



TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# TILARATKAISUIDEN JA AURINKOSUOJA- UKSIEN TUTKIMINEN DYNAAMISELLA OLOSUHDESIMULOINNILLA

COMBI-hanke

Jouni Hytönen

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2017  
Talotekniikan koulutus  
LVI-talotekniikka



## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Talotekniikan koulutus  
LVI-talotekniikka

HYTÖNEN JOUNI:

Tilaratkaisuiden ja aurinkosuojauksien tutkiminen dynaamisella olosuhdesimuloinnilla  
COMBI-hanke

Opinnäytetyö 50 sivua, joista liitteitä 5 sivua  
Huhtikuu 2017

---

Tässä työssä tutkittiin arkkitehtonisten suunnitteluratkaisuiden vaikutusta rakennuksen energiataseeseen. Työ toteutettiin osana laajempaa COMBI-hanketta (Comprehensive development of nearly zero-energy municipal service buildings), joka keskittyy palvelurakennusten energiatehokkuuden kehittämiseen ja parantamiseen. Suomessa on asetettu tavoitteeksi saavuttaa vuoden 2019 alusta lähtien kaikille julkisille rakennuksille lähes nollaenergiataso. COMBI-hankkeessa pyritään erilaisia lähestymissuuntia hyödyntäen selvittämään, miten rakennusten suunnittelu- ja käyttövaiheessa tulisi toimia lähes nollaenergiatason saavuttamiseksi.

Tutkimuksen päätavoitteena oli selvittää, kuinka suuresti yksittäiset arkkitehtisuunnittelussa määritettävät ratkaisut vaikuttavat rakennuksen kokonaisenergiankulutukseen. Tutkittavana kohteena työssä oli Tampereen teknillisen yliopiston asuntosuunnittelun työryhmän luoma palvelurakennuksen tyyppimalli. Tutkimus toteutettiin dynaamisella simuloinnilla, IDA Indoor Climate and Energy -ohjelmistolla. Työssä tutkittiin myös erilaisilla aurinkosuojausratkaisuilla saavutettavia hyötyjä valaistus- ja jäähdytysenergian kulutuksissa.

Merkittävin tutkittava suunnitteluratkaisu oli ikkunapinta-alan vaikutus rakennuksen energiatehokkuuteen. Kasvattamalla ikkunoiden leveyttä asteittain löydettiin ikkunoille energiatehokkuuden näkökulmasta optimaalisin koko. Dynaamisella simuloinnilla selvitettiin myös, kuinka paljon suuren ikkunapinta-alan lisäämää energiankulutusta voidaan kompensoida vakiovalo-ohjauksella. Aurinkosuojauksen vaikutus jäähdytysenergian kulutukseen jäi simulointitulosten perusteella odotettua pienemmäksi. Tämä selittyy suurelta osin tyyppimallin muodolla.

Työssä onnistuttiin kuvaamaan miten yksittäiset suunnitteluratkaisut vaikuttavat kokonaisenergiankulutukseen. Vaikka arkkitehtisuunnittelulla ja aurinkosuojauksella saavutettavat energiatehokkuuden parannukset jäivät tässä työssä tutkitussa tyyppimallissa pienehköiksi, ei niiden tärkeyttä lähes nollaenergiatason saavuttamisessa tule väheksyä.

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Building Services Engineering  
HVAC-engineering

**HYTÖNEN, JOUNI:**

Inspecting space solutions and sun protection by dynamic circumstance simulation  
COMBI-project

Bachelor's thesis 50 pages, appendices 5 pages  
April 2017

---

This thesis contemplates the impact of architectural planning solutions on the total energy consumption of buildings. The work was carried out as a part of COMBI-project (Comprehensive development of nearly zero-energy municipal service buildings), which focuses on development of more energy-efficient solutions for municipal service buildings. The government of Finland has set a target to achieve nearly zero-energy consumption level in municipal service buildings by 2019. The COMBI-project is trying to clarify how buildings should be designed in order to achieve this goal.

The main aim of this work was to predict the effects of different architectural planning solutions on building's total energy consumption. A main research subject in this investigation was a municipal building type model, prepared by the housing design group of the Tampere University of Technology. The research was implemented by dynamic simulation method, using IDA Indoor and Energy -program. It was also investigated how much energy could be saved by using passive chilling solutions and advanced lighting control systems.

The window area had the most important effect on the total energy consumption. An optimal size for the windows was found by increasing them step by step. Potential savings in chilling energy consumption achieved by sun protection turned out to be smaller than expected. The shape of the researching model building may contribute significantly to this result.

This work succeeded in producing guidelines for the prediction of the impact of the architectural elements on the total energy consumption of the building. Even though many of tested solutions turned out to have a small impact in total energy consumption, the architectural design is still an important part of achieving the nearly zero-energy consumption buildings.

---

Key words: dynamic simulation, sun protection, COMBI-project

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
1.1	COMBI-hanke .....	6
1.2	Työpaketti 2.....	6
1.3	Työn tavoitteet .....	7
2	ENERGIATEHOKKUUS JA ARKKITEHTUURI.....	8
2.1	Uudistuvat energiatehokkuusmääräykset .....	8
2.2	Energiatehokkuuden huomioiminen arkkitehtisuunnittelussa .....	9
2.2.1	Muoto ja asemointi .....	9
2.2.2	Pohjaratkaisu ja tilat.....	11
2.2.3	Ikkunat ja luonnonvalo .....	12
3	IKKUNOIDEN JA PÄIVÄNVALON VAIKUTUS RAKENNUKSEN ENERGIATEHOKKUUTEEN.....	14
3.1	Ikkunoiden vaikutus sisäympäristöön .....	14
3.1.1	Ikkunat osana lämpötasetta .....	14
3.1.2	Ikkunoiden ominaisuudet .....	15
3.2	Aurinkosuojaus .....	16
3.3	Päivänvalon hyödyntäminen valaistuksessa ja sen ohjaamisessa.....	19
4	TUTKIMUSMENETELMIEN JA TARKASTELUKOHTTEIDEN ESITTELY.....	21
4.1	Dynaaminen simulointi .....	21
4.1.1	IDA-ICE yleisesti .....	21
4.1.2	Rakenteiden ja kuormien määrittely IDA-ICE:ssa .....	21
4.1.3	Lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien asetukset IDA-ICE:ssa .....	23
4.1.4	Valaistuksen ja aurinkosuojauksen ohjaus IDA-ICE:ssa.....	24
4.2	Tarkastelukohteen esittely .....	25
5	LASKENTATAPAUSTEN ESITTELY .....	28
5.1	Ikkunapinta-alan vaikutus kokonaisostoenergiankulutukseen .....	28
5.1.1	Ikkunoiden koko, perustapaus .....	28
5.1.2	Vakiovalo-ohjaus .....	29
5.1.3	Integroitu aurinkosuojaus .....	29
5.1.4	Ulkopuolinen aurinkosuojaus .....	29
5.2	Lasirakenne.....	30
5.3	Rakennuksen suuntaus .....	30
5.4	Valaistuksen ja aurinkosuojauksien ohjausten vertailu.....	31
6	TUTKIMUSTULOKSET .....	32
6.1	Kokonaisostoenergian kulutus .....	32
6.1.1	Ikkunapinta-ala .....	32

6.1.2 Lasirakenne .....	35
6.1.3 Rakennuksen suuntaus .....	37
6.2 Aurinkosuojauksen ja valaistuksen ohjaus .....	38
7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA .....	40
7.1 Tulosten analysointi .....	40
7.2 Pohdinta ja kehitysehdotukset .....	42
LÄHTEET .....	44
LIITTEET .....	46
Liite 1. Seinärakenteen määrittäminen IDA-ICE:ssa .....	46
Liite 2. Henkilömittauspisteen asettaminen IDA-ICE:ssa .....	47
Liite 3. Puoliläpäisevien verhojen asetukset IDA-ICE:ssa .....	48
Liite 4. Varsimarkiisin asetukset IDA-ICE:ssa .....	49
Liite 5. Kattoikkunan asetukset IDA-ICE:ssa .....	50

# 1 JOHDANTO

## 1.1 COMBI-hanke

COMBI – hanke (Comprehensive development of nearly zero-energy municipal service buildings), on vuonna 2015 käynnistynyt projekti, jonka tarkoituksena on palvelurakennusten energiatehokkuuden parantamiseen liittyvien ongelmien selvittäminen. Hankkeen vetäjänä toimii Tampereen teknillisen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmä.

Suomessa on asetettu tavoitteeksi, että kaikki vuonna 2019 käyttöönotettavat uudet julkiset rakennukset ovat lähes nollaenergiarakennuksia. Tämä luo haasteita kustannustehokkuuden säilyttämiselle, korostuen erityisesti julkisissa rakennuksissa. COMBI -hanke pyrkii tarjoamaan ratkaisuja ja työkaluja tulevaisuuden määräystasojen saavuttamiseen. Tärkeänä tutkimusalueena on myös laskennallisen ja toteutuvan energiankulutuksen erot, ja tähän tilanteeseen johtavat syyt. COMBI-hankkeen yksi päätavoitteista on laatia suositukset lähes nollaenergiarakennusten energiatehokkuusvaatimuksista palvelurakennuksille Suomen olosuhteissa. Hanke on jaettu viiteen eri työpakettiin, joista neljä keskittyy itse tutkimukseen ja viides paketti organisointiin ja tulosten tiedottamiseen.

COMBI-hanketta rahoitetaan eri kuntien ja yritysten, sekä julkisen rahoituksen voimin. Kaikkiaan mukana hankkeessa on 37 yritystä ja kahdeksan kuntaa Pirkanmaalta sekä Helsinki. Julkinen rahoittaja hankkeella on TEKESin INKA – innovatiiviset kaupungit –ohjelmaan liittyvästä Euroopan aluekehitysrahastosta. Hankkeessa on mukana tutkimusryhmiä Tampereen teknillisestä yliopistosta, Aalto-yliopistosta sekä Tampereen Ammattikorkeakoulusta.

## 1.2 Työpaketti 2

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan työpaketti 2:n (WP2) piiriin kuuluvia arkkitehtonisten ratkaisujen vaikutusta rakennusten energiatehokkuuteen. Työpaketin koordinaattorina toimii Tampereen teknillisen yliopiston arkkitehtuurin laitoksen asuntosuunnittelun tutkimusryhmä. Tavoitteena työpaketilla on tarjota energiankulutuksen suhteen optimoituja ratkaisuvaihtoehtoja palvelurakennusten arkkitehtisuunnittelun tueksi. Työpaketin

tulisi myös luoda edellytyksiä energiatehokkuuteen liittyvien tekijöiden huomioimiseen jo kaavoituksessa sekä arkkitehtisuunnittelun aikaisissa vaiheissa. Tässä työssä käsiteltävä tutkimuksen osa ajoittuu syksystä 2016 kevääseen 2017.

Asuntosuunnittelun tutkimusryhmä on luonut tutkimuksessa käytettäviksi malleiksi useista eri palvelurakennusmalleista yhdisteltyjä tyyppimalleja. Tyyppimallit sisältävät yleisimmät palvelurakennuksissa käytettävät tilalliset ja toiminnalliset ratkaisumallit. Tässä työssä tutkimuksen kohteena on Tyyppimalli I, joka on suorakaiteen muotoinen ja pinta-alaltaan noin 675 m<sup>2</sup>.

### **1.3 Työn tavoitteet**

Työn tavoitteena on tutkia ja havainnoida arkkitehtonisten ratkaisujen, kuten aukotuksen koon, ikkunatyyppien ja aurinkosuojauksien vaikutusta rakennusmallin lämmitys- jäähdytys- ja valaistusenergiankulutukseen. Lisäksi tutkitaan myös rakennuksen suuntauksen vaikutusta kokonaisenergiankulutukseen. Tavoitteena on myös tutkia miten erilaiset ohjaustavat vaikuttavat valaistus- ja jäähdytysjärjestelmien energiankulutuksiin.

Rakennusmallien energiankulutuksen koostumisen tutkimisessa hyödynnetään dynaamista olosuhdesimulointia. Työkaluna simuloinnissa toimii IDA-ICE – energiasimulointiohjelmisto. Tyyppimallien arkkitehtiratkaisuja ja ominaisuuksia muuttamalla voidaan kartoittaa erilaisten ratkaisujen vaikutusta rakennuksen kokonaisenergiankulutukseen. Dynaamista olosuhdesimulointia voidaan hyödyntää myös rakennuksen sisävalaistusolosuhteita ja aurinkosuojauksen vaikutusta tutkiessa. Tulevaisuuden rakennuksissa valaistuksen osuus on kokonaisenergiankulutukseen nähden yhä merkittävämmässä osassa. Työssä on tarkoitus tutkia myös arkkitehtonisten ratkaisujen vaikutusta rakennuksen sisäpuolella vaikuttavaan päivänvalon määrään, sekä tämän mukaisesti ohjautuvan valaistuksen tuomaan energiansäästöön. Ikkunakoon muuttumisen lisäksi työssä pyritään kartoittamaan myös kattoikkunoilla saavutettavaa säästöpotentiaalia valaistusenergiankulutuksessa.

## 2 ENERGIA TEHOKKUUS JA ARKKITEHTUURI

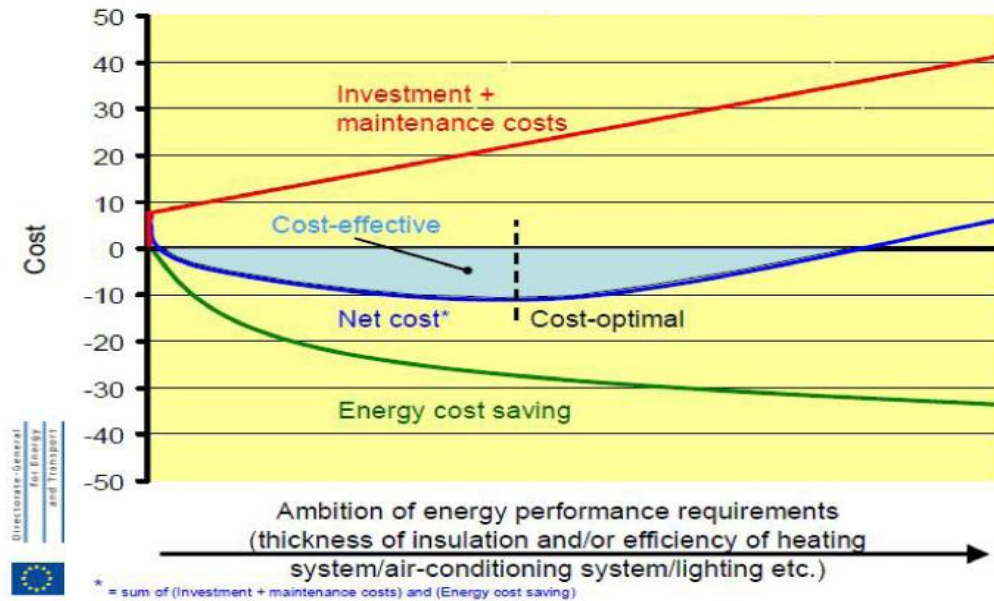
### 2.1 Uudistuvat energiatehokkuusmääräykset

Rakennusten energiatehokkaat suunnitteluratkaisut ovat tulevaisuudessa yhä tärkeämmässä osassa rakentamisprosessia. Täyttääkseen uuden Euroopan Unionin rakennusten energiatehokkuusdirektiivi EPBD:n, Suomessa on otettu tavoitteeksi saavuttaa vuoden 2019 alusta lähtien kaikille julkisille rakennuksille lähes nollaenergiataso. Direktiivi kuvaa itsessään ”lähes nollaenergiarakennusta” hyvin tulkinnanvaraisesti. Oikeiden energiankulutusta kuvaavien lukuarvojen määrittäminen on jätetty kunkin jäsenmaan itse hoidettavaksi. Lähes nollaenergiatason (nZEB) tavoitteet ja suuntaviivat Suomen kansalliselle tasolle on määritelty FinZEB- hankkeessa. COMBI-hanke tulee tavoitteidensa mukaan täydentämään suosituksia erityisesti palvelurakennusten energiatehokkuusvaatimuksille Suomessa.

Energiatehokkuusmääräysten uudistuminen luo suuria haasteita erityisesti julkisten palvelurakennusten suunnittelulle ja toteuttamiselle, joiden energiankulutuksen suunnittelutason saavuttaminen käyttötilanteessa on jo nykymääräysten puitteissa todettu haasteelliseksi. Hyvinkin suunnitellun rakennuksen lopullinen energiatehokkuus määräytyy vasta käyttövaiheessa. Palvelurakennusten käyttö on hyvin monimuotoista, joka luo erityisiä haasteita suunnittelutasojen saavuttamiselle.

Energiatehokkaan rakennuksen toteuttaminen vaatii panostusta läpi koko rakennusprosessin. Sepposen ym. (2013, 11) mukaan energiatehokkuustavoitteiden on oltava selkeitä jo esisuunnitteluvaiheessa. Kriittisin vaihe on joka tapauksessa rakennuksen varsinainen suunnitteluvaihe, sillä silloin päätetään suurimmasta osasta koko rakennuksen elinkaarikustannuksista. Itse suunnittelun investointi edustaa hyvin pientä osaa koko elinkaaren kustannuksista. Kuvassa 1 on kuvattuna lähes nollaenergiarakennuksen investoinnin ja energiansäästöpotentiaalini riippuvuutta toisistaan.





KUVA 1. Rakennuksen elinkaarikustannusten optimointi (Sepponen ym. 2013, 9)

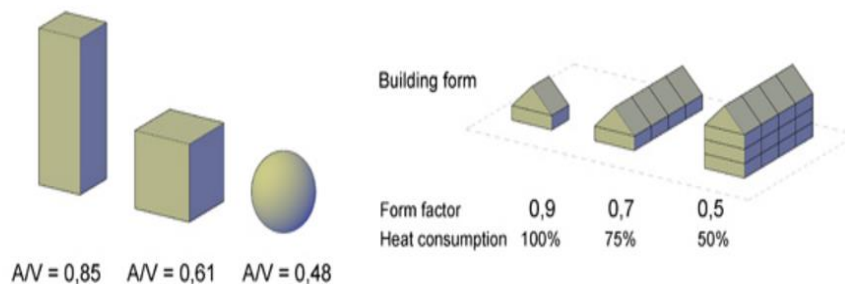
Kuva 1 havainnollistaa lähes nollaenergiarakentamisen haasteita. Hyvin energiatehokkaan rakennuksen rakentamiseen ja huoltamiseen sijoitetut rahat eivät välttämättä koskaan osoittaudu hankkeen tilaajan näkökulmasta kannattaviksi. Siksi lähes nollaenergiatasoa tavoitellessa tulee yleisimpien energiansäästöinvestointien lisäksi panostaa myös korkea energiatehokkuutta tukeviin pienempiin osatekijöihin.

## 2.2 Energiatehokkuuden huomioiminen arkkitehtisuunnittelussa

### 2.2.1 Muoto ja asemointi

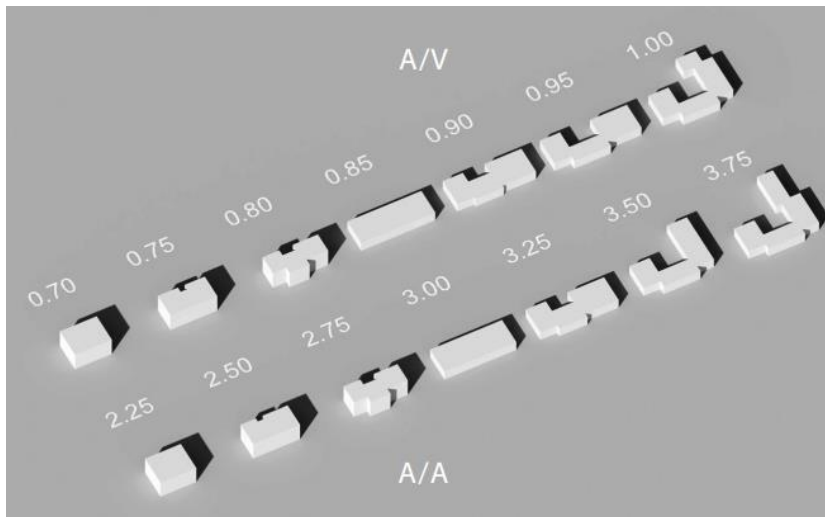
Arkkitehtisuunnitteluvaiheen ratkaisuista energiatehokkuuden kannalta merkittävimpänä pidetään rakennuksen muotoa. Usein muoto sisällytetään termiin rakenteellinen energiatehokkuus. Tällä tarkoitetaan lämmitystarpeen pienentämistä arkkitehtuurin sekä rakenteellisin ratkaisuin. Rakenteellisen energiatehokkuuden ratkaisut ovat yhä tärkeämmässä osassa tulevaisuuden rakennuksissa, koska ne eivät ole riippuvaisia säädöistä tai käyttäjistä. Oikein toteutettuna suunnittelijan pöydällä, niillä luodaan pohja koko rakennuksen energiatehokkuudelle. Tilojen lämmitystarpeen määrittelevät ratkaisut tulisi tehdä suunnittelun alkuvaiheessa. Tällöin olisi myös hyvä suorittaa alustavia energialaskelmia, joilla pienennetään riskiä rakennushankkeen myöhemmässä vaiheessa eteen tuleville arkkitehtonisille muutoksille. (Lylykangas ym. 2015, 22).

Sepposen ym. (2013, 17) mukaan ulkovaipan monimuotoisuus lisää aina rakennuksen lämpöhäviöitä. Rakennuksen lämmöneristetyin vaipan yksinkertaistamisella vaikutetaan positiivisesti sekä investointikustannuksiin että ylläpitokustannuksiin. Yksinkertaisten muotojen suosiminen vähentää osaltaan myös työvirheiden riskiä asennusvaiheessa. Lähes nollaenergiarakennuksen muotoa kuvataan usein ns. muotokertoimella. Yleensä muotokerroin lasketaan rakennuksen ulkovaipan ulkopinta-alan ja lämmitettävän alan tilavuuden suhdelukuna  $A/V$ . Pienen rakennuksen muotokerroin voi olla lähellä yhtä, jolloin lähes nollaenergiatason saavuttaminen on hyvin haastavaa. Muotokertoimen pientyessä rakennuksen energiatehokkuus paranee ainakin ulkovaipan johtumislämpöhäviöiden osalta. Kuviossa 1 on esitetty esimerkki muotokertoimien ja lämmitysenergiankulutuksen riippuvuuksista (Heiduk Ernst: Passive house standard).



KUVIO 1. Erimallisten rakennusten muotokertoimia (Heiduk Ernst: Passive house standard)

Toinen yleisesti käytetty muotokertoimen muoto on  $A/A$ , joka suhteuttaa ulkovaipan pinta-alan lattiapinta-alaan. Tätä muotokerrointa käytetään yleisemmin pohjoismaissa. Muotokerroin  $A/A$  vahvistaa käsitystä, että kaksikerroksinen ratkaisu olisi aina olennaisesti yksikerroksista energiatehokkaampi. Näin ei kuitenkaan todellisuudessa ole, sillä yläpohjan lämmöneristävyys on huomattavasti ulkoseinien lämmöneristävyyttä parempi. Kuviossa 2 havainnollistetaan näiden muotokertoimien eroja (Lylykangas ym. 2015, 30).



KUVIO 2. Yleisimmät muotokertoimet (Lylykangas ym. 2015, 30)

Rakennuksen asemointi vaikuttaa myös osaltaan rakennuksen energiatehokkuuteen. Kaupunkimaiseen ympäristöön rakennettaessa kaava asettaa yleensä reunaehdot rakennuksen suuntaukselle ja asemoinnille. Energiatehokkuutta mahdollisesti tukevat valinnat, kuten ympäröivän rakennuskannan ja puuston tarjoamat varjostukset, on silti hyvä huomioida kaavan sallimissa puitteissa. Eniten rakennusten asemoinnilla voidaan säästää energiansäästöpotentiaalia suunniteltaessa useamman rakennuksen kokonaisuuksia. Passiivisen aurinkoenergian hyödyn maksimoimiseksi rakennukselta edellytetään aina eteläsuuntausta. Aktiivista aurinkoenergian talteenottoa varten on varattava laitteille riittävästi tilaa vesikatolta, sekä huolehdittava niiden maksimaalisesta tuottopotentiaalista. (Sepponen ym. 2013, 16).

### 2.2.2 Pohjaratkaisu ja tilat

Järkevät tilaratkaisut luovat edellytykset hyvälle energiatehokkuudelle. Huonosti suunniteltu pohjaratkaisu lisää rakennuksen lämmitettävää tilavuutta, jonka paikkaaminen muilla suunnitteluratkaisuilla kuluttaa saavutettavaa energiansäästöä. Tehokas tilankäyttö jää usein pois energiatehokkuutta koskevista tarkasteluista, koska energiatehokkuuden arviointitapana on yleensä neliometriä kohti laskettava ominaisenergiankulutus. Rakennuksen investointi- ja elinkaarikustannuksiin tilaratkaisut vaikuttavat paljon. Tarpeeton tila lisää investointikustannuksia, ja toisaalta liian ahtaaksi suunnitellut tilat voivat jopa laskea rakennuksen markkina-arvoa.

Energiatehokkaita tilaratkaisuja suunniteltaessa Sepponen ym. (2013, 18) neuvovat kiinnittämään erityisesti huomiota tilojen lämmitystarpeeseen ylipäättään. Esimerkiksi varastotilojen lämmityksen tarpeellisuutta voidaan monessa tapauksessa kyseenalaistaa. Myös sisäiset lämpökuormat tulee huomioida tilasuunnittelussa, kuten saunan, keittiölaitteiden tai muiden lämpöä tuottavien elementtien sijoittelussa. Lämmitysvaikutuksen hyödyntämiseksi nämä tulisi sijoittaa mahdollisuuksien mukaan aina rakennuksen keskiosiin.

### **2.2.3 Ikkunat ja luonnonvalo**

Lähes nollaenergiarakennuksen ikkunoiden suunnittelussa on hyvä muistaa kohtuullisuus. Kohtuullinen ikkunapinta-ala on hyväksi energiatehokkuudelle, mutta suuret ikkunat ja lasiseinät huonontavat energiatehokkuutta huomattavasti. Ikkunoilla on myös merkittävä vaikutus sisävalaistusolosuhteisiin ja mahdollisesti myös valaistuksen energian kulutukseen. Ikkunoiden suunnittelussa tulee huomioida myös suurista ikkunapinnoista helposti aiheutuva vedontunne.

Lähes nollaenergiarakennuksen ikkunapinta-alaksi sopii yleensä noin 15–20 % kerrosalasta. Aurinkoiseen ilmansuuntaan suunnatut ikkunat lisäävät asumisviihtyvyyden lisäksi myös aurinkoenergian vaikutusta sisätiloihin eniten. Sisään tulevan passiivisen aurinkoenergian lämmityskustannuksiin aiheuttamat säästöt voidaan kuitenkin menettää kesäkauden ylikuumenemisen aiheuttamalla jäähdytystarpeella. Ikkunoiden eteläsuuntauksen hyöty pohjoisessa ilmastossa on verrattain pieni. Tätä korostaa lähes nollaenergiarakennuksen lyhyeksi muodostuva lämmityskausi, joka ajoittuu vähävaloiseen vuodenaikaan. Näin ollen myös pääosin pohjoiseen avautuvilla ikkunoilla on mahdollista saavuttaa lähes nollaenergiataso (Sepponen ym. 2013, 18–19).

Ikkunapinta-alan määrittelyssä toinen yleisesti käytettävä termi on ikkunapinta-alan osuus julkisivusta. Ympäristöministeriön tasauslaskentaoppaan (2012, 17) mukaan julkisivupinta-ala lasketaan ulkoseinien ja niissä olevien ikkunoiden sekä ovien yhteenlaskettuna pinta-alana. Kaikkien rakenneosien pinta-alat lasketaan sisämittojen mukaan. Maanvastaisia rakenteita ei lasketa mukaan julkisivupinta-alaan.

Sisätilojen luonnonvalo-olosuhteet ovat Lylykankaan ym. (2015, 33) mukaan ikkuna-aukotusta suunniteltaessa vielä lämmitystarvettakin tärkeämpi tekijä. Lähes nollaenergiarakennusta suunniteltaessa ei tule unohtaa luonnonvalon tärkeyttä ihmisen hyvinvoinnille. Luonnonvalo vaikuttaa asumisviihtyvyyden ohella myös työhyvinvointiin ja terveyteen. Niukasti aukotetun rakennuksen energiatehokkuus helposti myös kärsii sähkövoimavarojen tarpeen kasvamisesta. Näin ollen energiatehokkuuslaskelmien vastapainona on suunnitteluvaiheessa hyvä tarkastella myös sisätilojen päivänvalo-olosuhteista laskennallisesti tai simulointityökaluja hyödyntäen.

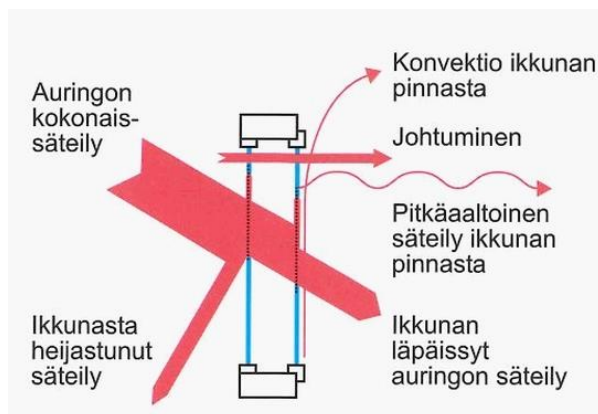
Nykyiset määräykset ottavat vähän kantaa rakennusten sisävalaistusolosuhteisiin. Määräysten ja ohjeiden puuttuessa valaistuksen energiansäästöpotentiaali jää helposti jo rakennuksen suunnitteluvaiheessa hyödyntämättä. Päivänvaloa huomioivia ohjeistuksia rakennus- ja tilasijoitteluun pitäisi Kallioharjun ja Harsian (2015, 13) mukaan lisätä. Samalla tulisi myös arvioida uudelleen ikkunoiden ja aukotuksien vaikutuksia energiatehokkuuteen.

### 3 IKKUNOIDEN JA PÄIVÄNVALON VAIKUTUS RAKENNUKSEN ENERGIATEHOKKUUTEEN

#### 3.1 Ikkunoiden vaikutus sisäympäristöön

##### 3.1.1 Ikkunat osana lämpötasetta

Ikkunat läpäisevät sekä valoa että lämpöä. Parhaidenkin ikkunoiden lämmöneristyskyky on seinärakennetta huomattavasti huonompi, joten ne aiheuttavat suuren osan rakennuksen ulkovaipan lämpöhäviöistä. Ikkunoiden läpi tunkeutuva auringon säteilyenergia on toisaalta suurin yksittäinen lämpökuorman aiheuttaja sisätiloille. Ikkunat läpäisevät myös ääntä seinärakennetta paremmin, joten ikkunoiden vaikutus sisäilman akustisiin olosuhteisiin tulee myös huomioida. Kuvio 3 havainnollistaa auringon säteilyenergian reagoitintia sen kohdatessa ikkunapinnan (Vuolle & Heinonen, 2014, 429).



KUVIO 3. Ikkunan lämpövirrat auringon paistaessa ikkunaan (Vuolle & Heinonen, 2014, 429)

Kuviosta 3 nähdään yksinkertaistettuna suojaamattoman ikkunan lämpötekniinen toiminta. Osa ikkunaan osuneesta auringon säteilystä heijastuu takaisin, osa absorboituu ikkunalaseihin ja siirtyy sisimmästä lasipinnasta huoneilmaan ja -pintoihin konvektiona sekä pitkäaaltoisena säteilynä.

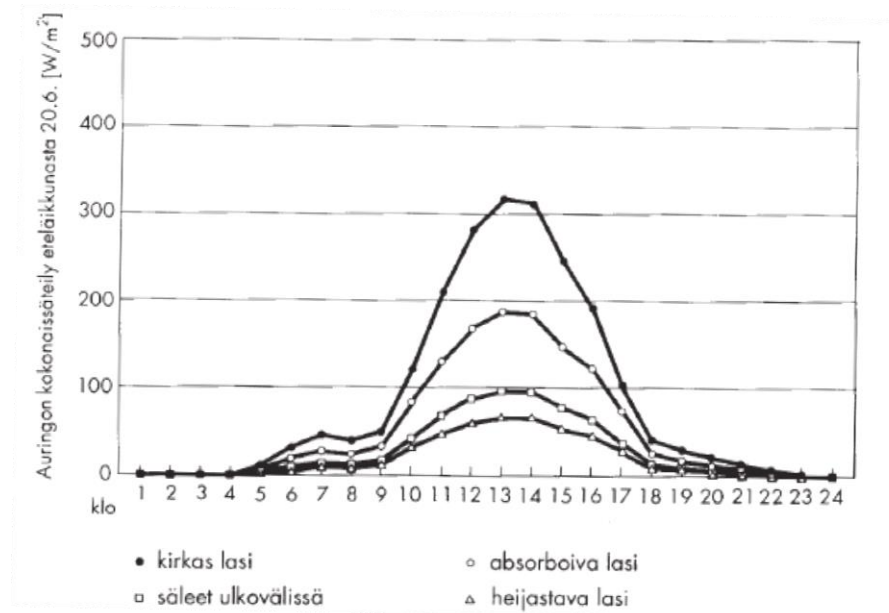
### 3.1.2 Ikkunoiden ominaisuudet

Ikkunalasitukselle on nykypäivänä lukuisia eri vaihtoehtoja. Lasitusta muuttamalla voidaan rakennuksen lämpötaseeseen vaikuttaa haluttuun suuntaan. Lasituksen säteilyenergian läpäisyyn vaikuttaa eniten lasimateriaali ja mahdollinen pinnoite. Pinnoitteilla voidaan estää säteilyenergian siirtymistä haluttuun suuntaan. Lämmöneristävyys vaikuttaa paljon myös lasien lukumäärä sekä mahdollinen kaasutäyttö eristyslasien välissä. Tässä tarkoituksessa hyödynnetään ilmaa hidaslukkeisempia kaasuja, kuten argonia tai kryptonaa (Motiva, 2016). Kolme tärkeintä suuretta eri lasien ja lasiyhdistelmien arvioinnissa ovat seuraavat:

- U-arvo eli lämmönläpäisykerroin ( $W/m^2K$ ) ilmaisee ikkunan läpäisevää lämpöenergiaa
- Auringon energiasäteilyn kokonaisläpäisykerroin, G-arvo, kuvaa ikkunalasin lävitseen lämpönä päästämää auringon säteilyenergiaa ikkunan kohtaavasta kokonaisläpäisystä
- Valonläpäisykerroin  $T_v$  tai  $\tau$  ilmaisee ikkunan läpäisevän valon osuutta

Yleisimmin näistä käsitteistä ovat käytössä U- ja G -arvot, jotka määrittävät suurimmalta osin ikkunan energiatehokkuuden. Valonläpäisykerrointa  $T_v$  käytetään tilanteissa, joissa tutkitaan ikkunoiden vaikutusta sisävalaistusolosuhteisiin. Tässä työssä käytettävä IDA-ICE -ohjelma määrittää lasirakenteen valonläpäisyn kahden eri kertoimen perusteella. Nämä ovat auringon suoraläpäisykerroin  $T_v$  sekä lyhytaaltoisen näkyvän säteilyn kerroin  $T_{näk}$ .

Kuviossa 4 on esitetty erilaisten lasimateriaalien vaikutusta ikkunapinnan maksimisäteilykuormaan etelään päin avautuvassa huoneessa kirkkaana kesäpäivänä (LVI 73-40016, 2).



KUVIO. 4 Auringon kokonaissäteilyteho eteläikkunasta huonetilaan erilaisilla lasivaihtoehdoilla kesäkuun 20. päivänä (LVI 73-40016, 2)

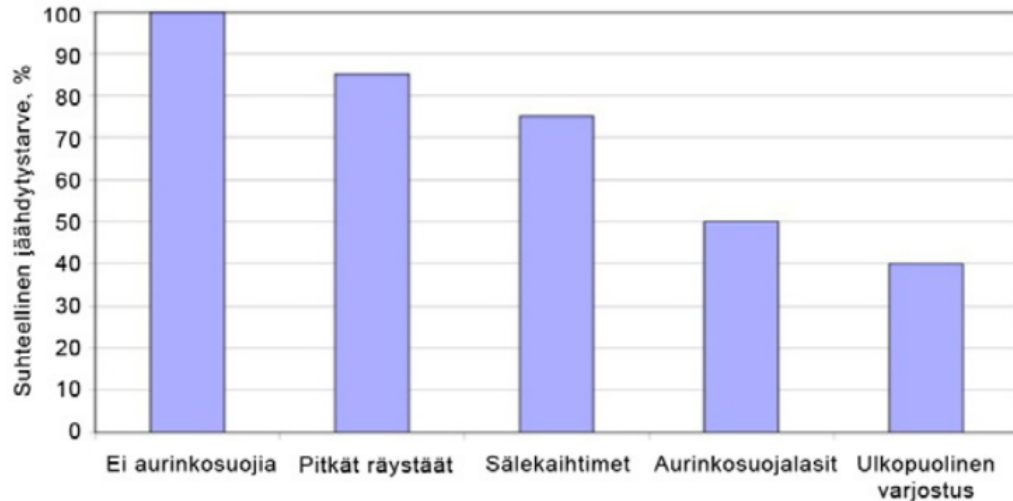
Kuviosta 4 voidaan todeta lasituksen vaikuttavan ikkunan aiheuttamaan lämpökuormaan hyvin merkittävästi. Heijastavalla lasilla huonetilaan vaikuttava auringon säteilyteho pienenee noin. 80 % verrattuna kirkaaseen lasiin.

### 3.2 Aurinkosuojaus

Auringosta saatava lämpöenergia muuttuu voimakkaasti vuodenaikojen mukaan. Tiettyyn pisteeseen asti auringonpaiste suoraan tilaan on miellyttävää, mutta pian tilan ylikuumentamisen seurauksena se koetaan epämiellyttäväksi. Kiristyvien energiatehokkuusmääräysten takia passiiviset jäähdytyskeinot astuvat yhä tärkeämpään osaan. LVI-ohjekortin 50-10910 (2007, 1) mukaan asuntojen lämpötilojen hallinnalla on myös kansanterveydellinen merkitys, joka korostuu hellepäivien määrän lisääntyessä. Lisäksi korkeista huonelämpötiloista aiheutuvat tuulettamisen tarpeen väheneminen laskee ihmisen altistumista ulkoilman pienhiukkasille.

Suomessa koneellisen viilennyksen tarve on useimmissa rakennustyypeissä mahdollista välttää passiivisilla viilennysratkaisuilla. Yleisimpiä passiivisia viilennysratkaisuja ovat esimerkiksi sälekaihtimet, auringonsuojalasit sekä kiinteät varjostavat rakenteet. Kuvio 5 esittää passiivisten viilennyskeinojen suhteellista vaikutusta rakennuksen viilennystarpeeseen (Sepponen ym. 2013, 19)

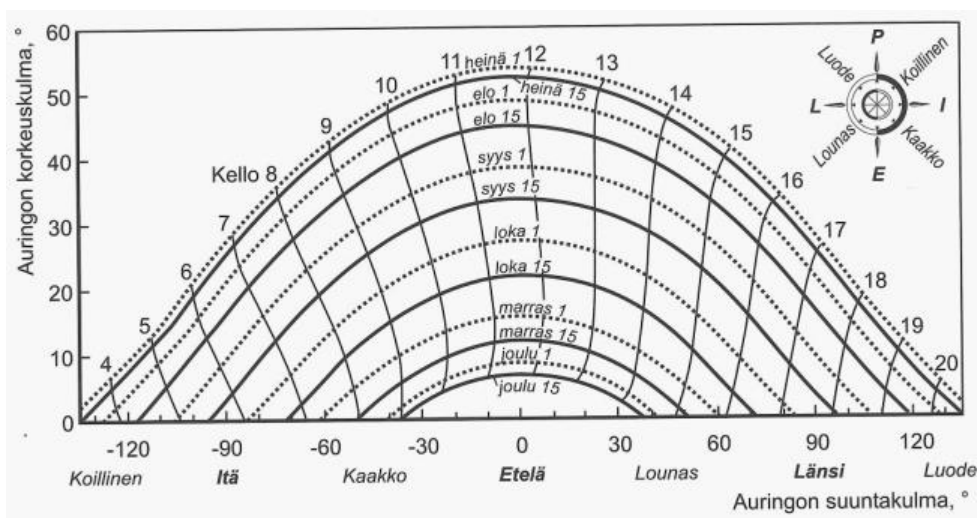




KUVIO 5. Ikkunasuojaratkaisujen vaikutukset viilennystarpeeseen (Sepponen ym. 2013, 20)

Kuvion 5 mukaan tehokkain tapa jäähdytystarpeen pienentämiseksi on ulkopuolinen varjostus. Ulkopuolinen varjostus voidaan toteuttaa useilla erilaisilla auringonsuojaratkaisuilla, joista kerrotaan edempänä.

Aurinkosuojauksen suunnittelussa tulee ensisijaisesti huomioida auringon osumakulma ikkunaan, joka riippuu auringon säteilyn korkeuskulmasta ikkunaan nähden. Osumakulma vaihtelee vuoden- ja kellonaikojen mukaan. Osumakulmaa havainnollistaa kuvio 6 (Vuolle & Heinonen, 2014, 429).



KUVIO 6. Auringon asema eri vuorokauden- ja vuodenaikoina Helsingissä (Vuolle & Heinonen, 2014, 436)

Kuviossa 6 auringon korkeuskulma on esitetty eri vuorokauden- ja vuodenaikoina. Korkeuskulma tarkoittaa vaakasuoran pinnan ja auringonsäteilyn osumakulmaa. Korkeuskulman nähdään Helsingissä olevan suurimmillaan heinäkuun alussa keskipäivällä.

Aurinkosuojausratkaisun valinnassa ensimmäiseksi on tehtävä valinta ulko- tai sisäpuolelle sijoitettavasta ratkaisusta. Ulkopuolisella suojauksella saavutetaan yleensä parempi yllilämmöltä suojaava vaikutus. Sisäpuolisella suojauksella sisävalaistusolosuhteiden huomioiminen sekä häikäisyn ehkäiseminen onnistuvat ulkopuolisia suojauksia paremmin. Integroidun suojauksen käyttäminen edellyttää kaksoislasitusta, joita lasijulkisivut eivät useissa tapauksissa ole. Arkkitehdit ja käyttäjät valitsevat aurinkosuojaustyypin yleensä ulkonäköön ja käyttöön sekä muihin tunneperäisiin valintamotiiveihin perustuen. Energiatehokkainta ratkaisua haettaessa tulisi kiinnittää huomiota aurinkosuojaratkaisun optimaalisen toiminnan varmistamiseksi myös muihin seikkoihin, kuten suuntaukseen ja rakennuksen yksityiskohtiin (Beck ym. 2011, 39). Yleisimpiä ulko- ja sisäpuolisia aurinkosuojausratkaisuja on esitetty kuvioissa 7 ja 8 (Aurinkosuojaus, 2017).



KUVIO 7. Ulkopuoliset aurinkosuojaratkaisut (Aurinkosuojaus, 2017)



KUVIO 8. Sisäpuoliset aurinkosuojaratkaisut (Aurinkosuojaus, 2017)

Päivänvalon tehokas hyödyntäminen edellyttää Beckin ym. (2011, 13) mukaan tarpeenmukaista aurinkosuojausten säätöä, yhdistettynä päivänvalon mukaan ohjautuvaan valaistukseen. Aurinkosuojausten avulla voidaan vaikuttaa suoraan huoneeseen saapuvaan sekä hajaantuvaan auringonsäteilyn määrään. Kesällä suoran auringonvalon valaistusvoimakkuus esimerkiksi toimistotiloissa voi olla tarvittavaan tasoon nähden jopa 100-kertainen.

### 3.3 Päivänvalon hyödyntäminen valaistuksessa ja sen ohjaamisessa

Kallioharjun ja Harsian (2015, 6) mukaan valo on rakennuksen käyttäjille tärkein sisäolosuhde. Valaistus on lisäksi yksi merkittävimmistä rakennusten yksittäisistä sähköenergiankuluttajista. Lähes nollaenergiarakentamisen aikana päivänvalon hyödyntäminen ja valaistuksen järkevä ohjaaminen kasvavat yhä tärkeämpään osaan sekä rakennuksen että sen käyttäjien näkökulmasta. Tällä hetkellä valaistuksen energialaskenta tehdään suunnittelun alkumetreillä perustuen kiinteisiin valaistuksen keskitehoihin, käyttötunteihin sekä käyttöasteisiin perustuen. Tämä johtaa siihen, että valaistuksen ohjauksen parannuksilla ei saada parannuksia laskennalliseen valaistusenergian kulutukseen.

Suurimmillaan valaistuksen ollessa erityisen tärkeässä osassa rakennuksen toimintaa, sen osuus voi olla jopa yli 50 % rakennuksen kokonaissähköenergiankulutuksesta. Normaalisti asuinrakennuksissa valaistusenergian osuus on noin 10–20 % ja palvelura-

kennuksissa 20–40 % kokonaisenergiankulutuksista. Potentiaali energiansäästöön on huolimatta pienentyneistä valaisintehoista suuri. Tekniikan lisäksi tarvitaan valaistusolosuhteet huomioivia ratkaisuja rakennuksen muodon, suuntauksen, pintamateriaalien ja tilojen sijoittelun osilta. (Kallioharju & Harsia 2015, 7)

Paras energiatehokkuus valaistukselle saavutetaan käyttämällä valoa oikeassa paikassa oikeaan aikaan. Päivänvalon mukaan säätyvästä valaistuksesta puhuttaessa käytetään termiä vakiovalo-ohjaus. Kallioharjun ja Harsian (2015, 15) mukaan energiatehokkaimmissa valaistuksenohjausratkaisuissa valaistuksen sekä aurinkosuojauksen ohjaukset toimivat yhdessä. Aurinkosuojauksen ohjauksella saadaan hyödynnettyä päiväaikaan päivänvaloa ilman häiritsevää häikäisyä sekä estettyä pimeällä valon karkaaminen rakennuksen ulkopuolelle. Mikäli rakennuksen verhot tai sälekaihtimet ovat ohjattavissa käsin, tulisi kiinnittää huomiota myös käyttäjäkunnan käytönopastukseen. Vakiovalo-ohjauksella saavutettavat energiansäästöt kumoutuvat helposti, mikäli sälekaihtimia tai muita verhoja pidetään kiinni väärään aikaan.

Käsiteltäessä päivänvalon vaikutusta sisävalaistusolosuhteisiin käytetään terminä päivänvalokerrointa eli päivänvalosuhdetta. Päivänvalokerroin ilmaisee luonnonvalon ja keinovalon suhdetta sisätiloissa, huomioimatta suoraa auringonvaloa. Lylykankaan ym. (2015, 35) mukaan huoneiden, joissa päivänvalokerroin on alle 2 %, valaistusolosuhteet koetaan usein synkiksi ja niissä tarvitaan ehdottomasti keinovalaistusta. Päivänvalokerroimen ylittäessä 6 %, tilaan aiheutuu helposti jäähdytystarvetta. Suomalaista ohjeistusta päivänvalon huomioimisesta arkkitehtisuunnittelussa on saatavilla huonosti. Hanna Vikbergin (2014, 45) mukaan Suomessa voisi suositeltava minimiarvo päivänvalokerroimelle olla monissa ulkomaisissa määräyksissä ja ohjeissa esitettyä 2 % suurempi. Sopivaksi päivänvalokertoimeksi Suomeen Vikberg esittää 4,5 %.

## 4 TUTKIMUSMENETELMIEN JA TARKASTELUKOHTTEIDEN ESITTELY

### 4.1 Dynaaminen simulointi

#### 4.1.1 IDA-ICE yleisesti

Tässä työssä rakennusmallien dynaaminen simulointi toteutetaan IDA Indoor Climate and Energy – simulointiohjelmalla. Ohjelma on ruotsalaisen Equa Simulations AB:n kehittämä, ja siitä käytetään yleisesti lyhyempää nimitystä IDA-ICE. Ohjelmalla voidaan tutkia rakennuksen lämpötasetta sekä koko rakennuksen järjestelmäkohtaista energiankulutusta. Lämmitys-, jäähdytys- sekä valaistusjärjestelmille voidaan luoda jokaiselle järjestelmälle ominaiset säätöasetukset. Myös sisäilman laatuun liittyviä simulointeja voidaan toteuttaa IDA-ICE:a käyttäen. Rakennuksen sijainnin vaikutus rakennuksen lämpötaseeseen huomioidaan ohjelmassa paikkakuntaakohtaisella säädatalla. Säädata huomioi lämpöolot, ilmankosteuden sekä auringon sijainnin ja liikkeen. Tässä työssä käytetään Helsingin säädataa.

IDA-ICE simuloi rakennuksen toimintaa vyöhykkeittäin. Tässä tapauksessa käytetään Tampereen teknillisen yliopiston arkkitehtityöryhmän suunnittelemaa palvelurakennuksen Tyyppimalli I:tä. Tyyppimalli on suunniteltu ArchiCAD-ohjelmistolla ja käännetty IFC -muotoon. IDA-ICE:lla voidaan käsitellä IFC-malleja, jolloin myös IFC –mallin sisältämät huonekohtaiset vyöhykkeet saadaan suoraan muutettua IDA-ICE –vyöhykkeiksi.

#### 4.1.2 Rakenteiden ja kuormien määrittely IDA-ICE:ssa

Kun IFC-mallin vyöhykkeet on muutettu IDA-ICE -vyöhykkeiksi, on seuraavaksi määritettävä rakennuksen rakenteiden ominaisuudet, kuten lämmönläpäisykerroimet, kylmäsiltojen konduktanssit sekä rakennusvaipan ilmanvuotoluku. Rakenteille ja kylmäsiltoille määritettiin tässä tapauksessa Suomen rakennusmääräyskokoelman osien D3 ja C3 mukaiset vertailuarvot. Alapohja määritettiin maanvastaiseksi. IDA-ICE ottaa olosuhteiden simuloinnissa huomioon ulkovaipan U-arvojen lisäksi myös materiaalitekniset ominaisuudet kuten lämmönjohtavuuden, tiheyden sekä ominaislämpökapasiteetin. Tässä työssä ulkoseinärakenteena on käytetty mineraalivillalla eristettyä betoniseinää

(liite 1). Ulkoseinät koostuvat kahdesta 0,1 m paksuisesta betonikerroksesta, joiden välissä on 0,225 m paksuinen mineraalivilloitus. Myös ylä- ja alapohjat on määritetty betonirakenteisiksi.

IDA-ICE huomioi myös rakennusten sisäiset lämpökuormat, kuten kuluttajalaitteet, henkilökuormat ja valaistuskuormat. Tässä työssä käytetään RakMK D3:n mukaisia majoitusliikerakennuksen lämpökuormia ja standardikäyttöaikataulua, jotka ovat kokonaisuudessaan esitettynä taulukossa 1 (RakMK D3, 2012, 19).

TAULUKKO 1. Rakennuksen standardikäyttö ja sisäiset lämpökuormat (RakMK D3, 2012, 19)

Käyttötarkoitukseluokka	Kellonaika <sup>d</sup>	Käyttöaika		Käyttöaste	Valaistus W/m <sup>2</sup>	Kuluttajalaitteet W/m <sup>2</sup>	Ihmiset <sup>a</sup> W/m <sup>2</sup>
		h/24h	d/7d				
Erillinen pientalo sekä rivi- ja ketjutalo	00:00-24:00	24	7	0,6	8 <sup>b,c</sup>	3	2
Asuinkerrostalo	00:00-24:00	24	7	0,6	11 <sup>b,c</sup>	4	3
Toimistorakennus	07:00-18:00	11	5	0,65	12 <sup>c</sup>	12	5
Liikerakennus	08:00-21:00	13	6	1	19 <sup>c</sup>	1	2
Majoitusliikerakennus	00:00-24:00	24	7	0,3	14 <sup>c</sup>	4	4
Opetusrakennus ja päiväkot	08:00-16:00	8	5	0,6	18 <sup>c</sup>	8	14
Liikuntahalli	08:00-22:00	14	7	0,5	12 <sup>c</sup>	0	5
Sairaala	00:00-24:00	24	7	0,6	9 <sup>c</sup>	9	8

a ei sisällä kosteuteen sitoutunutta lämpöä, kokonaislämmönluovutus saadaan jakamalla kertoimella 0,6

b asuinrakennusten valaistuksen käyttöaste on 0,1

c ohjearvo uudisrakennuksille ellei tarkempaa tietoa ole käytettävissä, pienempää valaistuksen tehoa voi käyttää, mikäli valaistustaso säilyy ja siitä esitetään erillisselvitys kohtien 3.3.3 ja 3.3.4 mukaisesti.

d ilmanvaihdon käyntiaika kohdan 3.3.7 mukaisesti

Tilojen ilmanvaihto voidaan IDA-ICE:ssa määrittää vyöhykekohtaisesti. Tässä tapauksessa kaikille vyöhykkeille määritettiin RakMK D3:ssa majoitusliikerakennuksille määrätty ilmavirta 2 l/(sm<sup>2</sup>) (taulukko 2, RakMK D3, 2012,19). IDA-ICE simuloi myös ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenottoyksikön toimintaa. LTO:lle tulee määrittää lämpötilahyötysuhde sekä jäteilman minimilämpötila. Lämmöntalteenoton lämpötilasuhteeksi määritettiin tämän työn simulointitapauksissa 45 % ja jäteilman minimilämpötilaksi 5 °C.

TAULUKKO 2. Huonelämpötilan asetusarvot ja käyttöajan ilmanvaihtomäärät lämmitettyä nettoalaa kohden ((RakMK D3, 2012, 18)

Käyttötarkoitusluokka	Ulkoilmavirta dm <sup>3</sup> /(s m <sup>2</sup> )	Lämmitysraja °C	Jäähdytysraja °C
Erillinen pientalo sekä rivi- ja ketjutalo	0,4	21	27
Asuinkerrostalo	0,5	21	27
Toimistorakennus	2	21	25
Liikerakennus	2	18	25
Majoitusliikerakennus	2	21	25
Opetusrakennus ja päiväkot	3	21	25
Liikuntahalli	2	18	25
Sairaala	4	22	25

IDA-ICE huomioi myös rakennuksen ulkovaipan ilmanpitävyyden. Ohjelmassa tiiveys voidaan määrittää usean eri ilmanpitävyyttä ilmaisevan yksikön perusteella. Tässä tapauksessa ulkovaipan tiiveys määritettiin vakiovuotoilmavirran mukaan. Vuotoilmavirraksi asetettiin  $0,114 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ .

#### 4.1.3 Lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien asetukset IDA-ICE:ssa

Vyöhykkeiden tavoitelämpötilana käytetään lämmityskaudella  $21 \text{ °C}$  ja jäähdytyskaudella  $25 \text{ °C}$ , jotka ovat RakMK D3:n mukaiset asetusarvot majoitusliikerakennuksille (taulukko 2). Osassa laskentatapauksia jäähdytystarpeen kasvattamiseksi asetettiin jäähdytysrajaksi myös  $23 \text{ °C}$ . IDA-ICE:ssa tilojen lämmitys ja jäähdytys voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Tämän työn simulointitapauksessa lämmitys toteutetaan käyttäen ideaalisia lämmitys- ja jäähdytyslaitteita, jotka toimivat tilalle asetettujen asetusarvojen saavuttamiseen vaadittavalla teholla. Ideaalisista laitteista voidaan säätää maksimitehoa ja luovutuksen hyötysuhdetta. Tässä tapauksessa luovutuksen hyötysuhteeksi asetettiin 1,0 ja maksimitehot asetettiin tasoille, joilla lämmitys- ja jäähdytysenergiantarpeet varmasti täyttyvät.

IV-jäähdytys jäähdyttää IDA-ICE -simuloinnissa tiloja jatkuvasti jäähdyttämällä tiloihin virtaavan tuloilman  $18 \text{ °C}$  lämpötilaan. Tämän seurauksena tilojen todellisen jäähdytystarpeen kuvaaminen onnistuu paremmin sulkemalla IV-jäähdytyksen vaikutus kokonaan pois. Tämä tapahtuu IDA-ICE:ssä muuttamalla ilmanvaihtokoneen asetuksista jäähdytyspatterin hyötysuhde nolllaksi. Muutamista laskentatapauksista on toteutettu simulointi myös IV-jäähdytyksen ollessa kytkettynä päälle.

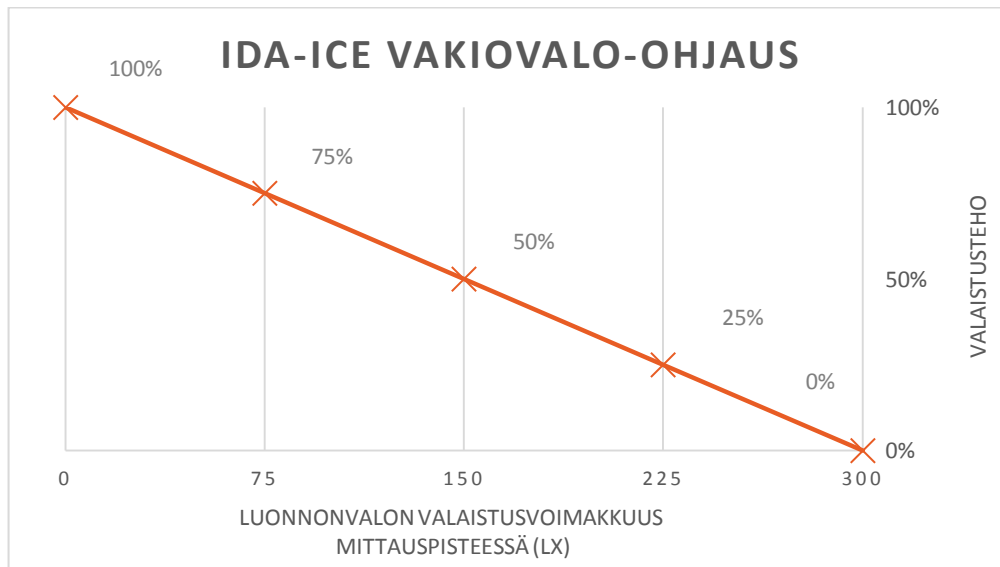
IDA-ICE:ssa määritetään lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien tuotannoille vuotuiset hyötysuhteet. Tässä työssä on käytetty lämmityksen tuotannon hyötysuhteena 0,97 ja jäähdytyksen vastaavana 3. Käsiteltäessä ostoenergiankulutusta, tarkoitetaan näin ollen tällä kertoimella painotettua energiankulutusta.

#### **4.1.4 Valaistuksen ja aurinkosuojauksen ohjaus IDA-ICE:ssa**

Valaistus sekä osa aurinkosuojauksista voidaan IDA-ICE:ssa kytkeä toimimaan aikataulupohjaisesti. Aikataulu perustuu tällöin RakMK D3:n standardikäyttöaikatauluun (taulukko 1), joka määrittää majoitusliikerakennuksen käyttöaikatauluksi 24 h/d, sekä käyttöasteeksi 0,3. Myös valaistusteho on IDA-ICE:ssa määritetty majoitusliikerakennuksen määräystasolle 14 W/m<sup>2</sup> (taulukko 1).

IDA-ICE simuloi päivänvalon vaikutusta sisätilojen valaistusolosuhteisiin vyöhykekohtaisesti. Ohjelma mittaa päivänvaloa tilaan asetetun henkilömittauspisteen kohdalla (liite 2). Mittauspiste on sijoitettu jokaisen vyöhykkeen lattiaobjektiin. Ohjelma asettaa pisteen automaattisesti huoneen keskelle. Tässä työssä mittauspisteet siirrettiin jokaisen huonetilan kuvitellun työtason kohdalle. Korkeudeksi mittauspisteille asetettiin 0,8 m. Mikäli vakiovalo-ohjaus on kytketty vyöhykkeen asetusarvoista päälle, valaistustehon ohjaus tapahtuu vyöhykkeen mittauspisteestä mitatun päivänvalon valaistusvoimakkuuden mukaan. Kuvio 9 havainnollistaa valaistustehon muutosta mittauspisteestä mitatun päivänvalon valaistusvoimakkuuden funktiona.





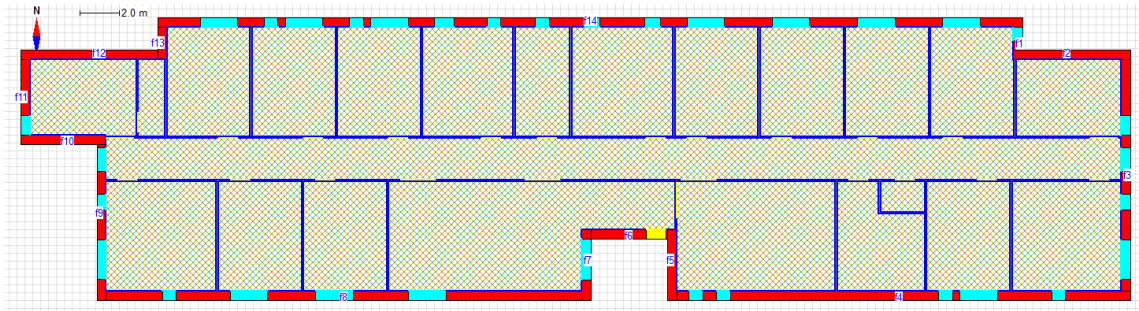
KUVIO 9. Vakiovalo-ohjaus IDA-ICE:ssa

Kuviosta 9 nähdään valaistuksen säätävän lineaarisesti mittauspisteelle asetettujen valaistusvoimakkuuden raja-arvojen mukaan. Tässä työssä vakiovalo-ohjauksen sisältävissä simuloinneissa on käytetty raja-arvoina kuvion 9 mukaisesti 0-300 lx:n valaistusvoimakkuuksia.

Aurinkosuojauksia ja sälekaihtimia mallinnettaessa IDA-ICE:ssa tulee huomioida ovatko suojaukset säädettävissä. Säädettävien aurinkosuojaverhojen ja sälekaihtimien tapauksessa ohjaustapa tulee määrittää joko auringonsäteilyn tai aikataulun mukaisesti tapahtuvaksi. Ohjauksen ollessa ”valaistus” –muodossa, ohjaa IDA-ICE oletusasetuksillaan verhot kiinni ikkunapinnan kohtaaman auringon säteilytehon ollessa 100 W/m<sup>2</sup>. Tämä asetus on muutettavissa järjestelmäparametrit –välilehdellä. Tässä työssä on käytetty sulkemiseen vaadittavana säteilyteho 100 W/m<sup>2</sup>.

## 4.2 Tarkastelukohteen esittely

Tyypimalli I on Tampereen teknillisen yliopiston asuntosuunnittelun työryhmän suunnittelema palvelurakennusmalli. Malli on toteutettu yhdistelemällä suomalaisissa palvelurakennuksissa yleisimmin esiintyviä tiloja yhdeksi kokonaisuudeksi. Malli on koottu yksinkertaiseen suorakaiteen muotoon. Tyypimalli I:n pohjapiirustus on esitetty kuvassa 2.



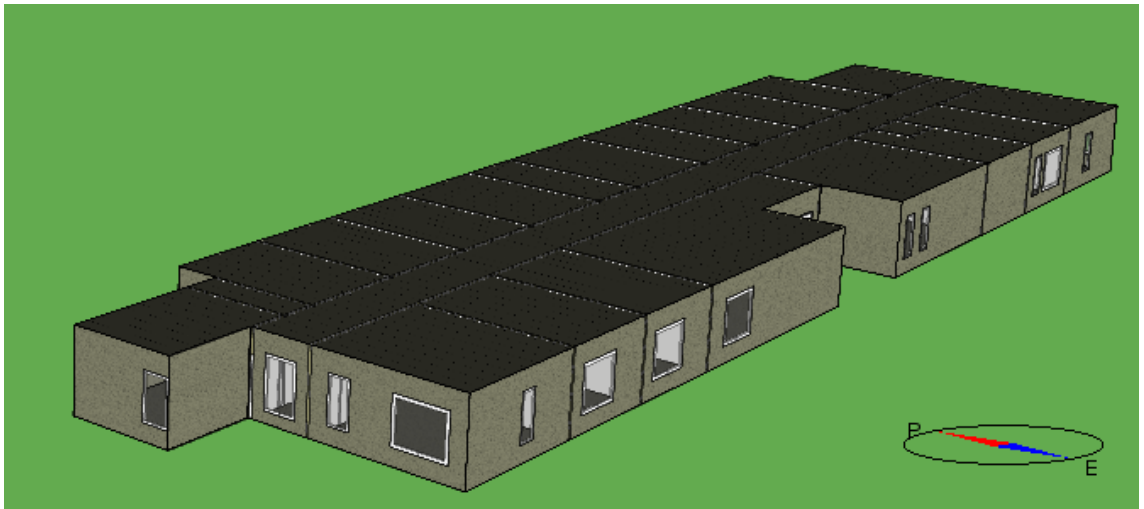
KUVA 2. Tyyppimalli I:n pohjapiirustus IDA-ICE:ssa

Tyyppimalli I koostuu 23:sta eri vyöhykkeestä. IDA-ICE:ssa malli on ominaisuuksiltaan asetettu kappaleessa 4.1 esitettyihin asetusarvoihin. Rakennusmallin valaistusenergian vuosikulutus on ohjauksen toimiessa aikataulupohjaisena 24960 kWh. Tyyppimalli I:n ikkunat ovat korkeudeltaan 1,6 m, ja alareunat 0,6 m korkeudella. Ikkunakarmien osuudeksi ikkunapinta-alasta on määritetty 0,25. Ohjelma simuloi tällöin ikkunakarmien peittävän aina neljäsosan ikkunapinta-alasta. Taulukossa 3 on esitetty tutkimuksen kannalta olennaisimpia tietoja Tyyppimalli I:sta.

TAULUKKO 3. Tyyppimalli I perustiedot

Tilavuus	1970m <sup>3</sup>
Kerrosala	677 m <sup>2</sup>
Ulkovaipan ala	1738 m <sup>2</sup>
Muotokerroin A/V	0,88
Muotokerroin A/A	2,56
Julkisivuala	422 m <sup>2</sup>
Ikkunapinta-ala (vakiotapaus)	70 m <sup>2</sup>
- julkisivualasta	16,5 %
- kerrosalasta	10,3 %

Kuvissa 1 ja 2 on esitetty Tyyppimalli I kolmiulotteisena IDA-ICE:ssa. Kuvassa 3 rakennusmalli on esitetty eteläsuunnasta ja kuvassa 4 pohjoissuunnasta.



KUVA 3. Tyyppimalli I IDA-ICE:ssa eteläsuunnasta



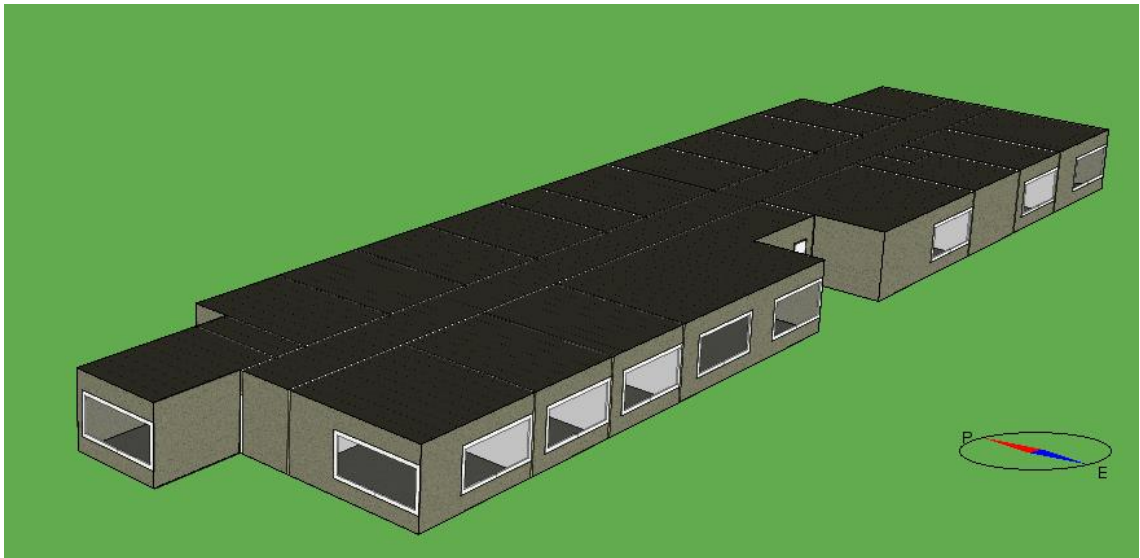
KUVA 4. Tyyppimalli I IDA-ICE:ssa pohjoissuunnasta

## 5 LASKENTATAPAUSTEN ESITTELY

### 5.1 Ikkunapinta-alan vaikutus kokonaisostoenergiankulutukseen

#### 5.1.1 Ikkunoiden koko, perustapaus

Ikkunoiden kokoa kasvatettiin rakennusmallissa portaittain. Simulointi aloitettiin tapauksessa 0,1 m levyisistä ikkunoista. Ikkunoiden leveyttä kasvatettiin 3,6 m saakka. Ikkunapinta-alan osuus rakennusmallin julkisivusta vaihtelee näin ollen välillä 1-30 %. Ikkunoiden korkeus sekä ikkunoiden alareunojen korkeudet säilytettiin alkuperäisillä tasoillaan. Ikkunoiden sijaintia muutettiin sijoittamalla ikkunat vyöhykkeen edestä katsottaessa ulkoseinän oikeaan reunaan, koska IDA-ICE kasvattaa ikkunaa aina edestä katsottuna oikealta vasemmalle. Kuvassa 5 on esitetty Tyyppimalli I ikkunoiden ollessa suurimmillaan, rakennuksen eteläsuunnasta katsottuna.



KUVA 5. Tyyppimalli I, ikkunapinta-ala suurimmillaan

Ensimmäiseksi ikkunapinta-alan kasvamisen vaikutusta tutkittiin yhteenlaskettuun lämmityksen, jäähdytyksen ja valaistuksen ostoenergian vuosikulutukseen (kuvio 10). Tapauksesta on esitetty kokonaisostoenergiankulutukset IV-jäähdytyksen ollessa sekä päälle että pois kytkettynä. IV-jäähdytyksen ollessa poistettuna käytöstä, tilojen jäähdytys toteutuu todellisen jäähdytystarpeen mukaisesti huonelaitteella. Mallissa ei tapauksessa ole sälekaihtimia. Jäähdytysrajaksi laskentatapauksessa on asetettu 25 °C.

Energiatehokkuuden kannalta optimaalisimman ikkunakoon lähialuetta tarkasteltiin erikseen (kuvio 11). Tästä alueesta on esitetty erikseen sekä lämmitys- että jäähdytysenergiankulutuksen käyttäytyminen. Tulokset on esitetty simuloinnista, jossa IV-jäähdytys on kytkettynä päälle.

### **5.1.2 Vakiovalo-ohjaus**

Ikkunakoon kasvattamisen vaikutusta ostoenergiankulutukseen tutkittiin hyödyntämällä IDA-ICE:n vakiovalo-ohjausta (kuvio 12). Tapauksessa ikkunapinta-ala kasvaa kappaleessa 5.1.1 selitetyllä tavalla. Vakiovalo-ohjauksen ollessa kytkettynä päälle, IDA-ICE säättää valaistustehoa päivänvalon vaikutuksesta kappaleessa 4.1.4 esitetyllä tavalla. Samalla esitetään myös vyöhykkeiden keskimääräisen päivänvalokertoimen kehittymisen ikkunakoon kasvaessa. Koska IDA-ICE mittaa päivänvalokerrointa jokaiseen vyöhykkeeseen asetetusta henkilömittauspisteestä, päivänvalokerroin on esitetty kaikkien vyöhykkeiden laskentatulosten keskiarvona. IV-jäähdytys on tässä laskentatapauksessa kytketty pois. Kuvaajassa on esitettyä vertailun helpottamiseksi myös aikataulupohjaisella valaistuksella simuloidut energiankulutukset.

### **5.1.3 Integroitu aurinkosuojaus**

Tässä laskentatapauksessa (kuvio 13) Tyypimalli I:n ikkunoihin lisättiin integroidut sälekaihtimet. Sälekaihtimet asetettiin säätymään ikkunapinnan kohtaaman auringon säteilytehon mukaisesti, kappaleessa 4.1.3 kerrotulla tavalla. Ikkunakokoa kasvatettiin edellisissä kappaleissa esitetyllä tavalla. Ohjaustavan muutoksen vaikutuksen korostamiseksi tapauksesta simuloidaan sekä vakiovalo-ohjauksella että kiinteällä valaistusteholla toimivat järjestelmät. IV-jäähdytys on kytketty molemmissa tapauksissa pois päältä.

### **5.1.4 Ulkopuolinen aurinkosuojaus**

Ikkunakoon vaikutusta ostoenergiankulutukseen tutkittiin myös varustaen ikkunat ulkopuolisilla varsimarkiiseilla (kuvio 14). Varsimarkiisit voidaan IDA-ICE:ssa asettaa haluttuun kulmaan seinäpintaan nähden. Tässä tapauksessa kulmaksi asetettiin 90 ° avautumiskulma seinään nähden (liite 4). Ulkopuolisen aurinkosuojausvaikutusta haluttiin tutkia myös rakennusmallin sisäpuolisiin valaistusolosuhteisiin. Tapaus simuloitiin

tästä syystä sekä vakiovalo-ohjauksella että ilman. Jäähdytys on tapauksessa toteutettu tilakohtaisesti.

## 5.2 Lasirakenne

Ikkunalasituksen vaikutusta Tyypimalli I:n energiankulutukseen tutkittiin muuttamalla ikkunoiden lasituksia erityyppisiksi. Lasirakenteiksi valittiin IDA-ICE:n kirjastosta 5 erilaista lasiyhdistelmää. Jotta johtumislämpöhäviön osuus lasirakenteen muuttuessa jäisi mahdollisimman pieneksi, kaikkien lasitusten U-arvoksi on muutettu 1,0 W/(m<sup>2</sup>K). Ikkunakarmien osuutena ikkunapinta-alasta säilytettiin kaikilla lasituksilla 25 %. Lasirakenteet sekä niiden tarkemmat tiedot on esitetty taulukossa 4.

TAULUKKO 4. Lasirakenteet

Malli	G	T
Pilkington Suncool 30/17 (6C(30)-15Ar-4-15Ar-S(3)(4))	0,19	0,16
Pilkington Arctic Blue (6ab-15Ar-S(3)6)	0,33	0,26
RakMK D3 2012 Ikkuna	0,55	0,44
Pilkington Optifloat Clear (4-15-4-12-4)	0,68	0,6
Pilkington Optifloat Clear (4-15-4)	0,76	0,7

Lasirakenteen muuttumisen vaikutusta kokonaisostoenergiankulutukseen tutkittiin kasvattamalla ikkunapinta-alaa edellisten laskentatapausten tapaan. Simuloinnit eri lasirakenteilla toteutettiin sekä aikataulu- (kuvio 15) että vakiovalo-ohjatuilla (kuvio 16) valaistuksilla. IV-jäähdytys on kytketty molemmissa lasirakennetta käsittelevissä laskentatapauksissa pois päältä.

## 5.3 Rakennuksen suuntaus

Rakennuksen suuntauksen vaikutusta Tyypimalli I:n kokonaisenergiankulutukseen tutkittiin kääntämällä rakennusta 90 ° (kuvio 17). Kääntämisen jälkeen mallin alkuperäinen eteläjulkisivu avautuu länteen päin. Mallin ikkunapinta-alat etelä- ja pohjoissivuilla ovat hyvin lähellä toisiaan, joten tulokset 180 ° kääntämisellä voidaan olettaa merkityksettömän pieniksi. Kokonaisostoenergiankulutukset on esitetty IV-

jäähdytyksellä sekä tilakohtaisella jäähdytyksellä. Tapauksessa valaistus on kytketty aikatauluohjaukselle.

#### 5.4 Valaistuksen ja aurinkosuojauksien ohjausten vertailu

Aurinkosuojauksen ja valaistuksen ohjaustapojen vaikutusta tutkittiin valaistus- ja jäähdytysenergiankulutuksen kannalta. Näissä tapauksissa rakennusmallia tutkittiin vakio-koon ikkunoilla. Tutkittaviksi aurinkosuojausratkaisuiksi valittiin ulkopuoliset varsimarkiisit, sisäpuoliset puoliläpäisevät aurinkosuojaverhot sekä integroidut sälekaihtimet. IV-jäähdytys on kytketty pois kaikissa tämän kappaleen laskentatapauksissa, joten tilat jäähdytetään tilakohtaisesti. Lisäksi jäähdytysrajaksi on asetettu 23 °C.

Sisäpuolisten puoliläpäisevien verhojen ja sälekaihtimien vaikutusta valaistus- ja jäähdytysenergiankulutuksiin simuloitiin muuttamalla valaistuksen sekä verhojen ohjaustapaa (kuvio 18). Lisäksi molemmilla ratkaisuilla simuloitiin tilanne suojauksen ollessa suljettuna. Puoliläpäisevistä verhoista voidaan IDA-ICE:ssa muuttaa kankaan ominaisuuksia eri läpäisykertoimien saavuttamiseksi. Verhojen asetukset on esitetty liitteessä 3.

Varsimarkiiseille ei IDA-ICE:ssa ole verhojen ja sälekaihtimien tapaan auringonvalon mukaisesti tapahtuvaa automaattista ohjausta. Varsimarkiisisuojauksen vaikutusta valaistus- ja jäähdytysenergiankulutuksiin tutkitaan siis ainoastaan muuttamalla valaistuksen ohjausta aikatauluun ja vakiovaloon perustuvaksi (kuvio 19). Varsimarkiisien asetukset on esitetty tarkemmin liitteessä 4.

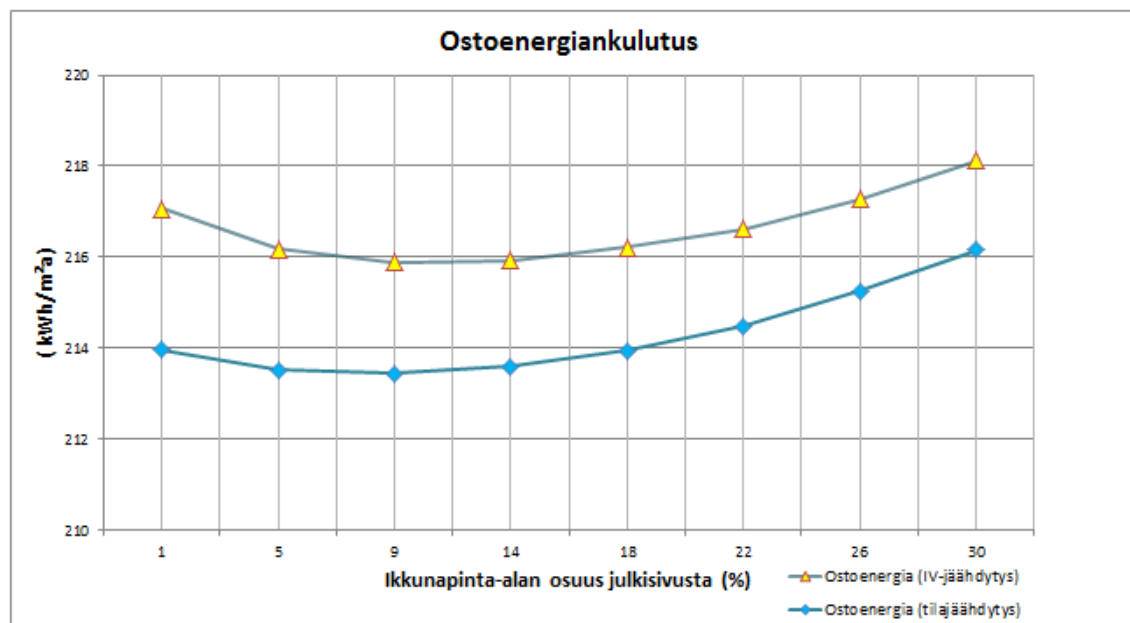
Vakiovalo-ohjauksella saavutettavaa energiansäästöä tutkittiin myös lisäämällä kaikkiin Tyypimalli I:n asuinhuoneisiin kattoikkunat (kuvio 20). Suurimpaan yhteiskäyttötilaan lisättiin kaksi kattoikkunaa, joten ikkunoiden yhteismääräksi muodostui 20 kpl. Kattoikkunoilla pyritään lisäämään päivänvalon valaistusvoimakkuutta sisätiloissa, jolloin vakiovalo-ohjauksella voidaan saavuttaa valaistusenergiassa lisäsäästöä. Kattoikkunat asetetaan IDA-ICE:ssa vyöhykkeen katto-objektiin (liite 5). Lasipinta-alaksi asetettiin jokaiselle kattoikkunalle yhteensä 1 m<sup>2</sup>.

## 6 TUTKIMUSTULOKSET

### 6.1 Kokonaisostoenergian kulutus

#### 6.1.1 Ikkunapinta-ala

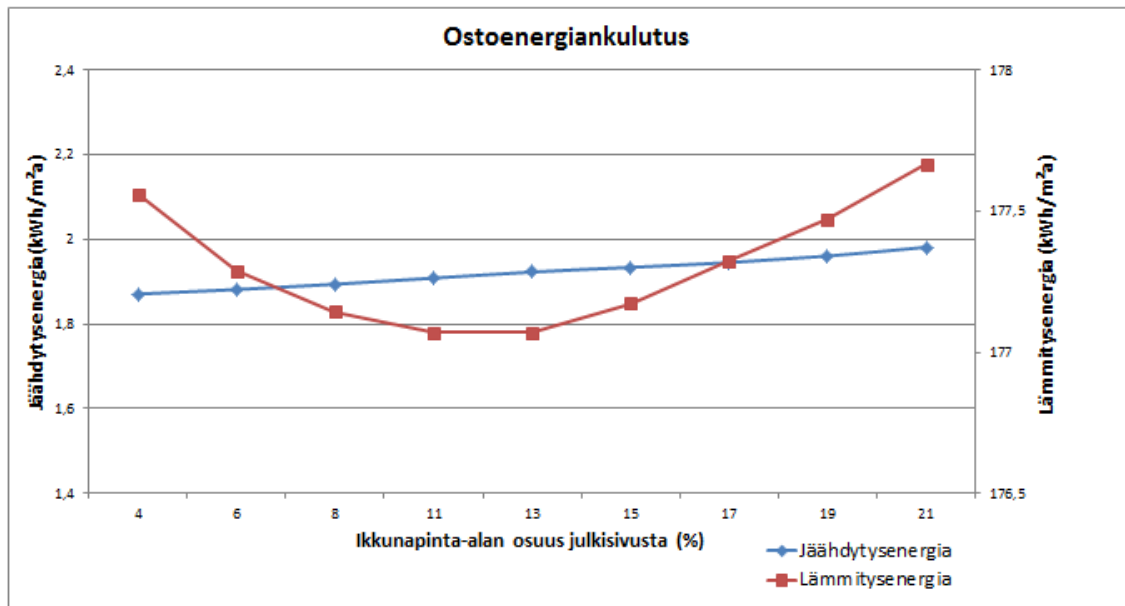
Ikkunoiden koko muuttuu kuviossa 10 kappaleessa 5.1.1 kuvailulla tavalla. Kuviossa on esitetty sekä IV-jäähdytyksellä että pelkällä huonelaitejäähdytyksellä toteutetut simuloinnit. Valaistus on asetettu toimimaan kiinteällä teholla, RakMK D3:n mukaisella standardikäyttöaikataululla.



KUVIO 10. Tyypimalli I, perustapaus

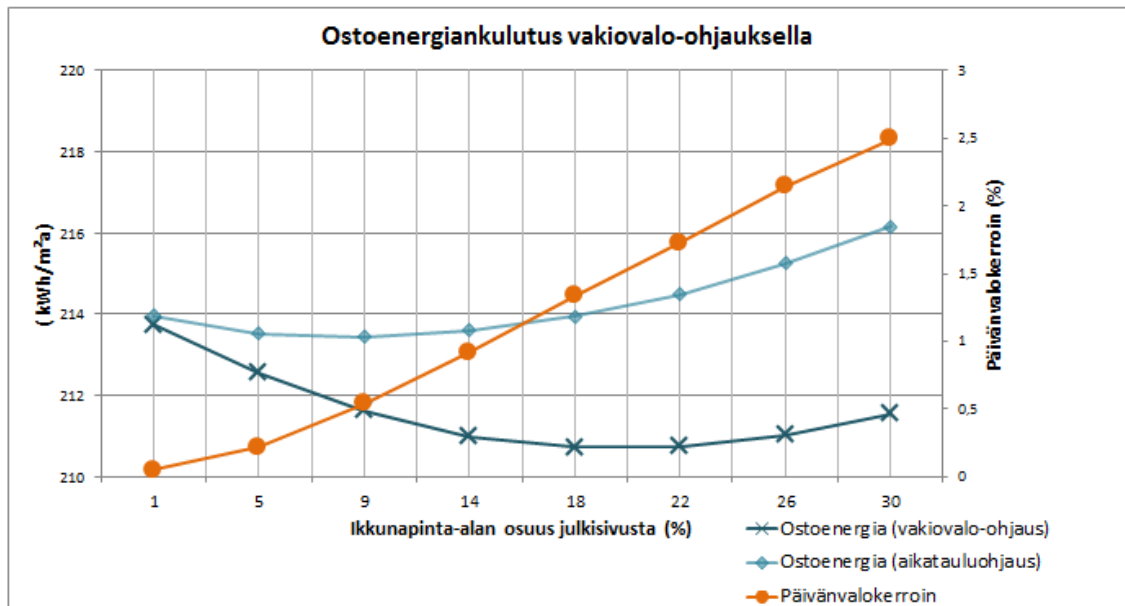
Kuviosta nähdään rakennusmallin energiatehokkuuden paranevan tiettyyn pisteeseen saakka. Kuviossa 11 on esitetty tarkemmin ostoenergiankulutusten käyttäytyminen alueella, jossa energiankulutus saavuttaa matalimman arvonsa.





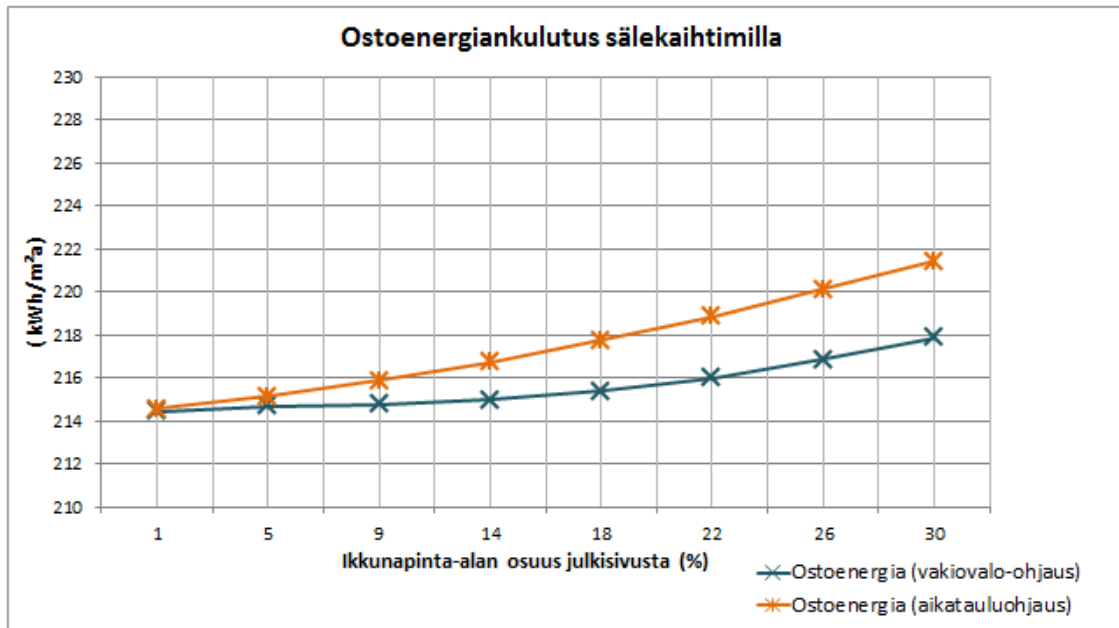
KUVIO 11. Tyypimalli I, ostoenergian kulutukset alueella 4-21 %

Ikkunakoon vaikutus kokonaisenergiankulutukseen on esitetty seuraavaksi valaistuksen toimiessa vakiovalo-ohjauksella (kuvio 12). Kuvaajassa esitetään myös sisätiloista mitattu keskimääräinen päivänvalokerroin kullakin ikkunaleveydellä.



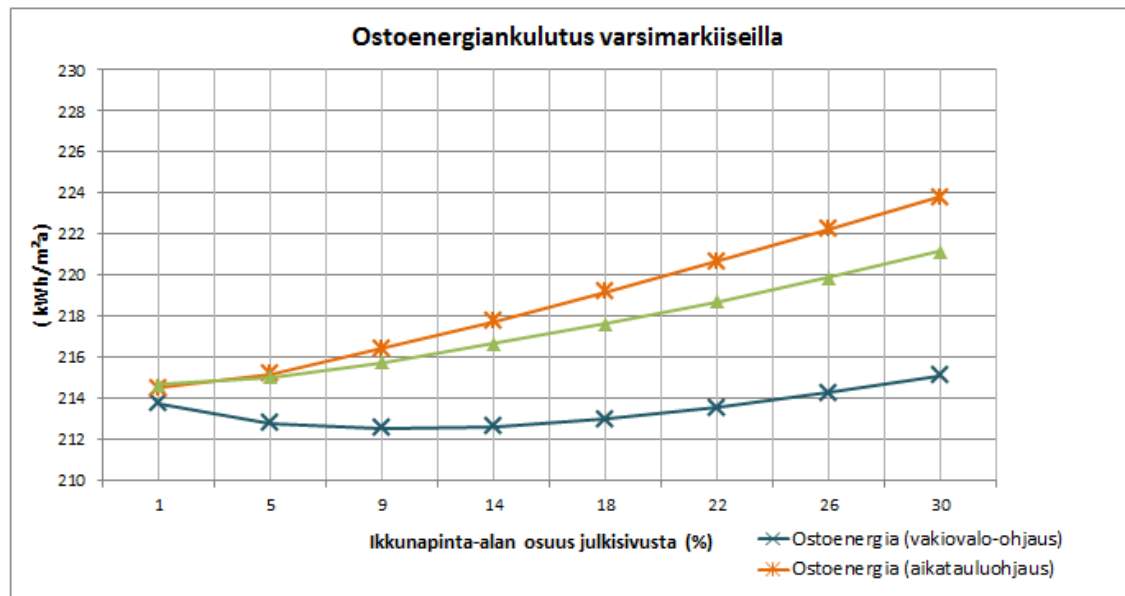
KUVIO 12. Tyypimalli I, vakiovalo-ohjaus

Laskentatapaus ikkunoiden ollessa varustettuna integroiduilla sälekaihtimilla on esitetty kuviossa 13. Simulointi on suoritettu sekä vakiovalo-ohjauksella että aikatauluohjatulla valaistuksella.



KUVIO 13. Tyypimalli I, sälekaihtimet ikkunoissa

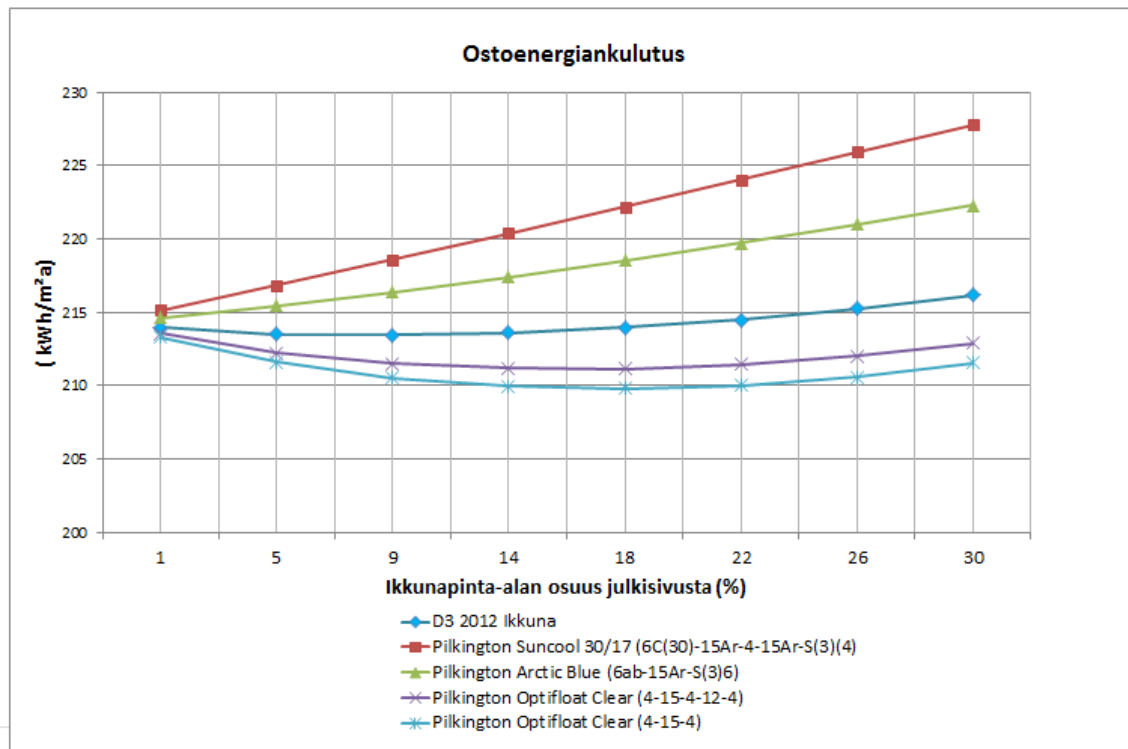
Aurinkosuojauksen vaikutusta tutkittiin myös ulkopuolisilla varsimarkiiseilla (kuvio 14). Kuvaajassa on esitetty sekä vakiovalo-ohjauksella että kiinteällä valaistuksella simuloidut tulokset.



KUVIO 14. Tyypimalli I, varsimarkiisit ikkunoissa

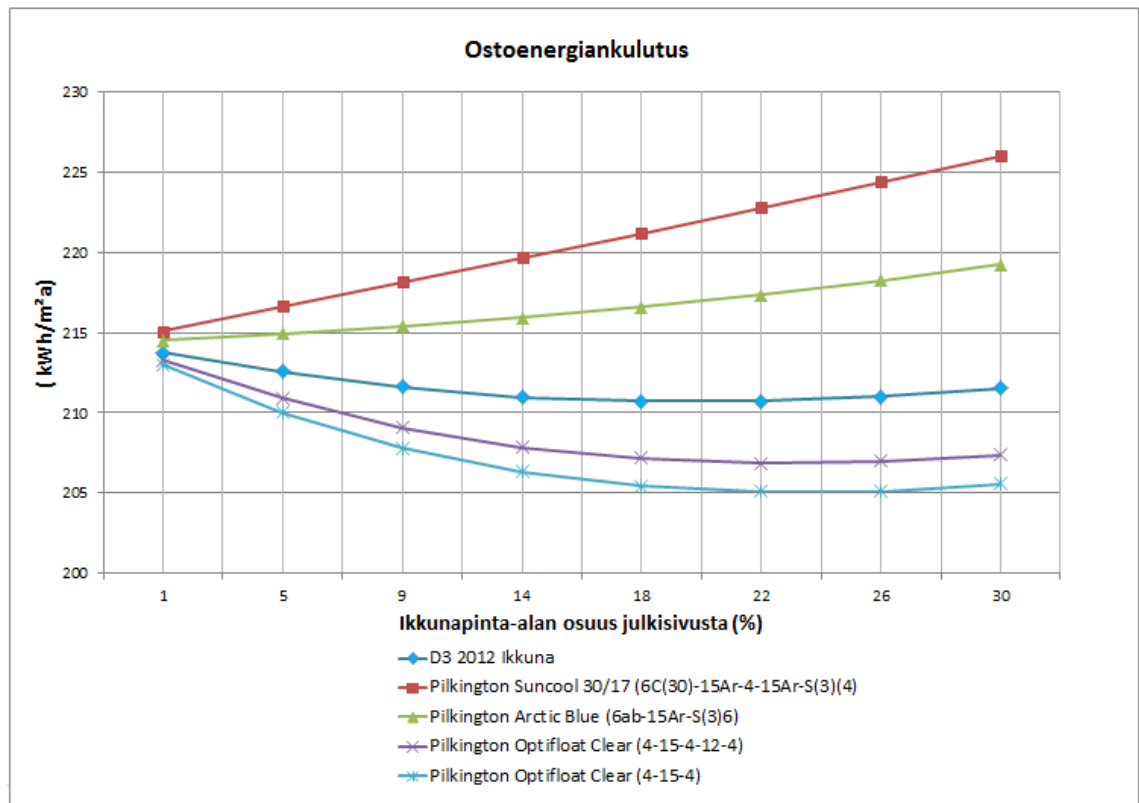
### 6.1.2 Lasirakenne

Kuviossa 15 esitetään eri lasirakenteiden ja ikkunapinta-alan muuttumisen vaikutusta kokonaisenergiankulutukseen Tyyppimalli I:ssa. Tässä laskentatapauksessa valaistus on asetettu toimimaan kiinteällä teholla.



KUVIO 15. Tyyppimalli I, lasirakenteiden vertailu

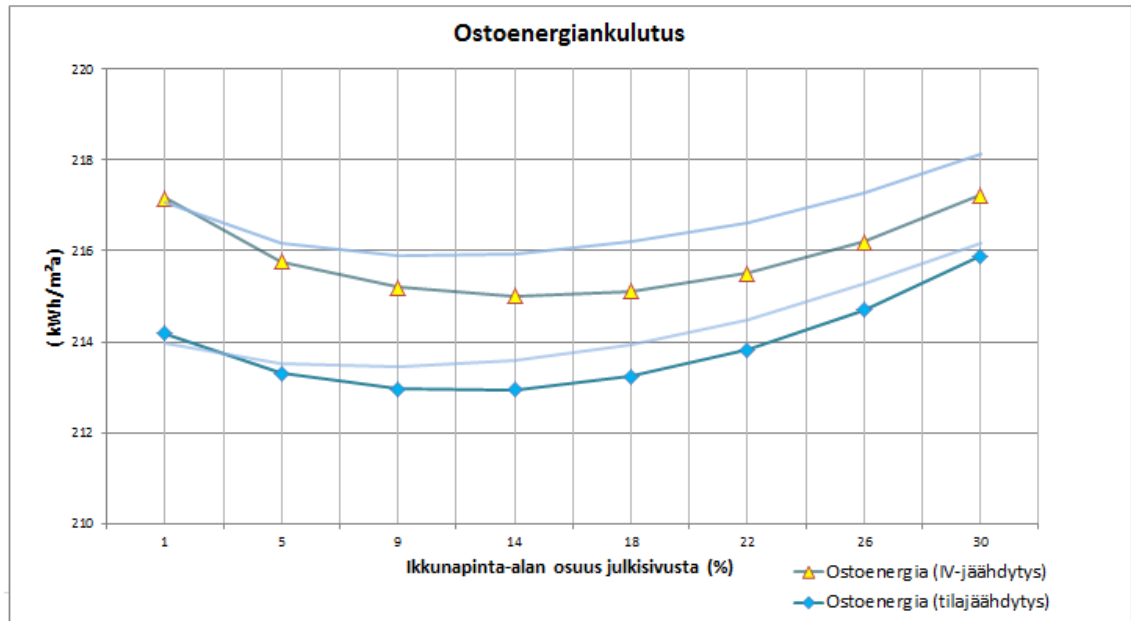
Eri lasirakenteilla ja vakiovalo-ohjauksella toteutetun laskennan tulokset on esitetty seuraavaksi (kuvio 16).



KUVIO 16. Tyypimalli I, lasirakenteiden vertailu, vakiovalo-ohjaus

### 6.1.3 Rakennuksen suuntaus

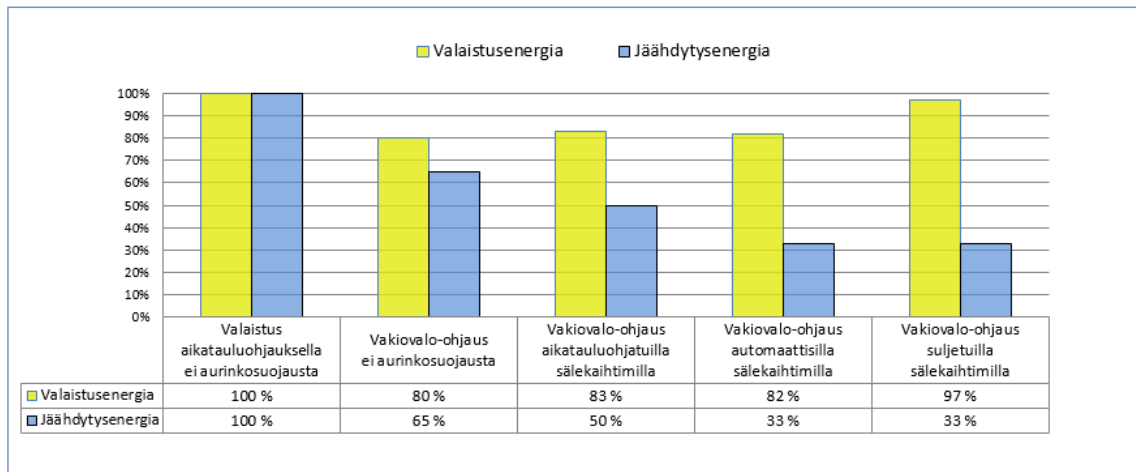
Kuviossa 17 esitetään ostoenergiankulutuksen muutokset ikkunakoon kasvaessa perustapauksen tavoin. Rakennusmallia on käännetty 90 °. Kääntämisen jälkeen rakennusmallin pohjoisjulkisivu avautuu länteen päin. Vertailun helpottamiseksi käännetyn ja alkuperäisellä tavalla suunnatun mallin välillä, kuviossa 17 on esitetty myös perustapauksen simulointitulokset haaleanvärisinä kuvaajina.



KUVIO 17. Tyypimalli I, perustapaus, käännetty 90 °

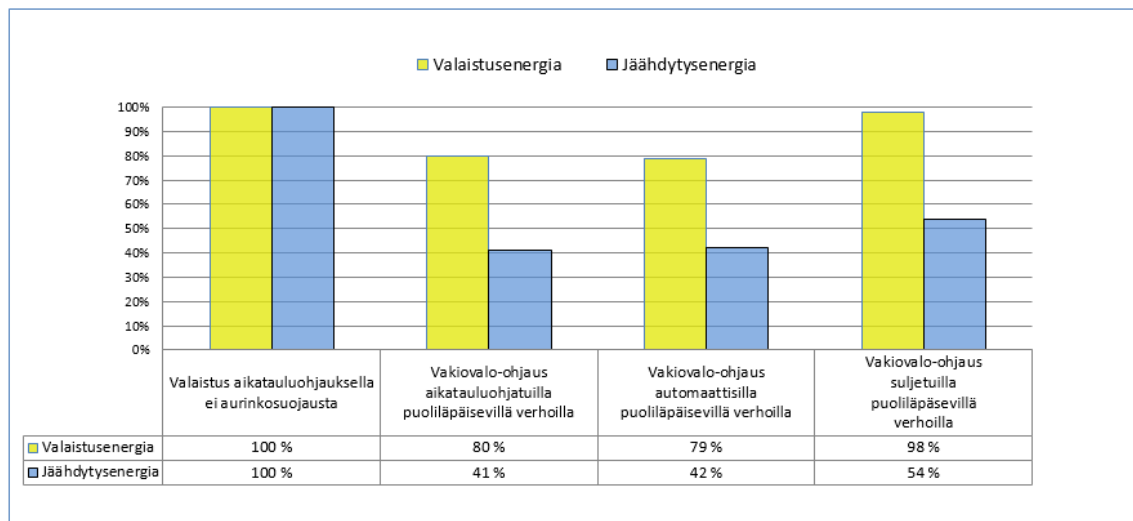
## 6.2 Aurinkosuojauksen ja valaistuksen ohjaus

Valaistus- ja jäähdytysenergiankulutuksia simuloitiin erilaisten sälekaihtimien ja valaistushajauksen yhdistelmillä, sekä kaihtimien ollessa aina suljettuina. Laskentatapausten tulokset Tyypimalli I:n perusmallilla on esitetty kuviossa 18.



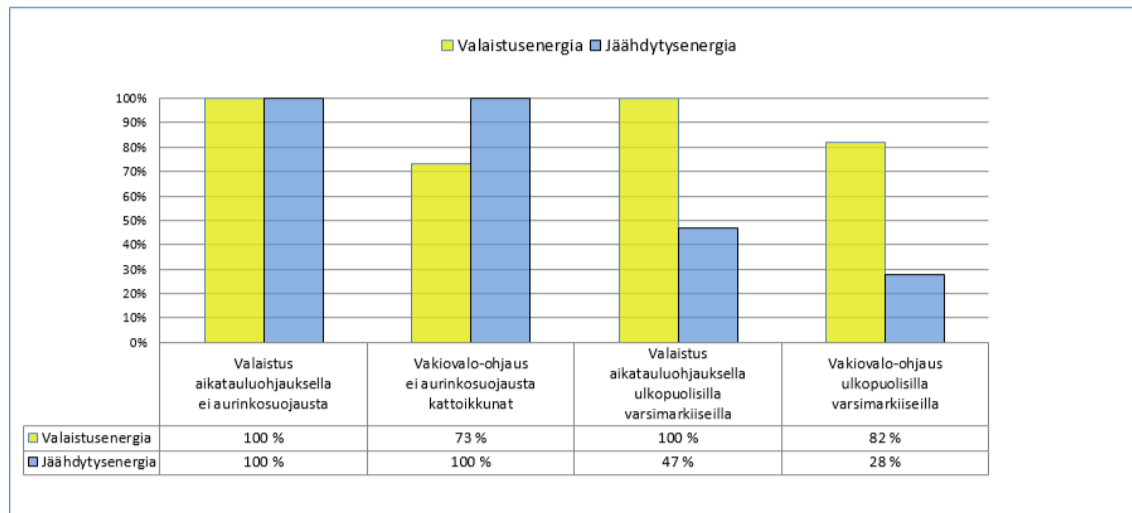
KUVIO 18. Integroidut sälekaihtimet

Vastaavat tapaukset simuloitiin myös ikkunoiden sisäpuolelle asetettavilla puoliläpäisevillä aurinkosuojaverhoilla (kuvio 19).



KUVIO 19. Sisäpuoliset puoliläpäisevät verhot

Varsimarkiisien tapauksessa ohjaustapaa muutettiin ainoastaan valaistuksen osalta (kuvio 20). Seuraavassa kuviossa on esitetty myös laskentatapaus asuinhuoneisiin ollessa lisättynä kattoikkunat. Valaistus on tällöin kytketty toimimaan vakiovalo-ohjauksella eikä aurinkosuojausta ole käytetty.



KUVIO 20. Ulkopuoliset varsimarkiisit sekä tapaus kattoikkunoiden kanssa

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

### 7.1 Tulosten analysointi

Rakennuksen jäähdytysenergiantarve voidaan todeta kuvioista 10 pieneksi. IV-jäähdytyksen ollessa päällä, IV-jäähdytyspatterin tuloilmaan siirtämä jäähdytysteho on tilojen todellista jäähdytysenergiantarvetta kuvaavaa tilajäähdytystä suurempi. Tämä selittyy suurelta osin jäähdytysrajalla, joka on kuvioiden 10-16 laskentatapauksissa 25 °C. Myös rakenteiden materiaali ja lämmönvarastointikyky vaikuttavat osaltaan jäähdytystarpeeseen. Tässä tutkimuksessa rakenteina on käytetty melko raskaita betonirakenteita, jotka myös osaltaan pienentävät jäähdytystarvetta. Jäähdytysenergiankulutuksen analysoinnissa on myös lähtökohtaisesti hyvä huomioda jäähdytysenergian tuottoprosessille määritetty hyötysuhde 3,0. Käyttämällä tässä esimerkiksi arvoa 1,0, olisi jäähdytysenergiankulutuksen osuus tuloksissa kolminkertainen.

Ikkunapinta-alalla on suuressa osassa kokonaisostoenergiankulutuksen laskentatapauksista havaittavissa energiatehokkuuden kannalta optimaalisin piste. Poikkeuksen tekevät tapaukset, jossa rakennusmalli on varustettu automaattisilla sälekaihtimilla sekä varsimarkiiseilla (kuviot 13 ja 14). Sälekaihtimilla energiankulutus kasvaa ikkunakoon suurentuessa kummallakin valaistuksenohjauksella. Varsimarkiiseilla valaistuksen ollessa vakiovalo-ohjattuna, energiatehokkuuden kehitys on aluksi positiivista. Aikatauluohjattulla valaistuksella ikkunakoolla ei ole varsimarkiisien kanssa positiivista vaikutusta energiatehokkuuteen lainkaan, vaan energiankulutus kasvaa alusta alkaen ikkunakoon mukaisesti.

Perustapauksessa (kuvio 10) optimaalinen ikkunakoko energiatehokkuuden kannalta on ikkunapinta-alan peittäessä noin 12 % julkisivualasta. Verratessa tähän vakiovalo-ohjauksella simuloitua tapausta (kuvio 12), nähdään optimaalisen pisteen siirtyvän suuremmalle ikkunakoolle. Vakiovalo-ohjauksella energiatehokkain ikkunakoko löytyy noin 19 % tuntumasta. Tulosten perusteella voidaan todeta vakiovalo-ohjauksen mahdollistavan käytettävän suurempia ikkunakokoja samalla kokonaisenergiankulutuksella lisäten sisätilojen viihtyisyyttä huomattavasti.



Perustapauksen optimaalisen pisteen ikkunapinta-ala (12 % julkisivualasta), on kerrosalaan suhteutettuna noin 7 %. Suomen rakentamismääräyskokoelman osan G1 määrittämä pienin ikkunapinta-alan osuus huonealasta on 10 %. Tämän lisäksi huomioituna päivänvalon hyvinvointia lisäävä näkökulma, voidaan vain 12 % julkisivupinta-alasta peittäviä ikkunoita pitää auttamatta liian pieninä. Myös keskimääräinen päivänvalokerroin on tämän kokoluokan ikkunoilla hyvin alhainen (n. 0,7 %). Vakiovalo-ohjauksella määritetty optimaalinen ikkunakoko (n. 19 % julkisivualasta) voisi taasen hyvin toimia suunnitteluvaiheessa suuntaviivana, mikäli energiatehokkuus on suunnittelussa lähtökohtana. Keskimääräinen päivänvalokerroin on tällä ikkunapinta-alalla vajaa 2 %. Tätä voidaan pitää sisätilojen viihtyisyyden näkökulmasta jo kohtuullisena arvona.

Sälekaihtimilla varustetuilla ikkunoilla Tyyppimalli I:n kokonaisenergiankulutus kasvaa pienimmästä ikkunakoosta alkaen (kuvio 13). Kokonaisenergiankulutus sälekaihtimilla on ikkunoiden ollessa suurimmillaan noin 3 % suurempi suojaamattomiin ikkunoihin verrattuna (kuvio 12).

Varsimarkiiseilla ja vakiovalo-ohjauksella energiankulutuksessa on havaittavissa optimaalinen piste ikkunapinta-alan peittäessä julkisivusta noin 12 % (kuvio 14). Valaistuksen toimiessa aikatauluohjatusti energiatehokkuus huononee melko tasaisesti ikkunakoon kasvaessa. Kohteen energiatehokkuudelle varsimarkiisien vaikutus voidaan todeta negatiiviseksi vertailemalla kuvion 14 tuloksia kuvioon 12. Kokonaisenergiankulutukset ovat molemmilla valaistuksenohjaustyypeillä varsimarkiisitapauksessa kuvion 12 suojaamattomia tapauksia suurempia. Tämä selittyy rakennusmallin pienellä jäähdytysenergian tarpeella. Ikkunoista lämpösäteilyenergianä saatava hyöty voidaan siis todeta näissä tapauksissa passiivisella jäähdytyksellä jäähdytysenergiasta saatavaa säästöä suuremmaksi. Sama ilmiö selittää myös automaattisten sälekaihtimien käytöllä todetun lisääntyneen energiankulutuksen.

Rakennuksen suuntauksen voidaan todeta vaikuttavan kokonaisenergiankulutukseen hieman positiivisesti vertaamalla kuvioita 17 ja 10. Vaikutus on kuitenkin suuruusluokaltaan hyvin marginaalinen.

Kuviosta 15 nähdään lasirakenteen vaikuttavan merkittävästi kokonaisenergiankulutukseen. Myös energiankulutuksen kehitys ikkunakoon kasvaessa on erisuuntainen eri lasirakenteilla, ikkunakoon ollessa alle 15 % julkisivusta. Kuviosta 16 nähdään vakiovalo-

ohjauksen lisäävän eroa kokonaisenergiankulutuksessa huomattavasti eri lasirakenteiden välillä. Kuvioista 15 ja 16 on todettavissa samat johtopäätökset kuin aurinkosuojaustausten yhteydessä jo todettiin. Jäähdytystarpeen minimoimiseen tarkoitetuilla matalan G- ja T-arvon lasituksilla ikkunakoon kasvaessa kokonaisenergiankulutus kasvaa tasaisesti tahtia. Valaistuksen ohjaustavasta riippuen, hyvin valoa läpäisevillä lasituksilla puolestaan energiankulutus alkaa lisääntyä vasta ikkunapinta-alan saavuttaessa 18...25 % osuuden julkisivupinta-alasta. U-arvo on kaikilla lasituksilla määritetty samaksi, joten johtumislämpöhäviöt eivät vaikuta laskentatuloksiin.

Valaistuksen ja aurinkosuojausten ohjauksien vaikutuksesta Tyypimalli I:n perustapauksen valaistus- ja jäähdytysenergiankulutuksiin saa kattavan kuvan kuvioista 18-20. Päivänvalon hyödyntäminen osana sisätilojen valaistusta onnistuu tulosten mukaan hyvin myös kaikkien aurinkosuojausten kanssa. Poikkeuksen vakiovalo-ohjauksen tuomaan energiansäästöön luo luonnollisesti tilanne käsisäästöisten verhojen ollessa suljetuina. Tällöin valaistusenergiankulutus palaa aikatauluohjatun valaistuksen tasolle.

Asuinhuoneistoihin asetetuilla kattoikkunoilla saavutetaan säästöä valaistusenergiankulutuksessa aikatauluohjattuun valaistukseen verrattuna noin 27 % (kuvio 20). Vastavasti ero ilman kattoikkunoita simuloituun vakiovalo-ohjattuun valaistukseen on noin -7 %. Jäähdytysenergiankulutuksen valaistuksen toimiessa vakiovalo-ohjauksella kattoikkunat nostavat aikatauluohjatun ja aurinkosuojaamattoman perustapauksen tasolle.

## **7.2 Pohdinta ja kehitysehdotukset**

Työssä saavutettiin suurelta osin alkuvaiheessa asetetut tavoitteet. Ikkunakoon vaikutuksesta kokonaisenergiankulutukseen onnistuttiin luomaan kokonaiskuva eri tapauksissa. Myös päivänvalon hyödyntämisestä valaistuksessa ja aurinkosuojausten vaikutuksesta energiatehokkuuteen saatiin vertailukelpoisia tuloksia. Konkreettisimmat mahdollisuudet energiatehokkuuden parantamiseen arkkitehtisuunnitteluvaiheessa tulee tämän tutkimuksen tulosten perusteella päivänvalon hyödyntämisestä osana valaistusta. Tarkasteltaessa vakiovalo-ohjauksen hyötyjä rakennuksen elinkaarikustannuksissa, on hyvä huomioida järjestelmän investointikustannusten lisäksi myös mahdollisesti kasvavat huoltokustannukset.

Aurinkosuojausten hyödyt kokonaisenergiankulutuksessa jäivät simulointitulosten perusteella pieniksi ja jopa osassa laskentatapauksia negatiivisiksi. Mikäli työssä olisi käytetty suuremmilla ikkunapinnoilla varustettua tai muusta syystä suuremmalla jäähdytystarpeella varustettua tarkastelumallia, vaikutukset kokonaisenergiankulutukseen olisivat todennäköisesti olleet positiiviset. Tutkimustulosten perusteella tässä työssä käytetyn rakennusmallin jäähdytystarve on katettavissa hyvin pitkälle passiivisilla menetelmillä.

Kokonaisuutena IDA-ICE osoittautui tehokkaaksi työkaluksi tämän tyyppisen laskennan toteuttamiseen. Päivänvalon hyödyntämisen säästöt saadaan suoraan huomioitua sekä pienenevissä valaistus- ja jäähdytysenergiankulutuksissa että lisääntyvässä lämmitysenergiankulutuksessa. Tuloksia olisi mahdollisesti hyvä vertailla myös taulukkoarvojen perusteella laskettaviin energiankulutuslukemiin. Näin voitaisiin löytää seikkoja, jotka erityisesti tukisivat dynaamisen simuloinnin käyttämistä tämän tapaisessa tutkimuksessa. Tutkimusta olisi myös hyvä laajentaa muuttamalla sisätilojen olosuhteita paremmiksi ainakin huonelämpötilojen osalta. Näin saataisiin jäähdytysenergiankulutuksen osuutta suuremmaksi sekä todennäköisesti myös aurinkosuojaratkaisuille kannattavuutta.

Laskentatulosten perusteella voidaan todeta tutkittujen suunnitteluratkaisuiden muodostavan hyvin pienen osan tässä työssä käsitellyn rakennusmallin kokonaisenergiankulutuksesta. On hyvä huomioida, että tavoitteena työssä oli ennen kaikkea määrittää näiden vaikutusten suuruusluokkia. Käsiteltävänä kohteena työssä toimi hyvin yksinkertainen rakennusmalli, joten tuloksille ei tässä vaiheessa ole vertailupohjaa muille rakennusmalleille tehdyistä vastaavista laskelmista. Työtappaa on mahdollista kehittää ottamalla tutkimukseen mukaan erikokoisia ja -muotoisia rakennusmalleja. Näin voitaisiin saavuttaa myös merkittävämpiä muutoksia kokonaisenergiankulutuksessa tässä työssä käytetyn tapaisilla muuttujilla.

Haastavinta opinnäytetyön laatimisessa oli simulointityössä alkuun pääseminen ja lopullisten vertailtavien laskentatapauksien määrittäminen. IDA-ICE:n käyttö tämän tyyppiseen tutkimukseen vaati oman aikansa, joten relevanttien tutkimustulosten aikaansaaminen vei varsinkin alkuosuudella paljon aikaa. Aihe oli kokonaisuutena hyvin mielenkiintoinen, ja vastaavia tutkimuksia voitaisiin toteuttaa myös muille ja monimuotoisimmille rakennusmalleille.

## LÄHTEET

Aurinkosuojaus. 2017. Aurinkosuojaus on tärkeä osa rakennuksen energiansäästöä. Luettu 16.2.2017

<http://www.aurinkosuojaus.fi/aurinkosuojaus.html>

COMBI-hanke. Luettu 2.3.2017

<http://www.tut.fi/fi/tutkimus/tutkimusalat/rakennustekniikka/rakennetekniikka/rakennusfysiikka/combi/index.htm>

Heiduk, Ernst. Passive House Standard. Luentoaineisto. Drau, Itävalta: Passive House Summer School. Luettu 3.2.2016

Kallioharju, K. & Harsia, P. 2015. Valaistuksen laadullisten tekijöiden ja energialaskennan määrittely FInZEB-hankkeelle. Tampereen Ammattikorkeakoulu.

<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/87613/FInZEBvalaistusselvitys.pdf?sequence=1>

Lylykangas, K., Andersson, A., Kiuru J., Nieminen, J. & Päätaalo, J. 2015. Rakenteellinen energiatehokkuus. Opas. 2015. Rakennusteollisuus.

[https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/oppaat-ohjeet/ret\\_opas\\_20150917.pdf](https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/oppaat-ohjeet/ret_opas_20150917.pdf)

LVI 50-10910. Kesäaikaisten lämpötilojen hallinta asuinkerrostalossa. 2007. Helsinki: Rakennustieto Oy.

LVI 73-40016. Auringon säteilykuorman pienentämismahdollisuudet rakennuksissa. 1991. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Motiva. 2016. Ikkunoiden energiatehokkuus. [www-sivu]. Päivitetty 9.12.2016. Luettu 10.2.2017.

[http://www.motiva.fi/koti\\_ ja\\_ asuminen/vaikuta\\_hankinnoilla/ikkunoiden\\_energialuokitus/ikkunoiden\\_energiatehokkuus](http://www.motiva.fi/koti_ ja_ asuminen/vaikuta_hankinnoilla/ikkunoiden_energialuokitus/ikkunoiden_energiatehokkuus)

RakMk D3. 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta. Helsinki: Ympäristöministeriö.

RT 07-10946, Sisäilmastoluokitus. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. 2008. Helsinki : Rakennustieto

Sepponen, M., Nieminen J., Tuominen, P., Kouhia, I., Shemeikka, J., Viikari, M., Hemmilä, K. & Nykänen, V. 2013. Lähes nollaenergiatalon suunnitteluohjeet. Asumisen rahoittamis- ja kehittämiskeskus. Helsinki: Edita Prima Oy.

Tasauslaskentaopas. 2012. Rakennuksen lämpöhäviön määräystenmukaisuuden osoittaminen. Helsinki: Ympäristöministeriö

Vikberg, H. 2014. Valoisa asunto. Luonnonvalon hyödyntäminen asuinkerrostalossa. Arkkitehtuurin laitos. Aalto-yliopisto. Diplomityö.

Vuolle, M. & Heinonen, J. 2014. Sisälämpötilan ja jäähdytystehontarpeen laskenta. Ilmastointitekniikka osa 2. Toimittanut Sandberg E. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.

## LIITTEET

## Liite 1. Seinärakenteen määrittäminen IDA-ICE:ssä

**Rakennuksen oletusarvot**

Rakenteet

- Ulkoseinää
- Sisäseinää
- Väliseinää
- Ulkoseinää
- Alaseinää
- Lasiseinää
- Ulkoseinää
- Lasiseinää

**Tuotannon hyötysuhde**

	Sähkö	Polttoaine	Kaivo-
Lämmitys	COP 1	0.9	0.97
Jäähdytys	COP EER 3	C	1
Lämmön käyttövesi	COP 1	C	0.97

**Energiamittarit**

Käyttö	Sähkö	Polttoaine	Kaivo-
HYG-Henkilö 1	Keiyf sähköl... 1.253	1.2	Keiyfaste D3.2.
HK-Henkilö 1	Keiyf sähköl... 1.397	1.2	Keiyfaste D3.2.
AS-9-Henkilö 1	Keiyf sähköl... 1.494	1.2	Keiyfaste D3.2.
AS-11-Henkilö 1	Keiyf sähköl... 1.507	1.2	Keiyfaste D3.2.
KR-1-Henkilö 1	Keiyf sähköl... 2.167	1.2	Keiyfaste D3.2.
KR-Henkilö 1	Keiyf sähköl... 3.193	1.2	Keiyfaste D3.2.

**Seinän määrittely**

Konaisuus: Suomen rakentamismääräyskokoelma D3 2012, lämpimän tilan ulkoseinä (0- arvo vastaisuus 0,17 W/m2K)

U-sarvo: 0,1698 W/(m2K)

Paksuus: 0,472 m

Kerrokset: C4 2012 rappauslaasti, kalkkisementtilaasti, 0,03 m; C4 2012 betoni, 0,1 m; C4 2012 mineraalivilla, levy ja matto, 0,252 m; C4 2012 betoni, 0,1 m; C4 2012 rappauslaasti, kalkkiseimenttilaasti, 0,01 m

Seinän alapinta/Seinän sisäpinta: C4 2012 rappauslaasti, kalkkiseimenttilaasti, 0,01 m

Kerroslehdet: C4 2012 rappauslaasti, kalkkiseimenttilaasti, 0,01 m

Imvaihkokoneet: Imvaihkokoneet

Laajamaalauslaatu: Laajamaalauslaatu

Materialit: Paksuus 0,01 m

OK | Tallella nimellä | Peru | Ojje

Error: Unshown object type: PAKUULLIAPPO [Uusi] | Kuitaa







Liite 4. Varsimarkiisin asetukset IDA-ICE:ssa

**Varsimarkiisi**

Yleinen varsimarkiisi

Materiaali: Yleinen varsimarkiisi

Lämpötilan raja-arvo:  °C

Tuulen raja-arvo:  m/s

Kuvaus:

OK Peru Tallenna nimellä... Ohje

Ala, m <sup>2</sup>	Lasitus	g (SHGC)	T	Lasitus U, W/(m <sup>2</sup> K)	Umpossa n osuus, 0-1	Umpossa n U-ano, W/(m <sup>2</sup> K)	Umpoissa kok. sisäilman lämmitys, W/(m <sup>2</sup> K)	Integroitu suojus	Säätö	Ahkataulu	Ulkopuolen suojaus	Avoinna on tilauskäyttö	Avoinna on tilauskäyttö	Kuvaus
3.57	[Oletu...]	0.54	0.4408	0.667	0.25	2.0	1.0	0	[Oletu...]	Valais...	Ei ulk...	Aina...	Aina...	
3.23	[Oletu...]	0.54	0.4408	0.667	0.25	2.0	1.0	0	[Oletu...]	Valais...	Ei ulk...	Aina...	Aina...	

Liite 5. Kattoikkunan asetukset IDA-ICE:ssä

**Yleisomake**

Kattorajava: kattorajavalementti Tyypillimalli\_I\_penuusverso.K/R:ssa

Senäpinta Lisä Jäsenmitys

Geometria

	m
X	8.125
Y	2.4
DK	0.8
DY	0.8
DZ	0.8
L1	0.2
L2	0.2
L3	0.2
L4	0.2

Rakenne

	Seinä 1	Seinä 2	Seinä 3	Seinä 4	Katto
Lasiala [m <sup>2</sup> ]	0.22	0.22	0.22	0.22	0.12
Kokonaispinta-ala [m <sup>2</sup> ]	0.49	0.49	0.49	0.49	0.16

Seinät [Oletus] © D3.2012.Yläpohja(betonili)lammin lla

Lasiala [Oletus] oma ikkuna\_

Objekti Kattorajava

Nimi Kattorajava

Kuvaus Kattorajava

	Katto	64.7	Story...	180.0	Oletu...	0.04009	0.556	© C4 ... 0.01	© C4 ... 0.15	© C4 ... 0.486	© C4 ... 0.013	© C4 ... 0.013	© C4 ... 0.07	© C4 ... 0.013	© C4 ... 0.01	© C4 ... 0.1	© C4 ... 0.01	© C4 ... 0.1	© C4 ... 0.252	© C4 ... 0.252	© C4 ... 0.1	© C4 ... 0.013
Seinä 1	Sisäs...	36.03	KÄ	0.0	90.0	0.096	2.113	0.096	Air in ...	0.07	0.013	0.013	0.07	0.013	0.01	0.1	0.01	0.1	0.252	0.252	0.1	0.013
Seinä 2	Sisäs...	3.585	KR-1	89.97...	90.0	0.096	2.113	0.096	Air in ...	0.07	0.013	0.013	0.07	0.013	0.01	0.1	0.01	0.1	0.252	0.252	0.1	0.013
Seinä 3	Ulkos...	12.15	Story/#	180.0	90.0	0.1698	0.472	0.1698	Air in ...	0.01	0.013	0.013	0.01	0.013	0.01	0.1	0.01	0.1	0.472	0.472	0.1	0.013
Seinä 4	Ulkos...	5.727	Story/#	90.0	90.0	0.1698	0.472	0.1698	Air in ...	0.01	0.013	0.013	0.01	0.013	0.01	0.1	0.01	0.1	0.472	0.472	0.1	0.013
Seinä 5	Ulkos...	26.11	Story/#	180.0	90.0	0.1698	0.472	0.1698	Air in ...	0.01	0.013	0.013	0.01	0.013	0.01	0.1	0.01	0.1	0.472	0.472	0.1	0.013
Seinä 6	Sisäs...	16.66	AS-10	270.0	90.0	0.096	2.113	0.096	Air in ...	0.07	0.013	0.013	0.07	0.013	0.01	0.1	0.01	0.1	0.252	0.252	0.1	0.013