vähem.

Kõige suuremat muutust tõi esile jahutustemperatuuri erinevus. 1 °C võrra jahutustemperatuuri tõstes või vähenedes vastavalt ruumi jahutusvõimsus suurenes või vähenes 3-5 W/m². Lineaarselt ei mõjuta JV akna g arvu muutmine, sest muutes akna g väärtus, muutuvad ka akna teised parameetrid. Akende mõju hoone JV on kõige suurem analüüsitud komponentidest. Hoone JV võib erineda 46 % ulatuses kui muuta akna g väärtust 0,4 võrra. G arvu muutmisel suureneb väga palju päikese soojuslisa.

Kuigi kõikide ruumide JV pindalaühiku kohta ei muutu väga suures ulatuses, siis konkreetse ruumi juures tuleb ikka hästi välja, et vabasoojus lisa mõjutab ruumi JV 13 W/m² kohta.

3.4 Maksumus

Jahutustalade süsteemi maksumuse juures vaadeldi, kuidas ehitismaksumus muutub JV suurenedes või vähenedes. Maksumuse juures võeti lähtepunktiks büroohoone simulatsioon, millega hakati maksumuse erinevust võrdlema. Tulemused on toodu tabelis (Tabel 3.7).

Lähtepunkti puhul on JV kokku 74 W/m^2 ning maksumus 0 €/m^2 . Järgmisena tehti maksumus arvutus muudetud akende puhul. Muutuse tulemusena langes JV 8 W/m^2 ning maksumus langes $7,3 \text{ €/m}^2$. Jahutustemperatuuri tõstmisel 25 °C juurde langes ruumide JV võrreldes algandmetega 8 W/m^2 ning maksumus alanes $11,8 \text{ €/m}^2$ kohta. Järgmisena vaadeldi konstruktsiooni muudatuste mõju. Konstruktsiooni puhul vähenes kogu jahutusvõimsus 2 W/m^2 ning maksumus $-3,5 \text{ €/m}^2$. Kui vähendada akende arvu, siis sellest muutub JV 15 W/m^2 , aga samas ehitismaksumus -16 €/m^2 . Kuuendaks võrreldi plaanilise ja esimese mudeli JV ja maksumust. Muutes jahutussüsteemi FC süsteemi peale, siis suurenes külmamasina jahutusvõimsus sellest 9 W/m^2 . JS maksumus, aga vähenes $-15,2 \text{ €/m}^2$. Lisades jahutuspalkidele juurde koosolekutele VAV süsteem suurenes jahutusvõimsus 1 W/m^2 kohta. Külmamasina jahutusvõimsus alanes 1 W/m^2 . Maksumus see-eest tõusis $3,4 \text{ €/m}^2$. Kui lisada VAV süsteem ka kabinettidele, siis tõusis ruumi JV 6 W/m^2 , aga külmamasina JV vähenes 5 W/m^2 . Maksumus tõusis nagu eelnevalgi korral, aga seekord $9,7 \text{ €/m}^2$. Muutes välisõhu parameetrid 27 °C ja 50% juures, siis JS väljaehitusmaksumus vähenes $-4,2 \text{ €/m}^2$. Plaaniline muudatus jättis ruumi JV samaks, aga külmamasina JV langes 2 W/m^2 . Ehitismaksumus suurenes muudatusest tulenevalt $-3,5 \text{ €/m}^2$. Kõige rohkem mõjutas ehitismaksumust kõrval hoonete puudumine simulatsioonis. Jahutus võimsus suurenes sellest 16 W/m^2 võrreldes lähtepunktiga ning maksumus 22 €/m^2 . Kalibreeritud mudeli puhul langes ruumisise JV 6 W/m^2 kohta ning külmamasina JV samuti 1 W/m^2 . Ehitismaksumus vähenes muutustest tulevalt $-4,1 \text{ €/m}^2$.

Tabel 3.7 Jahutusvõimsuse ja maksumuse võrdlus

Jrk nr.	Mudel	Ruumide jahutusvõimus, W/m ²	Külmajaama jahutusvõimus, W/m ²	Ehitusmaksumus, €/m ²
1	Büroohoone simulatsioon	38	74	0
2	Muudetud aknad	33	68	-7,3
3	Jahutustemperatuur 25 °C	28	66	-11,8
4	Konstruksiooni muutus	34	72	-3,5
5	Fan coil süsteem	46	83	-15,2
6	VAV süsteem koosolekud	39	73	3,4
7	VAV süsteem koosolekud + kabinetid	41	69	7,9
8	Välisõhu parameetrid 27 °C ja 50 %	38	68	-4,2
9	Plaaniline muutus	38	72	-3,5
10	Plaaniline muudatus varjetusega	54	90	22,0
11	Kalibreeritud simulatsioon	32	73	-4,1

Ehitusmaksumus sõltub väga palju erinevatest muudatustest tulevatest jahutusvõimsuste erinevusest. Jahutustalade süsteemi puhul (Joonise 3.16) võime öelda, et ehitusmaksumus sõltub väga palju ruumide kogu jahutusvõimsusest. Kui ruumide jahutusvõimsus muutub 4 W/m² kohta, siis sellest suureneb ehitusmaksumus juba 4,1 €/m². Mida suuremaks läheb ruumide ja hoone jahutusvõimsus, seda kallimaks muutub ehitusmaksumus. Varjestusega lahenduse puhul näeb seda väga hästi, et kui JV tõuseb 30 %, siis jahutusvõimsuse ehitusmaksumus kallineb 22 €/m².

VAV süsteemi puhul näeb seda, et jahutussüsteemi maksumus tõuseb, sest VAV klapid ja sellele lisanduvad kontrollid on kallid. Ehitusmaksumus tõuseb sellest vahemikus 3,4 kuni 7,9 €/m². See-eest väheneb sellest ventilatsiooniagregaadi jahutuspatari JV vastavalt 4-9 W/m² kohta. Väiksemat JV jahutuspatareid kasutades saab säästa nii ventilaatorite elektritarbimise kui ka külmajaama maksumuse pealt.

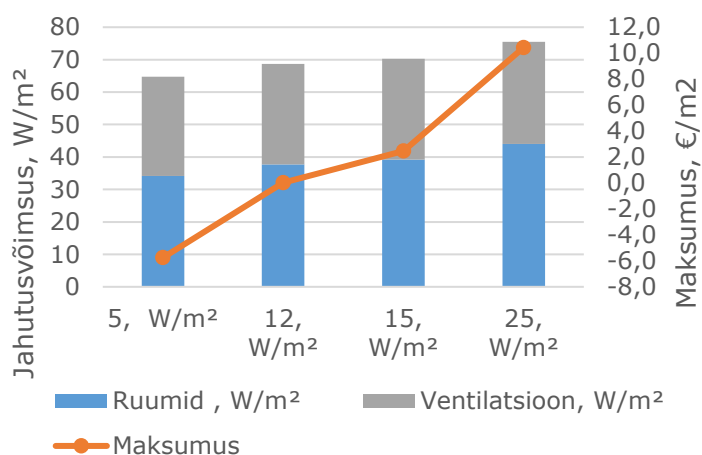
Fan coil süsteemi puhul tõuseb ruumide kogu jahutusvõimsus suuremaks, sest kasutatakse madalama temperatuuriga külmakandjat. Kuigi jahutusvõimsus FC süsteemi puhul tõuseb, alaneb jahutussüsteemi maksumuse hind, sest FC süsteemi ehitamise hind on odavam. Samas peab FC süsteemi puhul arvestama lisa kuludega võrreldes JT. FC süsteemi puhul muutub kallimaks ventilatsiooni maksumus, sest ventilatsiooni töövõttu lisanduvad plafoonid ja rõhualanduskastid.



Joonis 3.16 Jahutusvõimsuse ja ehitusmaksumus erinevate süsteemide juures

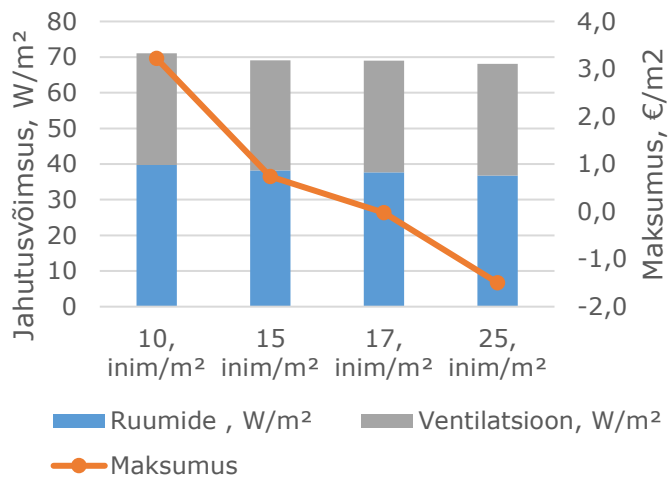
Komponentide analüüsi maksumuse hindamisel tehti arvutused jahutustalade süsteemile ning võrreldi büroohoone mudeliga. Komponentide JV ja maksumused on järgmisel leheküljel asuvatel joonistel (Joonis 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21). Joonisel on halli värvusega ventilatsiooniagregaadi JV ja sinisega ruumide JV. Oranž joon toob välja, kui palju muutus erinevatel olukordadel ehitusmaksumus. Joonistelt on näha, kuidas JV kasvuga suureneb ka ehitusmaksumus. Mõni komponent mõjutab maksumust suuremal ning mõni väiksemalt määral.

Seadmete erinevad soojuseraldused mõjutasid ehitusmaksumust suures ulatuses (Joonis 3.17). Kui seadmete poolt vabasoojuslisa on 5 W/m^2 , siis maksumus võrreldes algandmete hinnaga väheneb $5,8 \text{ €/m}^2$. Tõstes soojuseralduse 15 W/m^2 peale, siis maksumus ja JV suurenevad. Maksumus tõuseb $2,5 \text{ €/m}^2$ peale. Sisestades soojuslisa 25 W/m^2 suureneb maksumus märgatavalt. Sellisel juhul suureneb maksumus $10,4 \text{ €/m}^2$.

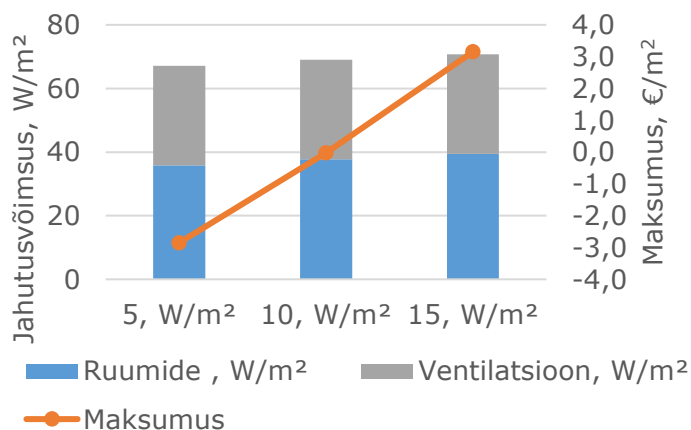


Joonis 3.17 Seadmete soojuseralduse mõju ehitusmaksumusele

Inimeste arvu muutmine pindalaühiku kohta ei mõjuta ehitusmaksumust ja JV nii palju kui seadmete soojuseraldused (Joonis 3.18 ja Joonis 3.19). Inimeste arvu muutmisel $10 \text{ m}^2/\text{inim}$ pealt $25 \text{ m}^2/\text{inim}$ on ehitusmaksumuse väärtused vastavalt $3,2 \text{ €/m}^2$ ning -15 €/m^2 . Valgustuse mõju JS ehitusmaksumusel on sarnaselt eelnevaga suhteliselt väike. Kui tõsta valgustuse soojuseraldust 15 W/m^2 , siis süsteemi ehitusmaksumus on $3,2 \text{ €/m}^2$.

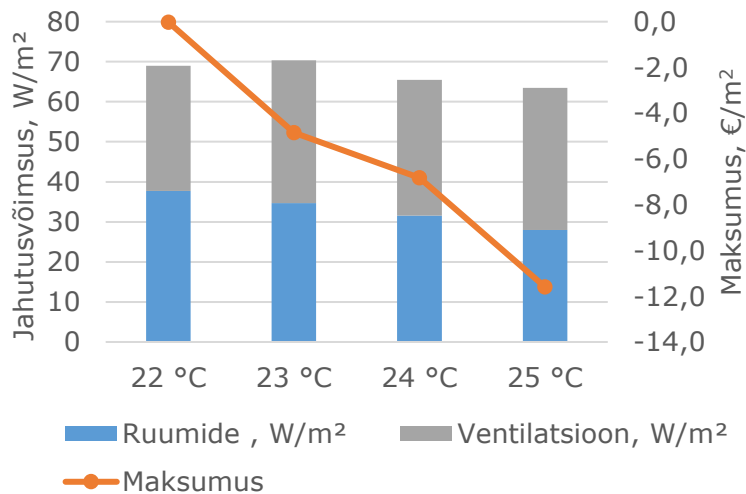


Joonis 3.18 Inimeste arvu mõju ehitismaksumusele

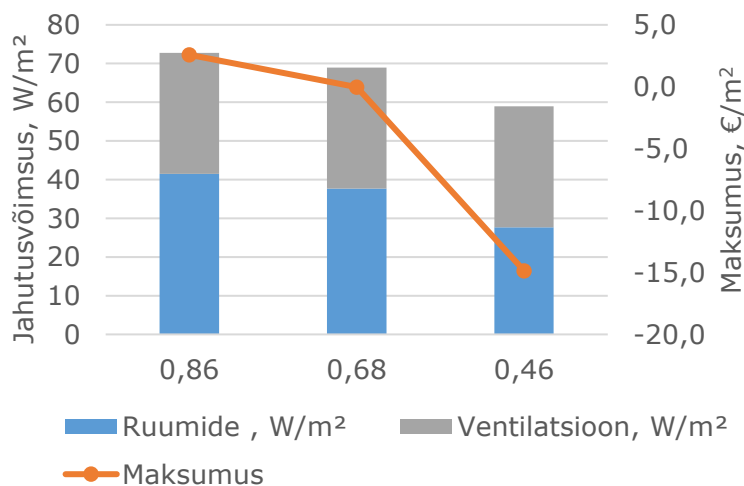


Joonis 3.19 Valgustuste soojuseralduse mõju ehitismaksumusele

Kõige suuremat mõju ehitismaksumusele peale seadmete soojuseralduse annavad veel jahutustemperatuuri tõstmine ja akende g väärtuse muutmine (Joonis 3.20 ja Joonis 3.21). Jahutustemperatuuri muutmisel $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ võrra muutus ehitismaksumus $4,9\text{ €/m}^2$ kohta. $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ maksumuste vahe on juba $11,6\text{ €/m}^2$. Akna G väärtuse parandamisel muutub maksumus kas suuremaks $2,6\text{ €/m}^2$, kui väärtus on $0,86$, või väheneb $14,9\text{ €/m}^2$ võrra, kui väärtus on $0,46$.



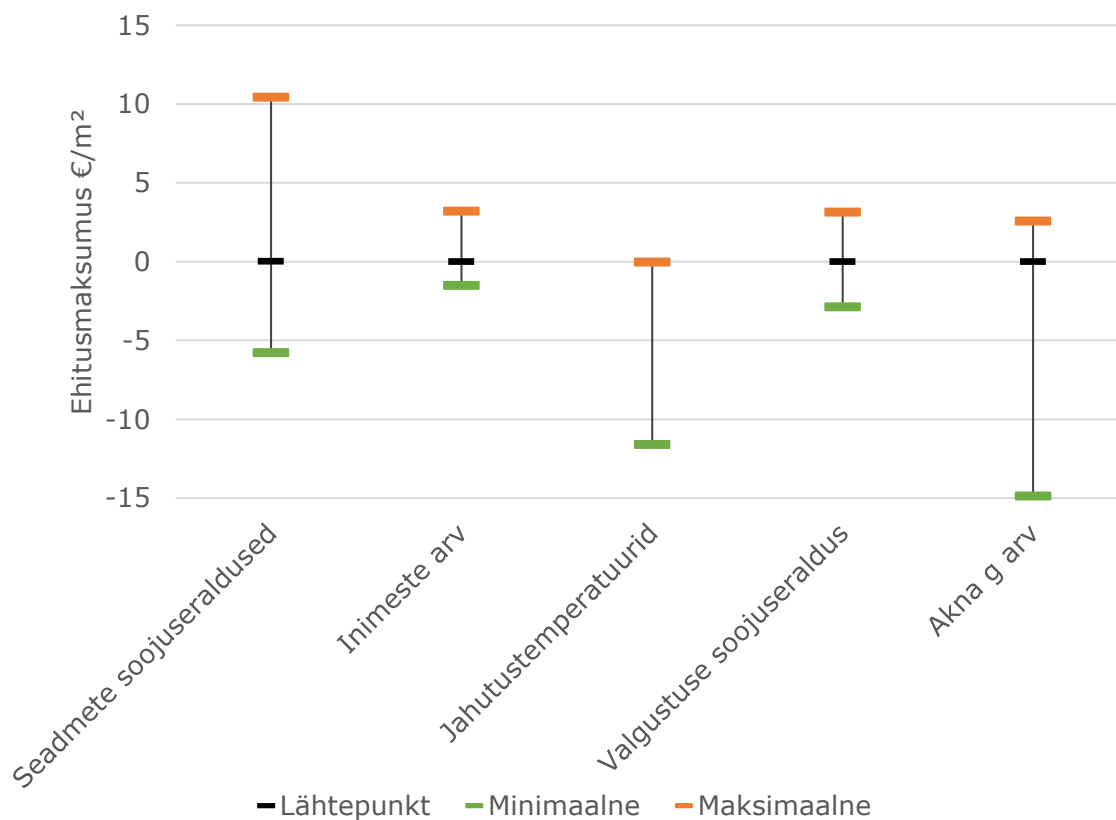
Joonis 3.20 Jahutustemperatuuride mõju ehitismaksumusele



Joonis 3.21 Akna G väärtuse mõju ehitismaksumusele

Komponentide maksumuse tulemuste puhul saab välja tuua, et muutused ehitismaksumuses on päris suured (Joonis 3.22). Nagu muudatuste maksumuse puhul, siis akende g arvu muutus toob kõige suuremaid muutusi JV ja ehitismaksumuse juures. G arv mõjutab seda, kui palju päikeseenergiat jõuab ruumi. Nagu varasemalt on välja toodud, siis päike on üks peamisi JV mõjutajatest. Peale päikeseenergia muutis ehitismaksumust suurel määral jahutustemperatuuri muutmine. Jahutustemperatuurist sõltub, mis temperatuurini on vaja ruum maha jahutada. Mida kõrgem on jahutustemperatuur, seda vähem on vaja JV-st. Ehitismaksumuse muutus jääb 0 kuni 11,6 €/m² vahele. Seadmete soojuseralduse puhul on sarnane. Muutub suhteliselt suurel määral ning mida suurem on seadmete soojuseraldus, seda kallimaks läheb

maksma JS ehitus. Inimeste ja valgustuse väärtuste puhul suureneb ehitusmaksumus minimaalselt, sest ühest hetkest tulevad ette minimaalsed ja maksimaalsed väärtused. Üldjuhul väärtused jäävad valgustuse puhul 5 kuni 15 W/m² vahele.



Joonis 3.22 Komponentide muutuse mõju ehitusmaksumusele

KOKKUVÕTE

Käesolevas töös uuriti projekteerimis- ja ehituse käigus tehtavate muudatuste mõju jahutusvõimsusele. Samuti uuriti, kui palju muutub jahutussüsteemi maksumus erinevate jahutusvõimsuste puhul. Eesmärgiks oli juhtida tähelepanu sellele, et jahutusvõimsuse tegeliku olukorra väljaselgitamiseks on vaja projekteerijatel projekteerimiseks täpseid sisendeid.

Hoone jahutusvõimsuste arvutamiseks on kasutatud arvutusprogrammi IDA ice 4.8. Hoone simuleerimiseks võeti andmeid büroo hoone algandmetest ning Hoone energiatõhususe määrust. Mudelite arvutamisel kasutati Eesti baasaastat TRY ning 2019 aasta kliimafaile.

Kokkuvõttes erinevad muudatused mõjutavad jahutusvõimsust erinevalt. Projekteerimise seisukohalt on väga tähtis see, et kui tehakse muudatusi konstruktsioonis, arhitektuuris või süsteemis, siis vajab jahutusvõimsus korrigeerimist. Kindlasti peab tähelepanu pöörama jahutustemperatuuri seadeväärtusele, mis on üheks olulisemaks lähteparameetriks. Parameetri muutusega erineb ruumide kogu jahutusvõimsus 10 W/m^2 . Peale selle on vaja projekteerimisel arvestada kõrvaolevate hoonetega, sest vastasel juhul dimensioneeritakse jahutusvõimsus üle. Ruumide jahutusvõimsuse üledimensioneerimine võib jahutusvõimsus olla 2 kordne. 2 kordsel dimensioneerimisest suureneb ehitusmaksumus 22 €/m^2 .

Simuleerimisel Hoone energiatõhususe meetoodika abil on võimalik suhteliselt täpselt hinnata jahutusvõimsust. Kalibreeritud ja meetoodika järgi koostatud külmajaamade jahutusvõimsuste vahe oli kokku 1 W/m^2 . Selline vahe on suhteliselt marginaalne ning võib pidada täpseks.

Jahutuse projekteerija eesmärgiks peab olema võimalikult täpselt hinnata tegelikku olukorda. Kombinatsioonide analüüsist selgus, et akende soojuslähivuse vähenemisel võib ruumi jahutusvõimsus erineda 37 %. Samuti peab jahutussüsteemide projekteerimisel tähelepanu pöörama mitte ainult jahutusvõimsusele vaid ka kondensaaditekke ohule jahutuspalkide süsteemi näol. Edaspidistes uurimistes on võimalik kondensaadi tekke probleemi edasi uurida.

SUMMARY

The purpose of the thesis is to study how the changes applied during the planning and construction process impact the performance of cooling systems. At the same time research reveals how the changes affect the cost of the building's cooling systems. Another goal is to draw attention to the importance of the specific base values for engineers to predict the actual cooling capacity of the system.

The simulation software IDA ice 4.8 was used to calculate cooling capacity. Also, Estonian Test Reference Year (TRY) and 2019 climate fails were used for simulation. All the data for the simulation was taken from original building information and Building Energy Efficiency Calculation Methodology Regulation.

Altogether the changes applied to base values affect the cooling capacity differently. From a design point of view it is significant that the cooling capacity needs review after application of different changes to the source of data, construction or architecture. One of the most significant values is the cooling temperature set point. It can make a massive difference up to 10 W/m² in cooling capacity of the rooms when the value of this parameter is changed. It is important to pay attention to adjacent buildings not to overcompensate the dimensions of the system when calculating the cooling capacity. Over sizing can reach up to 2 times which can raise the construction cost up 22 €/m²

It is possible with simulation to predict realistic results of the cooling capacity based on the energy efficiency calculation methodology regulation. The difference between calibrated and methodology simulations were overall 1 W/m². This difference is relatively marginal and can be considered accurate.

Cooling engineer's main goal is to calculate the cooling capacity of the building based on accurate predictions of the real situation. Combination analysis brings out that window heat permeability decrease can change cooling capacity 37 %. Besides the cooling capacity the engineer also needs to pay attention to the possible condensation of the system. More detailed research about possible condensation can be conducted in the future.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] M. Herrando, D. Cambra, M. Navarro, L. de la Cruz, G. Millán, ja I. Zabalza, *Energy Performance Certification of Faculty Buildings in Spain: The gap between estimated and real energy consumption*, Energy Convers. Manag., 2016.
- [2] U. S. E. I. Administration, *International Energy Outlook 2019 with projections to 2050*, Choice Rev. Online, 2019.
- [3] X. Zhou, D. Yan, J. An, T. Hong, X. Shi, ja X. Jin, *Comparative study of air-conditioning energy use of four office buildings in China and USA*, Energy Build., 2018.
- [4] W. Gang, S. Wang, F. Xiao, ja D. C. Gao, *Robust optimal design of building cooling systems considering cooling load uncertainty and equipment reliability*, Appl. Energy, 2015.
- [5] Q. Cheng, S. Wang, ja C. Yan, *Sequential Monte Carlo simulation for robust optimal design of cooling water system with quantified uncertainty and reliability*, Energy, 2017.
- [6] H. W. Stanford III ja A. F. Adam F. Spach, *Analysis and Design of Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems*. 2019.
- [7] A. Pallikere, R. Qiu, P. Delgoshaei, ja A. Negahban, *Incorporating occupancy data in scheduling building equipment: A simulation optimization framework*, Energy Build., 2020.
- [8] P. K. Soori ja M. Vishwas, *Lighting control strategy for energy efficient office lighting system design*, Energy Build., 2013.
- [9] Z. Wang, T. Hong, ja M. A. Piette, *Data fusion in predicting internal heat gains for office buildings through a deep learning approach*, Appl. Energy, 2019.
- [10] A. Bhatia, S. A. R. Sangireddy, ja V. Garg, *An approach to calculate the equivalent solar heat gain coefficient of glass windows with fixed and dynamic shading in tropical climates*, J. Build. Eng., 2019.
- [11] M. Cehlin, T. Karimipanah, U. Larsson, ja A. Ameen, *Comparing thermal comfort and air quality performance of two active chilled beam systems in an open-plan office*, J. Build. Eng., 2019.
- [12] H. C. Chuang, J. H. Chi, K. Y. Chang, ja C. T. Lee, *Study on a fan coil unit and chiller by an intelligent control method with a stepless variable speed driving technology*, Build. Environ., 2018.
- [13] C. M. Chu, T. L. Jong, ja Y. W. Huang, *Thermal comfort control on multi-room fan coil unit system using LEE-based fuzzy logic*, Energy Convers. Manag., 2005.
- [14] A. Ranade, G. Provan, A. El-Din Mady, ja D. O'Sullivan, *A computationally efficient method for fault diagnosis of fan-coil unit terminals in building Heating Ventilation*

- and Air Conditioning systems*, J. Build. Eng., 2020.
- [15] Q. Cao, A. Chen, J. Zhou, ja V. W. C. Chang, *Performance evaluation of filter applications in fan-coil units during the 2015 Southeast Asian haze episode*, Build. Environ., 2016.
- [16] G. S. Okochi ja Y. Yao, *A review of recent developments and technological advancements of variable-air-volume (VAV) air-conditioning systems*, Renew. Sustain. Energy Rev., 2016.
- [17] EQUA Simulation AB, *User Manual IDA Indoor Climate and Energy*, 2013.
- [18] T. Kalamees ja J. Kurnitski, *Estonian test reference year for*, 2006.
- [19] Majandus- ja taristuministeri määrus nr 58 (05.06.2015), *Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika*, RT I, 22.08.2019, 5.
- [20] *Liginullenergia eluhooned - piirdetarindite liikohata joonsoojuslääbivuse kataloog*, Tallinn, 2017.
- [21] Y. Miyaoka, H. Nakayama, ja Y. Teranishi, *Influence of LED Lamps on Air-conditioning Load and Energy Consumption in Commercial Buildings*, 2017.