



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Laitosrakennuksen majoitustilojen läm- pötilanhallinta kesäaikana

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

6.5.2021

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Eetu Jokinen Laitosrakennuksen majoitustilojen lämpötilahallinta kesäai- kana 59 sivua 6.5.2021
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Ammatillinen pääaine	LVI-suunnittelu
Ohjaajat	ryhmäpäällikkö Riitta Tulokas yliopettaja Jukka Yrjölä
<p>Tämän insinööriyön tarkoituksena on selvittää majoitusrakennuksen kesäajan lämpöolo- suhteet ja tarkastella keinona lämpötilojen hallintaan. Tavoitteena on tarkastella keinoja, jotka eivät aiheuta suuria jäähdytysjärjestelmän asentamisesta ja hankinnasta koituvia kustannuksia. Tarkasteltavia keinoja ovat ikkunoiden aurinkosuojakalvot, jotka pienentävät auringosta syntyvää lämpökuormaa ja tilojen jäähdyttäminen tehostamalla ja jäähdyttä- mällä tuloilmaa.</p> <p>Insinööriyössä tarkastelu toteutettiin IDA ICE -simulointiohjelman avulla. Simulointitulosten perusteella työssä tarkastellaan eri vaihtoehtojen vaikutusta sisälämpötiloihin ja niiden to- teuttamisen hyödyllisyyttä.</p> <p>Insinööriyön tulosten perusteella nähdään, että aurinkosuojakalvojen asentaminen majoi- tustilojen ikkunoihin vähentää auringosta syntyvää lämpökuormaa. Kuitenkin saavutettu hyöty aurinkosuojakalvoista jää liian pieneksi tarkasteltaviin tiloihin. Tuloilman lisäämisen ja jäähdyttämisen ansiosta saadaan katettua lämpökuormat, mutta ilmamäärät nousevat kohtuuttoman suuriksi. Insinööriyössä päädyttiin tulokseen, että tarkasteltavat keinot eivät ole riittäviä ja haluttujen lämpötilojen saavuttaminen tiloissa vaatii erillistä jäähdytystä.</p>	
Avainsanat	aurinkosuojakalvo, IDA ICE, sisälämpötila

Author Title Number of Pages Date	Eetu Jokinen Summertime Temperature Management in Accommodation Building 59 pages 6 May 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Professional Major	HVAC Design
Instructors	Riitta Tulokas, Group manager, Jukka Yrjölä, Principal Lecturer
<p>The aim of this bachelor's thesis was to determine the summertime heat conditions of an accommodation building and study the means of controlling temperatures. The aim was to study means that do not require the acquisition and installation of a cooling system, which would cause high costs. The means discussed included solar films for windows that reduce the heat load generated from the sun and cooling the spaces by cooling and increasing the volume of the supply air.</p> <p>The IDA ICE simulation program was used in the thesis. The simulation results were then used to study the impact of various options on indoor temperatures and the utility of their implementation.</p> <p>Based on the results of this thesis, the installation of solar films on the windows reduces the heat load generated by the sun. However, the benefit gained from solar films remains too small for the spaces under consideration. Increasing the amount and cooling of supply air would cover the heat loads, but this would increase the air volumes to an unacceptably high level. The thesis concluded that the means under consideration are insufficient and achieving the desired temperatures in the premises requires separate cooling.</p>	
Keywords	solar film, IDA ICE, indoor temperature

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Rakennuksen sisäiset lämpökuormat	2
2.1	Lämpökuorma henkilöistä	2
2.2	Lämpökuorma laitteista ja valaistuksesta	4
3	Ulkoiset lämpökuormat	5
3.1	Taustatietoa ulkoisista lämpökuormista	5
3.2	Auringon säteily	6
3.2.1	Auringon säteilyn merkitys	6
3.2.2	Auringon säteilyn voimakkuus	6
3.2.3	Auringon säteilyn lämpökuorman siirtyminen huonetilaan	8
4	Ikkunoiden kautta tulevan lämpöenergian laskeminen	10
5	Lämpötilan vaikutus sisätilojen viihtyvyyteen	16
6	Kohteen lähtötiedot	19
6.1	Tarkasteltava rakennus ja tilat	19
6.2	Laskelmissa käytetyt rakenteiden lähtötiedot	19
6.3	Tarkasteltavan alueen LVI-järjestelmä	21
7	Rakennuksen IFC-tietomallin laatiminen	21
8	IDA ICE -ohjelma ja simulointimalli	24
8.1	Taustatietoa simuloinneista ja IDA ICE -ohjelmasta	24
8.2	IDA ICE -projektin valmistelu simulointeja varten	25
9	Simulaatiot	28
9.1	Simuloitu ajanjakso	28
9.2	Alkutilanteen ikkunoiden lämpökuorman ja huonelämpötilan simuloinnit	29

9.3	Alkutilanteen simulointitulokset	30
9.4	Kalvotettujen ikkunoiden lämpökuorman ja huonelämpötilan simuloinnit	33
10	Jäähdytysteho	35
10.1	Vaadittavan jäähdytystehon määrittäminen tarkasteltaviin tiloihin	35
10.2	Jäähdytysmenetelmien vertailu	38
11	Tuloilmalla jäähdyttäminen	39
12	Tuloilmavirtojen kasvattamisen tarkastelu alkutilanteessa	46
12.1	Kanavien ilmavirrat ja virtausnopeudet	46
12.2	Kanaviston painehäviötarkastelu	50
13	Jäähdytetyn tuloilman tarkastelu	52
14	Pohdinta	56
15	Yhteenveto	57
	Lähteet	60

1 Johdanto

Opinnäytetyössä käsitellään olemassa olevan laitosrakennuksen majoitustilojen kesäajan huonelämpötiloja ja keinoja, joilla lämpötilojen kohoamista voitaisiin vähentää. Tavoitteena on tuottaa selkeä arvio nykyisestä tilanteesta ja mahdollisista keinoista parantaa tarkasteltavien tilojen olosuhteita. Tarkasteltavissa tiloissa ei ole ennestään jäähdytystä tai aurinkosuojausta ja tarkasteltavat tilat ovat suurella käyttöasteella, joten lämpötilojen nousu on ongelmallista. Opinnäytetyössä keskityn aurinkosuojakalvotuksen ja ilmajäähdytyksen vaikutukseen lämpötilojen nousuun sekä tarkastelen eri vaihtoehtojen toteuttamisen kannattavuutta. Kesäajan olosuhteet simuloidaan IDA ICE -simulointiohjelmalla, jonka avulla voidaan myös laskea jäähdytyksen ja aurinkosuojauksen vaikutus tilojen olosuhteisiin.

Tilojen käytöstä ja ympäristön aiheuttamista lämpökuormista aiheutuu kesäaikana rakennuksen tilojen ylikuumenemista. Tämän seurauksena tarvitaan keinoja torjua ylimääräiset lämpökuormat. Ympäristöministeriö on antanut ohjeistuksen uudisrakennuksen laskennallisista kesäajan huonelämpötiloista, mutta korjaus- ja muutostöissä kesäajan huonelämpötilaa ei ole määritetty, jos tilojen käyttötarkoitus pysyy ennallaan. Ympäristöministeriö velvoittaa laskennassa käytettävän dynaamista laskentatyökalua. Dynaamiset laskentatyökalut ottavat huomioon rakenteisiin sitoutuvan lämmön ja laskennassa käytetään aikaisemmin toteutuneita sää- ja olosuhdetietoja. Sven Kroph ja Gerhard Zweifel vertailivat tutkimuksessa standardissa prEN 13791 esitettyjen testitapausten tuloksia ja vastaavanlaisten tilojen IDA ICA -simulointiohjelmalla tehtyjen laskelmien tuloksia. Tutkimuksessa päädyttiin tulokseen, että IDA ICE -simulointiohjelmalla päästiin lähelle oikeita tuloksia ja pienet heitot tuloksissa eivät johtuneet IDA ICE -simulointiohjelmasta vaan todennäköisesti mallin eroavuudesta testitapausten tilaan. Dynaamisilla laskentamenetelmillä saavutetaan suhteellisen tarkka tulos, mutta laskettavista tiloista on tärkeä tehdä huolellinen ja mahdollisimman todenmukainen 3D-malli. Työssä ei tutkita tarkasti jäähdytyslaitteita vaan keskitytään tuloilmalla jäähdyttämiseen. (1;2.)

2 Rakennuksen sisäiset lämpökuormat

Rakennuksen sisäiset lämpökuormat syntyvät rakennuksen käytön seurauksena. Rakennuksen käytöstä syntyviä eli sisäisiä lämpökuormia aiheuttavat henkilöt, valaistus, sähkölaitteet ja lämmin käyttövesi. Lämpökuormat lasketaan ympäristöministeriön energiatehokkuus ohjeistuksen mukaan. Simuloinneissa arvioidaan eri lämpökuormalähteiden käyttöasteet, joiden perusteella ohjelma pystyy laskemaan syntyneet lämpökuormat. (1.)

2.1 Lämpökuorma henkilöistä

Tilassa olevan henkilön kokonaislämmönluovutus syntyy henkilön kuivasta lämpötehosta ja hengityksen kosteuden tuomasta lämpökuormasta. Nämä ovat riippuvaisia henkilön toiminta-asteesta, koosta ja ympäristön lämpötilasta. Henkilön keskimääräisesti luovuttamalle kuivalle lämpöteholle voidaan käyttää arvoa 85 W (1, s. 31). Hengityksen tuoma lämpöteho arvioidaan aktiivisuuden mukaan, joka osoitetaan MET-arvolla. MET on lyhenne sanoista metabolinen ekvivalentti, ja se kuvaa fyysisen aktiivisuuden aiheuttamaa lisääntyneitä energiankulutusta verrattuna lepotasoon. Taulukossa 1 on esitetty eri aktiviteettitasoja ja niitä vastaavat kokonaislämpötehot normaalilla aikuisella ihmisellä (3).

Taulukko 1. Henkilön luovuttama kokonaislämpöteho (kuiva+kostea) MET-arvon mukaan (3).

Activity	met	Power [W]
Sleep	0.7	72
Reclining rest	0.8	81
Seated quiet resting	1.0	108
Standing, relaxed, rest	1.2	126
Walking (3.2 km/h)	2.0	207
Walking (4.3 km/h)	2.6	270
Walking (6.4 km/h)	3.8	396
Reading, seated	1.0	108
Typing	1.1	117
Office walking	1.7	180
Office lifting/packing	2.1	216
Cooking	1.6-2.0	171-207
Housecleaning	2.0-3.4	207-360
Light machine work	1.8-2.4	189-252
Heavy machine work	4.0	423
Pick and shovel work	4.0-4.8	423-504
Dancing, social	2.4-4.4	252-504
Aerobics/work out	3.0-4.0	315-423
Tennis	3.6-4.0	378-486
Basketball	5.0-7.6	522-792
Competitive wrestling	7.0-8.7	738-909

Muussa kuin vaatimuksenmukaisuuden osoittamisessa henkilön luovuttamaa lämpöenergiaa laskettaessa käytetään henkilön keskimääräistä kuivaa lämpötehoa. Lämpöenergia (kWh) lasketaan kaavalla 1 (1, s. 31).

$$Q_{hlö} = k n \Phi_{henk} \Delta t_{oleskelu} / 1000 \quad (1)$$

jossa

$Q_{hlö}$	on henkilöiden luovuttama lämpöenergia, kWh
k	on rakennuksen käytönaikainen käyttöaste, joka kuvaa ihmisten keskimääräistä läsnäoloa rakennuksessa, -
n	on henkilöiden lukumäärä, -
$\Phi_{hlö}$	on yhden henkilön luovuttama keskimääräinen lämpöteho (ei sisällä haihtumislämpöä), W/henkilö
$\Delta t_{oleskelu}$	on oleskeluaika, h
1000	on kerroin, jolla suoritetaan laatumuunnos kilowattitunneiksi.

Oleskeluaika voidaan laskea kaavalla 2 (1, s. 32).

$$\Delta t_{oleskelu} = \sum \tau_d \tau_v \Delta \tau \quad (2)$$

jossa

$\Delta t_{oleskelu}$	on oleskeluaika, h
τ_d	on rakennuksen keskimääräinen vuorokautinen käyttöaika-suhde, h/24 h

τ_v on rakennuksen keskimääräinen viikoittainen käyttöaika-suhde, vrk/7 vrk

ΔT on laskentajakson pituus, h.

2.2 Lämpökuorma laitteista ja valaistuksesta

Laitteiden ja valaistuksen sähkönkulutus muuttuu kokonaisuudessaan tilan lämpökuormaksi. Eri laitteiden käyttöasteet vaihtelevat suuresti, joten pelkkä laitteen ottoteho ei vielä määritä sen vaikutusta tilan lämpökuormiin. Ottoteho tulee muuttaa kilowattitunneiksi arvioimalla laitteen ja valaistuksen käyttöaste. Tarkasteluissa voidaan käyttää arvioita valaistuksen ja laitteiden lämpökuormista. Jos pyritään osoittamaan, että rakennuksen energiatehokkuutta koskevat määräykset täyttyvät, tulee käyttää energiatehokkuusasetuksessa ilmoitettuja arvoja. Valaistuksesta ja huonelaitteista syntyvä lämpökuorma voidaan laskea kaavalla 3 (1, s. 32).

$$Q_{\text{säh}} = W_{\text{valaistus}} + W_{\text{kuluttajalaitteet}} \quad (3)$$

jossa

$Q_{\text{säh}}$ on valaistuksesta ja sähkölaitteista rakennuksen sisälle tuleva lämpökuorma, kWh

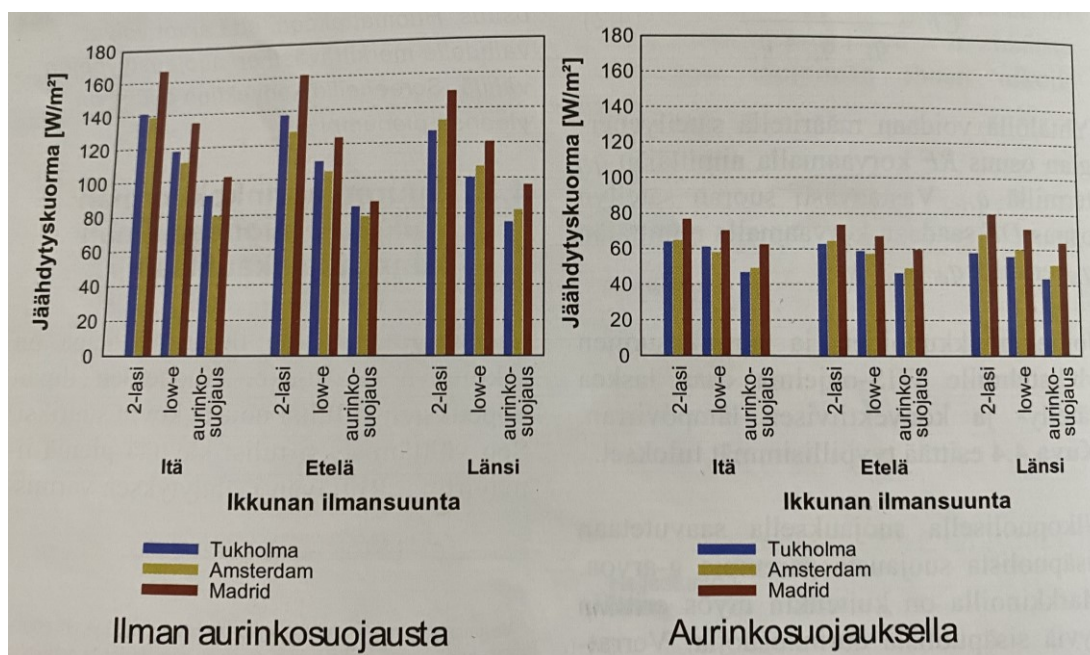
$W_{\text{valaistus}}$ on valaistusjärjestelmän sähköenergian kulutus, kWh

$W_{\text{kuluttajalaitteet}}$ on kuluttajalaitteiden sähköenergian kulutus, kWh.

3 Ulkoiset lämpökuormat

3.1 Taustatietoa ulkoisista lämpökuormista

Ympäristön lämpökuorma syntyy ulkolämpötilojen ja auringon lämpösäteilyn seurauksena. Auringon lämpöenergia pääsee huoneeseen ikkunoiden kautta säteilemällä tai johtamalla seinä- ja kattorakenteista. Suurin vaikutus ulkoisiin lämpökuormiin on rakennuksen suunnalla ja suojausmenetelmillä. Rakennuksen maantieteellisellä sijainnilla ei ole kovinkaan suurta merkitystä, jos tarkastellaan Euroopan aluetta. Kuvasta 1 huomataan, että jäähdytyskuormat pysyvät lähes samanlaisina eri tarkastelupaikoissa. Vaikka Tukholman, Amsterdamin ja Madridin ilmaston erojen takia jäähdytyskuormat vaihtelevat, on suuri ero jäähdytyskuormissa rakennuksen suuntauksien välillä. (4, s. 19.) Kuvassa 1 vasemmalla puolella olevassa pylväsdiagrammissa on esitetty jäähdytyskuormat ilman ulkopuolista aurinkosuojausta, ja oikeanpuoleisessa diagrammissa on esitetty arvot ulkopuolisella aurinkosuojauskella.



Kuva 1. Jäähdytyskuormat eri ikkunatyypeille ulkoisella aurinkosuojauskella ja ilman (4, s. 22).

Kuvassa 1 x-akselilla esitetyt tiedot ovat eri ikkunatyyppejä. Low-e on energian säästöikkuna ja 2-lasi on normaali kaksikerroksinen ikkunatyyppi. Aurinkosuojaus tarkoittaa kuvassa ikkunaan asennettavaa suojaa, kuten sälekaihtimia tai verhoja. Oikealla olevassa diagrammissa on myös ulkoinen aurinkosuojaus.

3.2 Auringon säteily

3.2.1 Auringon säteilyn merkitys

Auringon säteily on yksi merkittävimmistä lämmönlähteistä rakennuksissa, mutta sen määrä ja säteilykulma vaihtelee suuresti vuodenajan sekä sääolojen mukaan. Tämän takia rakentamisessa ja suunnittelussa tulee huomioida vaihtelut, jotta voidaan ylläpitää haluttu sisäilmasto riippumatta ulkoilman muutoksista. (4, s. 49.)

Auringon säteilyn intensiteetti ilmakehään tullessaan on $1\ 366\ \text{W/m}^2$ ja se heikkenee sironnan ja ilmakehään sitoutumisen vaikutuksesta tasolle $1\ 000\ \text{W/m}^2$ saapuessaan optimaalisissa olosuhteissa maanpinnalle. On huomioitava, että todelliset arvot vaihtelevat kellonajan, sijainnin, sääolosuhteiden ja rakennuksen suuntauksen mukaan. Näistä arvoista voidaan kuitenkin päätellä, että suuren pinta-alan omaavat rakennukset keräävät huomattavan määrän auringon säteilyenergiaa. Tämän takia rakennuksen suunnittelussa tulee toteuttaa riittävä aurinkosuojaus tai lisätä mekaaninen jäähdytys. Rakennuksen huolellinen suojaus auringon säteilyltä vaikuttaa merkittävästi jäähdytystehontarpeeseen, jolla puolestaan on suora vaikutus jäähdytyskustannuksiin. Aurinkosuojauksella ei myöskään ole yleensä käyttökustannuksia kuten mekaanisella jäähdytyksellä. Tämän takia aurinkosuojauksella voidaan myös saavuttaa merkittäviä säästöjä. (4, s. 27.)

3.2.2 Auringon säteilyn voimakkuus

Aurinkokulmat määrittävät ikkunapintoihin kohdistuvan auringon säteilyn voimakkuuden. Aurinkokulmat vaihtelevat alueellisesti joka päivä, koska maapallon akseli on kulmassa $23,5^\circ$ kiertoratansa tasoon nähden. Aurinkokulmilla on suuri merkitys suunniteltaessa rakennuksen ja ikkunoiden suuntausta. Myös tehokkaan aurinkosuojauksen toteutus

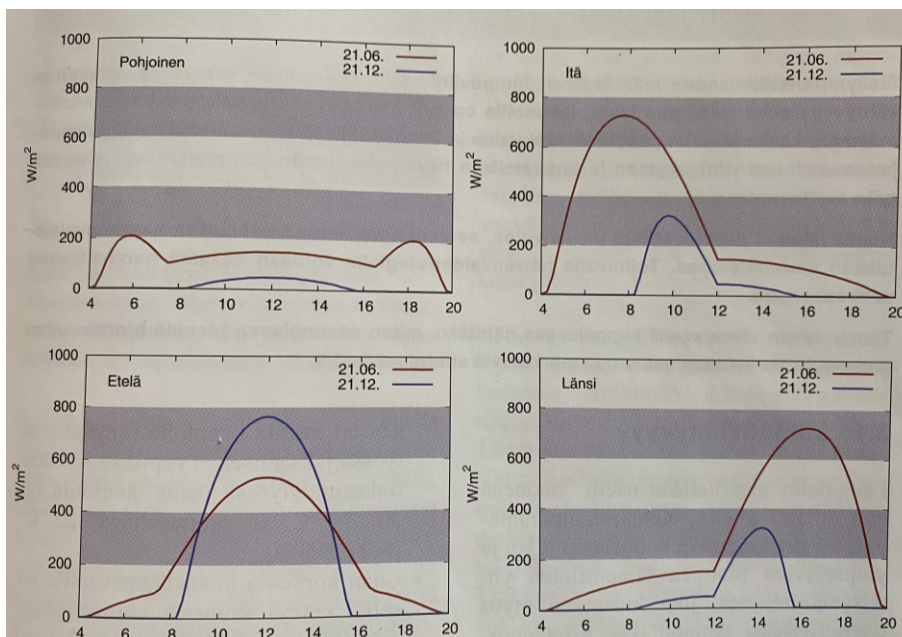
vaatii perehtymistä aurinkokulmiin, jotta siitä saatava hyöty voidaan maksimoida. Auringosuojaus tulee siis suunnitella ottaen huomioon julkisivujen suuntaus, koska auringonsäteilyn kulma osuu ikkunoihin eri kulmassa riippuen julkisivun suuntauksesta. Aurinkokulmat vaihtelevat myös vuoden ajan mukaan, joten tulee määrittää ajanjakso eri julkisivuille, jolloin niihin kohdistuvat suurimmat kuormat. Tehokas auringosuojaus tulee siis toteuttaa tapauskohtaisesti. (4, s. 7.)

Pinnalle osuva auringonsäteilyn voimakkuus eli auringonsäteilyn intensiteetti (W/m^2) vaihtelee voimakkaasti vuodenaikojen ja sääolosuhteiden mukaan. Auringonsäteilyn intensiteetti määräytyy kolmen komponentin mukaan, jotka ovat,

- suora auringonsäteily
- hajasäteily
- maaperästä ja muista ympäröivistä pinnoista heijastuva säteily (4, s. 6).

Hajasäteilyllä tarkoitetaan taivaalta tulevaa auringonsäteilyä, joka tulee muusta suunnasta kuin suoraan auringosta. Hajasäteilyä syntyy auringonsäteilystä sironnan seurauksena esimerkiksi pilvistä ja ilman epäpuhtauksista. Suomessa hajasäteilyn määrä on noin 40–50 prosenttia kokonaissäteilyn määrästä. Suora auringonsäteily on auringonsäteilyä, joka ei ole muuttanut suuntaansa matkalla auringosta tarkastelupisteeseen. Eri komponenttien osuus auringon intensiteetissä määräytyy tarkasteltavan pinnan suuntauksesta sekä auringon säteilykulmasta. Esimerkiksi tarkasteltaessa rakennuksen katon vaakapintaa huomataan, että maaperästä ja muista ympäröivistä pinnoista heijastuva säteily on nolla. Sen sijaan suora auringon säteily on lähes aina voimakkain osatekijä, poikkeuksena auringonnousun ja -laskun aika. Kuvassa 2 on esitetty auringonsäteilyn intensiteetin jakautuminen julkisivujen pystypinnoille pääilmansuuntien mukaan. Kuvan 3 tulokset kuvaavat auringon intensiteettiä kirkkaana kesä- ja talvipäivänä ja kuvattu alue on 50° pohjoista leveyttä, joka sijaitsee Amsterdamin kohdalla. Kuvaajissa punaisella viivalla on esitetty kesäkuun loppupuolella vaikuttavaa auringonsäteilyn intensiteettiä, jolloin aurinko on korkeimmillaan ja päivä on pisimmillään. Sinisellä viivalla on esitetty joulukuun loppupuolella vaikuttavaa auringonsäteilyn intensiteettiä, jolloin aurinko on

matalalla ja päivä on lyhyt. Kuvan 2 tulokset on saatu simulointiolosuhteissa, jossa olosuhteet ovat olleet optimaaliset. Simuloinneissa on myös oletettu, että hajasäteilyä laskeissa pinta näkee puolet taivaasta. Todellisuudessa ympäristö usein varjostaa pintaa jonkin verran. Esimerkiksi ympäröivillä rakennuksilla tai puilla voi olla merkittävä vaikutus hajasäteilyyn. Myöskään auringon säteily ei ole usein edes täydellisen kirkkaalla säällä kuvan 2 mukainen. (3; 4, s. 6.)



Kuva 2. Auringonsäteilyn intensiteetti eri ilmansuuntiin suunnatuilla julkisivuilla (4, s. 7).

Kuvasta 2 saadaan kuitenkin hyvä käsitys auringon säteilyn intensiteetistä eri ilmansuuntiin osoittaville julkisivuille. Pohjoisella julkisivulla auringon säteilyn intensiteetti on melko tasainen, itäisellä julkisivulla auringonsäteily keskittyy aamupäivään, eteläisellä julkisivulla auringon säteily keskittyy keskipäivälle ja läntisellä julkisivulla suurin kuorma keskipäivästä iltaan. (4, s. 7.)

3.2.3 Auringon säteilyn lämpökuorman siirtyminen huonetilaan

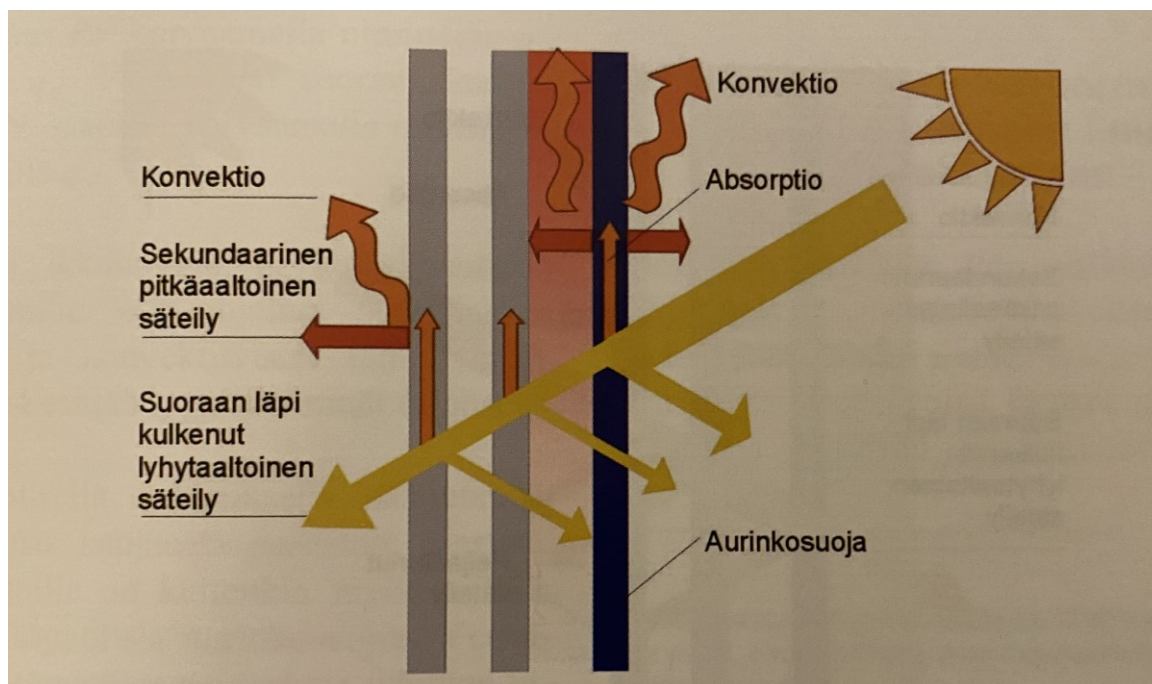
Auringonsäteilyn lämpökuorma siirtyy huonetiloihin suoraan ikkunan kautta säteilemällä tai rakenteiden kautta johtumalla. Kuvassa 3 on esitetty ikkunan läpi kulkeutuvat tärkeimmät lämpövirrat. Nämä lämpövirrat ovat keltaisella nuolella esitetty lyhytaaltainen säteily

eli suora- ja hajasäteily, punaisella nuolella esitetty sekundäärinen säteily eli rakenteista johtuva lämpösäteily ja mutkikas oranssilla nuolella esitetty konvektiolämpövirtaus. (3.)

Johtuminen eli konduktio on lämmön siirtymistä aineen sisällä tai aineesta toiseen, mikäli ne ovat kosketuksissa toisiinsa. Johtuvan lämmön määrä riippuu materiaalien lämmönjohtavuudesta, jonka SI-järjestelmän mukainen yksikkö on $W/(K \cdot m)$. Mitä suurempi lämmönjohtavuuslukema on, sitä paremmin lämpö johtuu aineen sisällä. Yleisesti metalleilla on suuri lämmönjohtavuus ja kaasuilla pieni. Esimerkiksi kuparin lämmönjohtavuus on $360 W/(K \cdot m)$ ja ilman $0,026 W/(K \cdot m)$. Tämän takia ilma ja eri kaasut toimivat hyvinä eristeinä esimerkiksi ikkunalasien välissä (5).

Lämpösäteily puolestaan on ainoa lämmönsiirron tavoista, joka pystyy siirtämään lämpöä ilman väliainetta. Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, joka perustuu hiukkasten lämpöliikkeeseen. Lämpöliikettä tapahtuu kaikissa aineissa, jotka ovat yli absoluuttisen nolapisteen. Mitä suurempi on aineen lämpötila, sitä suurempi on hiukkasten lämpöliike ja niiden tuottama lämpösäteily (5).

Konvektiolla tarkoitetaan lämmön siirtoa kaasussa tai nesteessä lämmön aiheuttamien virtausten mukana. Konvektio perustuu lämpötilaerojen aiheuttamiin tiheyseroihin aineiden välillä. Aineen tiheys on riippuvainen aineen lämpötilasta. Harventunut kuuma aine nousee ylöspäin nosteen vaikutuksesta, ja tiheytyneet viileät aine laskeutuu alaspäin. Konvektio voi olla myös pakotettua eli virtausta, jota on avustettu esimerkiksi potkureilla tai puhaltimilla (5).



Kuva 3. Tärkeimmät ikkunan läpi kulkeutuvat energiavirrat (4, s. 19).

Kuvassa 3 ikkunasta ulospäin lähtevät nuolet ovat ikkunan heijastamaa säteilyä. Sisään-päin suuntautuva nuoli eli sekundaarinen pitkäaaltoinen säteily syntyy rakenteen lämpiä-misestä auringonsäteilyn vaikutuksesta eli rakenne lämpenee absorptio vaikutuksesta. Tällöin rakenne luovuttaa lämpöä huoneeseen pitkäaaltoisenalämpösäteilynä. Konvek-tio eli kuvassa mutkikkaalla nuolella esitetty virtaus syntyy ikkunan läheisyydessä läm-menneen ilman ja huoneessa muualla olevan viileimmän ilman vaikutuksesta. (4, s. 19.)

4 Ikkunoiden kautta tulevan lämpöenergian laskeminen

Ikkunoiden kautta kulkeutuva auringon säteilyenergia voidaan laskea melko tarkasti kä-sin, mutta rakenteisiin varautuvan lämpöenergian tarkkaan laskemiseen tarvitaan dy-naamisia laskentatyökaluja. Tässä luvussa esitetyt kaavat ja laskentamenetelmät perus-tuvat ympäristöministeriön ohjeistukseen rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitys-tehontarpeen laskennasta. Ikkunoiden kautta rakennukseen tuleva auringon säteilyener-gia eli Q_a (kWh/kk) voidaan laskea kaavalla 4 (1, s. 32).

$$Q_a = \sum G_{\text{säteily, vaakapinta}} F_{\text{suunta}} F_{\text{läpäisy}} A_{\text{ikk}} g = \sum G_{\text{säteily, pystypinta}} F_{\text{läpäisy}} A_{\text{ikk}} g \quad (4)$$

jossa

Q_{aur}	on ikkunoiden kautta rakennukseen tuleva auringon säteilyenergia, kWh/kk
$G_{\text{säteily, vaakapinta}}$	on vaakatasolle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia pinta-alan yksikköä kohti, kWh/(m ² kk)
$G_{\text{säteily, pystypinta}}$	on pystypinnalle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia pinta-alan yksikköä kohti, kWh/(m ² kk)
F_{suunta}	on muuntokerroin, jolla vaakatasolle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia muunnetaan ilmansuunnittain pystypinnalle tulevaksi kokonaissäteilyenergiaksi, -
$F_{\text{läpäisy}}$	on säteilyn läpäisyn kokonaiskorjauskerroin, -
A_{ikk}	on ikkuna-aukon pinta-ala (kehys- ja karmirakenteineen), m ²
g	on ikkunan valoaukon auringon kokonaissäteilyn läpäisykerroin, -

Jos rakennuksen ikkunoiden kokonaissäteilyn läpäisykerrointa (g) ei tunneta, voidaan se laskea kaavalla 5 (1, s. 33).

$$g = 0,9g_{\text{kohtisuora}} \quad (5)$$

jossa

g	on ikkunan valoaukon auringon kokonaissäteilyn läpäisykerroin, -
-----	--

$g_{\text{kohtisuora}}$ on ikkunan valoaukon kohtisuoran auringonsäteilyn kokonaisläpäisykerroin, -.

Ympäristöministeriön ohjeessa rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskentaan on esitetty eri $g_{\text{kohtisuora}}$ arvoja erilaisille ikkunatyypeille. Arvot on esitetty kuvassa 4 (1, s. 33).

Lasitus	$g_{\text{kohtisuora}}$
Yksinkertainen lasitus	0,85
Kaksinkertainen lasitus	0,75
Yksipuitteinen, kolmilasinen ikkuna	0,70
Eristyslasi + erillislasi	0,65
Eristyslasi, matalaemissiviteettipinnoite + erillislasi	0,55

Kuva 4. Ikkunan valoaukon kohtisuora auringonsäteilyn kokonaisläpäisykerroin $g_{\text{kohtisuora}}$ (1, s. 33).

Säteilyn läpäisyn kokonaiskorjauskerroin eli $F_{\text{läpäisy}}$ lasketaan kaavalla 6 (1, s. 33).

$$F_{\text{läpäisy}} = F_{\text{kehä}} F_{\text{verho}} F_{\text{varjostus}} \quad (6)$$

jossa

$F_{\text{läpäisy}}$ on säteilyn läpäisyn kokonaiskorjauskerroin, -

$F_{\text{kehä}}$ on kehäkerroin, -

F_{verho} on verhokerroin, -

$F_{\text{varjostus}}$ on varjostusten korjauskerroin, -.

Jos ikkunoissa ei ole pysyviä verhoja tai varjostuksia, voidaan auringonsäteilyn läpäisyn kokonaiskorjauskertoimelle käyttää arvoa 0,75. Kuvassa 5 on esitetty tyypillisiä verho-kertoimia. (1, s. 33.)

Auringonsuojaratkaisu	Verhokerroin
Ei verhoa	1,00
Verhot	0,75
Valkoiset sälekaihtimet lasien välissä	0,30
Valkoiset sälekaihtimet sisäpuolella	0,60
Ikkunaluukut (säleikkö) ulkopuolella	0,30

Kuva 5. Verhokertoimia F_{verho} auringonsuojille (1, s. 34).

Kehäkertoimella eli $F_{\text{kehä}}$ tarkoitetaan valoaukon pinta-alan ja ikkuna-aukon pinta-alojen suhdetta. Tämä voidaan laskea kaavalla 7 (1, s. 34).

$$F_{\text{kehä}} = \frac{A_{\text{ikk,valoaukko}}}{A_{\text{ikk}}} \quad (7)$$

jossa

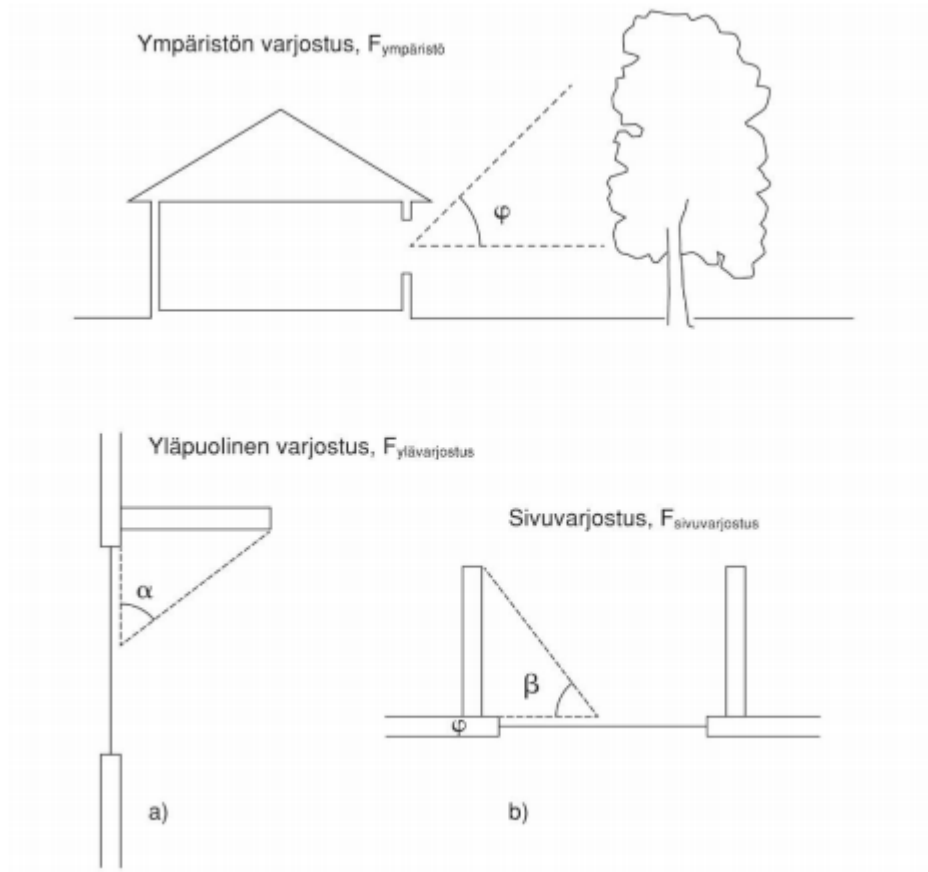
$F_{\text{kehä}}$ on kehäkerroin, -

$A_{\text{ikk,valoaukko}}$ on ikkunan valoaukon pinta-ala, m²

A_{ikk} on ikkuna-aukon pinta-ala (kehys- ja karmirakenteineen), m².

Jos ei ole tarkkaa tietoa, jonka pohjalta laskea, voidaan kehäkertoimena käyttää arvoa 0,75 (1, s. 34).

Ikkunan varjostuksen korjauskerroin saadaan kertomalla ympäristön, yläpuoliset ja pystysuorat varjostuskertoimet yhteen. Varjostuskulmat tulee määrittää tapauskohtaisesti kohteen ja sen ympäristön mukaan. Kuvassa 6 on esitetty eri korjauskertoimien kulmien määritykset, joita voidaan käyttää kulmien arvioimisessa. (1, s. 35.)



Kuva 6. Varjostuskulmien määritelmät (1, s. 35).

Ympäristön korjauskerroin eli $F_{\text{ympäristö}}$ on horisontaalisten varjostusten korjauskerroin, joka ottaa huomioon maaston, puiden ja ympäröivien rakennusten varjostuksen. Kuvassa 7 on esitetty $F_{\text{ympäristö}}$ korjauskertoimia ilmansuuntien ja varjostuskulmien mukaan. (1, s. 34.)

	Ikkunan ilmansuunta					
	Pohjoinen		Itä ja Länsi		Etelä	
	φ	φ	φ	φ	φ	φ
	45°	15°	45°	15°	45°	15°
Tammikuu	0,95	0,98	0,60	0,86	0,25	0,75
Helmikuu	0,90	0,96	0,50	0,83	0,30	0,76
Maaliskuu	0,90	0,96	0,50	0,83	0,40	0,80
Huhtikuu	0,80	0,93	0,50	0,83	0,50	0,83
Toukokuu	0,80	0,93	0,55	0,85	0,70	0,90
Kesäkuu	0,60	0,86	0,50	0,83	0,75	0,91
Heinäkuu	0,70	0,90	0,55	0,85	0,75	0,91
Elokuu	0,65	0,88	0,40	0,80	0,40	0,80
Syyskuu	0,85	0,95	0,50	0,83	0,45	0,81
Lokakuu	0,90	0,96	0,55	0,85	0,30	0,76
Marraskuu	0,90	0,96	0,60	0,86	0,20	0,73
Joulukuu	0,95	0,98	0,80	0,93	0,20	0,73

Kuva 7. Ympäristön varjostuksen korjauskertoimet $F_{\text{ympäristö}}$ (1, s. 34).

Ylävarjostuksen korjauskerroin eli $F_{\text{ylävarjostus}}$ huomioi ikkunoiden yläpuolisten rakenteiden varjostuksen. Tällaisia ovat esimerkiksi katokset tai muut julkisivun ulokkeet. Kuvassa 8 on esitetty $F_{\text{ylävarjostuksen}}$ korjauskertoimia ilmansuuntien ja varjostuskulmien mukaan (1, s. 34).

Kulma (α)	Ikkunan ilmansuunta		
	Pohjoinen	Itä ja Länsi	Etelä
0°	1,00	1,00	1,00
10°	0,97	0,98	0,99
20°	0,93	0,95	0,97
30°	0,90	0,92	0,95
40°	0,87	0,88	0,92
45°	0,80	0,81	0,85
60°	0,66	0,65	0,66

Kuva 8. Yläpuolisen varjostuksen korjauskertoimet lämmityskaudelle $F_{\text{ylävarjostus}}$ (1, s. 34).

Sivubarjostus korjauskerroin huomioi pystysuorien rakenteidenvarjostuksen. Kuvassa 9 on esitetty $F_{\text{sivubarjostus}}$ korjauskertoimia ilmansuuntien ja varjostuskulmien mukaan (1, s. 34).

Kulma (β)	Ikkunan ilmansuunta		
	Pohjoinen	Itä ja Länsi	Etelä
0°	1,00	1,00	1,00
10°	0,99	0,97	0,98
20°	0,99	0,94	0,96
30°	0,98	0,90	0,94
40°	0,98	0,87	0,91
45°	0,98	0,82	0,85
60°	0,98	0,73	0,73

Kuva 9. Sivuvarjostuksen korjauskertoimet lämmityskaudelle $F_{\text{sivuvarjostus}}$ (1, s. 34).

Varjostusten korjauskerroin eli $F_{\text{varjostus}}$ lasketaan kaavalla 8. (1, s. 34)

$$F_{\text{varjostus}} = F_{\text{ympäristö}} F_{\text{ylävarjostus}} F_{\text{sivuvarjostus}} \quad (8)$$

jossa

$F_{\text{varjostus}}$ on varjostusten korjauskerroin, -

$F_{\text{ympäristö}}$ on ympäristön horisontaalisten varjostusten korjauskerroin (esimerkiksi maasto, ympäröivät rakennukset ja puut), -

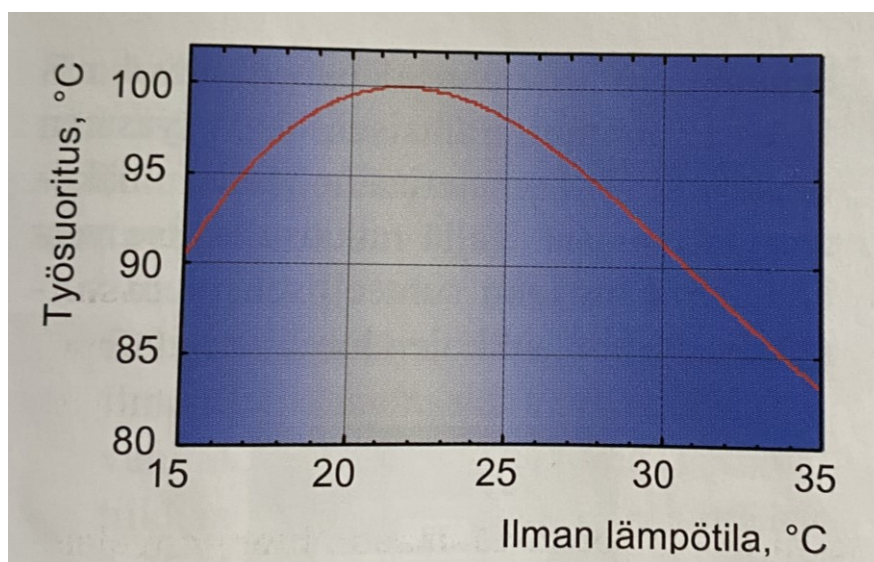
$F_{\text{ylävarjostus}}$ on ikkunan yläpuolisten vaakasuorien rakenteiden varjostusten korjauskerroin, -

$F_{\text{sivuvarjostus}}$ on ikkunan sivuilla olevien pystysuorien rakenteiden varjostusten korjauskerroin, -.

5 Lämpötilan vaikutus sisätilojen viihtyvyyteen

Tarkasteltaessa viihtyisyyttä sisätiloissa nousee lämpötila hyvin tärkeäksi tekijäksi. Sisäilman lämpötila, jonka henkilö kokee viihtyisäksi, vaihtelee suuresti henkilöiden välillä.

Viihtyisäksi sisäilman lämpötilan kokee henkilö, joka on tasapainolämpötilassa. Tasapainolämpötilalla tarkoitetaan tilannetta, jossa kehon aineenvaihdunnan tuottama energia on yhtä suuri kuin kehosta ympäristöön siirtyvä energia. Tämä kuitenkin vaihtelee tilassa oleskelevan henkilön ominaisuuksien ja aktiivisuuden mukaan. Voidaan siis todeta, että viihtyisä sisälämpötila on yksilöllinen tuntemus. Keskimääräisenä sopivana sisäilman lämpötilana pidetään talvisin 20–22 °C ja kesäisin 23–25 °C. Näissäkin lämpötiloissa voi osa ihmisistä kokea sisäilman lämpötilan epämiellyttäväksi. Lämpötilalla on myös vaikutusta työstä suoriutumiseen, ja sen huomioiminen on tärkeää suunniteltaessa toimivia työympäristöjä. Kuvassa 10 on esitetty toimistotyössä suoriutumista lämpötilasta riippuvana. (7)



Kuva 10. Toimistotyössä suoriutuminen ilman lämpötilasta riippuvana (8).

Liian korkea sisäilman lämpötila lisää sisäilmaan liittyviä oireita, kuten kuivuuden tunnetta ja alhainen lämpötila lisää usein vedon tunnetta. Vedon tunteeseen liittyvät ongelmat aiheuttavat yleisimmät sisäilmaan liittyvät valitukset. Vedon tunnetta lisäävät liian suuret ilmavirrat, alhainen ilman lämpötila sekä pintojen alhainen lämpötila. Sisäilman lämpötilasta ja sen vaikutuksista ihmiseen on tehty paljon tutkimuksia. Tutkimus tuloksia on saatu mm. seuraavia,

- Sisäilman lämpötila vaikuttaa toimistotyön tuottavuuteen, jossa liian matala tai korkea lämpötila romahduttaa tuottavuuden. Tyypillisessä toimistotyöskentelyssä hyvän tuottavuuden saavuttamiseksi lämpötilan tulisi olla 20 °C:n ja 24 °C:n välillä. Optimaalisena lämpötilana pidetään 22 °C:ta. (8)
- Havaitulla sisäilman laadun huonontumisella ja sairusrakennusoireyhtymän (SBS) syntymisellä on selvä yhteys liian korkeisiin sisäilman lämpötiloihin (8)
- Koulumenestys ja koulutehtävien suoritustaso heikkenee korkeissa sisäilman lämpötiloissa (9)

Tarkasteltaessa sisäilmaan liittyviä valituksia tulee huomioida myös muita vaikuttavia tekijöitä. Tällaisia tekijöitä ovat,

- henkilökohtaiset, persoonallisuuteen liittyvät ominaisuudet
- kodin ja työpaikan ihmissuhteet
- työympäristön henkinen ilmapiiri
- työn fyysinen ja psyykinen kuormittavuus.

Sisäilmaan koskevia ongelmia tulee tarkastella mittauksien ja laskelmien avulla. Sisäilmaa koskeviin valituksiin voi kanavoitua edellä listattuja muita vaikuttavia tekijöitä, koska sisäilmasto on neutraali ja helppo valituskohde. (6)

6 Kohteen lähtötiedot

6.1 Tarkasteltava rakennus ja tilat

Tarkasteltava kohde on vuonna 2002 valmistunut ja toimintansa aloittanut majoituslaitos, joka sijaitsee pääkaupunkisudulla. Rakennuksen tarkasteltavassa alueessa on 94 tilaa, joista 84 tilaa on majoituskäytössä. Kerroksia rakennuksessa on viisi kappaletta. Majoituskäytössä olevat tilat ovat yhden ja kahden hengen huoneita, jotka ovat korkealla käyttöasteella ympäri vuoden. Tarkasteltavat huoneet ja niiden julkisivu on suunnattu kaakkoon, eikä kohteella ole läheisiä varjostavia rakennuksia tai kasvistoa.

6.2 Laskelmissa käytetyt rakenteiden lähtötiedot

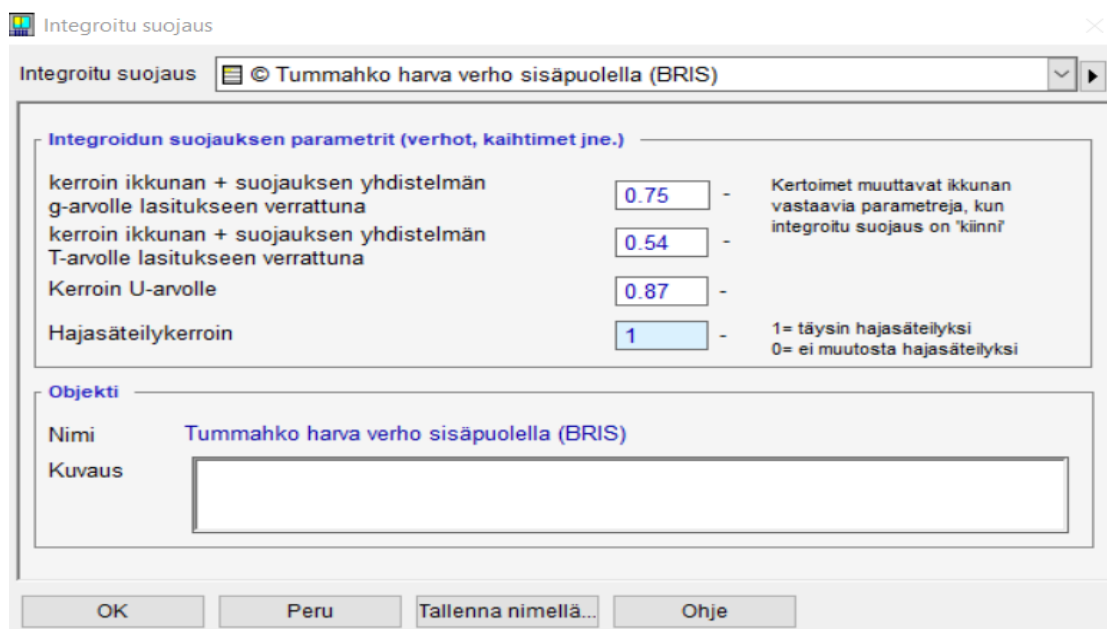
Työn tekemiseen oli käytössä rakennuksen LVI-suunnitelmat sekä arkkitehtipiirustukset ja leikkaukset. Kohteen rakennepiirustukset olivat hyvin puutteelliset varsinkin tarkasteltavalta alueelta. Tämän vuoksi piti arvioida eri rakenteiden ominaisuudet hyödyntämällä leikkauspiirustuksia ja ajankohdan rakentamismääräyksiä. Tämän vuoksi laskelmissa käytetyt rakenteiden ominaisuudet voivat poiketa todellisista arvoista. Rakenteiden arvioimisessa käytettiin ympäristöministeriön Energiatodistusoppaan 2018 liitetiedostoa. Energiatodistusoppaan 2018 liitteen tarkoituksena on auttaa rakennuksen vaipan lämmönjohtavuuksien arvioinnissa, jos tarkasteltavan kohteen rakenteiden dokumentointi on ollut puutteellista. Kyseisen liitteen johdannossa mainitaan, että voidaan olettaa saman aikakauden rakennuksien olevan rakennettu samalla tavalla. Ympäristöministeriön liitteen avulla pystyin arvioimaan eri rakennetyyppien U-arvot, joita vertasin työssä käytettyihin IDA ICE -ohjelman laskemiin arvoihin. Vertailu tehtiin, jotta lasketut rakenteiden ominaisuudet vastaavat rakentamisajankohdan määräyksiä.

Leikkauspiirustuksien perusteella määritettiin rakennekerroksien paksuudet, jotka syötetään IDA ICE -ohjelmaan saadaan määritettyä työssä käytetyt rakenteiden U-arvot. Rakenteiden paksuudet ja materiaalit ovat myös vaadittavia tietoja lämpöenergian varastoitumisen simuloinnissa. Lämpöolosuhteisiin vaikuttavia rakenteita tarkasteltavissa tiloissa ovat ulkoseinät, välipohjat, ikkunat ja yläpohja. Välipohjat ovat näistä vähiten

merkittäviä, mutta ne otettiin tarkasteluissa kuitenkin huomioon. Välipohjat ovat betonivälipohjia, joiden paksuus lattiapinnoitteen kanssa on 175 mm. (10)

Tarkasteltavien tilojen ulkoseinät ovat 380 mm:n paksuisia ja leikkauspiirustuksien perusteella arvioitu ulkoseinän U-arvo on 0,23 W/(m²K). Leikkauspiirustuksiin perustuva rakenteen koostumus on 150 mm betoni, eristys 140 mm ja julkisivuverhous.

Ikkunoiden laskennalliset ominaisuudet valittiin rakennuksen valmistumisajan mukaisten määräysten mukaan. Tällöin suurin sallittu ikkunan U-arvo oli 2,1 W/(m²K). Simuloinneissa käytettiin lasitusta, jonka U-arvo on 1,9 W/(m²K) ja g-arvo on 0,76. Ikkunoiden kalvotuksen vaikutusta tarkasteltiin ikkunalla, jonka g-arvo oli 0,47. Tämä g-arvon arvio valittiin 3M ikkunakalvoesitteen mukaan (11). Tarkasteluissa käytettiin ikkunan ulkopintaan asennettavan läpinäkyvän Prestige 70 -kalvon tietoja. Eri kalvojen ominaisuuksia on esitetty kuvassa 12. Ikkunoissa on myös tumman värinen ja melko harva verho ikkunan sisäpuolella. Tämä otettiin myös IDA ICE -ohjelman laskennassa huomioon. Ikkunan ominaisuusvalikosta voi määrittää eri verhojen ja sälekaihtimien ominaisuudet. Valitsin ikkunoihin IDA ICE -ohjelman esittämän vaihtoehdon, joka on esitetty kuvassa 11. Ikkunoiden koko on arkkitehtipiirustuksien perusteella 1000 mm x 1120 mm.



Kuva 11. IDA ICE -ohjelmaan integroitu suojausvalikko.

Ulkokalvon valonläpäisykykytaulukko:

Lasityyppi	Kalvotyyppi	Auringonsuojakerroin	Näkyvä ulkotilan heijastus	Näkyvä sisätilan heijastus	Näkyvä valonläpäisykyky	U-arvo	G-arvo	Torjutun aurinkoenergian kokonaismäärä	Lämpösaateily säästön määrä
Yksi levy									
Läpinäkyvä	Prestige 40 Ulos	0,45	6 %	42 %	61 %	1,08	0,39	52 %	
Läpinäkyvä	Prestige 70 Ulos	0,55	7 %	70 %	52 %	1,46	0,47	41 %	
Läpinäkyvä	Prestige 90 Ulos	0,74	9 %	88 %	36 %	1,38	0,67	21 %	
Läpinäkyvä	Silver 35 Ulos	0,41	35 %	36 %	35 %	1,02	0,36	64 %	56 %
Läpinäkyvä	Bronze 20 Ulos	0,26	32 %	33 %	23 %	1,02	0,22	78 %	73 %
Läpinäkyvä	Neutral 35 Ulos	0,56	10 %	13 %	44 %	0,9	0,49	51 %	56 %
Läpinäkyvä	Silver 15 Ulos	0,22	61 %	56 %	17 %	1,02	0,19	81 %	77 %

Kuva 12. Aurinkokalvojen ominaisuuksia (11).

Yläpohja lämmönläpäisykerroin arvioitiin rakennusajankohdan määräysten mukaan ja apuna käytettiin leikkauksissa olevia rakenteen paksuutta. Yläpohjan U-arvo oli leikkauksien perusteella lähellä vuonna 2003 voimaan tulleita määräyksiä. Valitsin simuloiteihin IDA ICE -ohjelman laskeman yläpohjan U-arvon, jonka on 0,17 W/(m²K).

6.3 Tarkasteltavan alueen LVI-järjestelmä

Rakennuksen tarkasteltavissa tiloissa ei ole jäähdytystä, joten lämpötiloihin oleellisesti kesällä vaikuttava järjestelmä on ilmanvaihto. Rakennuksen majoitustiloissa on yhden ja kahden hengen huoneita. Yhden hengen huoneissa tilaan tuodaan ja sieltä poistetaan ilmaa 20 litraa sekunnissa. Kahden hengen huoneissa ilmaa tuodaan ja poistetaan 30 litraa sekunnissa. Tilojen korkean käyttöasteen vuoksi simuloinneissa käytettiin 100 %:n toiminta-astetta ilmanvaihtokoneessa.

7 Rakennuksen IFC-tietomallin laatiminen

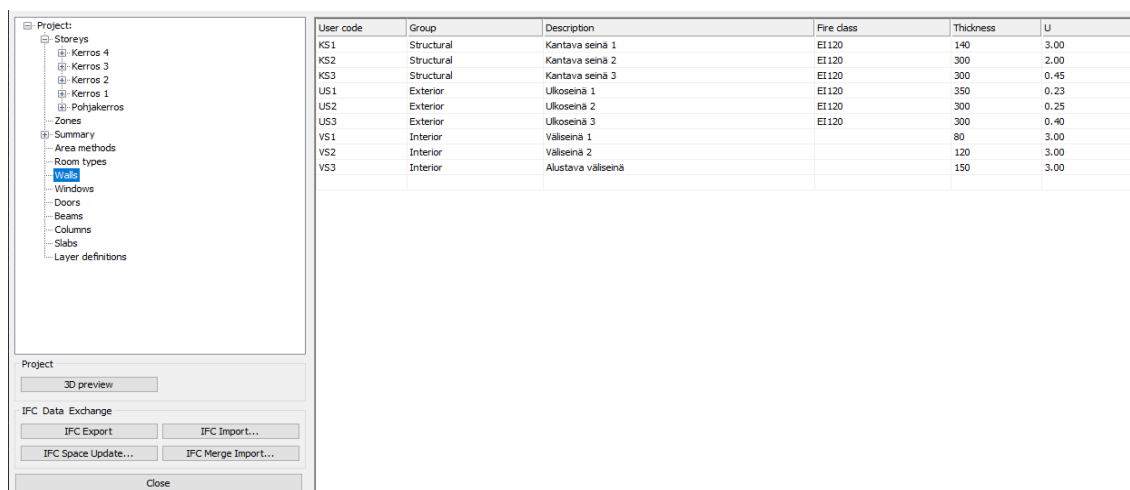
Rakennuksen IFC-malli on tiedostomuoto, jolla voidaan siirtää rakennuksen tietoja eri ohjelmistojen välillä, ja se on yleisin 3D-mallien tiedostonsiirtoon käytetty menetelmä. Lyhenne IFC tarkoittaa Industry Foundation Classes, joka on kansainvälinen avoin tiedostoformaatti. Kyseisen mallin voi laatia monella eri mallinnusohjelmalla, joka pystyy

muuttamaan tiedoston IFC-muotoon. Tässä työssä IFC-malli luotiin käyttämällä MagiCad-ohjelman Room-sovellusta, ja tavoitteena oli laatia rakennuksen 3D-malli olosuhdesimulointeja varten.

Mallinnus aloitetaan luomalla mallille projektitiedosto MagiCad-ohjelman Room-sovelluksessa. Projektinhallintavalikkoon syötetään rakennuksen mallintamiseen tarvittavat tiedot. Malli kannattaa pitää mahdollisimman yksinkertaisena, jotta IDA ICE -simulointiohjelman suorittamat laskelmat eivät hidastu merkittävästi. Mallintamiseen vaadittavia tietoja:

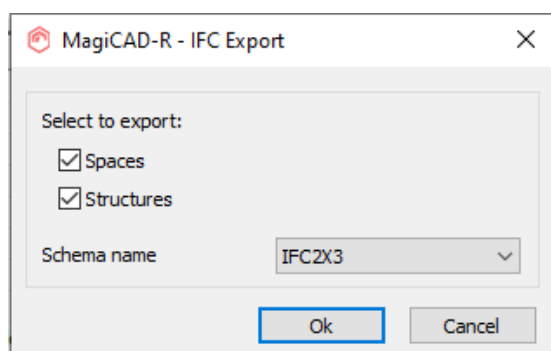
- rakennuksen kerroskorkeudet ja lukumäärä
- rakenteiden paksuudet
- ovien ja ikkunoiden sijainnit
- rakennuksen ja kerroksien sijainti ohjelman koordinaatistossa.

Kuvassa 13 on esitetty projektinhallintaikkuna MagiCad-ohjelman Room-sovelluksessa. Tämän valikon kautta pääsee tarkastelemaan ja muuttamaan projektin tietoja. Kuvassa 13 on esillä projektinhallintaikkunan seinien määrittämyskohta. Seinien määrittämisestä voi muokata rakenteiden paloluokkia, paksuuksia ja U-arvoja. Tässä työssä vain paksuuksilla on mallin luomisessa merkitystä, koska U-arvot määritetään simulointeihin IDA ICE -simulointiohjelmassa.



Kuva 13. MagiCad-ohjelman Room-sovelluksen projektinhallinta valikko.

Mallin piirtäminen aloitetaan avaamalla Room-sovelluksen taustalle arkkitehtipiirustukset. Arkkitehtipiirustuksen perusteella piirretään seinät oikeille paikoilleen ja varmistetaan rakenne- tai leikkauspiirustuksista seinien paksuuksien yhdenmukaisuus. Kun seinät on piirretty paikoilleen, lisäämme ovet ja ikkunat oikeille paikoille. Kun mallinnus on tehty vaadittavalle alueelle, voidaan malli muuttaa IFC-muotoon. Tämä tapahtuu projektin hallintavalikon kautta painamalla IFC-export -painiketta. Tällöin avautuu kuvan 14 mukainen valikko, jossa voi valita, luodaanko malliin vain rakenteet vai myös määritetyt tilat. Valikosta voi myös valita IFC-tiedoston tyyppiä, joka on IFC 2x3 tai IFC 4. Tässä työssä valitsimme IFC 2x3 tyyppiä sekä mallinsimme rakenteet ja määritetyt tilat. IFC2x3 on yleisessä käytössä oleva tiedostomalli ja IFC4 sen uusi versio, mutta se ei ole vielä laajasti käytössä.



Kuva 14. MagiCad-ohjelman Room-sovelluksen IFC-valikko.

8 IDA ICE -ohjelma ja simulointimalli

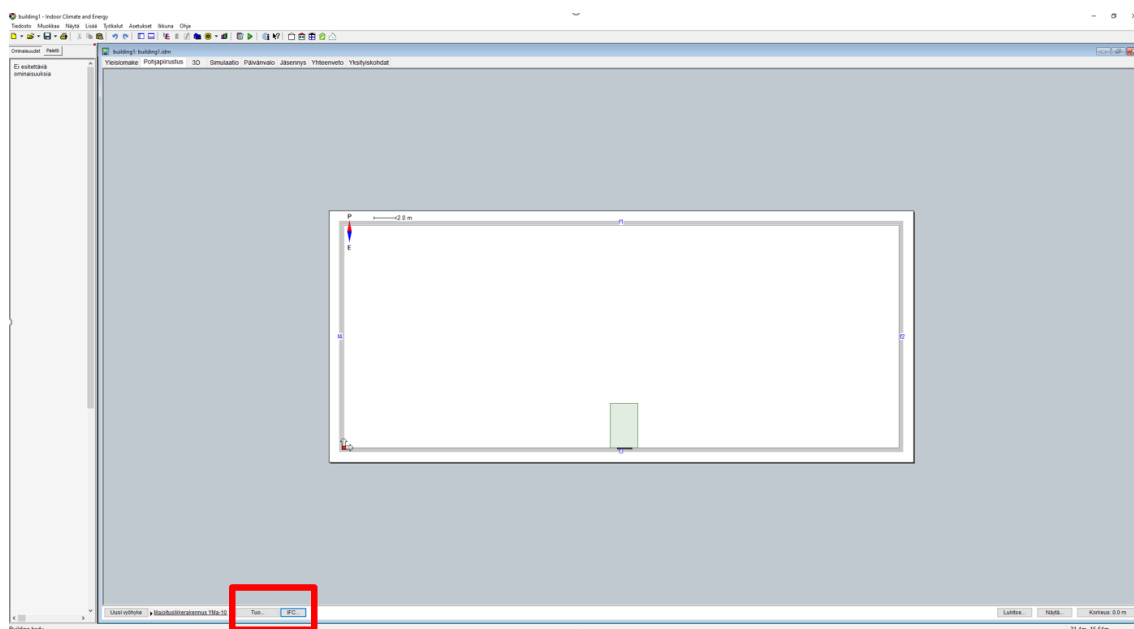
8.1 Taustatietoa simuloinneista ja IDA ICE -ohjelmasta

IDA Indoor Climate and Energy simulointiohjelma eli IDA ICE -ohjelma on dynaaminen mallinnusohjelma monivyöhykesimulointiin. IDA ICE -ohjelmalla voidaan tarkastella rakennuksen energiankulutusta, lämpötasetta sekä muita sisäilman ja rakennuksen ominaisuuksia. Ohjelman on kehittänyt EQUA Simulation AB, joka on yksityisomisteinen ruotsalainen yritys. (13)

Ohjelmisto käyttää hyväkseen aiemmin työssä käytyjä lämpökuormien laskentamenetelmiä ja huomioi myös rakenteisiin varautuvan lämpöenergian. IDA ICE -ohjelmalla voidaan tehdä tarkkoja simulointeja huomioiden säävaihtelut, koska sää ja ulko-olosuhteet perustuvat toteutuneisiin sääolosuhteisiin. Kuten johdannossa mainittiin, IDA ICE -ohjelmalla tehdyt laskelmat vastaavat hyvin lähelle todellisia tuloksia. Tämä arvio perustuu Sven Krophin ja Gerhard Zweifelin tekemään tutkimukseen, jossa IDA ICE -ohjelman simulointituloksia verrattiin testihuoneessa suoritettuihin mittauksiin. Tuloksiin vaikuttavat merkittävästi simuloinneissa käytetyn rakennusmallin tarkkuus sekä rakenteiden ominaisuudet. Simuloinneissa käyttämäni rakennuksen mallin ominaisuudet eivät vastaa täysin todenmukaisia arvoja, koska rakennepiirustukset olivat puutteelliset rakennuksen tarkasteltavan alueen osalta. Simuloinnit ovat kuitenkin hyvin suuntaa antavia. Ikku-nakalvojen vaikutusta tilojen kesäajan lämpötiloihin voidaan arvioida simulointien pohjalta, koska rakennemallissa muut arvot pysyvät samoina simulointien välillä.

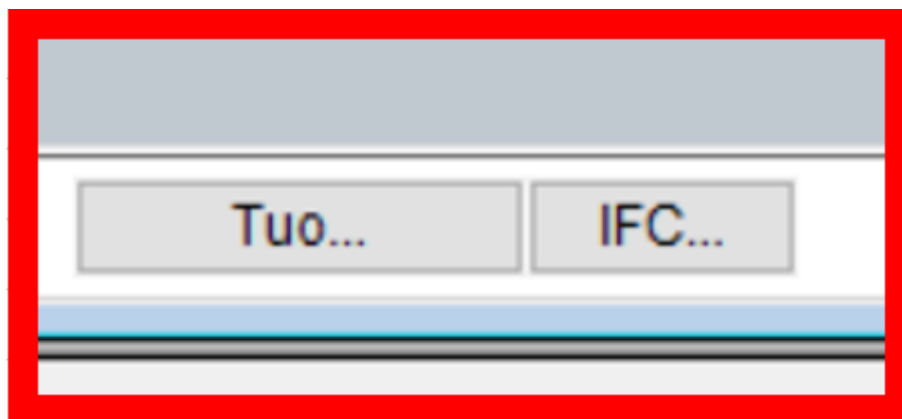
8.2 IDA ICE -projektin valmistelu simuloiteja varten

Simulointiin käytettävän mallin työstäminen aloitetaan tuomalla rakennuksen IFC-malli IDA ICE -ohjelmaan. Tämä tapahtuu kuvassa 15 punaisella merkityillä painikkeilla.



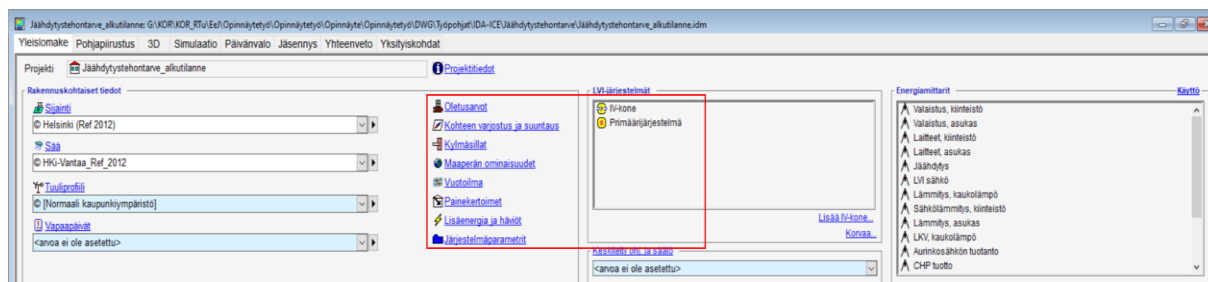
Kuva 15. IDA ICE -ohjelman pohjapiirustus-välilehden IFC-mallin avauspainike.

Kuvassa 16 on esitetty suurennettuna IFC-mallin avauspainike, joka on esitetty kuvassa 15.



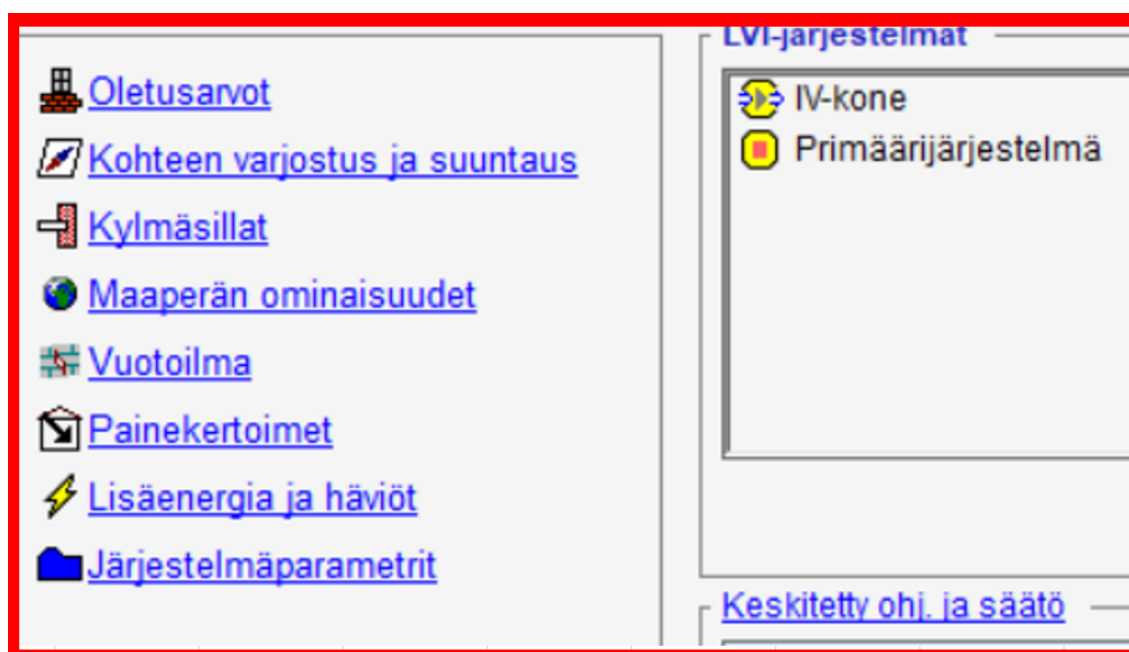
Kuva 16. Suurennettuna IFC-mallin avauspainike, joka esitettiin kuvassa 15.

Kun malli on siirretty IDA ICE -ohjemaan, voidaan aloittaa rakennuksen lähtötietojen määrittäminen. Simulointimallin ominaisuuksia voidaan muokata IDA ICE -ohjelman yleislomake-välilehdeltä. Tältä välilehdeltä löytyvät rakennuksen LVI-järjestelmien, rakenteiden ominaisuuksien ja suuntauksen sekä varjostuksen muokkaus valikot. Kuvassa 17 on esitetty IDA ICE -ohjelman yleislomake ja punaisella neliöllä on korostettu eri tietojen muokkausvalikot.



Kuva 17. IDA ICE -ohjelman yleislomake.

Kuvassa 18 on esitetty IDA ICE -ohjelman valikot, jotka on esitetty kuvassa 17.



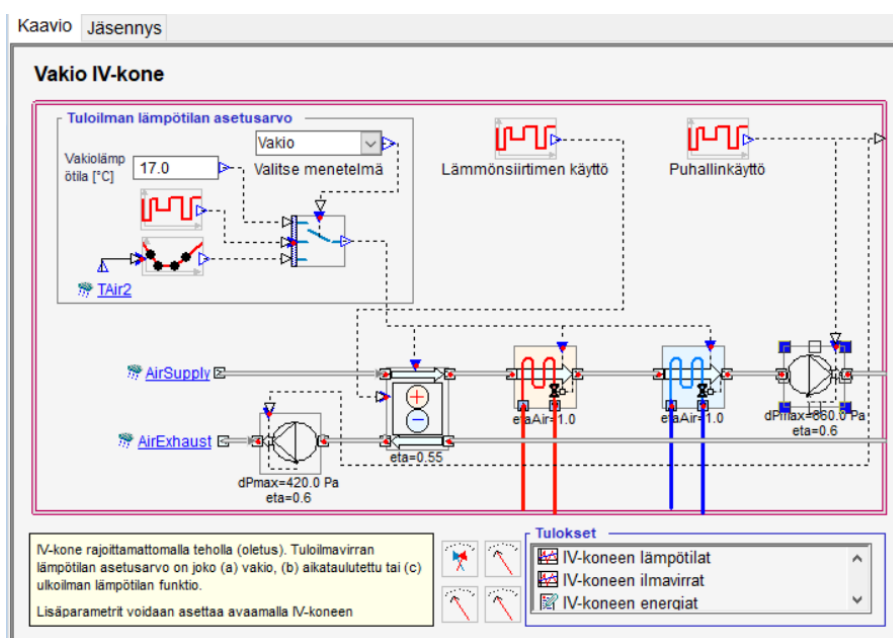
Kuva 18. IDA ICE -ohjelman valikot, jotka esitettiin kuvassa 17.

Ensimmäiseksi määritetään rakenteiden ominaisuudet. Rakenteiden ominaisuuksia voidaan muokata rakennuksen oletusarvot-valikosta, joka löytyy IDA ICE -ohjelman yleislomake-välilehdeltä. Rakenteet valittiin aiemmin rakenteiden lähtötiedot osiossa määritetyllä tavalla.

Simuloitavien tilojen ilmanvaihto määritetään yleislomakkeen LVI-järjestelmät kohdasta IV-kone valikon avulla. Simulointeihin valittiin seuraavat toiminta-arvot:

- Tuloilman lämpötila ennen puhallinta asetettiin arvoon 17 °C.
- Ilmanvaihdon tyyppiä valittiin vakioilmanvaihto.
- Ilman lämpötilan nousuksi puhaltimessa asetettiin 1 °C.
- Puhallinkäyttö asetettiin 100 %:n käyttöasteelle.

Kuvassa 19 on esitetty ilmanvaihtokoneen tietojen syöttämiseen käytetty kaavio, jossa eri komponentteja painamalla päästään asettamaan halutut arvot.



Kuva 19. IDA ICE -ohjelman ilmanvaihtokoneen kaavio.

Valaistuksen ja huonelaitteiden lämpökuormat on arvioitu hotellihuoneen ja majoitusliikarakennuksen mukaan. Ne perustuvat Sisäilmaluokituksen 2018 ja Rakentamismääräyskokoelman osan D3 neliökohtaisiin kuormiin. Kuormat voidaan lisätä simulointimaliin, joko yksi vyöhyke kerrallaan vyöhykkeen omista tiedoista tai yleislomakkeen avulla. Tarkasteltavien tilojen kuormat ovat saman suuruiset, joten kuormat syötettiin IDA ICE-ohjelmaan yleislomakkeen avulla. Valaistuksen ja laitekuormien käyttöaikataulu asetettiin kello 7–00:00 käyttöasteella 100 %. Tämä vastaa suurinta mahdollista kuormaa, joka tiloissa voidaan saavuttaa yleensä. (15, s. 13; 16). Simuloinneissa käytetyt tehot ovat seuraavat:

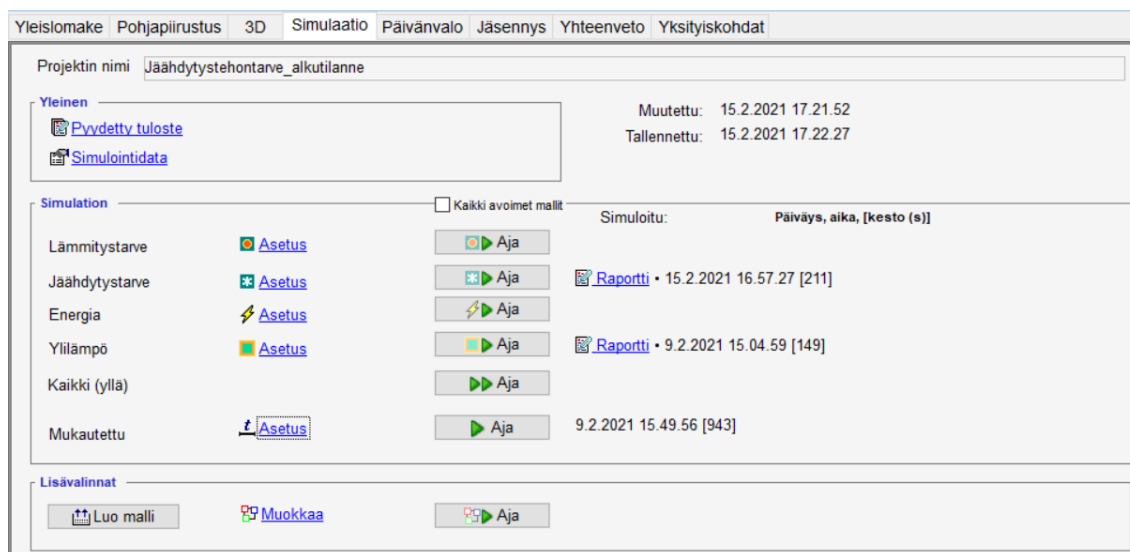
- valaistus 14 W/m²
- laitekuormat 4 W/m².

Henkilökuormat asetettiin vyöhykkeiden majoituspaikkojen mukaan. Tarkasteltavat tilat ovat yhden ja kahden hengen huoneita. Käyttöaikatauluksi asetettiin käyttöaste 100 % ja henkilön fyysiseksi aktiivisuudeksi asetettiin MET 1,2. Tällä MET-arvolla yhden henkilön luovuttama lämpöteho on noin 125 W. (3)

9 Simulaatiot

9.1 Simuloitu ajanjakso

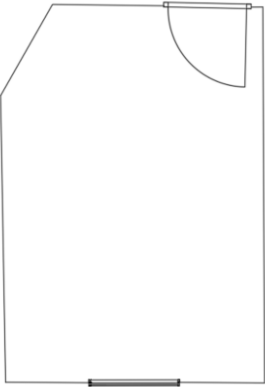
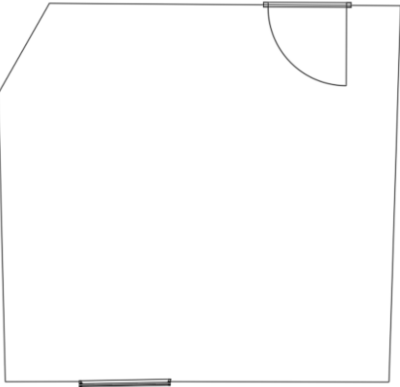
Simuloinnit tehtiin 1.5. – 31.8. Simulointiaika määritettiin kuukausille, joilla on korkeimmat lämpökuormat rakennukseen. Simulointiajassa huomioitiin myös rakenteisiin varastoituva lämpö, jonka takia ei simuloitu pelkästään kesäkuukausia. IDA ICE-simulointien aikataulun voi määrittää Simulaatio-välilehdeltä. Simulaatio-välilehdellä on myös eri simulaatiovaihtoehtoja, jotka ovat lämmitystarve, jäähdytystarve, energia ja ylilämpö. Tässä työssä tarkastelin jäähdytystarve simulaatioita. Kuvassa 20 on esitetty IDA ICE -ohjelman Simulaatio-välilehti.



Kuva 20. IDA ICE -ohjelman Simulaatio-välilehti.

9.2 Alkutilanteen ikkunoiden lämpökuorman ja huonelämpötilan simuloinnit

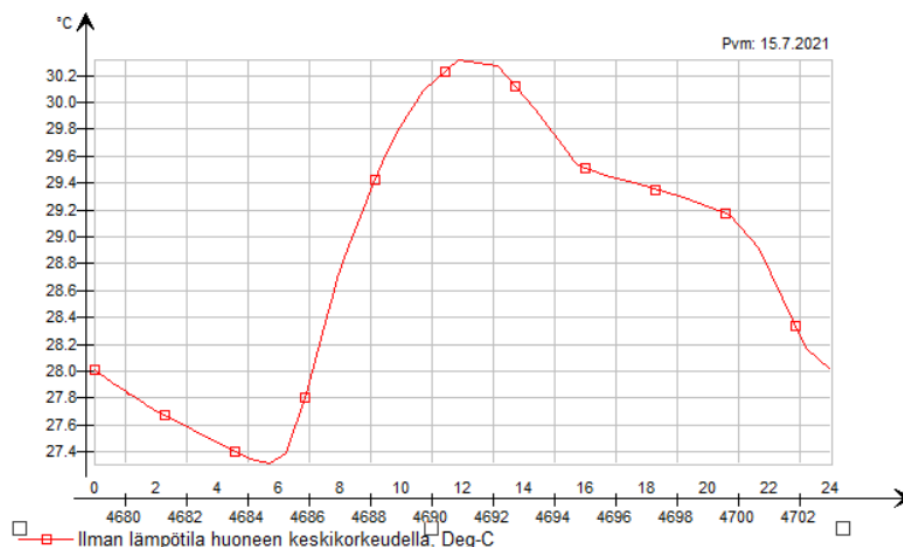
Simulaatiot suoritettiin koko tarkasteltavasta alueesta, mutta tulosten tarkasteluun valitsin kaksi eri tilaa. Valitut tilat olivat lämpötiloiltaan haastavat yhden hengen huone ja kahden hengen huone. Tarkasteluun valittiin viidennessä kerroksessa sijaitseva yhden hengen huone ja ensimmäisessä kerroksessa maan tasalla sijaitseva kahden hengen huone. Tarkasteltaessa näitä tiloja voidaan helpommin määrittää ikkunoiden kalvotuksen vaikutus sisäilman lämpötiloihin, koska huoneet pysyvät muuten ennallaan. Tarkasteluissa katsotaan myös jäähdytystehontarpeen muutosta näissä tiloissa. Tarkasteltavien tilojen julkisivun suuntaus on kaakko. Kuvassa 21 on esitetty luonnokset tarkasteltavista huoneista. Kuvassa 21 näkyy huoneiden koko, ilmavirrat ja ikkunoiden suuntaus.

YHDEN HENGEN HUONE 5 KERROS				KAHDEN HENGEN HUONE 1 KERROS			
PINTA-ALA	11 m ²	VALAISTUS:	14 W/m ²	PINTA-ALA	18 m ²	VALAISTUS:	14 W/m ²
ILMANVAIHTO	± 20 l/s	LAITEKUORMA:	4 W/m ²	ILMANVAIHTO	± 30 l/s	LAITEKUORMA:	4 W/m ²
IKKUNAN SUUNTAUS KAAKKOON		MET-ARVO	1,2	IKKUNAN SUUNTAUS KAAKKOON		MET-ARVO	1,2
IKKUNAN MITAT: 1000x1120 mm				IKKUNAN MITAT: 1000x1120 mm			
							

Kuva 21. Luonnos tarkasteltavista yhden ja kahden hengen huoneista.

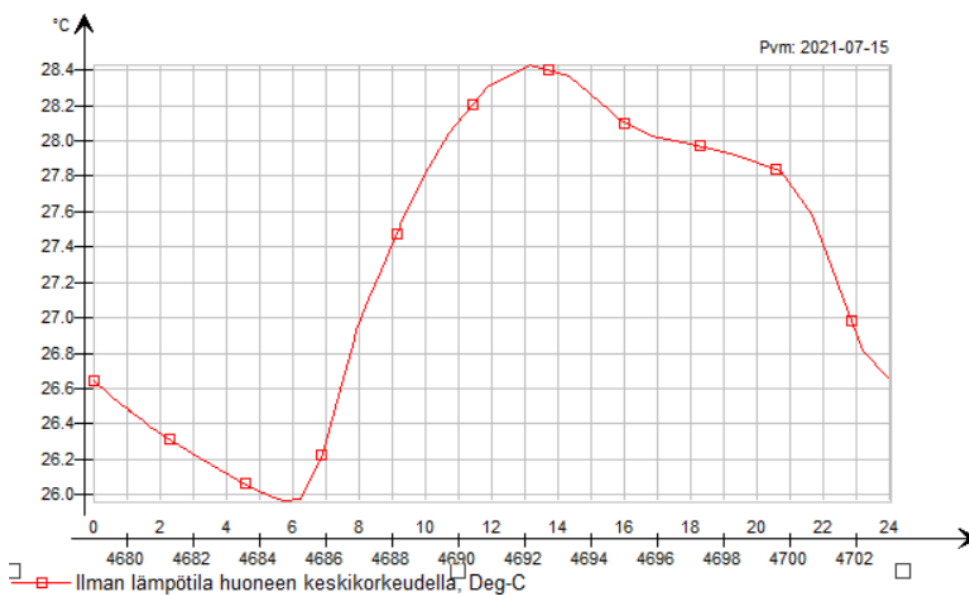
9.3 Alkutilanteen simulointitulokset

Viidennessä kerroksessa sijaitsevassa yhden hengen huoneessa lämpötila kohosi yli 30 °C:seen huippukuorman aikana. Suurimman lämpötilan huone saavutti heinäkuun puolessa välissä. Auringosta syntyvä lämpöteho huippupäivänä oli maksimissaan 327 W ja vuorokausikeskiarvo 104 W. Pitkäaaltoinen säteily ja konvektio ikkunoista oli maksimissaan 177 W keskipäivällä ja vuorokausikeskiarvo oli noin 18 W. Yöllä arvot menivät negatiivisen puolelle, eli ikkunan vaikutus oli jäähdyttävä. Tämä johtuu ulkoilman lämpötilan laskusta, jolloin lämmin ikkunapinta luovuttaa lämpöenergiaa ulospäin. Kehitys auringon ja ikkunoiden lämpökuormista on esitetty taulukossa 2. Arvoissa on huomioitu auringon suora- ja hajasäteily. Kuvassa 22 on esitetty huoneen lämpötilan kehitys huippukuormapäivänä.



Kuva 22. Yhden hengen huoneen lämpötilat huippukuorma päivänä alkutilanteessa.

Ensimmäisessä kerroksessa sijaitsevassa kahden hengen huoneen lämpötila kohosi 28 °C:seen. Koska kohteella ei ole läheisiä rakennuksia tai muita varjostavia tekijöitä, pysyvät ikkunoista tulevat lämpökuormat hyvin saman suuruisina kuin ylempässä kerroksessa sijaitsevassa huoneessa. Huoneen lämpötilan nousua rajoittaa sen sijainti alimmassa kerroksessa, joten huoneella ei ole alapuolella lämmintä tilaa nostamassa lämpökuormaa. Myös tuloilman määrä on suurempi kahden hengen huoneissa, joten tuloilman jäähdystysteho on suurempi. Kahden hengen huoneen lämpötilan kehitys huippukuormapäivänä on esitetty kuvassa 23 ja taulukossa 2 on esitetty ikkunoiden kautta syntyvät lämpökuormat. Kahden hengen huoneessa lämpötilan kuvaaja laskee illalla loivemmin kuin yhden hengen huoneessa, koska lämpökuormista suurempi osa tulee henkilöistä ja ikkunan kautta kulkeutuvan lämpökuorman suhteellinen vaikutus on pienempi. Yhden hengen huoneessa lämpökuormat laskevat jyrkemmin auringon lämpökuorman mukaan.



Kuva 23. Kahden hengen huoneen lämpötilat huippukuorma päivänä alkutilanteessa.

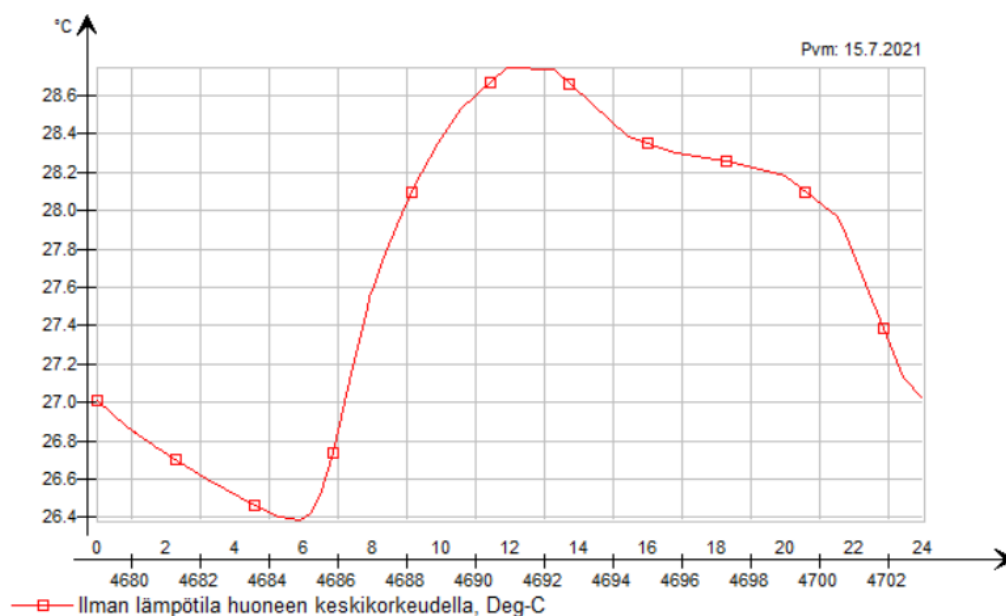
Taulukossa 2 on esitetty lämpökuormat ikkunoista alkutilanteessa.

Taulukko 2. Alkutilanteen lämpökuormat ikkunoista.

Tunti	Yhden hengen huone		Kahden hengen huone	
	Aurinkokuorma - suora- ja hajasäteily, W	Pitkäaaltoinen säteily ja konvektio ikkunoista, W	Aurinkokuorma - suora- ja hajasäteily, W	Pitkäaaltoinen säteily ja konvektio ikkunoista, W
1	0.0	-47.54	0.0	-42.23
2	0.0	-49.51	0.0	-44.23
3	0.0	-50.77	0.0	-45.52
4	0.7096	-51.58	0.712	-46.37
5	3.284	-52.07	3.261	-46.91
6	21.81	-50.17	13.38	-46.07
7	120.2	-37.31	48.25	-40.86
8	172.0	41.74	127.0	-7.952
9	239.9	108.4	174.0	71.48
10	301.1	154.1	251.5	127.2
11	327.0	176.8	298.5	163.5
12	320.5	177.4	314.7	179.1
13	281.4	156.0	299.5	173.1
14	213.9	115.6	254.4	147.0
15	128.4	63.32	179.8	101.1
16	76.23	11.82	97.3	40.59
17	76.8	-11.58	86.18	-4.921
18	66.84	-15.88	67.12	-10.48
19	55.18	-21.86	55.4	-16.48
20	41.61	-28.44	41.75	-23.07
21	25.84	-34.88	25.9	-29.61
22	11.96	-39.86	11.96	-34.63
23	4.235	-42.82	4.231	-37.55
24	0.1238	-45.25	0.1236	-39.95
keskiarvo	103.7	17.74	98.13	20.26
keskiarvo *24.0 h	2489.2	425.7	2355.0	486.2
min	0.0	-52.07	0.0	-46.91
maks	327.0	177.4	314.7	179.1

9.4 Kalvotettujen ikkunoiden lämpökuorman ja huonelämpötilan simuloinnit

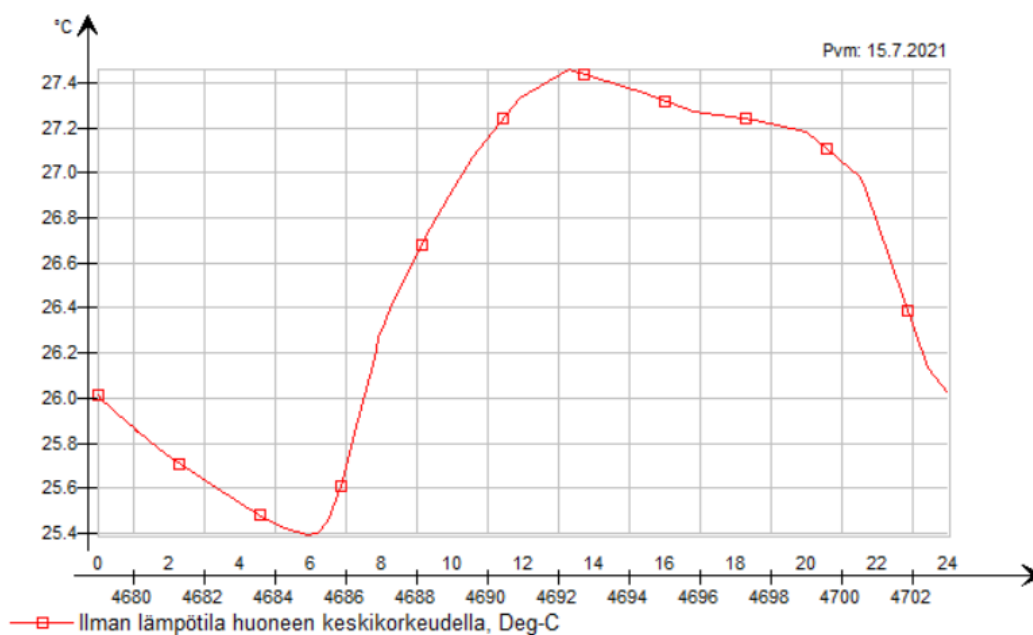
Simuloinneissa, joissa ikkunoihin oli asennettu aurinkosuojakalvot, huomattiin parannusta tilojen lämpötilassa. Lämpötila kuitenkin nousi yli 28 °C:seen yhden hengen huoneessa. Tilan ilman lämpötila oli siis noin 2 °C alhaisempi kuin ilman aurinkosuojakalvoa. Auringon ja ikkunoiden aiheuttamat lämpökuormat olivat huomattavasti alhaisempia kuin ilman aurinkosuojakalvoa. Auringon suora- ja hajasäteilyn maksimiteho laski 327 W:n tehosta 192 W:n tehoon ja vuorokausikeskiarvo laski 104 W:n tehosta 62 h:n tehoon. Pitkäaaltoinen säteily ja konvektio ikkunoista laski myös merkittävästi. Yhden hengen huoneen ikkunoiden kautta kulkeutuvat lämpökuormat on esitetty taulukossa 3 ja lämpötilat esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. Yhden hengen huoneen lämpötilat huippukuorma päivänä kalvotetuilla ikkunoilla.

Ensimmäisessä kerroksessa sijaitsevan kahden hengen huoneet tulokset olivat saman suuntaisia kuin kolmannen kerroksen huoneen. Lämpötilat eivät nousseet aurinkokalvojen ansiosta yhtä korkeiksi kuin ilman. Lämpötilat tosin nousivat kuitenkin yli 27 °C:seen. Sisälämpötilaero simulointien välillä oli vain noin 1 °C, eli kalvotus laski sisäilman lämpötilaa asteen verran. Auringon ja ikkunoiden aiheuttamat lämpökuormat olivat huomattavasti alhaisempia kuin ilman aurinkosuojakalvoa.

tavasti alhaisempia kuin ilman aurinkosuojakalvoa. Auringon suora- ja hajasäteilyn maksimiteho laski 315 W:n tehosta 185 W:n tehoon ja päiväkeskiarvo laski 98 W:n tehosta 58 W:n tehoon. Pitkäaaltoinen säteily ja konvektio ikkunoista laski myös merkittävästi. Yhden hengen huoneen ikkunoiden kautta kulkeutuvat lämpökuormat on esitetty taulukossa 3 ja lämpötilat esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Kahden hengen huoneen lämpötilat huippukuorma päivänä kalvotetuilla ikkunoilla.

Taulukossa 3 on esitetty kalvotettujen ikkunoiden tilanteen lämpökuormat ikkunoista.

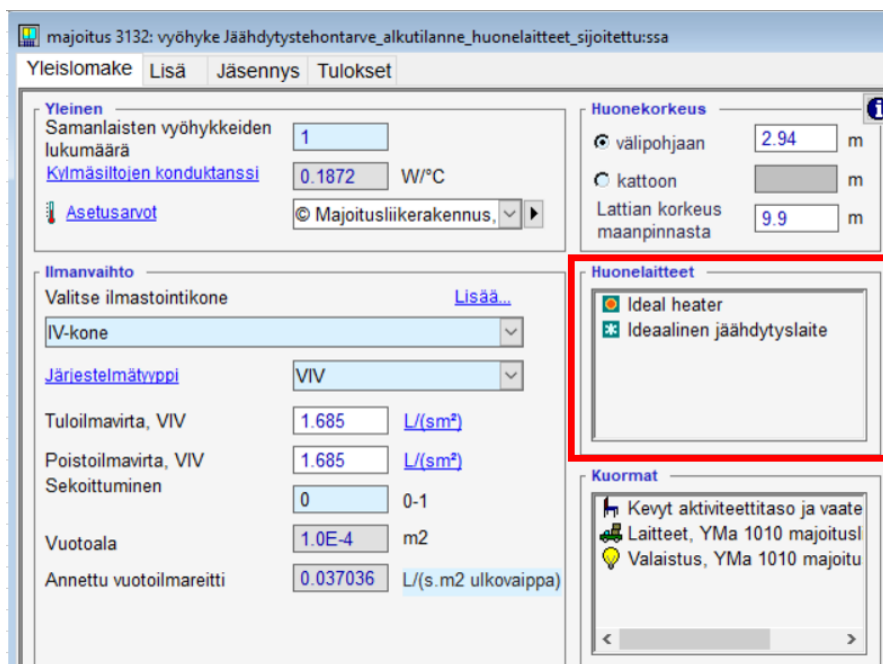
Taulukko 3. Lämpökuormat ikkunoista kalvojen kanssa.

Tunti	Yhden hengen huone		Kahden hengen huone	
	Aurinkokuorma - suora- ja hajasäteily, W	Pitkäaaltoinen säteily ja konvektio ikkunoista, W	Aurinkokuorma - suora- ja hajasäteily, W	Pitkäaaltoinen säteily ja konvektio ikkunoista, W
1	0.0	-43.57	0.0	-39.75
2	0.0	-45.59	0.0	-41.79
3	0.0	-46.91	0.0	-43.12
4	0.4194	-47.78	0.4198	-44.01
5	2.039	-48.3	1.934	-44.58
6	12.97	-46.37	7.796	-43.76
7	71.97	-33.99	27.16	-38.82
8	131.3	4.901	85.89	-18.77
9	141.6	64.85	102.5	40.02
10	177.3	97.95	147.7	80.03
11	192.3	115.2	175.2	106.6
12	188.4	117.3	184.6	118.7
13	165.7	104.3	175.9	116.2
14	127.5	78.85	148.8	98.69
15	78.27	44.13	102.0	65.45
16	38.33	12.43	60.6	32.43
17	40.96	-3.871	46.82	4.274
18	39.12	-11.91	39.19	-7.957
19	32.55	-17.22	32.59	-13.31
20	23.86	-24.34	23.87	-20.41
21	15.1	-30.75	15.1	-26.83
22	7.032	-35.86	7.012	-31.98
23	2.835	-38.86	2.824	-34.99
24	0.2704	-41.28	0.2694	-37.43
keskiarvo	62.08	5.137	57.85	7.287
keskiarvo *24.0 h	1489.8	123.3	1388.3	174.9
min	0.0	-48.3	0.0	-44.58
maks	192.3	117.3	184.6	118.7

10 Jäähdytysteho

10.1 Vaadittavan jäähdytystehon määrittäminen tarkasteltaviin tiloihin

Vaadittava jäähdytysteho määritettiin sijoittamalla tarkasteltaviin tiloihin IDA ICE -ideaalijäähdytin. Ideaali jäähdyttimen laskenta perustuu siihen, että lämpötilat eivät kohoa yli 25 °C:seen tilassa, johon se on sijoitettu. Tällöin simuloinneissa saadaan laskettua tilan vaatima lisä jäähdytysteho katsomalla ideaali jäähdytyslaitteen tuottama jäähdytysteho. Ideaalinen jäähdytyslaite lisätään tilaan vyöhykkeen yleislomakkeen kautta. Kuvassa 26 on esitetty punaisella neliöllä huonelaitteiden valikko. Tarkastelu suoritettiin samoihin tiloihin kuin aikaisemmat tarkastelut. Simuloinnit suoritettiin ilman aurinkosuojakalvoja ja kalvotetuilla ikkunoilla.



Kuva 26. IDA ICE -ohjelman huonelaitteiden valikko.

Alkutilanteessa yhden hengen huoneessa jäähdytystehontarve kasvoi korkeimmillaan 678 W:n tehoon ja kahden hengen huoneessa teho oli korkeimmillaan 503 W. Jäähdytystehon tarve on siis suhteellisen korkea, jos suurimpana sallittuna huoneilman lämpötilana pidetään 25 °C:ta. Suurin kuorma yhden hengen huoneessa oli kello 12 ja kahden hengen huoneessa kello 13. Molemmissa huoneissa suurimmat jäähdytystehon tarpeet olivat keskipäivällä ja laskivat iltaa kohden. Taulukossa 4 on esitetty huoneiden jäähdytyslaitteiden tuottama jäähdytysteho eri kellonaikoina.

Taulukko 4. Vaadittavat jäähdytyslaitteiden tehot alkutilanteessa

Tunti	Yhden hengen huone	Kahden hengen huone
	Lämmitys/jäähdytys-laittekuormat, W	Lämmitys/jäähdytys-laittekuormat, W
1	-179.9	0.0
2	-161.1	0.0
3	-145.6	0.0
4	-131.9	0.0
5	-119.8	0.0
6	-115.2	0.0
7	-180.9	-1.093
8	-346.5	-110.6
9	-481.7	-252.9
10	-577.7	-352.2
11	-646.7	-433.3
12	-677.9	-483.1
13	-672.8	-502.5
14	-629.4	-489.5
15	-564.6	-445.4
16	-497.1	-377.7
17	-463.0	-334.3
18	-451.9	-317.7
19	-439.6	-304.0
20	-424.3	-287.8
21	-400.8	-261.2
22	-363.3	-215.4
23	-286.2	-114.2
24	-210.8	-17.81
keskiarvo	-382.0	-220.9
keskiarvo *24.0 h	-9168.7	-5300.7
min	-677.9	-502.5
maks	-115.2	0.0

Aurinkosuojakalvojen kanssa yhden hengen huoneessa jäähdytystehontarve kasvoi korkeimmillaan 458 W:n tehoon ja kahden hengen huoneessa teho oli korkeimmillaan 341 W. Jäähdytystehon tarve on siis suhteellisen korkea, jos suurimpana sallittuna huoneilman lämpötilana pidetään 25 °C. Suurin kuorma yhden hengen huoneessa oli kello 12 ja kahden hengen huoneessa kello 13. Molemmissa huoneissa suurimmat jäähdytystehon tarpeet olivat keskipäivällä ja laskivat iltaa kohden. Taulukossa 5 on esitetty huoneiden jäähdytyslaitteiden tuottama jäähdytysteho eri kellon aikoina.

Taulukko 5. Vaadittavat jäähdytyslaitteiden tehot kalvotetuilla ikkunoilla.

	Yhden hengen huone	Kahden hengen huone
Tunti	Lämmitys/jäähdytys- laittekuormat, W	Lämmitys/jäähdytys- laittekuormat, W
1	-97.19	0.0
2	-82.07	0.0
3	-69.62	0.0
4	-58.53	0.0
5	-48.49	0.0
6	-43.63	0.0
7	-86.01	0.0
8	-223.2	-39.5
9	-324.9	-155.8
10	-389.6	-227.3
11	-434.7	-283.9
12	-456.8	-321.6
13	-457.6	-341.1
14	-435.1	-337.7
15	-393.6	-311.7
16	-357.6	-285.6
17	-342.8	-261.4
18	-333.7	-247.9
19	-326.3	-239.2
20	-317.4	-229.4
21	-303.4	-213.5
22	-262.3	-161.1
23	-191.3	-80.96
24	-121.9	-8.23
keskiarvo	-256.6	-156.1
keskiarvo*24.0 h	-6157.6	-3745.9
min	-457.6	-341.1
maks	-43.63	0.0

10.2 Jäähdytysmenetelmien vertailu

Jäähdytysmenetelmän valinnassa on oleellista jäähdytystehontarve ja valitun ratkaisun toteutettavuus. Toteutettavuuden perusteena voi olla ratkaisun toimivuus ja vaikutus sisäilman laatuun sekä kustannukset. Jäähdytyksen lisääminen aiheuttaa aina kustannuksia, niin investointivaiheessa kuin käytöstä syntyviä juoksevia kustannuksia. Investointiaikaiset kustannukset syntyvät jäähdytyslaitteiden ja putkistojen sekä hankinta- ja asennuskustannuksista. Käytönaikaiset kustannukset syntyvät pumppujen ja puhaltimien sähkönkulutuksesta sekä laitteiden huoltokustannuksista. Eri laitteilla ja putkistoilla on

omat elinkaarensa, joten tulevaisuudessa kustannuksia syntyy laitteiden ja putkistojen korjauksista ja uusimisesta. Tarkasteltavissa tiloissa ei ole alakattoa, eikä roikkuvia tai esillä olevia jäähdytysratkaisuja haluta tilaan. Alakaton rakentaminen ei olisi kustannuksien puolesta varteen otettava ratkaisu. Tämä sulkee jäähdytyspaneelit ja huoneen keskelle sijoitettavat puhallinkonvektorit pois tarkastelusta.

Jäähdytys voi vaikuttaa myös sisäilman laatuun heikentävästi. Huonosti suunniteltu ja toteutettu jäähdytys voi lisätä vedon tunnetta tilaan. Jäähdytysteho kasvaa, mitä viileämpää ilmaa huoneeseen tuodaan. Ilmaa ei voida jäähdyttää kuitenkaan mielivaltaisen alas, sillä vedon tunne lisääntyy, jos tilaan tuotavan ilman ja huoneilman välillä on suuri lämpötilaero. Tämä korostuu varsinkin pienissä tiloissa, joissa työ- tai oleskelupaikka sijaitsee lähellä puhallusaukkoa. Pienissä tiloissa tulee jäähdytyksen kanssa olla varovainen, koska vaikka kylmän ilman pyrkisi sekoittamaan tehokkaasti huoneilmaan, voi se valahtaa tilassa olevan niskaan ja aiheuttaa epäviihtyisät olosuhteet. Vaihtoehtoina tarkastelussa on tuloilman lisääminen ja kanavaan sijoitettava jäähdytyspatteri.

11 Tuloilmalla jäähdyttäminen

Tuloilmavirran lisäämisen tarkastelussa asetettiin tarkasteltaviin tiloihin vaihtuvat ilmavirrat, jotka määräytyvät huoneen lämpötilan mukaan. IDA ICE -ohjelma laskee vaadittavan ilmavirran, jotta huoneen lämpötila ei nouse yli raja-arvon, joka on 25 °C. Tuloilman sisäänpuhalluksen lämpötila on 18 °C. Vaihtuvan ilmavirran simuloinnit tehtiin asettamalla tarkasteltavat tilat oman ilmanvaihtokoneen taakse ja ilmavirran säätö asetettiin lämpötilan mukaan. Ilmavirtojen lisäämisen jäähdyttävä vaikutus perustuu siihen, että viileämpi tuloilma lämpenee eli sitoo lämpöä huoneilmasta. Tämä lämpöenergia poistuu huoneesta poistoilman kautta ja näin viilentää huonetta. Tuloilman lämpenemisen lämpöteho lasketaan kaavalla 9. (1, s. 23.)

$$\Phi_{tuloilma} = \rho_i * q_{v,tulo} * c_{pi} * (T_s - T_{sp}) \quad (9)$$

jossa,

Φ_{tuloilma} on tilassa tapahtuvan tuloilman lämpenemisen lämpöteho, W

ρ_i on ilman tiheys, 1,2 kg/m³

$q_{v,\text{tulo}}$ on tuloilmavirta, m³/s

c_{pi} on ilman ominaislämpökapasiteetti, 1000 J/(kg K)

T_s on sisäilman lämpötila, °C

T_{sp} on sisäänpuhalluslämpötila, °C.

Tarkastellaan esimerkiksi tilannetta, jossa sisäänpuhalluslämpötila on 18 °C, sisäilman lämpötila on 25 °C ja tuloilmavirta on 1 l/s. Ilmavirran sitoma lämpöteho on,

$$1,2 \text{ kg/m}^3 * 1/1000 \text{ m}^3/\text{s} * 1000 \text{ kJ}/(\text{kg K}) * (25 \text{ °C} - 18 \text{ °C}) = 8,4 \text{ W}$$

Tällaisessa tilanteessa alkuperäisillä ilmavirroilla saataisiin yhden hengen huoneessa-virralla 20 l/s jäähdytystehoksi,

$$1,2 \text{ kg/m}^3 * 20/1000 \text{ m}^3/\text{s} * 1000 \text{ kJ}/(\text{kg K}) * (25 \text{ °C} - 18 \text{ °C}) = 168 \text{ W}$$

ja kahden hengen huoneessa ilmavirralla 30 l/s,

$$1,2 \text{ kg/m}^3 * 30/1000 \text{ m}^3/\text{s} * 1000 \text{ kJ}/(\text{kg K}) * (25 \text{ °C} - 18 \text{ °C}) = 252 \text{ W}$$

Lämpöteho on riippuvainen lämpötilaeroista, joten huoneilman viilentyessä pienenee myös lämpötilaero. Tällöin myös jäähdytysteho laskee. Sama pätee myös toiseen suuntaan, eli kun huoneen sisäilman lämpötila nousee, kasvaa myös tuloilman jäähdytysteho. Työssä oletetaan, että tuloilman jäähdyttäminen 18 °C:seen tapahtuu ilmanvaihtokoneen jäähdytyspatterissa. Yhden hengen huoneen tuloilman jäähdyttäminen sisäänpuhalluslämpötilaan, jos ulkolämpötila on esimerkiksi 27 °C, vaatii kuivaa jäähdytystehoa,

$$1,2 \text{ kg/m}^3 * 20/1000 \text{ m}^3/\text{s} * 1000 \text{ kJ}/(\text{kg K}) * (27 \text{ }^\circ\text{C} - 18 \text{ }^\circ\text{C}) = 216 \text{ W}$$

Kahden hengen huoneen tuloilman jäähdyttäminen sisäänpuhalluslämpötilaan, jos ulkolämpötila on esimerkiksi 27 °C vaatii kuivaa jäähdytystehoä:

$$1,2 \text{ kg/m}^3 * 30/1000 \text{ m}^3/\text{s} * 1000 \text{ kJ}/(\text{kg K}) * (27 \text{ }^\circ\text{C} - 18 \text{ }^\circ\text{C}) = 324 \text{ W}$$

Vuorokauden aikana yhden hengen huoneen tuloilman jäähdyttäminen kuluttaa energiaa,

$$216 \text{ W} * 24 \text{ h} = 5184 \text{ Wh} \approx 5,2 \text{ kWh}$$

Vuorokauden aikana kahden hengen huoneen tuloilman jäähdyttäminen kuluttaa energiaa,

$$324 \text{ W} * 24 \text{ h} = 7776 \text{ Wh} \approx 7,8 \text{ kWh}$$

Jäähdytysteho on riippuvainen ulkolämpötilasta, joten vaadittava jäähdytysteho vaihtelee myös vuorokauden aikana. Jos ulkoilmasta poistetaan myös kosteutta, teho- ja energiamäärät ovat suuremmat. Esimerkiksi illalla ja yöllä tuloilman jäähdyttämiseen vaaditaan vähemmän jäähdytystehoä. Jos ulkoilman lämpötila illalla on 20 °C, on yhden hengen huoneen tuloilman jäähdyttämiseen vaadittava kuiva jäähdytysteho,

$$1,2 \text{ kg/m}^3 * 20/1000 \text{ m}^3/\text{s} * 1000 \text{ kJ}/(\text{kg K}) * (20 \text{ }^\circ\text{C} - 18 \text{ }^\circ\text{C}) = 48 \text{ W}$$

Kahden hengen huoneen tuloilman jäähdyttämiseen vaadittava jäähdytysteho, kun ulkoilma on 20 °C, on

$$1,2 \text{ kg/m}^3 * 20/1000 \text{ m}^3/\text{s} * 1000 \text{ kJ}/(\text{kg K}) * (20 \text{ }^\circ\text{C} - 18 \text{ }^\circ\text{C}) = 72 \text{ W}$$

Taulukossa 6 on esitetty simulointien heinäkuun huippukuormapäivän ulkolämpötilat ja yhden ilmalitran vaatima lämmitys- ja jäähdytysteho, jotta ilman lämpötilaksi tulee 18 °C

tai 16 °C. Miinusmerkkiset arvot ovat jäähdytystehoa, ja positiiviset arvot ovat lämmitys-
tehoa.

Taulukko 6. Huippukuormapäivän ulkolämpötilat.

Tunti	Ulkoilman lämpötila, °C	Yhden ulkoilmalitran lämmittämisen/jäähdyttämisen vaatima teho kun loppulämpötila on 18 °C, W	Yhden ulkoilmalitran lämmittämisen/jäähdyttämisen vaatima teho kun loppulämpötila on 16 °C, W
1	17,31	0,828	-1,572
2	16,59	1,692	-0,708
3	16,09	2,292	-0,108
4	15,71	2,748	0,348
5	15,38	3,144	0,744
6	15,24	3,312	0,912
7	15,48	3,024	0,624
8	16,45	1,86	-0,54
9	18,46	-0,552	-2,952
10	20,73	-3,276	-5,676
11	22,82	-5,784	-8,184
12	24,6	-7,92	-10,32
13	25,87	-9,444	-11,844
14	26,85	-10,62	-13,02
15	27,42	-11,304	-13,704
16	27,36	-11,232	-13,632
17	26,66	-10,392	-12,792
18	25,61	-9,132	-11,532
19	24,38	-7,656	-10,056
20	22,76	-5,712	-8,112
21	21,32	-3,984	-6,384
22	20,14	-2,568	-4,968
23	19,06	-1,272	-3,672
24	18,16	-0,192	-2,592

Taulukossa 6 esitetyistä arvoista nähdään, kuinka paljon ilman jäähdyttämiseen vaadit-
tava jäähdytysteho vaihtelee ulkolämpötilojen mukaan. Taulukossa 7 on esitetty alkuti-
lanteen tarkasteltavien tilojen ilmavirtojen vaihtelevuus päivän aikana, jolloin tiloissa oli
suurimmat kuormat. Taulukossa on myös esitetty tilojen poistoilman lämpötilat yksikössä
°C. Ilmavirrat on esitetty yksikössä l/s, ja tiloissa tulo- ja poistoilmavirrat ovat samat.

Taulukko 7. Alkutilanteen ilmavirrat vaadittavan jäähdytystehon saavuttamiseksi.

Tunti	Yhden hengen huone		Kahden hengen huone	
	Ilmavirta, l/s	Poistoilman lämpötila, °C	Ilmavirta, l/s	Poistoilman lämpötila, °C
1	54.57	24.39	38.14	24.07
2	51.96	24.38	36.82	24.02
3	49.84	24.36	36.56	23.97
4	47.93	24.35	36.56	23.92
5	46.07	24.33	36.56	23.87
6	45.43	24.33	36.56	23.84
7	54.17	24.39	37.25	23.95
8	77.04	24.53	54.31	24.23
9	96.76	24.62	74.62	24.35
10	111.0	24.69	88.46	24.41
11	120.6	24.73	99.46	24.46
12	125.5	24.75	106.9	24.48
13	124.5	24.74	109.6	24.49
14	118.0	24.71	107.7	24.49
15	108.2	24.67	101.9	24.46
16	97.97	24.63	92.81	24.43
17	94.39	24.61	86.57	24.4
18	92.64	24.6	84.14	24.39
19	90.8	24.59	82.08	24.39
20	88.45	24.58	79.65	24.37
21	85.58	24.57	76.69	24.36
22	79.02	24.53	68.4	24.32
23	68.17	24.47	54.05	24.22
24	58.3	24.42	41.34	24.12
keskiarvo	82.79	24.54	69.47	24.25
keskiarvo *24.0 h	1986.9	589.0	1667.2	582.0
min	45.43	24.33	36.56	23.84
maks	125.5	24.75	109.6	24.49

Alkutilanteen jäähdytystehontarpeen täyttävien ilmavirtojen simuloinnissa tuloilmavirta ja poistoilman lämpötila olivat yhden hengen huoneessa korkeimmillaan kello 13. Korkeimmillaan tuloilmavirta oli 125,5 l/s ja poistoilman lämpötila 24,75 °C. Tuloilman jäähdytysteho korkeimpien kuormien aikana on,

$$1,2 \text{ kg/m}^3 * 125,5/1000 \text{ m}^3/\text{s} * 1000 \text{ kJ}/(\text{kg K}) * (24,75 \text{ °C} - 18 \text{ °C}) = 1012,5 \text{ W}$$

Kahden hengen huoneessa huippukuormat ovat alkutilanteen jäädytystehontarpeen täyttävien ilmavirtojen simulointien perusteella kello 13. Korkeimmillaan tuloilmavirta oli 109,6 l/s ja poistoilman lämpötila 24,49 °C. Ilmavirran jäädytysteho korkeimpien kuormien aikana on,

$$1,2 \text{ kg/m}^3 * 109,6/1000 \text{ m}^3/\text{s} * 1000 \text{ kJ}/(\text{kg K}) * (24,49 \text{ °C} - 18 \text{ °C}) = 853,6\text{W}$$

Taulukossa 8 on esitetty kalvotettujen ikkunoiden tilanteen tarkasteltavien tilojen ilmavirtojen vaihtelevuus päivän aikana, jolloin tiloissa oli suurimmat kuormat. Ilmavirrat on esitetty yksikössä l/s ja tiloissa tulo- ja poistoilmavirrat ovat samat. Taulukossa 8 on myös esitetty poistoilman lämpötilat.

Taulukko 8. Vaadittavat ilmavirrat jäädytystehon saavuttamiseksi kalvotetuilla ikkunoilla.

Tunti	Yhden hengen huone		Kahden hengen huone	
	Ilmavirta, l/s	poistoilman lämpötila, °C	Ilmavirta, l/s	poistoilman lämpötila, °C
1	46.27	24.33	36.68	24.01
2	43.54	24.31	36.56	23.94
3	41.39	24.3	36.56	23.88
4	39.55	24.28	36.56	23.82
5	38.06	24.27	36.56	23.77
6	38.8	24.27	36.56	23.76
7	45.67	24.33	36.68	23.87
8	64.42	24.46	47.83	24.18
9	78.07	24.53	63.9	24.3
10	87.3	24.58	74.03	24.35
11	93.79	24.61	81.71	24.38
12	97.56	24.62	87.36	24.41
13	97.85	24.63	90.24	24.42
14	94.49	24.61	90.08	24.42
15	88.45	24.58	86.99	24.41
16	82.78	24.55	82.22	24.39
17	80.6	24.54	78.61	24.37
18	79.27	24.54	76.66	24.36
19	78.06	24.53	75.22	24.35
20	76.48	24.52	73.5	24.35
21	74.41	24.51	71.08	24.33
22	69.44	24.48	64.24	24.3
23	56.95	24.41	46.87	24.17
24	49.36	24.36	38.26	24.07
keskiarvo	68.44	24.46	61.87	24.19
keskiarvo*24.0 h	1642.5	587.1	1485.0	580.6
min	38.06	24.27	36.56	23.76
maks	97.85	24.63	90.24	24.42

Kalvotettujen ikkunoiden simuloinnissa tuloilmavirta ja poistoilman lämpötila olivat yhden hengen huoneessa korkeimmillaan kello 13. Korkeimmillaan tuloilmavirta oli 97,85 l/s ja poistoilman lämpötila 24,63 °C. Tuloilman jäähdysteho korkeimpien kuormien aikana on,

$$1,2 \text{ kg/m}^3 * 97,85/1000 \text{ m}^3/\text{s} * 1000 \text{ kJ}/(\text{kg K}) * (24,63 \text{ °C} - 18 \text{ °C}) = 778,5 \text{ W}$$

Kahden hengen huoneessa huippukuormat ovat kalvotettujen ikkunoiden simulointien perusteella kello 13. Korkeimmillaan tuloilmavirta oli 90,24 l/s ja poistoilman lämpötila 24,42 °C. Ilmavirran jäähdysteho korkeimpien kuormien aikana on,

$$1,2 \text{ kg/m}^3 * 90,24/1000 \text{ m}^3/\text{s} * 1000 \text{ kJ}/(\text{kg K}) * (24,42 \text{ °C} - 18 \text{ °C}) = 695,2 \text{ W}$$

Jäähdystehontarpeen täyttävien ilmavirtojen ero alkutilanteen ja kalvotettujen ikkunoiden simulointien välillä ovat yhden hengen huoneessa,

$$1012,5 \text{ W} - 778,5 \text{ W} = 234 \text{ W}$$

Kahden hengen huoneessa jäähdystehontarpeen täyttävien ilmavirtojen ero alkutilanteen ja kalvotettujen ikkunoiden simulointien välillä on,

$$853,6 \text{ W} - 695,2 \text{ W} = 158,4 \text{ W}$$

Tulosten perusteella kalvotus pienentää vaadittavaa ilmavirtaa jäähdystehon tarpeen täyttämiseen. Tehon pieneneminen tulosten perusteella on suurempaa ylemmässä kerroksessa olevassa yhden hengen huoneessa, jossa aurinkokuormat ovat kokonaiskuormasta suurempi osa. Ensimmäisessä kerroksessa sijaitsevan kahden hengen huoneessa kalvotuksen vaikutus vaadittavaan jäähdystehoon on pienempi. Ilmavirtojen jäähdysteho eroaa IDA ICE -ideaalijäähdyttimen jäähdystehosta. Ero jäähdystehoissa johtuu siitä, että huoneessa on tarkastelussa IDA ICE -ideaalijäähdyttimen lisäksi alkutilanteen ilmanvaihto, joka lisää kokonaisjäähdystehoa.

12 Tuloilmavirtojen kasvattamisen tarkastelu alkutilanteessa

12.1 Kanavien ilmavirrat ja virtausnopeudet

Alkutilanteen simulointitulosten mukaan yhden hengen huoneissa ilmavirrat nousivat huippuarvoon 125,5 l/s ja kahden hengen huoneessa arvoon 109,6 l/s jäähdytystehontarpeen täyttämiseksi. Tarkasteltavassa alueessa on 79 yhden hengen huonetta ja 5 kahden hengen huonetta. Yhteensä majoitustilojen ilmavirraksi tulisi,

Alkutilanteen jäähdytykseen tarvittava ilmavirta

$$= 79 \text{ huonetta} * 125,5 \frac{l}{s} + 5 \text{ huonetta} * 109,6 \frac{l}{s} = 10462,5 \text{ l/s}$$

Ilmanvaihtokoneen pitäisi pystyä puhaltamaan noin 10,5 m³/s ilmaa tiloihin. Yhden hengen huoneessa alkuperäinen ilmavirta oli 20 l/s ja kahden hengen huoneessa 30 l/s. Alkuperäisillä ilmavirroilla ilmanvaihtokone puhaltaa majoitustiloihin ilmaa,

Puhallettava ilmavirta alkutilanteessa

$$= 79 \text{ huonetta} * 20 \frac{l}{s} + 5 \text{ huonetta} * 30 \frac{l}{s} = 1730 \text{ l/s}$$

Vaadittavan jäähdyttämistehon saavuttamiseksi ilmanvaihtokonetta tulisi tehostaa yli kuusinkertaiseksi. Suuret ilmavirrat voivat aiheuttaa liian suuria virtausnopeuksia ja painehäviöitä kanavistossa. Konehuoneelta majoitustiloille lähtevät runkokanavat ovat kooltaan Ø250, ja niiden vaikutusalueella on kaksi majoitushuonetta jokaisessa kerroksessa, paitsi ensimmäisessä kerroksessa on kahden hengen huone. Yhteensä yhden runkokanavan palvelema alue on siis yhdeksän majoitushuonetta. Alkutilanteessa yhden runkokanavan ilmavirrat ovat,

Alkutilanteen ilmavirta per runkokanava

$$= 8 \text{ huonetta} * 20 \frac{l}{s} + 1 \text{ huonetta} * 30 \frac{l}{s} = 190 \text{ l/s}$$

Jäähdytystehon saavuttamiseksi alkutilanteessa tulisi yhdessä runkokanavassa siirtää ilmaa;

Yhden runkokanavan ilmavirta jäähdytystehon saavuttamiseksi

$$= 9 \text{ huonetta} * 125,5 \frac{l}{s} + 1 \text{ huone} * 109,6 \frac{l}{s} = 1239,1 \text{ l/s}$$

Virtausnopeus kanavassa voidaan laskea kaavalla 10 (17).

$$v = \frac{q_v}{A} \tag{10}$$

jossa;

v on virtaavan aineen virtausnopeus, m/s

q_v on tilavuusvirta, m³/s

A on virtauspoikkipinta-ala, m²

Kanavan virtauspoikkipinta-ala voidaan laskea ympyrän pinta-alana. Ympyrän pinta-ala lasketaan kaavalla 11. (17)

$$A = \frac{\pi * d^2}{4} \tag{11}$$

jossa;

A on ympyrän pinta-ala, m²

d on ympyrän halkaisija, m

Alkutilanteen Ilmavirralla pyöreässä kanavassa, jonka halkaisija on 250 mm, tulee ilman virtausnopeudeksi,

$$v = \frac{\frac{190 \frac{l}{s}}{1000}}{\frac{\pi * \left(\frac{250 \text{ mm}}{1000}\right)^2}{4}} \approx 3,87 \text{ m/s}$$

Jäähdytystehontarpeen täyttävällä ilmavirralla pyöreässä kanavassa, jonka halkaisija on 250 mm, tulee ilman virtausnopeudeksi,

$$v = \frac{\frac{1239,1 \frac{l}{s}}{1000}}{\frac{\pi * \left(\frac{250 \text{ mm}}{1000}\right)^2}{4}} \approx 25,24 \text{ m/s}$$

Majoitushuoneiden tuloilmalaitteiden kanavat ovat kokoa Ø125. Alkutilanteen jäähdytystehontarpeen täyttävillä ilmavirroilla virtausnopeudet majoitushuoneiden kanavissa ovat yhden hengen huoneessa,

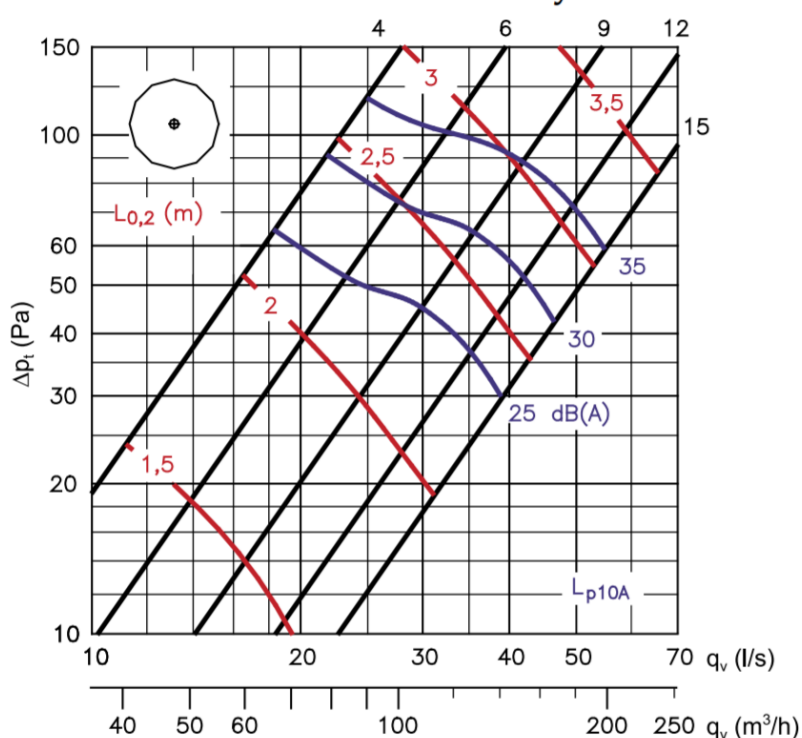
$$v = \frac{\frac{125,5 \frac{l}{s}}{1000}}{\frac{\pi * \left(\frac{125 \text{ mm}}{1000}\right)^2}{4}} \approx 10,23 \text{ m/s}$$

Alkutilanteen jäädytystehontarpeen täyttävillä ilmavirroilla virtausnopeudet majoitus-
huoneiden kanavissa ovat kahden hengen huoneessa,

$$v = \frac{\frac{109,6 \frac{l}{s}}{1000}}{\frac{\pi * \left(\frac{125 \text{ mm}}{1000}\right)^2}{4}} \approx 8,93 \text{ m/s}$$

Rakennuksen piirustuksissa ei ole tyypitetty ilmanvaihdon päätelaitteita, joten suoraa
tarkastelua päätelaitteiden äänitasoista ei voida tehdä. Kuvassa 27 on esitetty
Fläktwoods Oy:n tuloilmaventtiin Ø125 säätökäyrästä, jossa näkyvät myös painehäviöt
ja äänitasot (19).

KTSS/KTSS-125 ilman suuntauslevyä²⁾

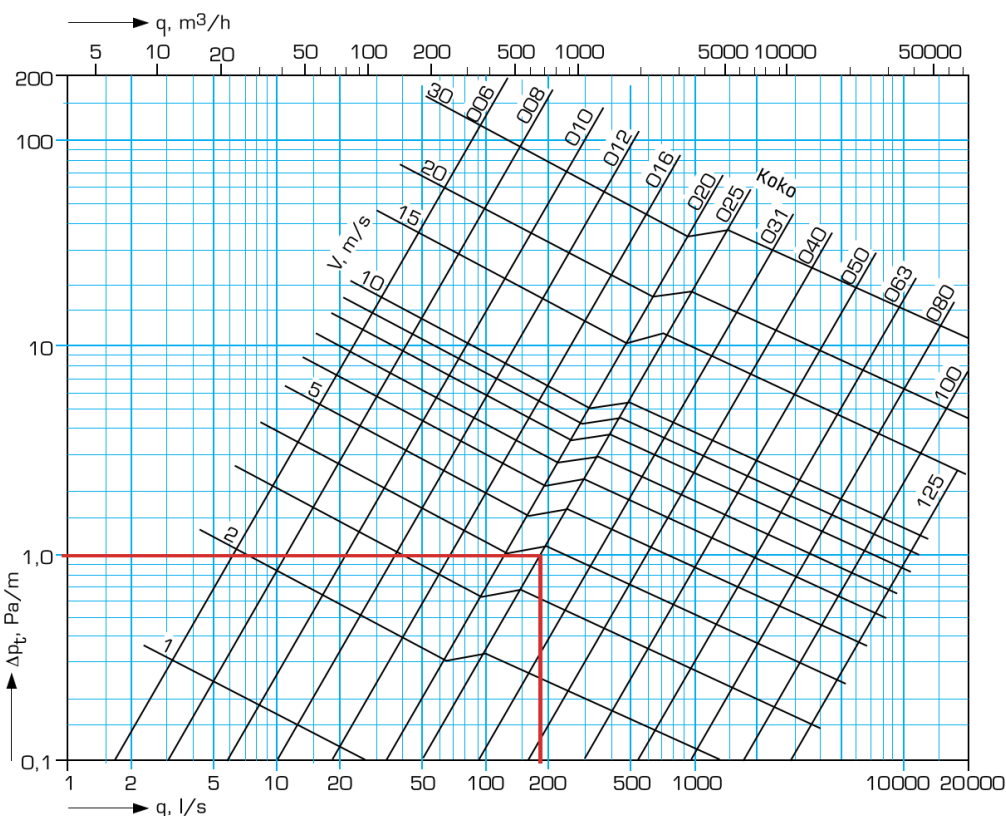


Kuva 27. KTS-tuloilmaventtiin säätökäyrästä (19).

Kuvasta 27 nähdään, että yleisesti käytössä olevassa tuloilmaventtiilissä eivät vaadittavat ilmavirrat mahdu edes mitoituskäyrästölle. Käyrästön mukaan 25 dB:n raja täyttyy ilmavirralla, joka on noin 38 l/s. Vaaditut ilmavirrat majoitustiloissa jäähdytystehon tarpeen täyttämiseksi olivat yhden hengen huoneessa 125,5 l/s ja kahden hengen huoneessa 109,6 l/s. Oletettavaa siis on, että vaaditut ilmavirrat aiheuttaisivat äänihaittaa majoitustiloissa sekä niistä koituisi myös painehäviötä runsaasti.

12.2 Kanaviston painehäviötarkastelu

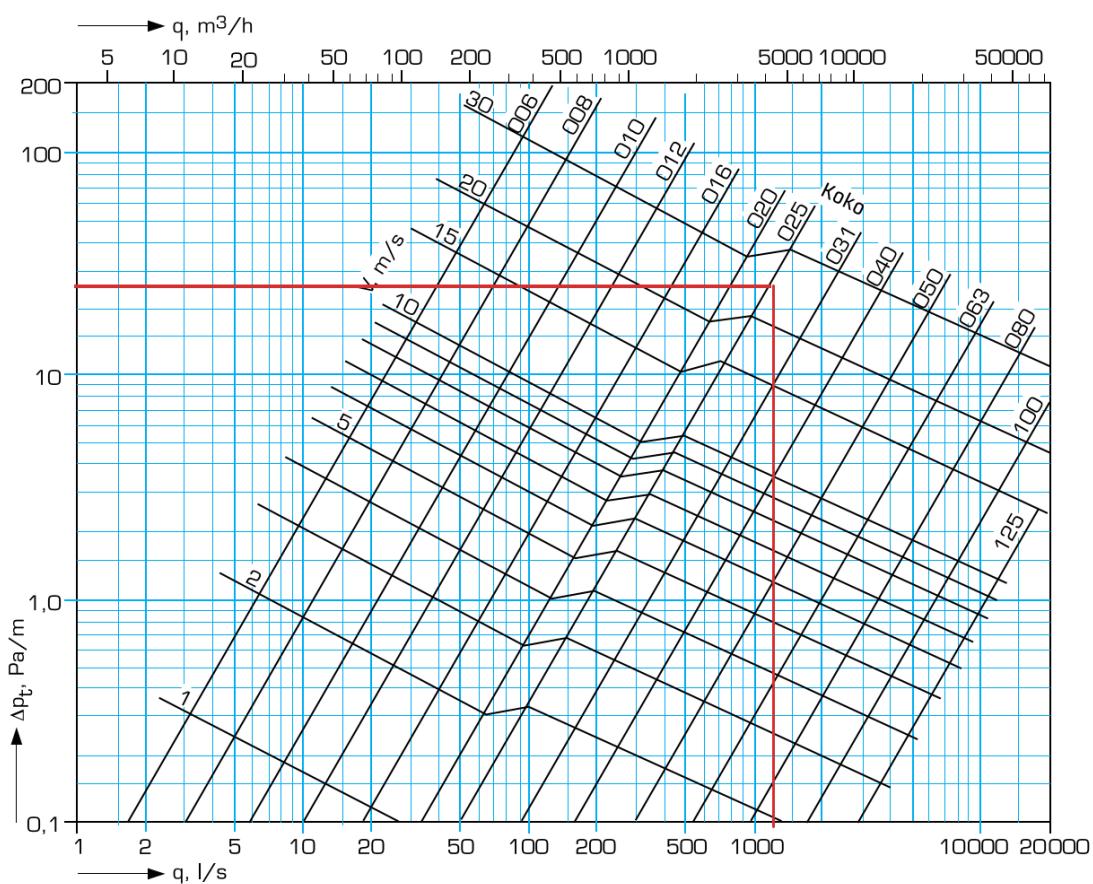
Kanaviston painehäviöiden tarkastelussa käytettiin Fläktwoods Oy:n pyöreä kanavajärjestelmä -tuoteluetteloa. Alkutilanteessa puhallettava ilmavirta majoitustiloihin on 190 l/s ja yhden haaran koko on Ø250. Kuvassa 28 on esitetty pyöreän kanavan painehäviökäyrästö, ja punaisilla viivoilla on esitetty alkutilanteen tiedot.



Kuva 28. Painehäviöt alkutilanteessa yhdessä runkokanavassa (18).

Kuvassa 28 on vaaka-akselilla ilmavirta yksikössä l/s ja pystyakselilla painehäviö metriä kohden yksikössä Pa/m. Kuvassa on esitetty myös virtausnopeus, joka on käyrästäön mukaan noin 4 m/s, eli lähellä laskettua arvoa. Käyrästäön mukaan alkutilanteessa painehäviö on noin 1 Pa/m.

Alkutilanteessa jäähdytystehontarpeen täyttävä ilmavirta on 1239,1 l/s ja yhden haaran koko on Ø250. Kuvassa 29 on esitetty pyöreän kanavan painehäviökäyrästäön ja punaisilla viivoilla on esitetty alkutilanteen jäähdytystehontarpeen täyttävä tilanne.



Kuva 29. Painehäviöt alkutilanteen jäähdytystehontarpeen täyttävällä ilmavirralla yhdessä runkkanavassa (18).

Kuvassa 29 on vaaka-akselilla ilmavirta yksikössä l/s ja pystyakselilla painehäviö metriä kohden yksikössä Pa/m. Kuvassa on esitetty myös virtausnopeus, joka on käyrästäön

mukaan noin 25 m/s eli lähellä laskettua arvoa. Käyrästäön mukaan jäähdytystehontarpeen täyttävällä ilmavirralla painehäviö on noin 37 Pa/m.

Painehäviökäyrästäön tarkastelun perusteella painehäviöt nousevat erittäin suuriksi verrattuna alkutilanteeseen. Alkutilanteen 1 Pa/m on taloudellisesti mitoitettu, mutta kasvatettujen ilmamäärien tilanteessa painehäviö on noin 37 Pa/m. Painehäviöt nousevat runkokanavien osalta siis yli 30-kertaisiksi. Suuret painehäviöt aiheuttavat kustannuksia ilmanvaihdossa. Puhaltimen täytyy kattaa kanaviston ja päätelaitteiden painehäviöt, jotta ilma saadaan toimitettua palveltaviin tiloihin. Jos painehäviöt nousevat, kasvaa myös puhaltimelta vaadittava työ, mikä aiheuttaa suurempaa sähkönkulutusta.

13 Jäähdytetyn tuloilman tarkastelu

Kanavajäähdytyspatterin lisäämistä tarkasteltiin samalla tavalla kuin ilmavirran lisäämisen vaikutusta. Tarkasteltaviin tiloihin lisättiin omat ilmanvaihtokoneet, joihin tuloilman lämpötilaksi asetettiin 16 °C. Lämpötilan asetusarvoksi määritettiin korkeimmillaan 25 °C. Taulukoissa 9 on esitetty alkutilanteen tarkasteltavien tilojen vaadittavat ilmavirrat, jotta lämpötila ei kohoja yli 25 °C:n. Taulukossa 9 on esitetty myös poistoilman lämpötilat.

Taulukko 9. Alkutilanteessa vaadittavat jäähdytetyt tuloilmavirrat jäähdytystehon tarpeen täyttämiseksi.

Tunti	Yhden hengen huone		Kahden hengen huone	
	Ilmavirta, l/s	poistoilman lämpötila, °C	Ilmavirta, l/s	poistoilman lämpötila, °C
1	41.66	24.3	36.56	23.74
2	39.47	24.28	36.56	23.65
3	37.66	24.26	36.56	23.57
4	36.04	24.25	36.56	23.49
5	34.6	24.23	36.56	23.43
6	34.21	24.23	36.56	23.38
7	42.4	24.3	36.56	23.5
8	61.13	24.44	39.39	24.0
9	75.7	24.52	52.16	24.22
10	86.38	24.57	64.0	24.3
11	93.91	24.61	73.5	24.35
12	97.43	24.62	79.24	24.37
13	96.67	24.62	81.57	24.38
14	91.69	24.6	80.45	24.38
15	83.99	24.56	76.35	24.36
16	76.09	24.52	69.42	24.33
17	73.33	24.5	64.45	24.3
18	71.94	24.5	62.61	24.29
19	70.47	24.49	61.06	24.28
20	68.66	24.48	59.22	24.27
21	66.63	24.47	57.26	24.26
22	61.63	24.44	51.03	24.21
23	51.3	24.37	39.28	24.05
24	44.83	24.32	36.57	23.86
keskiarvo	64.08	24.44	54.31	24.04
keskiarvo*24,0 h	1537.8	586.5	1303.5	577.0
min	34.21	24.23	36.56	23.38
maks	97.43	24.62	81.57	24.38

Alkutilanteen jäähdytetyn tuloilman simuloinnissa tuloilmavirta ja poistoilman lämpötila olivat yhden hengen huoneessa korkeimmillaan kello 13. Korkeimmillaan tuloilmavirta oli 97,43 l/s ja poistoilman lämpötila 24,62 °C. Tuloilman jäähdytysteho korkeimpien kuormien aikana on,

$$1,2 \text{ kg/m}^3 * 97,43/1000 \text{ m}^3/\text{s} * 1000 \text{ kJ}/(\text{kg K}) * (24,62 \text{ °C} - 16 \text{ °C}) = 1007,8 \text{ W}$$

Alkutilanteen jäähdytetyn tuloilman simuloinnissa tuloilmavirta ja poistoilman lämpötila olivat kahden hengen huoneessa korkeimmillaan kello 13. Korkeimmillaan tuloilmavirta oli 81,57 l/s ja poistoilman lämpötila 24,38 °C. Tuloilman jäähdytysteho korkeimpien kuormien aikana on,

$$1,2 \text{ kg/m}^3 * 81,57/1000 \text{ m}^3/\text{s} * 1000 \text{ kJ}/(\text{kg K}) * (24,38 \text{ }^\circ\text{C} - 16 \text{ }^\circ\text{C}) = 843,8 \text{ W}$$

Jäähdytetyn ilmavirran simuloinnissa ilmavirta pienei verrattuna alkutilanteen kasvatet-
tujen ilmavirtojen tilanteeseen. Jäähdytystehon tulee pysyä lähes samansuuruisena näi-
den simulointien välillä, koska muuttuvana tekijänä simuloinneissa on vain tuloilman läm-
pötila. Alkutilanteen kasvatetun ilmavirran ja jäähdytetyn ilmavirran huippu jäähdytyste-
hojen erotus yhden hengen huoneessa on,

$$1012,5 \text{ W} - 1007,8 \text{ W} = 4,7 \text{ W}$$

Huippu jäähdytysteho eroaa simulointien välillä vain 4,7 W. Tämä ero johtuu simulointien
huippukuorman aikaan olevista eroista sisäilman lämpötiloissa. Vaikka asetukset ovat
simuloinneissa samat tuloilman lämpötila pois lukien, simulointi tuloksissa voi tapahtua
pieniä muutoksia simulointien välillä. Esimerkiksi lämpötilan noustessa lähelle asetusar-
voa, simulointiohjelma lisää ilmanvaihtoa. Tuloilman lämpötilaerot aiheuttavat eri suurui-
set ilmavirrat saman tavoitteen toteuttamiseksi. Jos ilmavirtaa kasvatetaan 1 l/s molem-
missa simuloinneissa, jäähdytystehot ovat erisuuruiset, vaikka sisäilman lämpötilat olisi-
vat samat. Esimerkiksi 1 l/s ilmavirran lisäys, jos huoneilman lämpötila on 24,5 °C ja
tuloilman lämpötilat ovat 18 °C ja 16 °C, tuottaa seuraavan tuloksen

$$1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1/1000 \text{ m}^3/\text{s} * 1000 \text{ kJ}/(\text{kg K}) * (24,5 \text{ }^\circ\text{C} - 18 \text{ }^\circ\text{C}) = 7,8 \text{ W}$$

$$1,2 \text{ kg/m}^3 * 1/1000 \text{ m}^3/\text{s} * 1000 \text{ kJ}/(\text{kg K}) * (24,5 \text{ }^\circ\text{C} - 16 \text{ }^\circ\text{C}) = 10,2 \text{ W}$$

Yllä olevissa esimerkeissä pienen ilmavirran lisäyksellä on 2,4 W:n ero. Simulointioh-
jelma huomioi niin monta muuttujaa laskelmissa, ja laskutoimituksia tapahtuu simuloin-
neissa niin paljon, että pienet erot tuloksissa ovat odotettavissa.

Taulukossa 10 on esitetty kalvotettujen ikkunoiden tilanteessa vaadittavat jäähdytetyt
tuloilmavirrat ja poistoilman lämpötilat.

Taulukko 10. Kalvotettujen ikkunoiden tilanteessa vaadittavat jäähdytetyt tuloilmavirrat.

Tunti	Yhden hengen huone		Kahden hengen huone	
	Ilmavirta, l/s	poistoilman lämpötila, °C	Ilmavirta, l/s	poistoilman lämpötila, °C
1	33.93	24.22	36.56	23.63
2	32.24	24.2	36.56	23.53
3	30.84	24.19	36.56	23.45
4	29.62	24.17	36.56	23.37
5	28.64	24.15	36.56	23.31
6	29.19	24.16	36.56	23.28
7	34.87	24.23	36.56	23.39
8	50.9	24.37	36.96	23.87
9	61.04	24.44	43.85	24.15
10	67.76	24.47	51.76	24.22
11	72.73	24.5	58.48	24.27
12	75.31	24.52	63.3	24.29
13	75.38	24.52	65.91	24.31
14	73.08	24.5	66.3	24.31
15	68.41	24.48	63.95	24.3
16	63.99	24.45	60.02	24.27
17	62.21	24.44	57.49	24.26
18	61.24	24.44	56.27	24.25
19	60.33	24.43	55.35	24.25
20	59.12	24.42	54.15	24.24
21	57.15	24.41	51.94	24.22
22	53.35	24.38	47.26	24.18
23	43.11	24.31	37.87	23.99
24	36.36	24.25	36.56	23.75
keskiarvo	52.53	24.36	48.47	23.96
keskiarvo *24.0 h	1260.8	584.7	1163.3	575.1
min	28.64	24.15	36.56	23.28
maks	75.38	24.52	66.3	24.31

Kalvotettujen ikkunoiden tilanteessa jäähdytetyn tuloilman simuloinnissa tuloilmavirta ja poistoilman lämpötila olivat yhden hengen huoneessa korkeimmillaan kello 13. Korkeimmillaan tuloilmavirta oli 75,38 l/s ja poistoilman lämpötila 24,52 °C. Tuloilman jäähdytys-teho korkeimpien kuormien aikana on,

$$1,2 \text{ kg/m}^3 * 75,38/1000 \text{ m}^3/\text{s} * 1000 \text{ kJ}/(\text{kg K}) * (24,52 \text{ °C} - 16 \text{ °C}) = 770,7 \text{ W}$$

Kalvotettujen ikkunoiden tilanteessa jäähdytetyn tuloilman simuloinnissa tuloilmavirta ja poistoilman lämpötila olivat kahden hengen huoneessa korkeimmillaan kello 14. Korkeimmillaan tuloilmavirta oli 66,3 l/s ja poistoilman lämpötila 24,31 °C. Tuloilman jäähdytysteho korkeimpien kuormien aikana on,

$$1,2 \text{ kg/m}^3 * 66,3/1000 \text{ m}^3/\text{s} * 1000 \text{ kJ}/(\text{kg K}) * (24,31 \text{ °C} - 16 \text{ °C}) = 661,1 \text{ W}$$

Alkutilanteen ja kalvotuksen välinen ero tuloilman jäähdyttämisen tilanteessa on yhden hengen huoneessa,

$$1007,8 \text{ W} - 770,7 \text{ W} = 237,1 \text{ W}$$

Alkutilanteen ja kalvotuksen välinen ero tuloilman jäähdyttämisen tilanteessa on kahden hengen huoneessa:

$$843,8 \text{ W} - 661,1 \text{ W} = 182,7 \text{ W}$$

Erot simulointituloksista ovat saman suuntaisia kuin kasvatettujen ilmavirtojen simuloinneissa. Suurempi hyöty kalvotuksesta on ylemmässä kerroksessa sijaitsevassa yhden hengen huoneessa.

14 Pohdinta

Työn tavoitteena oli määrittää kohteen kesäajan lämpöolosuhteet ja pohtia keinoja lämpötilojen hallintaan. Työssä tarkasteltiin aurinkosuojakalvotuksen vaikutusta lämpökuorman pienentämiseen sekä ilmanvaihdon tehostamisen ja tuloilman lämpötilan laskun vaikutusta tilojen jäähdyttämiseen. Aurinkosuojakalvotuksen tarkastelussa huomattiin, että vaikka aurinkosuojauksella oli positiivinen vaikutus lämpötilojen hallintaan, ei saavutettu hyöty ollut läheskään tarpeeksi suuri. Parhaimmat tulokset auringon lämpökuorman torjumisessa aurinkosuojakalvoilla saavutettiin ylimmissä kerroksissa. Alimmissä kerroksissa aurinkosuojakalvo ei tuonut yhtä merkittäviä vähennyksiä jäähdytystehon-

tarpeeseen, koska alimmissa kerroksissa auringon aiheuttamat lämpökuormat olivat pienempi osa huoneen kokonais- lämpökuormaa. Aurinkosuojakalvotuksen rinnalle tarvittaisiin myös muu jäähdytyskeino, jotta saavutettaisiin halutut sisälämpötilan arvot

Ilmanvaihdon tehostamisen ja tuloilman jäähdyttämisen tarkastelussa huomattiin, että ilmavirrat kasvaisivat tiloissa huomattavasti. Tarkasteluissa huomattiin myös, että virtausnopeudet ja painehäviöt nousisivat olemassa olevissa kanavissa erittäin suuriksi, jolloin majoitustiloihin voi syntyä äänihaittaa. Myös ilmanvaihtokoneen taloudellisen toiminnan takaamiseksi ilmavirtojen nostaminen vaadittavalle tasolle ei ole varteen otettava vaihtoehto.

Tarkasteluiden perusteella voidaan arvioida, että halutun sisäilman lämpötilan saavuttamiseksi tarvitaan majoitustiloihin jäähdytys. Näitä vaihtoehtoja ovat esimerkiksi puhallin-konvektorit ja jäähdytyspaneelit. Jäähdytysjärjestelmien lisäämisessä kustannukset nousisivat suuriksi, koska kohteessa ei ole aikaisempaa jäähdytysjärjestelmää. Kustannuksia syntyisi jäähdytyslaitteista, putkistoista ja tarvittavasta työstä. Myös kohteen luonteen takia näkyvillä olevat jäähdytyslaitteet tulisi suojata ilkeillä, mikä tarkoittaisi kustannuksia rakenteellisista muutoksista.

15 Yhteenveto

Opinnäytetyö tehtiin, koska tarkasteltavan kohteen käyttäjät olivat kokeneet kesäajan lämpötilat liian korkeiksi majoitustiloissa. Työssä tarkasteltava kohde on vuonna 2002 valmistunut ja toimintansa alottanut majoituslaitosrakennus, joka sijaitsee pääkaupunkiseudulla. Rakennuksen tarkasteltavassa alueessa on 94 tilaa, joista 84 tilaa on majoituskäytössä. Kerroksia rakennuksessa on viisi. Majoituskäytössä olevat tilat ovat yhden ja kahden hengen huoneita, jotka ovat korkealla käyttöasteella läpi vuoden. Tavoitteena opinnäytetyössä oli tarkastella aurinkosuojakalvotuksen vaikutusta lämpökuorman pienentämiseen sekä ilmanvaihdon tehostamisen ja tuloilman lämpötilan laskun vaikutusta tilojen jäähdyttämiseen. Tarkasteluissa käytettiin IDA ICE -simulointiohjelmää, jonka avulla laskettiin kesäajan lämpötilat eri tarkasteluvaihtoehdoilla. Simuloinnit suoritettiin 1.5.–31.8. Työssä tutkittavia vaihtoehtoja tarkasteltiin viidennessä kerroksessa olevassa

yhden hengen huoneessa ja alimmassa kerroksessa olevassa kahden hengen huoneessa. Tarkasteltavat tilat pidettiin simuloinneissa samoina, jotta eri vaihtoehtojen vertailu ja tarkastelu olisi mahdollisimman yhdenmukaista.

Alkutilanteessa viidennessä kerroksessa sijaitsevassa yhden hengen huoneessa lämpötila kohosi yli 30 °C:seen huippukuorman aikana. Ensimmäisessä kerroksessa sijaitsevassa kahden hengen huoneessa lämpötila kohosi alkutilanteessa 28 °C:seen huippukuorman aikana. Suurimman lämpötilan huoneet saavuttivat heinäkuun puolella välissä. Auringon suora- ja hajasäteilyn maksimiteho ikkunoista oli yhden hengen huoneessa 327 W ja kahden hengen huoneessa 315 W. Aurinkosuojakalvotuksen simulointituloksissa auringon suora- ja hajasäteilyn maksimiteho ikkunoista oli yhden hengen huoneessa 192 W ja kahden hengen huoneessa 185 W. Aurinkosuojakalvotus laskee merkittävästi ikkunoista kulkeutuvaa auringon suora- ja hajasäteilyn tehoa. Myös pitkäaaltonen säteily ja konvektio ikkunoista laskee merkittävästi aurinkosuojakalvotuksen vaikutuksesta. Huonelämpötilat laskivat aurinkosuojakalvotuksen simuloinneissa yhden hengen huoneessa 2 °C ja kahden hengen huoneessa 1 °C. Simulointitulosten perusteella aurinkosuojakalvotus laskee merkittävästi ikkunoiden kautta kulkeutuvaa lämpökuormaa, mutta tarkasteltavissa tiloissa saavutettu hyöty ei ollut riittävä.

Alkutilanteessa yhden hengen huoneessa ilmavirta oli 20 l/s ja kahden hengen huoneessa 30 l/s. Tuloilman sisäänpuhalluksen lämpötila tarkasteluissa oli 18°C. Tehostetun ilmanvaihdon simuloinneissa asetettiin huoneilman lämpötilaraja 25 °C:seen, jonka perusteella IDA ICE -simulointiohjelma laskee jäähdytystehontarpeen kattavan ilmavirran. Alkutilanteen jäähdytystehon täyttävä ilmavirta oli yhden hengen huoneessa 126 l/s ja kahden hengen huoneessa 110 l/s. Aurinkosuojakalvotuksen kanssa ilmavirrat olivat yhden hengen huoneessa 98 l/s ja kahden hengen huoneessa 90 l/s. Jäähdytystehontarpeen täyttävät ilmavirrat olivat huomattavasti suuremmat kuin alkuperäiset ilmavirrat. Ilmavirtojen kasvattaminen ei ollut varteenotettava vaihtoehto, koska suuret ilmavirrat aiheuttaisivat ylisuuria painehäviöitä kanavistossa, äänihaittaa ja todennäköisesti ilmanjaon ongelmia.

Jäähdytetyn tuloilman tarkasteluissa huoneilman lämpötilaraja oli 25 °C ja tuloilman lämpötila 16 °C. Alkutilanteessa jäähdytetyn tuloilman simuloinneissa jäähdytystehontarpeen täyttävä ilmavirta oli yhden hengen huoneessa 97 l/s ja kahden hengen huoneessa

82 l/s. Jäähdytetyn tuloilman tarkasteluissa päädyttiin hyvin samanlaisiin johtopäätöksiin kuin tehostetun ilmanvaihdon tarkasteluissa. Suuret ilmavirrat kasvattaisivat ilmavirran nopeutta kanavistossa huomattavasti ja aiheuttaisivat samoja ongelmia kuin tehostetun ilmanvaihdon tapauksessa.

Opinnäytetyön tarkasteluiden pohjalta arvioidaan, että haluttujen sisälämpötilojen saavuttamiseksi tulee majoitustiloihin asentaa erillinen jäähdytysjärjestelmä. Opinnäytetyössä käsiteltyä aihealuetta voitaisiin tutkia tarkemmin jäähdytyslaitteiston mitoituksen yhteydessä. Tarkastelu aurinkosuojakalvotuksen vaikutuksesta jäähdytysjärjestelmän mitoitukseen ja jäähdytyskustannuksiin voisi olla kannattavaa.

Lähteet

- 1 Energiategokkuus. 2018. Rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Helsinki: ympäristöministeriö.
- 2 Kropf, Sven. & Zweifel, Gerhard. 2001. Validation of the Building Simulation Program IDAICE According to CEN 13791. HOCHSCHULE FÜR TECHNIK+ARCHITEKTURLUZERN.
- 3 IDA Indoor Climate and Energy 3.0. 2002, Manual, EQUA Simulation AB.
- 4 Beck, Wouter. (toim.);ym. 2011. Aurinkosuojaus, Rehva ohjekirja no. 12. Forssa: Suomen LVI-liitto ry.
- 5 Lämmön siirtymistavat. Verkkoaineisto. Peda. < <https://peda.net/kotka/perusopetus/kotkansaaren-koulu/kt/oppiaineet/fysiikka/jannen-ryhmat/l%C3%A4mp%C3%B6/ls/ls>>. Luettu 7.3.2021.
- 6 Rakenteiden lämpötekniikka. Verkkoaineisto. Sisäilmayhdistys ry.<<https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Rakenteiden-lampotekniikka>>. Luettu 7.3.2021.
- 7 Terveysvaikutukset. Verkkoaineisto. Sisäilmayhdistys ry. < <https://www.sisailmayhdistys.fi/Perustietoa-sisailmasta/Terveysvaikutukset>>. Luettu 7.3.2021.
- 8 Seppänen. Olli, Fisk. William, Lei-Gomez. Quanhong 2006. Room temperature and productivity in office work. Helsinki University of Technology, Vol 1
- 9 Wargocki, Wyon. 2006. Research report on effects of HVAC on student performance ASHRAE Journal. Vol 48.
- 10 Tyypillisiä olemassa olevien vanhojen rakennusten alkuperäisiä suunnitteluarvoja, Energiatodistusoppaan 2018 liite, Helsinki: ympäristöministeriö.
- 11 Solar window film esite, Verkkoaineisto. Suomen 3M Oy. <<https://www.kuopionta-kuutarra.fi/wp-content/uploads/2019/06/solar-window-film-esite-28-1-2014.pdf>>. Luettu 7.3.2021
- 12 Standardit. Verkkoaineisto. Buildingsmart. < <https://buildingsmart.fi/standardit/>>. Luettu 7.3.2021.

- 13 Tietoja EQUA:sta, Verkkoaineisto, Equa. < <https://www.equa.se/fi/about-us/about-equa> >. Luettu 7.3.2021
- 14 Kurnitski, Jarek, & Tauru, Pasi. 2007. Kesäaikaisten lämpötilojen hallinta asuin-kerrostaloissa. Sisäilmastoseminaari 2007, Espoo 14.3.2007
- 15 Kesäajan huone lämpötilan vaatimuksenmukaisuuden osoittaminen (2012). 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma, D3. Ympäristöministeriö.
- 16 Sisäilmaluokitus 2018. 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Rakennustieto. RT 07-11299.
- 17 Valkeapää, Aki. 2018. Termodynamiikan perusteita 1. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 18 Pyöreä kanavajärjestelmä. 2017. Tuote-esite. Fläktwoods Oy
- 19 KTS ja KTSS tuloilmaventtiilit. 2018. Tuote-esite. Fläktwoods Oy