

Jyri Nurmi

RAKENNUSTEN ENERGIARATKAISUJEN OPTIMOINTI

Opinnäytetyö

Insinööri (AMK)

Talotekniikka (LVI)

2022



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä/Tekijät	Jyri Nurmi
Työn nimi	Rakennusten energiaratkaisujen optimointi
Toimeksiantaja	A-Insinöörit Rakennuttaminen Oy
Vuosi	2022
Sivut	53 sivua, liitteitä 0 sivua
Työn ohjaaja(t)	Mika Kuusela (Xamk), Esa Suomalainen (A-Insinöörit)

TIIVISTELMÄ

Ilmastonmuutoksen ehkäisemiseksi nykypäivän ja tulevaisuuden rakentaminen tulee olla entistä energiatehokkaampaa huomioiden eri kulutustekijät sekä pyrkien päästöjen vähenemiseen. Rakennusten lämmitysenergiaratkaisujen optimoinnilla pystytään vastaamaan tulevaisuuden rakentamisen haasteisiin energia- ja kasvihuonepäästö määräysten kiristyessä.

Työn tarkoituksena oli tutkia kohderakennusten lämmitysenergianlähteiden optimointia ja energialaskentaa sekä luoda pohja työn tilaajan energiakonsultointipalveluun. Opinnäytetyö rajattiin kahden kohderakennuksen lämmitysenergianlähteiden optimointiin. Tavoitteena oli selvittää rakennuksen lämmityksen huipputehontarve ja optimaalisin teho rakennuksen maalämpöpumpulle. Toisen kohderakennuksen osalta tavoitteena oli verrata kauko- ja maalämmön elinkaarikustannuksia ostoenergiankulutuksen ja käyttökustannusten osalta. Lisäksi tavoitteena oli rakentaa rakennusten lämmitysenergianlähteiden optimointiin soveltuvia IDA ICE -laskenta- ja optimointimalleja, joita voidaan hyödyntää IFC-tietomallin kanssa.

Tutkimus suoritettiin dynaamisen laskennan IDA ICE -ohjelmistolla ja ohjelmiston Graphical Script- ja Parametric Run -työkaluilla. Rakennusten IFC-mallien tutkintaan hyödynnettiin ArchiCAD- ja Simplebim-ohjelmia. Elinkaaren laskentaan käytettiin energiayhtiöiden hinnastoja sekä Microsoft Excel -ohjelmistoa.

Tuloksena syntyi laskelmat toimistorakennuksen lämmityksen huipputehontarpeesta ja maalämpöenergiantarpeesta sekä selvitys optimaalisimmasta maalämpöpumpun tehosta. Koulurakennuksen osalta tuloksena saatiin laskelma kaukolämmön ja maalämmön ostoenergiantarpeesta yhden vuoden ajalle. Verrattaessa kaukolämmön ja maalämmön ostoenergiankulutusta todettiin maalämmön ostoenergiantarpeen olevan noin kolme kertaa pienempi kuin kaukolämmön. Lisäksi maalämmön todettiin olevan edullisempi 20 vuoden elinkaaren käyttökustannuksiltaan verrattuna kaukolämpöön. Tuloksena rakennettiin myös IDA ICE -laskenta- ja optimointimallit, joita voi hyödyntää IFC-tietomallin kanssa.

IDA ICE -ohjelmisto soveltuu tutkimuksen kohderakennusten energiaselvityksiin ja se mahdollistaa yksityiskohtaisen tarkastelun rakennuksen taloteknisistä järjestelmistä etsittäessä optimaalisinta ratkaisua. Maalämpö on energiatehokkaampi lämmitysjärjestelmä useimmissa kohteissa kaukolämpöön verrattaessa. Tuloksia ja malleja voidaan hyödyntää rakennuksen taloteknisten järjestelmien tarkasteluun sekä markkinointiin tilaajaorganisaatiossa.

Asiasanat: IDA ICE, optimointi, simulointi, energiatehokkuus, energialaskenta

Degree	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Jyri Nurmi
Thesis title	Optimization of Buildings' Energy Solutions
Commissioned by	A-Insinöörit Rakennuttaminen Oy (Ains Group Ltd.)
Time	2022
Pages	53 pages, 0 pages of appendices
Supervisor	Mika Kuusela (Xamk), Esa Suomalainen (A-Insinöörit)

ABSTRACT

To prevent climate change, construction today and in the future must be more energy-efficient. This can be achieved by aiming to reduce emissions and considering the different consumption factors. The optimization of the heating energy solutions of buildings will enable us to meet the challenges of future construction as energy and greenhouse gas emissions regulations tighten.

The purpose of the work was to study the optimization of heating energy sources and energy computing in the target buildings and to lay the foundations for the energy consultancy service of the client of this thesis. The scope of this thesis was limited to optimizing the heating energy sources of the two target buildings. The aim was to find out the need for peak power in the first building's heating and the most optimal power for the building's geothermal pump. As to the second target building, the aim was to compare the life cycle costs of long-distance and terrestrial heat in terms of purchasing energy consumption and its operating costs. In addition, the aim was to create IDA ICE calculation and optimization models suitable for optimizing heating energy sources in buildings, which can be utilized with the IFC data model.

The result was calculations of the peak power demand for heating in the office building and the need for geothermal energy and a study of the most optimal ground heat pump power. In the case of the school building, the result was a calculation of the purchase energy needs of district heating and geothermal heat for a period of one year. When comparing the purchase energy consumption of district heat and geothermal heat, the purchase energy demand for geothermal heat was about a quarter lower than that of district heat. In addition, geothermal heat was cheaper in terms of operating costs over a 20-year life cycle than district heating. An IDA ICE calculation and optimization model was also created as a result, using the IFC data model.

The IDA ICE software is suitable for energy surveys in the target buildings of the research and enables a detailed examination of the building's building technology systems in the search for the optimal solution. Geothermal heat is a more energy efficient heating system in most locations when compared to district heating. The results and models can be used to review buildings' building technology systems and for marketing purposes at A-Insinöörit Rakennuttaminen Oy.

Keywords: IDA ICE, optimization, simulation, energy efficiency, energy calculation

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	TUTKIMUKSEN TAUSTA	7
2.1	Rakennuttamista ja suunnittelua ohjaavat direktiivit ja asetukset	7
2.2	Rakennusten energiatehokkuus	10
3	TUTKIMUSMENETELMÄT	12
4	RAKENNUKSEN TIETOMALLI	13
5	ENERGIAKONSULTOINTI.....	14
5.1	Energiaoptimointi ja -simulointi.....	14
5.1.1	Optimointi IDA ICE -ohjelmistolla	15
5.1.2	IDA ICE -ohjelmiston laskenta- ja optimointimallit	16
5.1.3	Simulointi IDA ICE -ohjelmistolla	16
5.2	Energialaskenta.....	17
5.2.1	E-luku	19
5.2.2	Energiatodistus ja -selvitys	20
5.2.3	Dynaamiset laskentaohjelmistot	22
6	TUTKIMUKSEN TOTEUTUS	22
6.1	Toimistorakennus.....	23
6.2	Koulurakennus	32
6.3	Tietomalli.....	42
7	TULOKSET	43
8	TULOSTEN ARVIOINTI	48
9	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	50
	LÄHTEET	54

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena toimii rakennusten lämmitysenergiaratkaisujen optimointi. Aihe nousi omasta mielenkiinnosta rakennusten energialaskentaa kohtaan sekä työelämän tarpeesta A-insinöörit rakennuttaminen Oy:n tilauksesta. Opinnäytetyön tarkoituksena on luoda laskenta- ja optimointimalleja dynaamisen laskennan IDA ICE -ohjelmistolle sekä pohja tilaajaorganisaation Kuopion yksikön palvelun tarjonnan laajentumiselle. IDA ICE -ohjelmistoon luotavat mallit tehdään lämmitysenergianlähteiden optimointia ja laskentaa varten. Palvelun tarjontaa laajennetaan energiakonsultointiin.

Opinnäytteen aihepiiriin liittyvää tietoa tullaan tarvitsemaan tulevaisuudessa yhä enemmän energia- ja kasvihuonepäästömääräysten kiristyessä sekä rakennusten ollessa merkittävimpiä energian kuluttajia (noin 40 %) ja kasvihuonekaasupäästöjen (noin 30 %) aiheuttajia EU:n alueella [1]. Ilmastonmuutoksen hillitsemispyrkimysten vuoksi strategiat liittyen rakennusten energiatehokkuuteen, kulutukseen sekä päästöjen vähenemiseen muodostavat yhden tulevaisuuden rakennusalan suurimmista haasteista [2].

Aihe on myös yhteiskunnallisesti ja juuri ilmastonmuutoksen kannalta merkittävä energiakonsultoinnin ollessa tärkeässä roolissa tulevaisuuden pyrkimyksessä vähentää rakennusten päästöjä ja pienentää hiilijalanjälkeä [1]. Talotekniikan alan kannalta aihealue on merkittävin kokonaisuus, jolla tullaan ohjaamaan taloteknistä suunnittelua ja rakentamista tulevaisuudessa kohti vähäpäästöisempiä ja hiilineutraalimpia rakennuksia.

Rakennusten energiatehokkuuden parantaminen lisäksi vähentää valtioiden energiariippuvuutta tuontienergiasta, varmistaa energian kysynnän kasvun hallintaa sekä lisää valtion toimintavarmuutta. Energiatehokkuuden kehittäminen tuo myös alalle lisää työllisyyttä, tukee teknologian kehitystä sekä edistää uusia innovaatioita. [1.]

Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia kohderakennusten lämmitysenergianlähteiden optimointia ja energialaskentaa sekä luoda pohja työn tilaajan energia-

konsultointipalveluun. Tutkimus rajattiin kahteen eri kohderakennukseen. Ensimmäinen kohderakennus on Vantaalla sijaitseva toimistorakennus ja toinen on Kuopiossa sijaitseva koulurakennus.

Toimistorakennuksen osalta tutkimus rajattiin ainoastaan optimaalisimman maalämpöratkaisun löytämiseen. Tavoitteena on selvittää rakennuksen lämmityksen huipputehontarve ja optimaalisin teho rakennuksen maalämpöpumpulle. Tutkimuskysymyksiksi muodostui seuraavat:

1. Kuinka paljon on toimistorakennuksen lämmityksen huipputehontarve sekä kuinka tehokas maalämpöpumppu tarvitaan, jotta saadaan katettua 90 prosenttia vuotuisesta lämmitysenergiankulutuksesta?
2. Kuinka paljon energiaa tarvitaan maalämmöstä, jotta saadaan katettua 90 prosenttia toimistorakennuksen vuotuisesta lämmitysenergiankulutuksesta?

Koulurakennusta koskevassa tutkimuksessa tavoitteena on verrata kauko- ja maalämmön ostoenergiankulutusta ja elinkaarikustannuksia käyttökustannusten osalta. Koulurakennusta koskevasta tutkimuskysymyksestä rajattiin ulkopuolelle elinkaarikustannuksiin vaikuttavat investointi ja huoltokustannukset. Tutkimuskysymykseksi muodostui seuraava: Millä tavoin erilaiset lämmitysenergianlähteet vaikuttavat koulurakennuksen ostoenergiankulutukseen ja käyttökustannusten elinkaarikustannuksiin?

Tilaajan energiakonsultointipalvelua koskevan tutkimuksen tavoitteena on rakentaa rakennusten lämmitysenergianlähteiden optimointiin soveltuvia IDA ICE laskenta- ja optimointimalleja, jota voidaan hyödyntää IFC-tietomallin kanssa. Tutkimuskysymykseksi muodostui seuraava: Kuinka IDA ICE-ohjelmistolla voidaan luoda rakennuksen lämmitysenergianlähteiden optimointiin soveltuva laskenta- ja optimointimalli, jota voidaan hyödyntää IFC-tietomallin kanssa?

2 TUTKIMUKSEN TAUSTA

Nykypäivän tekniikan innovaatioiden synnyttämän potentiaalin myötä pystytään vastaamaan rakennusten tiukentuneisiin päästövaatimuksiin. Esimerkiksi yhä enemmän rakennusautomaatiolla toteutetut rakennukset sekä talotekniikan datankeräämisen mahdollistuminen ovat avanneet keinon rakennusten entistä tehokkaampaan käyttöön ja energiahukan minimointiin asumismukavuuden säilyessä. Viime vuosikymmenten aikana juuri rakennuksen energiatehokkuuden optimointiin liittyvä tutkimustoiminta on kasvanut. [3.]

IDA ICE -ohjelmisto sopii hyvin muun muassa rakennuksen energiatehokkuuden kustannusoptimointiin. Tämän osoittaa esimerkiksi Jokisalon ym. [4] suorittama tutkimus Suomessa sijaitsevaan ikäihmisten palvelukotiin, jonka tavoitteena oli määrittää kustannusoptimaalisia ratkaisuja vanhan palvelurakennuksen energiantuotantojärjestelmän energiaremonttia ja uusiutuvia energialähteitä varten. Tutkimus osoitti IDA ICE-ohjelmiston rakennussimulointityökalun avulla, että kyseiseen rakennukseen kustannusoptimaalisin lämmitysjärjestelmä on kaukolämmön sijasta vesi-ilmalämpöpumppu. [4.]

Salvalain [5] tuottaman tutkimuksen, IDA ICE- ohjelmiston simulaatioympäristön kyvystä validoida uusi lämpöpumppumalli, mukaan ohjelmisto sopii lämpöpumppujen mallintamiseen. Tutkimusartikkelissa verrattiin maalämpöpumppujärjestelmän kenttäkoetietoja simulaatietietoihin ja tulosten mukaan ohjelmistolla rakennetut mallit vastasivat lämpöprosessien odotettuja trendejä. [5.]

2.1 Rakennuttamista ja suunnittelua ohjaavat direktiivit ja asetukset

Rakennuttamista ja suunnittelua ohjaavat lukuisat määräykset, direktiivit ja asetukset. Esimerkiksi uudisrakentamista sitouttaa päästöjen vähentämiseen ja energiatehokkuuteen pyrkivät rakennusmääräykset. [1.] Oman osansa rakennuttamisen sääntelyyn on tuonut myös Euroopan unioni, jonka toimesta energiatehokkuusvaatimukset ovat tiukentuneet järjestelmällisesti jo 20 vuoden ajan. [6.]

2010/31/EU rakennusten energiatehokkuusdirektiivi määrittää sekä uudis- että korjausrakentamista koskevien rakennusten energiatehokkuuden parantami-

seen tähtääviä asetuksia ja sitä kautta tavoittelee hiilidioksidipäästöjen vähene- mistä. Direktiivin uudistus 2018/44/EU tähtää myös vähähiilisen rakentamisen kautta hiilidioksidipäästöjen hillitsemiseen. Muutos mahdollistaa olemassa ole- vien rakennusten peruskorjaukset kustannustehokkaasti ja lisää rakennuksissa käytettävää älyteknologian määrää. [7.]

2012/27/EU Euroopan parlamentin ja neuvoston energiatehokkuusdirektiivi sekä sen muutos (EU)2018/2002 energiatehokkuusdirektiivi määrittävät EU- sekä kansallisen tason energiatehokkuustavoitteista, energiasäästövelvoit- teesta kansallisesti sekä toimenpiteistä energiatehokkuuden edistämiseksi [8]. Direktiivi käsittää energiatehokkuutta tavoittelevaa uudistusta, jonka myötä pys- tytään tuottamaan muun muassa energiatehokkaampia rakennuksia ja tuot- teita. Direktiivi ohjaa jäsenvaltioiden rakennuttamista määräyksellä, jonka mu- kaan rakennusten laajamittaisissa korjaustöissä varmistetaan energiatehok- kuuden parantaminen vähimmäisvaatimukset täyttävälle tasolle. [9.] Alla ole- vassa kuvassa 1 on esitetty EPBD-direktiivin vaikutus Suomessa.



Kuva 1. EPBD-direktiivin vaikutus Suomessa [6]

Vuoden 2018 uudistuksessa direktiiviin laajennettiin lähes nollaenergiatavoite koskemaan koko rakennuskantaa. Lisäksi nyt vuonna 2022 direktiivin lisäsehdotuksen mukaan vuoteen 2027 mennessä uusien julkisten rakennusten tulee olla nollaemissiorakennuksia, kuten myös muiden rakennusten vuoteen 2030 mennessä. [6.]

Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatodistuksesta 1048/2017 käsittelee rakennuksen energiatodistuksen laadintaa ohjaavaa lainsäädäntöä. Asetuksessa määritetään rakennuksen laskennallisen energiatehokkuuden vertailuluvun laskemisesta sekä rakennuksen energiatehokkuusluokittelusta. Asetuksen mukaan rakennuksen rakennusosien ja teknisten järjestelmien energiatekninen tila tulee arvioida sekä rakennuksen kustannustehokkaat energiansäästömahdollisuudet tulee määrittää huonontamatta sisäilmasto-olosuhteita. [10.]

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017 ohjaa sisäilmaston olosuhteiden säilyttämiseen energiaa käyttävää uudisrakentamista. Asetuksessa käsitellään myös rakennuksen laajennusta sekä tilan lisäämistä kerrosalaan laskettavaan tilaan. Lisäksi asetus määrittää rakennuksen energiatehokkuuden vähimmäisvaatimukset ja E-luvun raja-arvot. [11.]

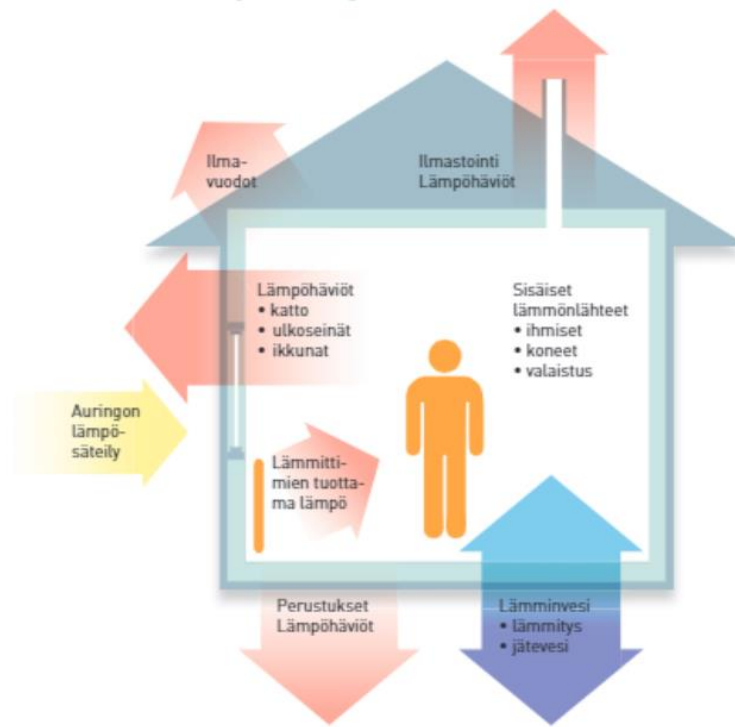
Toinen sisäilmaston olosuhteita säätelevä asetus on Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017. Asetuksessa käsitellään rakennuksen sisäilmastoa, ilmanvaihtoa ja ilmanvaihtojärjestelmiä sekä niiden käyttöönoton mittauksia, suunnittelua sekä rakentamista. Asetuksen mukaan uuden rakennuksen sisäilmaston suunnittelussa on otettava huomioon sisäiset ja ulkoiset kuormitustekijät sekä sijainti ja rakennuspaikka. Myös rakennuksen käyttötarkoituksenmukainen sisäilmasto on otettava huomioon suunniteltaessa esimerkiksi rakennuksen energiatehokkuutta. Lisäksi asetuksessa määritetään sisäilmastoon vaikuttavat huonelämpötilojen suunnitteluarvot, sisäilman laatu ja kosteus sekä ilmanvaihdon ilmavirtojen ohjaukseen vaikuttavat tekijät. [12.]

2.2 Rakennusten energiatehokkuus

Suomessa 30 prosenttia kasvihuonepäästöistä aiheutuu ainoastaan rakennusten energiankäytöstä. Rakennusten energiatehokkuuden saavuttaminen on täten tärkeässä roolissa hillitsemässä ilmastonmuutosta. Energiatehokkuuden vaikutuksia arvioitaessa täytyy ottaa huomioon uudisrakentamisen vaikuttavan rakennuskannan energiatehokkuuteen vasta pidemmällä ajanjaksolla. Tämän vuoksi myös energiatehokas korjausrakentaminen on nykyhetken kannalta keskeistä päästöjen vähentämisen näkökulmasta. [1.]

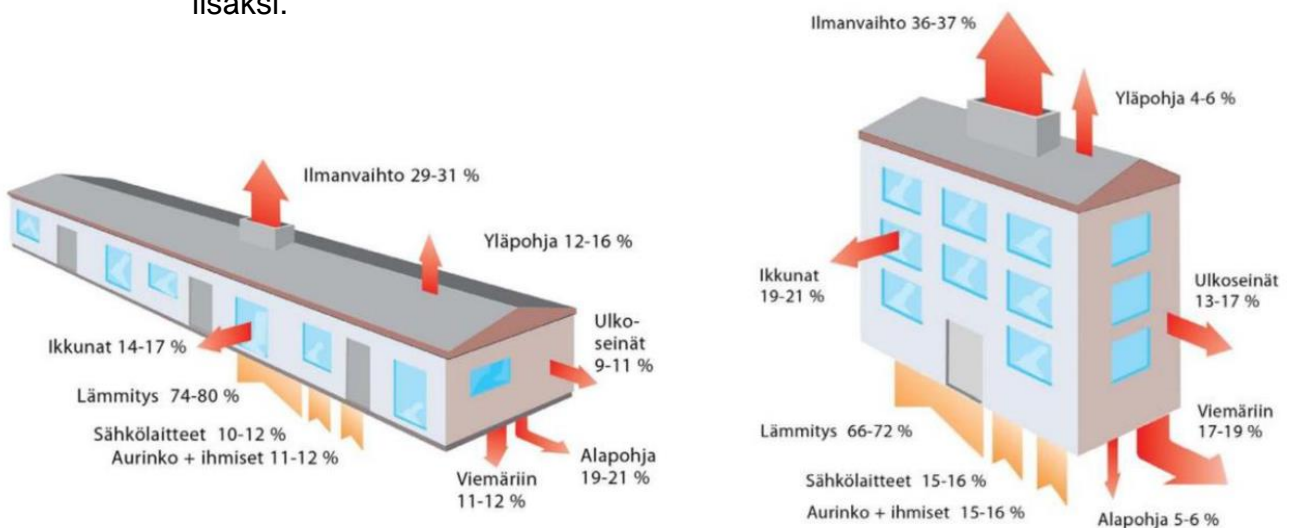
Rakennusten energiankulutus koostuu rakennuksen sähkölaitteiden ja valaistuksen käytöstä, lämmityksestä sekä mahdollisesta jäähdytyksestä [1]. Rakennuksen energiatehokkuuden saavuttamiseen vaikuttaa keskeisimmin rakennus- ja talotekniikan tarjoamien ratkaisujen sovittaminen yhdessä sekä rakennuksen energiatehokkuuteen vaikuttavien seikkojen kokonaisuuden hallinta [13]. Rakennukselle tulee asettaa energiankulutustavoitteet lämmön-, sähkön- ja vedenkäytölle sekä mahdolliselle jäähdytysjärjestelmälle. Lisäksi niitä tulee seurata järjestelmäkohtaisilla energiamittauksilla, jotka mahdollistavat kulutusseurannan myös tuntikohtaisesti. [1.]

Suunniteltaessa energiatehokkaita ratkaisuja laskelmat ja simuloinnit toimivat tärkeässä roolissa työn tukena, joiden kautta saavutetaan ymmärrys, mitä suunnittelulla tavoitellaan ja millä hinnalla [13]. Energiatehokkuuden kannalta uudisrakennusta suunniteltaessa mahdollistuu uusien innovaatioiden hyödyntäminen toteutusratkaisuja pohtiessa. Tällöin kannattaa ottaa huomioon rakennuksen erilaiset tilaratkaisut, vaihtoehtoisten lämmitysjärjestelmien mahdollisuus sekä rakennuksen pintojen hyödyntäminen energiantuotannossa. Korjausrakentamisessa puolestaan korostuu energiankulutuksen pienentämiseen tähtäävät ratkaisut. Vanhan rakennuksen korjauksessa tulee huomio kiinnittää energiankulutukseen sekä rakennuksen tiiveyteen uusiin lämmityslaitteisiin investoinnin sijaan. Huomionarvoista on myös, että joskus on hyödyllisempää rakentaa kokonaan tai osittain uusi rakennus vanhan korjaamisen sijasta. [1.] Sivulla 11 olevassa kuvassa 2 on esitetty rakennuksen lämpöhäviöt ja mistä rakennukseen tuleva lämpöenergia muodostuu.



Kuva 2. Esimerkki rakennuksen lämmitysenergiasta ja lämpöhäviöistä [14]

Kuvasta 2 nähdään rakennuksen lämpöhäviöihin vaikuttavat tekijät ja rakennuksen lämpöenergianlähteet sekä rakennuksen muut sisäiset energianlähteet, jotka vaikuttavat rakennuksen energiankulutukseen. Kuvassa näkyvät lämminvesi, lämmitys ja jätevesi tuovat myös rakennukseen lämpöenergiaa häviöiden lisäksi.



Kuva 3. Rakennusten lämpöhäviöiden vertailu rivi- ja kerrostalon välillä [17]

Yllä olevassa kuvassa 3 on esitetty, kuinka eri rakennustyyppisissä rivi- ja kerrostalossa lämpöhäviöiden prosenttiosuus (%) vaihtelee riippuen rakennos- osasta. Kuitenkin kuvista voidaan huomata, että merkittävin säästö energian

suhteen voidaan tehdä lämmöntalteenotolla ilmanvaihdosta kummassakin rakennustyyppissä. Muita merkittäviä lämpöhäviöitä aiheutuu esimerkiksi ikkunoiden ja viemäriin kautta.

Kuvasta 3 lisäksi voidaan huomata rakennusten ylä- ja alapohjista muodostuvien lämpöhäviöiden olevan suurempia rivitalossa kuin kerrostalossa. Kerrostalossa heikompana rakenteena ovat ulkoseinät ja ikkunat. Kuvassa on myös havainnollistettu, kuinka eri rakennustyyppi vaikuttaa rakennuksen lämpöenergianlähteisiin.

3 TUTKIMUSMENETELMÄT

Opinnäytteessä työmenetelmien teoreettista taustaa tutkitaan ja tuetaan saman aihealueen tutkimuksilla ja kirjallisuudella. Työhön käytetään tutkimusmenetelmänä dynaamisen laskennan IDA ICE -ohjelmistoa, jonka avulla voidaan tehdä tutkittaviin mallirakennuksiin tarkasteltavia energiasimulointeja sekä -optimointia. Simulointien ja optimoinnin avulla voidaan selvittää tarkasteltavalle rakennukselle optimaalisin lämmitysenergianlähde sekä tarvittaessa tarkastella rakennuksen jäähdytystarvetta ja mahdollisuutta aurinkoenergian hyödyntämiseen.

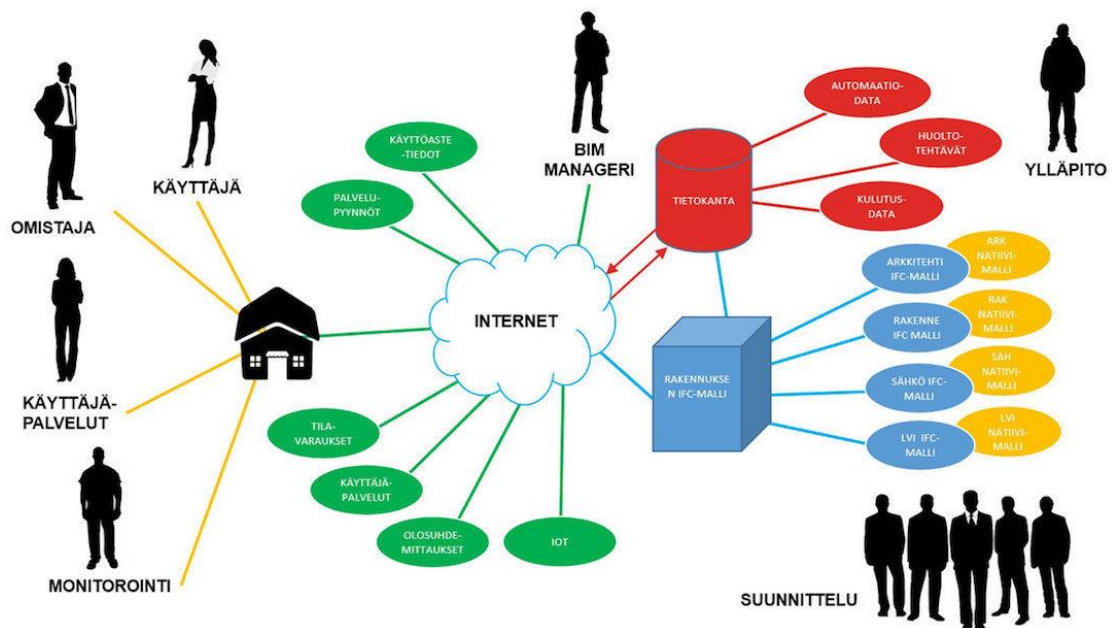
Työssä käytettäviä mallirakennuksia ovat koulu- ja toimistorakennus, joista on luotu valmiit IFC-tietomallit sekä vertailukelpoista laskentadataa. Tietomallien tarkasteluun ja korjauksiin käytetään ArchiCAD- ja Simplebim-ohjelmistoja.

IDA ICE -ohjelmistolla luodaan laskenta- sekä optimointimallit, joiden toimintaa testataan tutkittavien mallirakennuksien lämmitysenergiaratkaisuihin. Laskenta- ja optimointimallien luontia varten tutkitaan ensin yleisesti merkittävimmät energiatehokkuuden parantamiseen olevat vaikutuskeinot, joiden avulla ohjelmalliset komponentit luodaan.

Aihealueen kirjallisuuteen, säädöksiin ja ohjeistuksiin perehtymällä saavutetaan vaadittava teoriapohja opinnäytetyölle, jonka avulla voidaan toteuttaa IDA ICE -ohjelmistolla vaadittavat optimoinnit sekä simuloinnit laskentamallien testausta varten. Työmenetelmiä tuetaan meneillään olevilla opintojaksoilla sekä alan asiantuntijoiden tietotaidolla.

4 RAKENNUKSEN TIETOMALLI

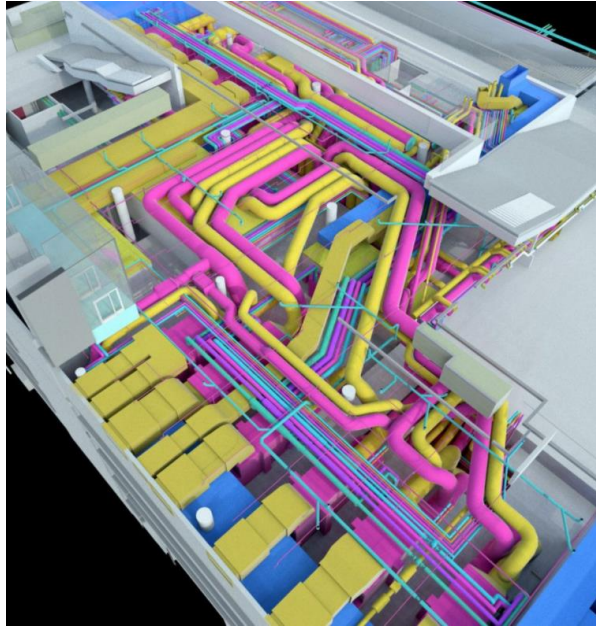
Building information model (BIM) eli rakennuksen tietomalli tarkoittaa rakennuksen toimintojen materiaalista ja dynaamista kuvausta sähköisesti 3-ulotteisessa muodossa, mikä mahdollistaa rakennustietojen jakamisen, vaihdon ja hyödyntämisen eri tahojen kesken. Tietomalli on käytännössä digitaalinen kokonaisuus eri suunnittelijoiden malleista kasatusta, rakennuskohteen sekä rakennusprosessin elinkaaren aikaisten tietojen yhdistelmämallista. [16; 17.] Tavoitteena on, että yhden tietomallin avulla pystyttäisiin ohjaamaan ja valvomaan rakennuksen suunnittelua, toteutusta, ylläpitoa sekä purkamista koko sen elinkaaren ajan [16]. Alla olevassa kuvassa 4 on havainnollistettu tämä tietomallien hyödyntämistavoite läpi rakennuksen elinkaaren.



Kuva 4. Tietomallin käyttömahdollisuudet rakennuksen käytön ja suunnittelun aikana [18]

IFC-malli (Industry Foundation Classes) käsittää yleistä tietomalliohjelmistojen selitystapaa tietomalleista. IFC-kirjainyhdistelmä tarkoittaa myös mallien avointa tiedonsiirtomuotoa, joka mahdollistaa niiden siirtämisen ohjelmistojen välillä. [18.] IFC-malleja käytetään yhdessä dynaamisten laskentaohjelmistojen kanssa rakennuksen simuloinnin sekä optimoinnin suorittamiseksi. IFC-malleja luodaan rakennushankkeissa rakennesuunnittelijan, arkkitehdin, LVIS- ja geosuunnittelijoiden toimesta. Eri IFC-malleista voidaan koostaa yhdistelmämalli,

jota kutsutaan SMC-malliksi. Alla olevassa kuvassa 5 on esitetty esimerkki yhdistelmämallin leikkauksesta. Leikkauksesta on nähtävillä myös rakennuksen talotekniikkaa.



Kuva 5. Leikkaus rakennuksen yhdistelmämallista [19]

5 ENERGIAKONSULTOINTI

Energiakonsultointi käsittää yrityksen tarjoamia asiantuntijapalveluita kohderakennusten energiatehokkuuden, elinkaarikustannusten tai olosuhteiden selvittämiseksi. Lisäksi konsultointiin kuuluu asiantuntijoiden analyysi kohteen optimaalisimmista energiaratkaisuista kustannusten ja ympäristön näkökulmasta. Energiakonsultointi on kannattavaa rakennusprojektin alun tarveselvityksestä ja suunnittelusta, itse rakentamiseen ja käyttöönottovaiheeseen, jotta koko hanke saavuttaisi vähäpäästöisen lopputuloksen. Energiakonsultoinnin mahdollistavina työn apuvälineinä käytetään energiasimulointia, E-lukulaskentaa, olosuhdesimulointia sekä monitavoiteoptimointia. [20.]

5.1 Energiaoptimointi ja -simulointi

Energiaoptimointia ja olosuhdesimulointia tehdään rakennuksille, jotta voitaisiin saavuttaa mahdollisimman kustannus- ja energiatehokkaat ratkaisut. Optimoinnilla tarkoitetaan parhaan ratkaisun löytämistä olosuhteiden rajoitteiden puitteissa [21]. Energiaoptimointi taas käsittää tilannetta, jossa optimoinnin keinoin

pyritään löytämään parhaimpia ratkaisuja rakennuksen energiatehokkuuteen nähden eri suunnitteluvaihtoehdoista [22].

Rakennuksen energiaoptimointi toimii päätöksenteon tukena tilanteissa, jossa tarvitaan riittävää informaatiota moniselitteisiä valintoja varten [22]. Simulointiin perustuva optimointi on tehokas menetelmä suunnittelu- ja päätösmuuttujien optimaalisten arvojen löytämiseksi rakennuksen vaipan, lämmitys-/jäähdytysjärjestelmissä ja energiantuotantojärjestelmissä. Optimointityökalujen avulla optimaalisten ratkaisujen löytäminen saavutetaan pienemmässä ajassa verrattuna kattavaan hakuun. [23.] Sen avulla voidaan saada tietoa nopeasti jopa tuhansista eri suunnitteluvaihtoehdoista sekä niiden systemaattisesta vertailusta [22]. Lisäksi simulointiin perustuvan optimoinnin avulla pystytään löytämään optimaalisia ratkaisuja energiapäästöjen ja kustannusten minimointiin sekä sisäilman laadun maksimointiin pyrkivissä lähes nollaenergiarakennusten toteutuksissa [23].

Simuloinnilla tarkoitetaan rakennuksen tietomallia arkkitehdin suunnitelmista, joka mahdollistaa haluttujen tekijöiden vaikutuksien tutkimisen rakennuksen toiminnassa. Simuloinnin avulla pystytään myös havainnollistamaan rakennus ja sen eri tilat animaatioilla. Yleisimmin rakennuksesta simuloidaan rakennuksen energiankulutus, sisätilojen viihtyvyys ja rakenteellinen energiatehokkuus. [24.]

5.1.1 Optimointi IDA ICE -ohjelmistolla

IDA ICE -ohjelmistolla voidaan suorittaa optimointia Parametric Run -työkalun avulla. Työkalulla suoritetaan simulaatiosarja, jossa parametreja vaihdellaan järjestelmällisesti. Samaan aikaan tietorakenteessa tapahtuu tarvittaessa muutoksia eri objektien lisäämisen tai korvaamisen johdosta. Työkalulla voidaan myös visualisoida rakennuksen simulaatiotulokset esimerkiksi taulukko ja kaaviomuotoon. Ohjelmalla pystytään suorittamaan rakennukselle erilaisia simulaatioita tarpeen mukaan. Run all -simulaatiolla voidaan simuloida kaikki määritetyt parametriarvojen yhdistelmät, kun taas Run optimization -simulaatio on tarkoitettu GenOpt -lisäohjelmiston kanssa käytettäväksi. Monte-Carlo-simulaatiolla suoritetaan määritetty määrä simulaatioita satunnaisella parametriarvojen valinnalla. Sensitivity analysis -simulaatio on tarkoitettu kaikille annetuille parametrien arvoille, jolloin kahdella erillisellä simulaatiolla haetaan suurin ja pienin

parametrin arvo. Parametric Run -ominaisuudella voidaan optimoida erilaisia rakennuksia ja järjestelmiä. Optimointia tuetaan Graphical script -toiminnon avulla, jossa voidaan suorittaa järjestelmäkohtaista laskentaa energian, lämmitys- ja jäähdytystehon osalta. [25.]

IDA ICE -ohjelmiston optimoinnin avulla voidaan etsiä esimerkiksi optimaalisin lämmitysenergianlähde tai selvittää rakennuksen energiankulutus kokonaisuudessaan. IDA ICE -ohjelmistolla voidaan myös optimoida ikkunoiden ja rakenteiden ominaisuuksia, tuloilman lämpötilaa tai aurinkoenergiajärjestelmien mitoitusta sekä lisäosien avulla esimerkiksi energiakaivoja. [26.]

5.1.2 IDA ICE -ohjelmiston laskenta- ja optimointimallit

IDA ICE -ohjelmistoon voidaan luoda valmiita mallipohjia erilaisten työkalujen avulla. Erityistyökalu on ESBO Plant, jolla voidaan tutkia erilaisia rakennussuunnittelu- sekä taloteknisiä ratkaisuja ja arvioida ratkaisujen vaikutuksia elinkaarikustannuksiin, energiankulutukseen ja asumisviihtyvyyteen. ESBO-ohjelman mallilla voidaan lisäksi tarkastella rakennuksen tilakohtaisia ominaisuuksia erilaisin suunnitteluratkaisuin ja niiden vaikutusta kohteen energiatehokkuuteen. [27.]

IDA ICE -ohjelmistoon voidaan tuoda myös esimerkiksi rakennuksen IFC-malli, jonka erilaisia rakenne- ja taloteknisiäsuunnitteluratkaisuja muuttamalla voidaan toteuttaa erilaisia simulaatioita mallirakennukselle. Mallista voidaan luoda eri versioita, joiden avulla voidaan vertailla erilaisten ratkaisujen vaikutusta rakennuksen energiatehokkuuteen ja kustannuksiin. Yksityiskohtaisten ja helposti muokattavien mallien avulla rakennus- ja tilakohtainen tarkastelu sujuu vaivattomasti. [28; 29.]

5.1.3 Simulointi IDA ICE -ohjelmistolla

IDA ICE -ohjelmistolla voidaan toteuttaa rakennukselle erilaisia simulaatioita kohteen tarpeiden mukaisesti. Simulaatioilla voidaan laskea rakennuksen tai yksittäisen tilan lämmitystehontarve sekä ilmanvaihdon ja käyttöveden lämmityksen tarvitsema lämmitystehontarve. Rakennuksiin ja tiloihin voidaan myös

simuloida jäähdytyksen tarvetta sekä tilan tarvitsemaa jäähdytystehoä. Jäähdytys­simulaatiolla saadaan myös simuloitua ilmanvaihdon tarvitsema jäähdytys­teho. Jäähdytys­simulaatio voidaan jakaa erillisiin tarkastelujaksoihin esimerkiksi kuukausikohtaisesti. Myös varjostusten vaikutusta jäähdytystehontarpeeseen voidaan tutkia ohjelmistolla. IDA ICE -ohjelmistolla voidaan toteuttaa myös rakennuksen energiankulutuksen simulointia. Energiasimuloinnin avulla voidaan selvittää rakennuksen järjestelmäkohtaiset energiankulutukset sekä -tarpeet. Tarkastelua voidaan tehdä vuotuisella tasolla tai pienemmillä ja tarkemmillä ajanjaksoilla. Myös rakennukselle tai yksittäiselle tilalle voidaan tehdä ylä­lämpenemissimulaatio. Ylä­lämpenemissimulaation avulla voidaan selvittää huone­tilan lämpötiloja ja kartoittaa, ylittävätkö lämpötilat asetusten määräämät raja­arvot. Muutoin rakennuksen jäähdytystarve voidaan selvittää jäähdytystarve­simulaatiolla. [30. s. 49–61.]

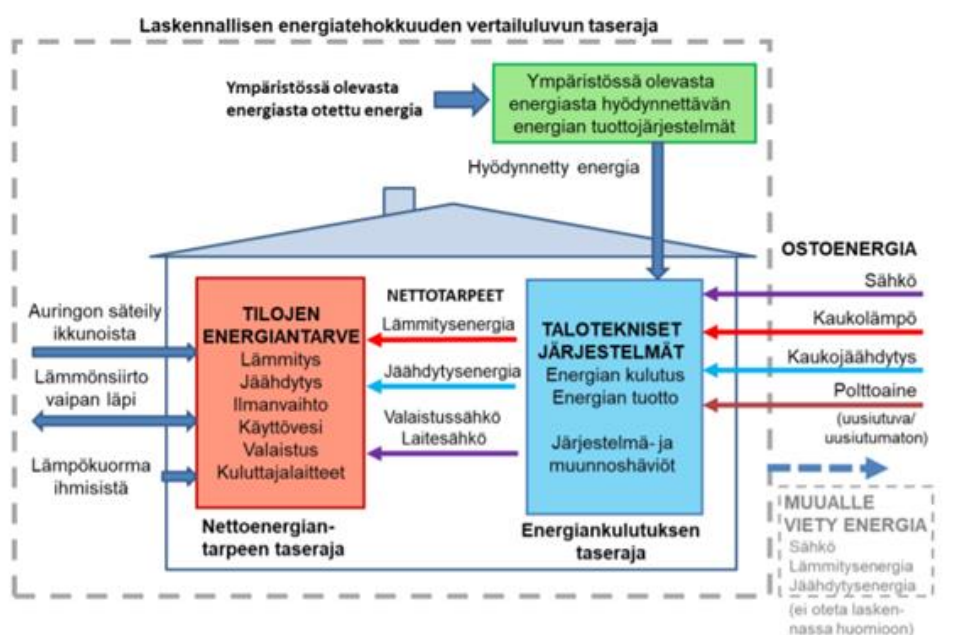
IDA ICE -ohjelmisto tarjoaa mahdollisuuden rakennuksen olosuhdesimulointiin esimerkiksi päivänvalon laskennan, luonnollisen, hybridimallin, tai tarveohjatun ilmanvaihdon laadinnan sekä lattialämmityksen sekä -jäähdytyksen valinnan osalta. Myös käyttäjän itse määrittämien järjestelmien, erilaisten tuuletettujen julkisivujen ja ikkunoiden sekä lämmityksen osalta ohjelmistossa voi simuloida eri olosuhteita rakennukselle. [31.] IDA ICE -ohjelmistossa on käytössä lisäksi ASHRAE 90.1 -laajennus standardista, joka määrittää vähimmäisvaatimukset energiatehokkaan rakennuksen suunnittelulle [32]. Laajennus hyödyntää tiettyä mittausmenetelmää rakennuksen energiatehokkuuden määrittämiseksi. Sama mittausmenetelmä on käytössä myös LEED- JA BREEAM-ympäristöluokituksissa. [33.]

5.2 Energialaskenta

Rakennuksen energialaskenta suoritetaan ympäristöministeriön laatimien energiatehokkuus- ja tasauslaskentaoppaiden mukaisesti. Oppaiden taustalla rakennuttamista ohjaa ympäristöministeriön rakennuttamista koskevat asetukset. Energiatehokkuutta koskevassa oppaassa ohjataan rakennuksen energiankulutusta ja lämmitystehontarvetta koskevaa laskentaa [34]. Tasauslaskentaoppaassa puolestaan määritellään rakennuksen lämpöhäviöiden tasauslaskenta, lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen laskenta sekä vaipan ilmanpitävyyden osoittaminen [35].

Rakennuksen energialaskenta tulee aloittaa jo energiatehokkaan rakennuksen suunnitteluvaiheen alussa. Tällöin rakennuksen suunnitteluvaiheeseen ja mahdollisiin tarvittaviin muutoksiin voidaan hyödyntää energialaskennan avulla saatuja tuloksia. Lisäksi energialaskenta auttaa tarkkailemaan koko suunnittelun ajan, pystytäänkö tavoiteltu energiatehokas rakennus toteuttamaan samalla suunnitelmalla. [36.]

Rakennuksen kokonaisenergiailaskentaan kuuluu osana myös rakennuksen ostoenergian kulutuksen laskenta. Ostoenergian kulutus käsittää energiaa, joka ostetaan rakennukseen esimerkiksi kaukolämpö-, sähkö- tai kaukojäähdytysverkosta tai ostetaan polttoaineena. [37.] Alla olevassa kuvassa 6 havainnollistetaan rakennuksen ostoenergian koostuminen rakennuksen tilojen energiantarpeella sekä teknisillä järjestelmillä. Ostoenergian ominaiskulutuksen pienentämiseksi rakennuksen suunnitelmaan tehdään usein muutoksia. Esimerkiksi lämmöneristystason parantaminen, tehokkaamman lämmöntalteenottolaitteen suunnittelemine, toisen energiamuodon valitseminen tai ikkunapinta-alan pienentäminen ovat tavanomaisia parannuskeinoja ostoenergian kulujen leikkaamiseksi. [38.]

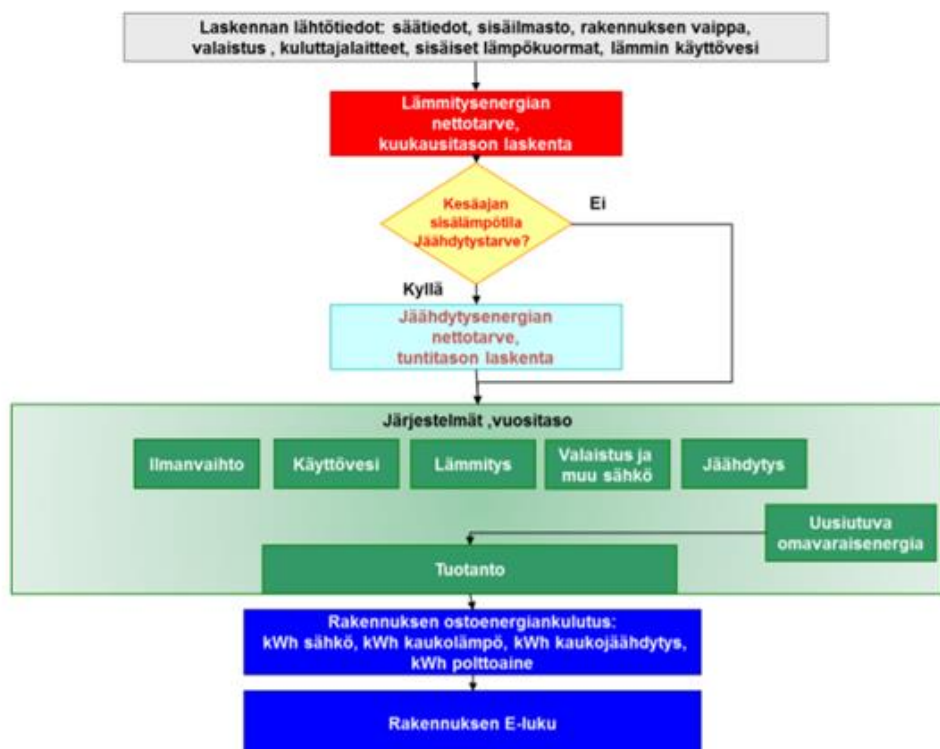


Kuva 6. Rakennuksen energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät ja taserajat [34, s.15]

5.2.1 E-luku

E-luvulla tarkoitetaan rakennuksen energiatehokkuuden laskennallista vertailulukua. E-luku muodostuu rakennuksen laskennallisesta ostoenergiankulutuksesta rakennuksen lämmitettyä nettoalaa kohden vuodessa rakennuksen energiamuotojen kertoimilla painotettuna. Rakennuksen energiatehokkuuden laskennallisen vertailuluvun yksikkönä toimii kWh_E/(m² a). [38.]

Rakennuksen E-lukuun vaikuttaa suoraan rakennuksen käyttöveteen ja tiloihin käytettävä energiamuoto. Kaukolämmöllä, biopolttoaineilla tai maalämpöpumpulla tapahtuva lämmitys täyttää helposti rakennuksen E-lukuvaatimukset. Rakennuksen sähkölämmitys puolestaan vaatii erittäin energiatehokkaita ratkaisuja tai myös uusiutuvia energianlähteitä lämmitysjärjestelmäänsä, jotta vaatimukset E-luvulle saavutettaisiin. [39.] Rakennuksen E-luku määritetään laskentatyökalulla, joka pystyy hyödyntämään kuukausitason tai dynaamista tuntitason laskentamenetelmää [10]. Alla olevassa kuvassa 7 on esitetty E-lukulaskennan kulku.



Kuva 7. E-lukulaskennan kulku [34, s.14]

5.2.2 Energiatodistus ja -selvitys

Rakennuksen energiatodistuksella tarkoitetaan Suomessa vuodesta 2008 uudisrakentamisessa ja vuodesta 2009 myynti- ja vuokraustilanteissa suurissa rakennuksissa sekä uusissa pientaloissa käytössä ollutta, rakennuksen energiatehokkuuden tarkasteluun tarkoitettua työkalua [40]. Todistus pohjautuu rakennuksen ominaisuuksien ja teknisten järjestelmien aiheutuvaan energiankulutukseen [41].

Rakennuksen energiatodistuksella on tärkeä rooli uudistuvan energian käytön ja energiatehokkuuden edistämässä [42]. Laki rakennuksen energiatodistuksesta mahdollistaa rakennusten energiatehokkuuden vertailun sekä edistää energiatehokkaita rakennusratkaisuja [43].

Energiatodistus on voimassa uuden todistuksen laatimiseen saakka, mutta enintään kymmenen vuoden ajan [43]. Rakennuksen energiatodistuksessa tulee tuoda ilmi toteutunut energiankulutus sekä laskennalliseen kulutukseen perustuva energiatehokkuusluokka sekä E-luku [41]. Lisäksi todistuksessa tiedotetaan asiantuntijan kokoamia säästösuosituksia, joiden myötä mahdollistuu tarvittaessa rakennuksen energiatehokkuuden parantaminen [40]. Sivulla 21, kuvassa 8 on esitetty esimerkki olemassa olevan energiatodistuksen kansilehdestä.

ENERGIATODISTUS 2018	
Rakennuksen nimi ja osoite:	Väli ARA Malkku 1 15140, LAHTI
Pysyvä rakennustunnus:	101089527F
Rakennuksen valmistusvuosi:	2005
Rakennuksen käyttötarkoituksiluokka:	Yhden asunnon talot
Todistustunnus:	1688
Energiatodistus on laadittu	
<input type="checkbox"/> Uudelle rakennukselle rakennuslupaa haettaessa	
<input type="checkbox"/> Uudelle rakennukselle käyttöönottovaiheessa	
<input checked="" type="checkbox"/> Olemassa olevalle rakennukselle, havainnointikäynnin päivämäärä: 14.2.2018	
	Energiatodistuksen luokitus
A	
B	
C	C 2018
D	
E	
F	
G	
Rakennuksen laskennallinen energiatehokkuuden vertailukulu ei E-luku Uuden rakennuksen E-luvun vaatimustaso	kWh _e /(m ² vuosi) 168 ≤ 140
Todistuksen laatija: HST-PRÄVSTRÖM, TESTKORT3844	Yritys: Yritys Oy Yrittäjäkatu 1 15140, LAHTI
Sähköinen allekirjoitus: HST-PRÄVSTRÖM, TESTKORT3844 15.2.2018 13:38:47	
Todistuksen laatimispäivä: 15.2.2018	Viimeinen voimassaolopäivä: 15.2.2028

Kuva 8. Esimerkki energiatodistuksen kansilehdestä [43]

Rakennuksen energiatodistuksen laatii tehtävään koulutautunut ammattilainen, jolla tulee olla tehtävään soveltuva tekniikan alan tutkinto tai tutkinnon korvaava alan työkokemus sekä hyväksytyt suoritukset energiatodistuksen laatijakoosteesta. Energiatodistuksen laatimiseen hyväksytyt ammattihenkilöt rekisteröidään laatijoita koskevaan rekisteriin. Energiatodistus on osa rakennuksen energiaselvitystä. [43.]

Rakennusta suunniteltaessa tulee laatia energiaselvitys, joka sisältää asetuksen 1010/2017 4 §:n mukaisen E-luku laskennan ja keskeisimmät lähtötiedot sekä tulokset. Rakennusten lämpöhäviöiden tulee täyttää 23 §:n mukaiset vaatimukset ja koneellisen ilmanvaihtojärjestelmän 30 §:n mukaisesti ilmanvaihdon ominaissähkötehon. Vaihtoehtoisesti pykälien 23 §:n ja 30 §:n jäädessä toteutumatta rakennuksen on täytettävä 33 §:n rakenteellisen energiatehokkuuden vaatimukset. Energiaselvityksen tulee lisäksi sisältää laskennallisen kesäajan huonelämpötilan tarkastelun 29 §:n mukaisesti ja rakennuksen energiatodistuk-

sen laadinnan, mikäli energiatodistuksen lainsäädäntö sitä edellyttää. Energiaselvitys tulee päivittää ennen rakennuksen käyttöönottoa rakennuksen ollessa lupavaiheessa. [11.]

5.2.3 Dynaamiset laskentaohjelmistot

Dynaamisten laskentaohjelmistojen suorittaman energialaskennan avulla pystytään huomioimaan vaihtuvien ympäristömuuttujien, kuten auringonsäteilyn voimakkuuden ja ulkolämpötilan, vaikutukset vuorokausitasolla rakennuksen rakenteisiin varastoituneen lämpöenergian vaihteluun. Juuri dynaamisen laskentamenetelmän kyky antaa perusteellista tietoa rakennuksen toiminnasta tarvittaessa tuntikohtaisesti tekee ohjelmistosta suositun työkalun monimutkaisten ja suurien rakennuskohteiden suunnitteluun. [44.]

IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) on EQUA Simulation AB:n simulointityökaluihin keskittyneen yrityksen valmistama ohjelmisto, joka on tarkoitettu rakennuksen energiatehokkuuden laskentaan. IDA ICE -ohjelmisto mahdollistaa rakennuksen sekä sen järjestelmien että säätimien monivolyymimallinnuksen. Ohjelmiston energialaskennan keinoin pystytään analysoimaan rakennuksen energiankulutuksen kokonaisuutta ja lämpötasetta. Laskennan tulosten avulla voidaan taata rakennuksen vähäinen energiankulutus sekä korkea asumisviihtyvyys. [45.]

Toinen rakennuksen lämpöteknisen toiminnan laskentaan kehitetty ohjelmisto on insinööritoimisto Olof Granlund Oy:n valmistama Riuska. Kyseinen ohjelmisto käyttää hyödykseen rakennuksen tietomallia (BIM) olosuhde- ja energiasimulointiin. Riuska hyödyntää rakennusten tietomalleja IFC-muodossa sekä kykenee laskemaan vuotuisen energiankulutuksen tuntikohtaisesti. Lisäksi ohjelmistolla pystyy huomiomaan rakennuksen huoneiden lämpötilat ja niiden pysyvyyden sekä jäähdytys- ja lämmitystarpeet. [46.] Dynaamisen tuntitason laskennan lisäksi voidaan toteuttaa myös kuukausitason laskentaa, jolloin laskennassa huomioidaan ainoastaan sähkö- ja lämmitysenergian kulutus [10].

6 TUTKIMUKSEN TOTEUTUS

Opinnäytetyön toteutus aloitettiin perehtymällä IDA ICE -ohjelmiston toimintaan ja käyttöön Equa Simulation Finland Oy:n järjestämän kurssin avulla. Kurssin

suorittamisen jälkeen tutustuttiin aiheen kannalta merkittävään aiempaan tietoperustaan tutkimustiedon avulla. Tiedonhaun jälkeen tehtiin Equa Simulation Finland Oy:n laatimia harjoitustehtäviä ja perehdyttiin ohjelmiston Getting Started -oppaaseen sekä muihin ohjelmiston käyttöohjeisiin IDA ICE -ohjelmiston käytön opettelua varten. Ohjelman käyttöä harjoiteltiin myös Equa Simulation AB:n laatimiin opetusvideoihin. Ennen varsinaista tutkimustyön aloitusta perehdyttiin lisäksi IFC- ja DWG-tiedostojen tuomiseen IDA ICE -ohjelmistoon. Laskennoissa käytettiin ympäristöministeriön asetuksen 1010/2017 määrittämiä toimisto- ja opetusrakennuksen arvoja. Rakenteiden U-arvot määritettiin myös asetuksen 1010/2017 uuden rakennuksen vertailuarvojen mukaisesti. Rakenteiden materiaalit ovat määritetty kohteiden mukaisesti. Muut laskennassa käytetyt arvot olivat asetuksen 1010/2017 käyttötarkoituksiluokkien 3 ja 6 vakioidun käytön mukaisia. Laskennan pohjana toimi ympäristöministeriön Rakennuksen energiatehokkuus ja lämmitystehontarpeen laskenta -ohje.

Toteutus eteni johdannossa asetettujen tavoitteiden ja tilaajan toiveiden mukaisesti. Toimistorakennuksen osalta oli tarkoituksena perehtyä vain maalämmön tarkasteluun ja koulurakennuksen osalla kauko- ja maalämpöön vertailuun. Koulurakennuksen elinkaarilaskennan tarkoituksena oli perehtyä vain käyttökustannuksiin, jossa ei huomioitu investointi ja huoltokustannuksia. Tutkimuksessa käytetyt arvot ovat todellisia kohdekohtaisia arvoja, jotka ovat otettu suunnitelmista ja energiaselvityksistä. Muut laskennalliset arvot ovat asetusten ja määräysten mukaisia.

6.1 Toimistorakennus

Tutkimuksessa käytetyn toimistorakennuksen rakennustiedot:

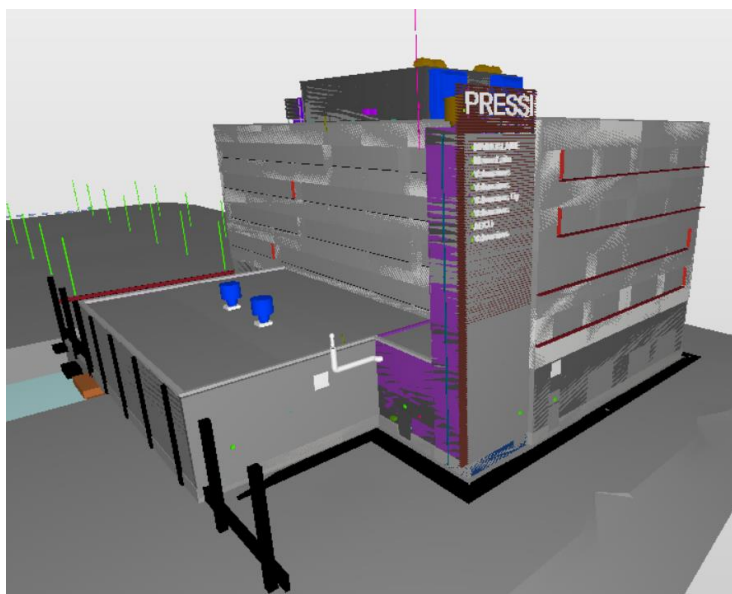
- Sijainti: Vantaa
- Säävyöhyke: I
- Rakennuksen valmistumisvuosi: 2018
- Käyttötarkoitukseluokka: 3 Toimistorakennus
- Energiatehokkuusluokka: B
- Rakennuksen laskennallinen kokonaisenergiankulutus (E-luku): 113 kWh_E/m² a
- Lämmitetty nettoala: noin 6200 m²

- IV-järjestelmä: koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä, pyöri-
vällä lämmöntalteenotolla (vuosihyötysuhde 80 %, SFP = 1,8 kW/m³/s)
- Lämmitysjärjestelmän kuvaus: Kattosäteilijät (+50/30°C)
- $q_{50} = 4 \text{ m}^3/\text{h m}^2$
- Maalämmön keruunesteen keskimääräinen lämpötila: +3°C
- SPF-luvut: tilat: 2,7 / käyttövesi 2,3

RAKENTEET

- Yläpohja: betoniontelolaatta + vesikatto/eristeet
- Alapohja: maan vastainen betonilaatta
- Seinät: betonielementti

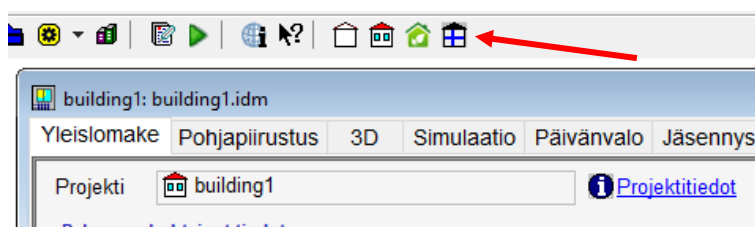
Alla olevassa kuvassa 9 on esitetty toimistorakennuksen SMC-yhdistelmämallista havainnekuva.



Kuva 9. Toimistorakennuksen SMC-yhdistelmämalli

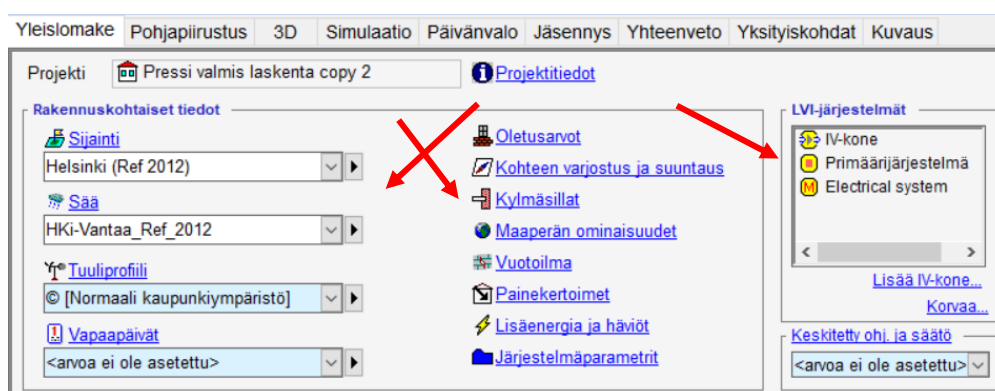
Tutkimustehtävänä oli laskea toimistorakennuksen lämmityksen huipputehontarve sekä selvittää, kuinka tehokas maalämpöpumppu tarvitaan, jotta saadaan katettua 90 prosenttia vuotuisesta lämmitysenergiankulutuksesta. Lisäksi tarkoituksena oli selvittää, kuinka paljon energiaa tarvitaan maalämmöstä, jotta saadaan katettua 90 prosenttia toimistorakennuksen vuotuisesta lämmitysenergiankulutuksesta. Tutkimus suoritettiin IDA ICE -ohjelmistolla.

Aluksi kohderakennuksen IFC-mallia korjattiin ja pelkistettiin Simplebim-ohjelmistolla, jotta laskennasta saataisiin tarkempi sekä mallista poistettua IDA ICE -ohjelmistoa häiritsevät objektit. Mallista poistettiin huonekalut ja IDA ICE-ohjelmistolle tuntemattomat rakenneosat, jotka eivät vaikuttaneet lopullisiin laskelmiin. IFC-mallin korjausten jälkeen tutkimusta jatkettiin perustamalla projekti asetuksen 1010/2017 mukaiselle koulurakennukselle IDA ICE Finland -lokalisoin avulla kuvan 10 mukaisesti, josta valittiin valikosta FINYMa1010 Toimistorakennukset (käyttötarkoitukseluokka 3). Lokalisoin perustamissijainti havainnollistettu kuvassa 10.



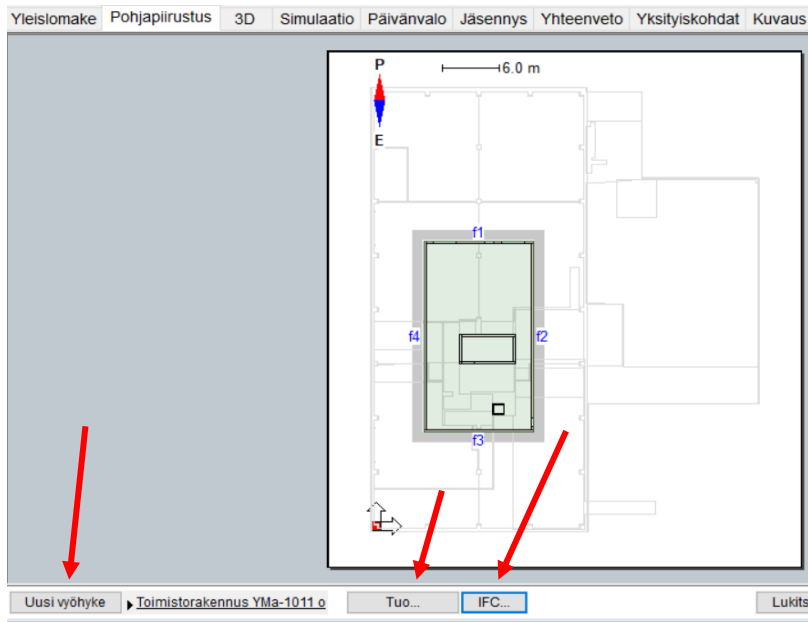
Kuva 10. IDA ICE -lokalisoinit

Seuraavassa vaiheessa tarkastettiin projektin asetukset, että ne vastasivat asetuksen 1010/2017 mukaisia arvoja, aikatauluja, sijaintia sekä suunnitteluarvoja. Asetuksien sijainnit havainnollistettu alla olevassa kuvassa 11.



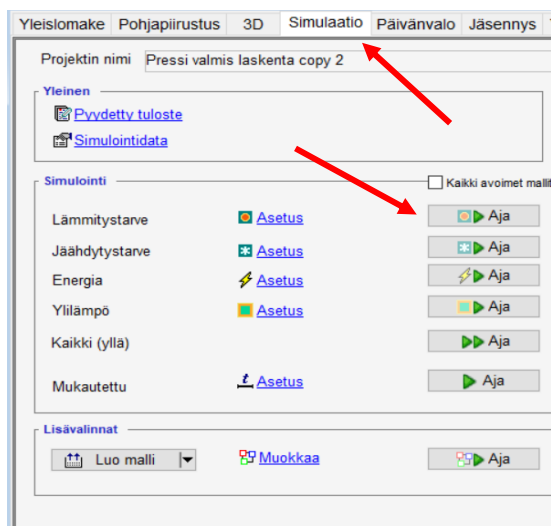
Kuva 11. IDA ICE -asetukset

Seuraavaksi Simplebim -ohjelmistolla pelkistetty IFC-malli tuotiin IDA ICE -ohjelmistoon. Sivulla 26 olevassa kuvassa 12 on havainnollistettu IFC-mallin tuonti IDA ICE -ohjelmistoon Pohjapiirustus-välilehden kautta.



Kuva 12. IFC-mallin tuonti IDA ICE -ohjelmistoon

Kuvassa 12 esitetyllä tavalla IFC-malli tuodaan päävalikon kohdasta "IFC" ja alavalikosta "Tuo" (Import), jolloin valitaan ohjelmaan tuotava IFC-malli. Päävalikon kohdasta "Tuo" (Import) voidaan ohjelmistoon tuoda myös DWG-kuva, jolloin rakennuksen pystyy itse mallintamaan ohjelmassa. Uusi vyöhyke kohdasta määritetään mallille sisätilat. Tilat voidaan määrittää täysin itse tai sitten hyvässä IFC-mallissa tilat voivat olla valmiiksi määriteltä, niin kuin tutkimuksen mallissa oli. Valmiit tilat tulee silti luoda uudeksi vyöhykkeeksi Uusi vyöhyke -komennon kautta. Seuraavaksi kun rakennus oli tuotu IDA ICE -ohjelmistoon, suoritettiin sille Simulaatio-välilehden (Simulation) alta lämmitystarvesimulaatio, kuvan 13 mukaisesti. Tästä saatiin laskettua samalla rakennuksen huippulämmitystehontarve.



Kuva 13. Lämmitystarvelaskenta

Kun tilojen lämmitystehontarve oli selvitetty, siirryttiin Primäärijärjestelmät (Plant)-kohtaan, jossa asetettiin rakennuksen lämmitysjärjestelmäksi maalämpöpumppu (100 kW) ja energiakaivot (5 kappaletta/300 metriä). Alla kuvassa 14 on esitetty toimistorakennuksen maalämpöpumpun tilojen ja käyttöveden SPF-luvut eli lämpöpumpun kausisuorituskyky kertoimet. Arvot asetetaan IDA ICEn Oletusarvot-valikosta (Defaults).

Tuotannon hyötysuhde			
	Sähkö	Polttoaine	Kauko-
Lämmitys	Oletus energiamuoto <input checked="" type="radio"/> COP <input type="text" value="2.7"/>	<input type="radio"/> <input type="text" value="0.9"/>	<input type="radio"/> <input type="text" value="0.97"/>
Jäähdytys	Oletus energiamuoto <input checked="" type="radio"/> COP (EER) <input type="text" value="3"/>	<input type="radio"/> <input type="text" value="1"/>	<input type="radio"/> <input type="text" value="1"/>
Lämmin käyttövesi	Oletus energiamuoto <input checked="" type="radio"/> COP <input type="text" value="2.3"/>	<input type="radio"/> <input type="text" value="0.9"/>	<input type="radio"/> <input type="text" value="0.97"/>

Kuva 14. Toimistorakennuksen maalämpöpumput SPF-luvut

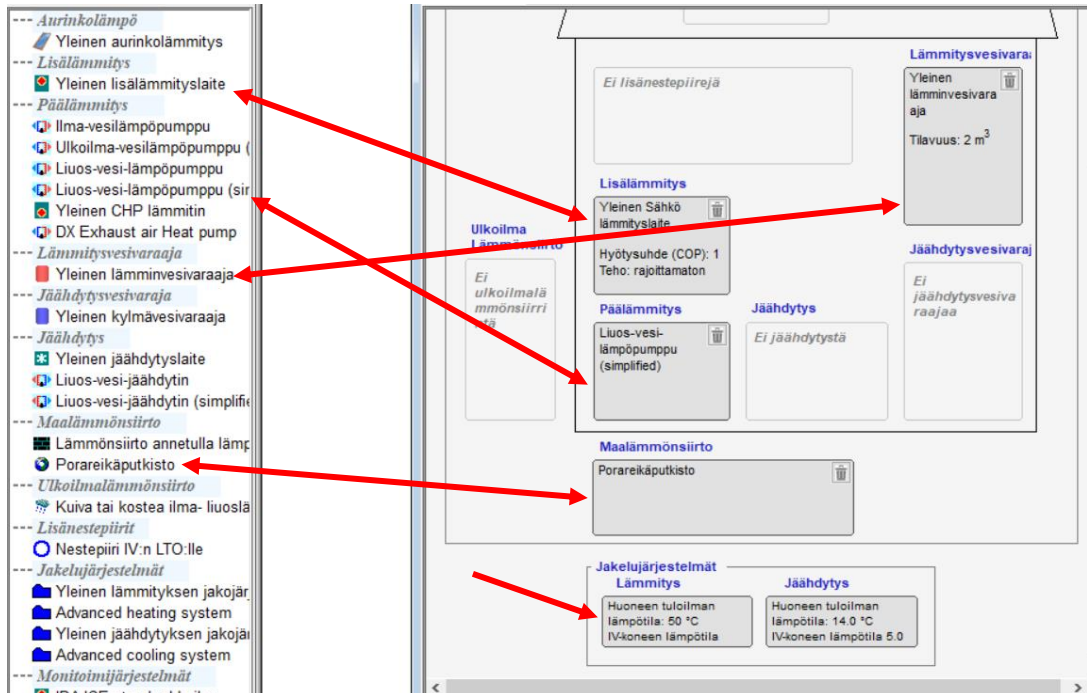
SPF-luvut määritettiin Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta -ohjeen [34] taulukon 7.9 mukaisesti. Taulukko esitetty alla olevassa kuvassa 15.

Taulukko 7.9 Maalämpöpumppujen SPF-lukuja

Maalämpöpumput: menoveden korkein lämpötila, °C	SPF-luku	
	Vuotuinen keruupiirin paluunesteen keskilämpötila, °C	
	-3	+3
Tilojen lämmitys		
30	3,4	3,5
40	3,0	3,1
50	2,7	2,7
60	2,5	2,5
Käyttöveden lämmitys		
60	2,3	2,3

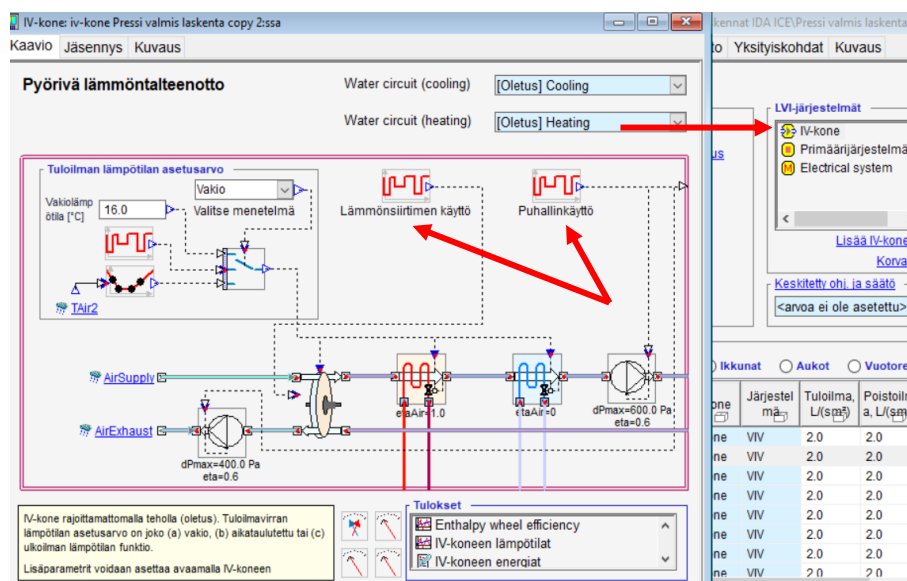
Kuva 15: Maalämpöpumppujen SPF-lukuja [34. s. 55]

Seuraavaksi asetettiin 2 m³ lämminvesivaraaja ja sähköinen lisälämmitys. Verkostojen lämpötilat asetettiin kattosäteilijöiden mukaan (50/30°C). Ilmanvaihtokoneena toimi pyörivällä lämmöntalteenotolla varustettu ilmanvaihtokone. Sivulla 28 olevassa kuvassa 16 on esitetty primäärijärjestelmän (Plant) asetukset.



Kuva 16. Primäärijärjestelmät

Alla olevassa kuvassa 17 on esitetty ilmanvaihtokone pyörivällä lämmöntalteenotolla ja koneen vaihtaminen oikeanlaiseksi. Kun valitaan LVI-järjestelmät (HVAC systems) kohdan alta IV-kone (AHU) ja sen jälkeen painetaan kohteen alapuolelta "Korvaa" (Replace), voidaan tällöin vaihtaa ilmanvaihtokoneen tyyppiä. Kuvasta 17 on myös nähtävissä ilmanvaihtokoneen käyntiaikatietojen muokkaus.

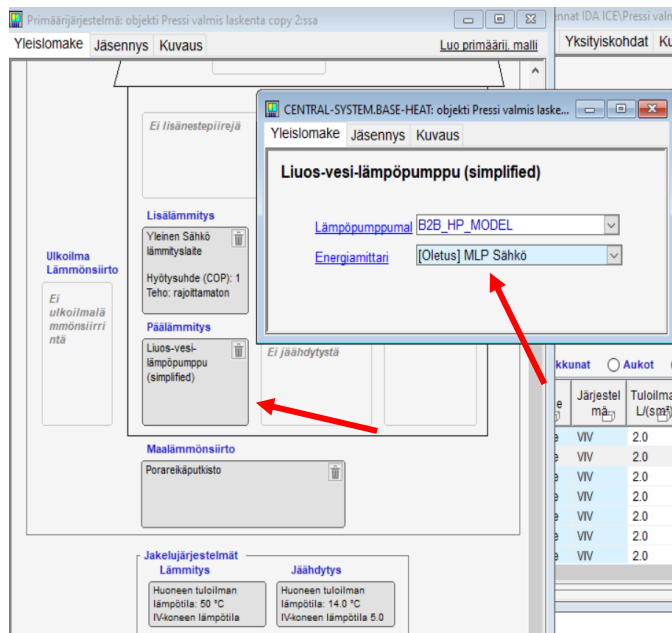


Kuva 17. IV-kone

Seuraavaksi luotiin maalämpöpumpulle oma energiamittaus eli Energiamittarit-kohdassa painetaan tietokoneen hiiren oikeaa painiketta ja lisätään uusi mittari, kuva 18. Mittari voidaan itse nimetä, kuten projektissa käytettiin nimeä MLP sähkö. Uusi mittari lisätään primäärijärjestelmä (Plant)-kohdan alta maalämpöpumpulle kuvan 19 mukaisesti.



Kuva 18. Energiamittarit



Kuva 19. Energiamittauksen vaihtaminen

Seuraavaksi rakennukselle suoritettiin koko vuoden energiasimuloinnit, jonka tuloksista siirrettiin Graphical Script -työkaluun maalämmön ja sähköisen lisälämmityksen ostoenergiankulutus Yhteenvedo (Summary)-välilehdeltä, kuva 20. Kun valitaan haluttu energianarvo ja painetaan hiirenoikealla valikosta Add to Graphical Script, saadaan arvot siirrettyä työkaluun.

Yksityiskohdat • Vertaile tuloksia • Moniväyhyke • Raportti

Laajenna taulukko

Operatiivinen ... °C	Maksimilämpötila ... °C	huonelaitteiden ... W/m ²	Maksimilämpötila ... °C
27.53	14.48	28.55	21.66
27.77	24.05	60.01	30.3
27.59	57.7	60.0	78.2
26.43	10.4	49.71	18.9
13.02	17.73	36.56	28.7
29.09	37.97	60.0	54.6
28.34	60.75	60.01	90.2

Ilmanvaihdonkoneet

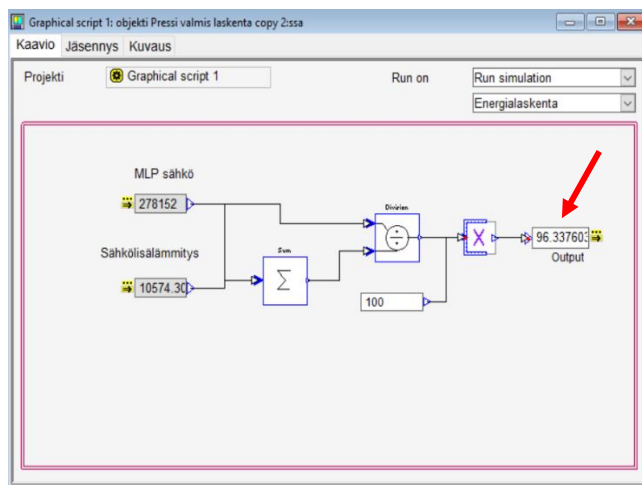
IV-kone	Lämmitys, kWh	Jäähdytys, kWh	LTO, kWh
IV-kone	17990...	0.0	11820...
Yhteensä	17990...	0.0	11820...

Ostoenergia

Meter	Yhteensä, kWh	m ² kohti, kWh/m ²	Tarve
Valaistus, kiinteistö...	10739...	18.28	38.1
LVI sähkö	17265...	29.39	20.3
Sähkölämmitys...	10574.3	1.8	54.3
MLP Sähkö	27815...	47.35	91.6
Laitteet, asukas	12887...	21.94	45.8
Aurinkosähkö...	0.0	0.0	-7.64

Kuva 20.

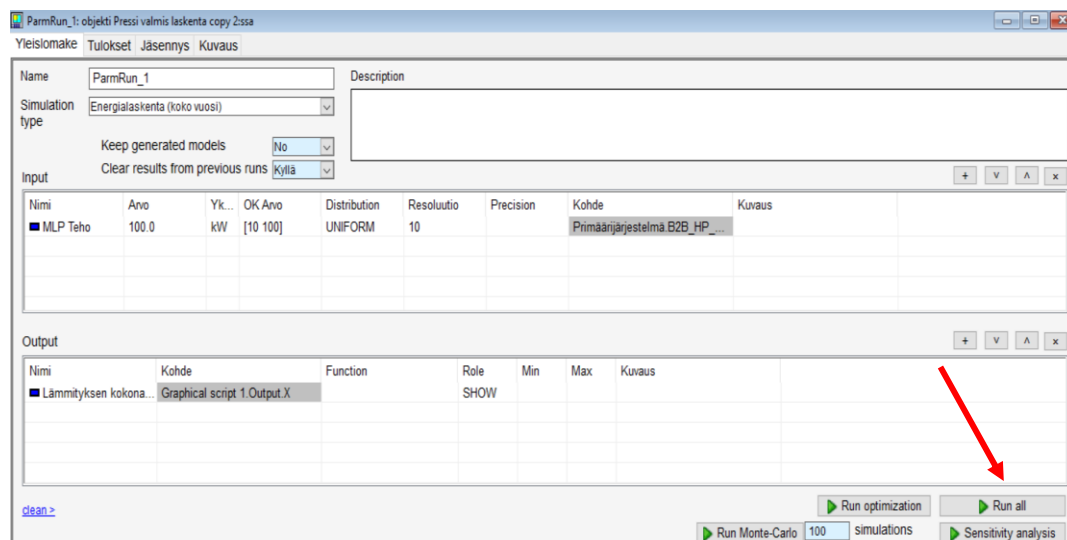
Seuraavaksi Graphical Script -työkalun avulla laskettiin lämpöpumpun sähköenergiankulutuksen suhde koko lämmityssähkön käyttöön verrattuna, kuva 21. Graphical Script:stä saatu lopputulos (Output, %) siirrettiin Parametric Run -työkaluun, jonne lisättiin myös maalämpöpumpun teho Primäärijärjestelmästä (Plant). Alla esitetty havainnekuva 21 Graphical Script -työkalusta.



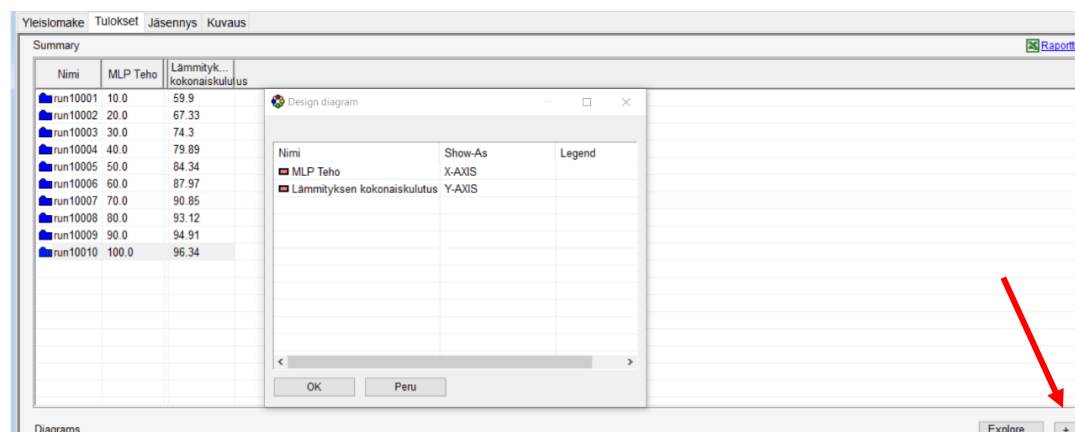
Kuva 21. Graphical Script -työkalu

Parametric Run -työkaluun siirrettävät arvot saadaan siirrettyä samalla Add to -komennolla kuin Graphical Scriptiin käytettiin. Parametric Run -työkalun avulla suoritettiin lopullinen optimointi, josta saatiin selville, kuinka tehokas maalämpöpumppu rakennukselle tarvitaan, jotta 90 prosenttia vuotuisesta ostoenergian tarpeesta saadaan katettua maalämmöllä ja saadaan mahdollisimman taloudel-

linen mitoitus. Optimointi käynnistetään Run all -komennolla (kuva 22). Kun optimointivaihe oli valmis, saadaan Parametric Run -työkalun Tulokset-välilehdelta luotua +-näppäimellä lopputuloksista kaavio, kuva 23.



Kuva 22. Parametric Run -työkalu



Kuva 23. Parametric Run -tulosten visualisointi

Kolmantena tutkimuksen kohteena oli, kuinka paljon energiaa maalämmöstä tarvitaan, jotta saataisiin katettua 90 prosenttia vuotuisesta lämmitysenergiankulutuksesta, kuva 24. Energiatarve saadaan laskettua kaavalla 1. [47, s. 31–33.]

$$Q_{KOK} * 0,9 = Q_{MLP} \quad (1)$$

jossa

Q_{KOK}	vuotuinen lämmitysenergiankulutus [kWh]
0,9	vakiokerroin [-]
Q_{MLP}	maalämmöstä tarvittava energia [kWh]

Lämmitys
 Energia

Vyöhykkeet

Vyöhyke	Ryhmä	Vyöhykkeen lämpötila, °C	Minimilämpötila, °C
Vyöhyke 1	Kellari	1	20.9
ANTICIMEX	ANTI...	1	12.4
CARRIER	CARR...	1	-7.071
FAZER	FAZER	1	20.91
FINN-ID	FINN-ID	1	20.9
FINN-ID-1	FINN-ID	1	2.658
HUS	HUS	1	-8.006

Rakennus

Järjestelmien energia

	kWh
Tilalämmitys	56866...
Tilajäähdytys	0.0
Lämmitys IV-k...	18035...
Jäähdytys IV-...	0.0
Lämmin käytt...	35190.0
Jäähdytys	0.0
Lämmitys	78420...

Yr
 La
 Ja
 Mi

Kuva 24. Vuotuinen lämmitysenergiankulutus

6.2 Koulurakennus

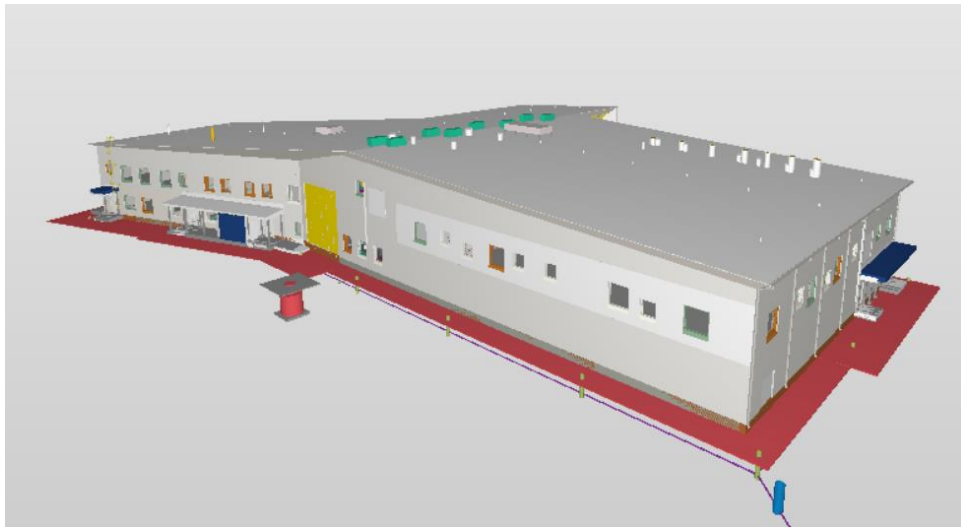
Tutkimuksessa käytetyn koulurakennuksen rakennustiedot:

- Sijainti: Kuopio
- Säilyvyöhyke: III
- Rakennuksen valmistumisvuosi: 2023
- Käyttötarkoitusluokka: 6 Opetusrakennus ja päiväkot
- Energiatehokkuusluokka: A
- Rakennuksen laskennallinen kokonaisenergiankulutus (E-luku): 88 kWh_E/m² a
- Lämmitetty nettoala: noin 3500 m²
- IV-järjestelmä: koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä, pyöri-
vällä lämmöntalteenotolla (vuosihyötysuhde 80 %, SFP = 1,8 kW/m³/s))
- Lämmitysjärjestelmän kuvaus: Lattia-/patterilämmitys (+40/30°C)
- q₅₀ = 4 m³/h m²
- Maalämmön keruunesteen keskimääräinen lämpötila: +3°C
- SPF-luvut: tilat: 3,1 / käyttövesi 2,3

RAKENTEET

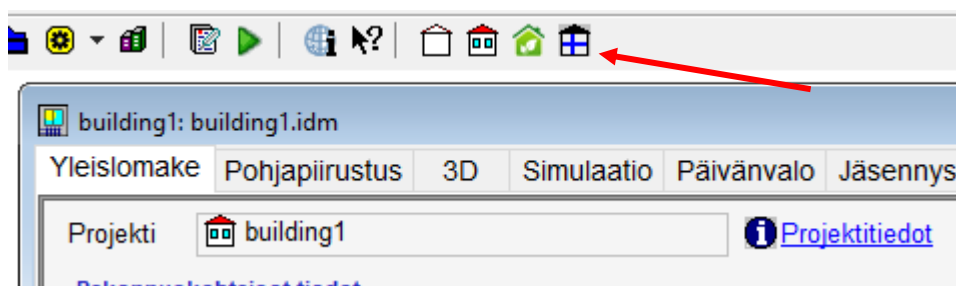
- Yläpohja: puiset kattotuolit + vesikatto
- Alapohja: maan vastainen betonilaatta
- Seinät: betonielementti

Alla olevassa kuvassa 25 on esitetty koulurakennuksen SMC-yhdistelmämallista havainnekuva.



Kuva 25. Koulurakennuksen SMC-yhdistelmämalli

Koulurakennusta koskeva tutkimus toteutettiin IDA ICE -ohjelmiston avulla. Tutkimustehtävänä oli selvittää, millä tavoin erilaiset lämmitysenergianlähteet vaikuttavat koulurakennuksen ostoenergian kulutukseen ja elinkaarikustannuksiin. Tutkimus aloitettiin perustamalla projekti asetuksen 1010/2017 mukaiselle koulurakennukselle IDA ICE Finland -lokalisoinnin avulla kuvan 26 mukaisesti, josta valittiin valikosta FINYMa1010 Opetusrakennukset (käyttötarkoitukseluokka 6). Lokalisoinnin perustamissijainti havainnollistettu kuvassa 26.



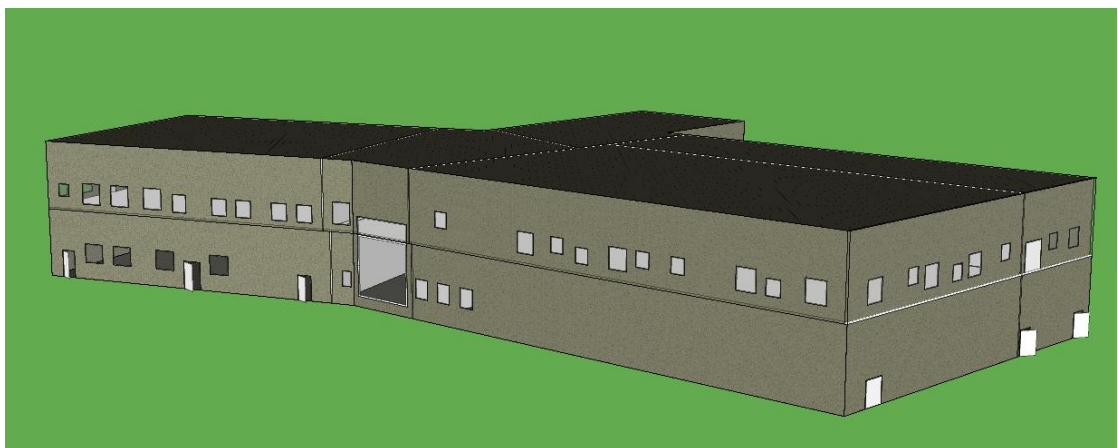
Kuva 26. IDA ICE -lokalisointi

Seuraavassa vaiheessa tarkastettiin projektin asetukset, että ne vastasivat asetuksen 1010/2017 mukaisia arvoja, aikatauluja, sijaintia sekä suunnitteluarvoja. Asetuksien sijainnit havainnollistettu sivulla 34 kuvassa 27.



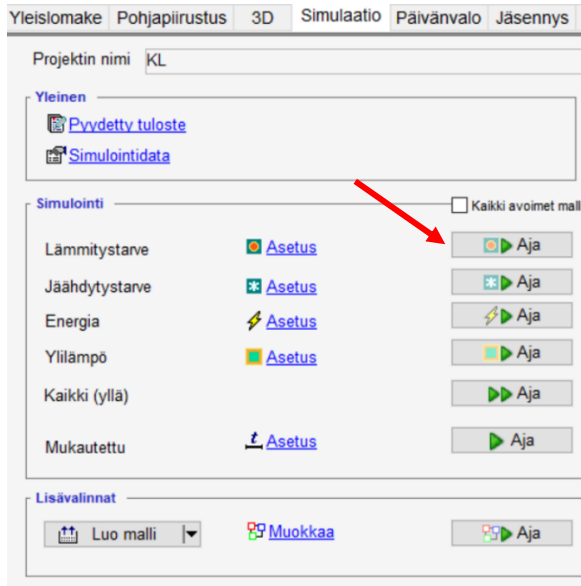
Kuva 27. IDA ICE -asetuksien sijainnit

Tutkimusta jatkettiin korjaamalla työn IFC-mallia ArchiCad- ja Simplebim-ohjelmistoilla IDA ICE -ohjelmistoon sopivaksi, koska IFC-malli ei ollut soveltuva IDA ICE -ohjelmistoon. Mallista yritettiin korjata IDA ICE -ohjelmiston tunnistamat rakennneosat, mutta rakenneosien havaittiin olevan välttämättömiä mallin toiminnan kannalta. Rakenneosien vuoksi IFC-mallia ei saatu korjattua soveltuvaiksi sellaisenaan IDA ICE -ohjelmistoon. Ongelman ratkaisemiseksi tilaajan kanssa sovittiin, että kohderakennus mallinnetaan itse IDA ICE-ohjelmistoon DWG-pohjakuvasta. Tilaajan kanssa päätettiin kohderakennuksen yksinkertaisemmasta mallinnuksesta sisältäen rakennusvaipan, ikkunat sekä ovet. Sisätiloja ei mallinnettu tarkasti sisäseinien mukaisesti. Alla olevassa kuvassa 28 on esitetty IDA ICE -ohjelmalla mallinnettu koulurakennus.



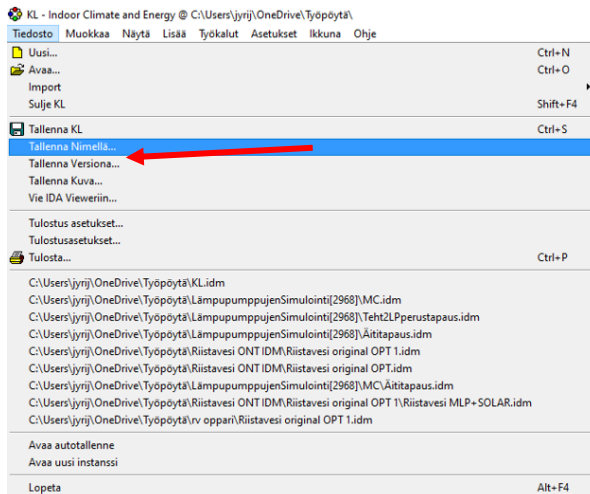
Kuva 28. IDA ICE -ohjelmalla mallinnettu koulurakennus

Tutkimuksen seuraavassa vaiheessa IDA ICE -ohjelmistolla suoritettiin rakennukselle lämmitystehontarpeen simulaatio lämmitystehontarpeen selvittämiseksi. Kuvassa 29 esitetty lämmitystarvesimuloinnin havainnekuva.



Kuva 29. Lämmitystarvesimulointi

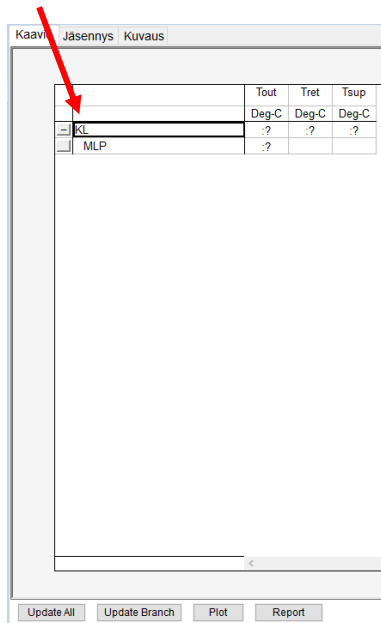
Lämmityksen tehontarvelaskennan laskennan jälkeen luotiin rakennukselle versiohallintaprojekti tallentamalla alkuperäinen versio rakennuksesta projektin pohjaksi Tallenna nimellä -kohdasta. Versiohallintaprojekti nimettiin Tallenna Versiona -ominaisuuden avulla. Alla havainnekuva 30 versiohallintaprojektista.



Kuva 30. Versiohallintaprojektin luonti

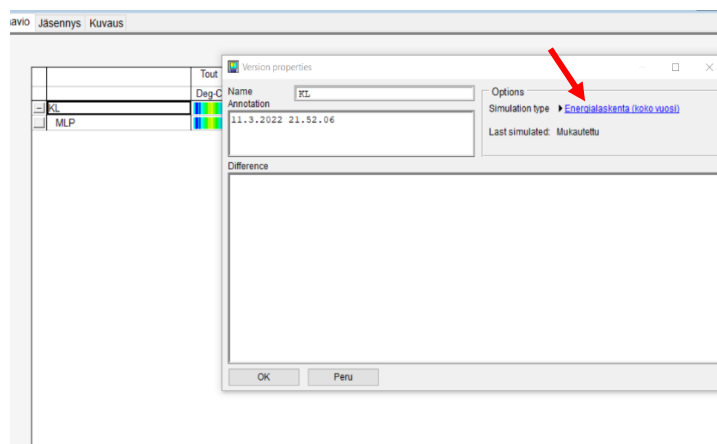
Projektin pohja nimettiin KL-nimellä (Kaukolämpö) ja toteutuksen Primäärijärjestelmäksi määritettiin kaukolämpö. IV-koneena toimi pyörivällä lämmöntalteenottokiekolla varustettu kone. Sivulla 37 on havainnekuva 33 tilanteesta. Versiohallintaprojekti nimettiin MLP-nimellä (Maalämpö) ja toteutuksen primäärijärjes-

telmäksi määriteltiin maalämpö. Muut asetukset olivat projektin pohjan mukaiset. Alla kuvassa 31 on esitetty näkymä versiohallintaprojektien nimeämisen jälkeen.



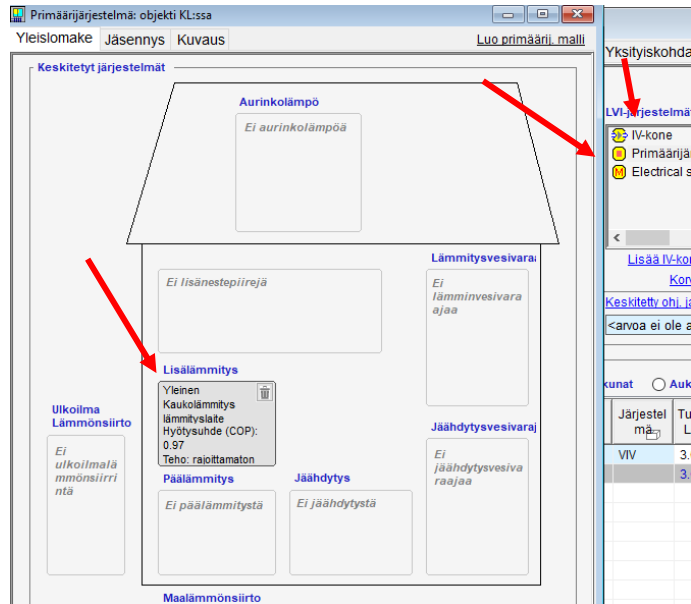
Kuva 31. Versiohallintaprojekti näkymä

Lisähuomiona kuvaan 31. Mikäli halutaan lisätä uusia versiohallintaprojekteja, tulee ne lisätä KL-version kautta, jotta lisääminen onnistuu. Versioille tulee määrittää simulointitavaksi koko vuoden energialaskenta painamalla version kohdalla hiiren oikeaa painiketta ja ominaisuudet -valikkoo. Alla on esitetty havainnekuva 32.

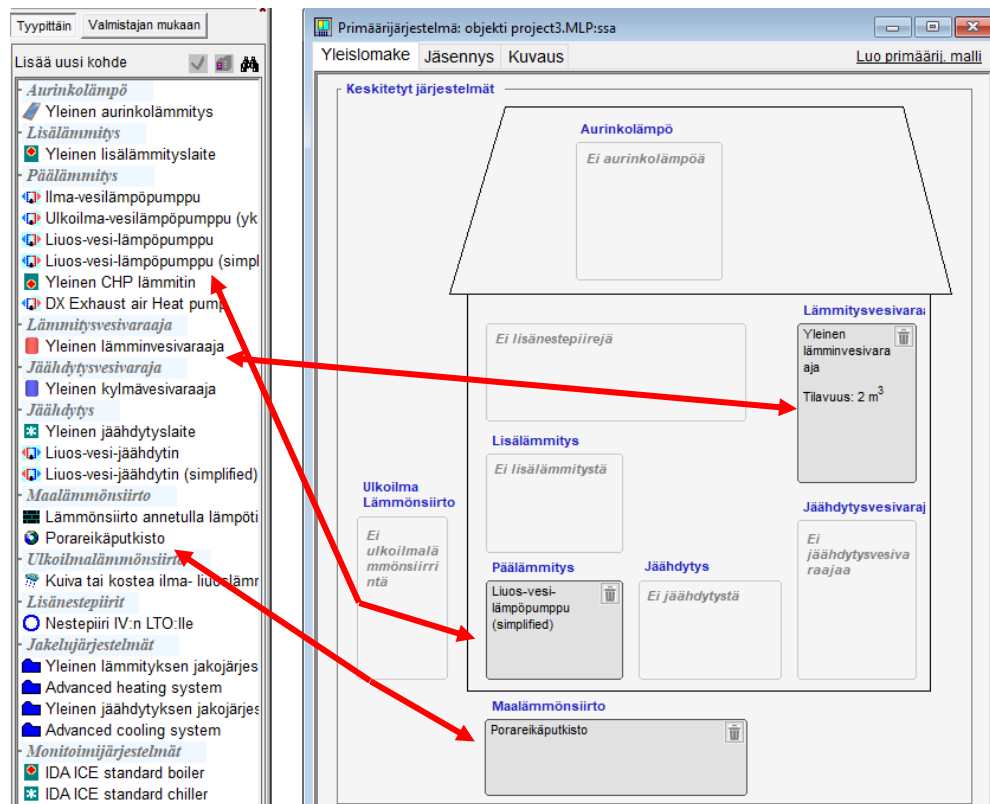


Kuva 32. Simulointitavan valinta

Kuvan 34 mukaisesti maalämpöversiolle määritettiin myös oma primäärijärjestelmä (Plant)-versiohallintaprojektissa. Maalämmölle määritettiin myös porakavit ja lämminvesivaraaja kuvan 34 mukaisesti.



Kuva 33. Kaukolämpöjärjestelmä



Kuva 34. Maalämpöjärjestelmä

Maalämpöpumpulle tulee asettaa sen vaatima teho maalämpöpumpun lisävalikosta (60 kW) ja samoin energiakaivojen määrä ja syvyys tulee määrittää porakaivoputkiston lisävalikosta (8 kappaletta/200 metriä). Alla kuvassa 35 on esitetty toimistorakennuksen maalämpöpumpun lämmityksen ja käyttöveden SPF-luvut eli lämpöpumpun kausisuorituskyky kertoimet. Arvot asetetaan IDA ICE:n Oletusarvot-valikosta (Defaults).

		Sähkö	Polttoaine	Kauko-
Lämmitys	Oletus energiamuoto	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	COP	3.1	0.9	0.97
Jäähdytys	Oletus energiamuoto	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	COP (EER)	3	1	1
Lämmin käyttövesi	Oletus energiamuoto	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	COP	2.3	0.9	0.97

Kuva 35: Koulurakennuksen maalämpöpumpun SPF-luvut

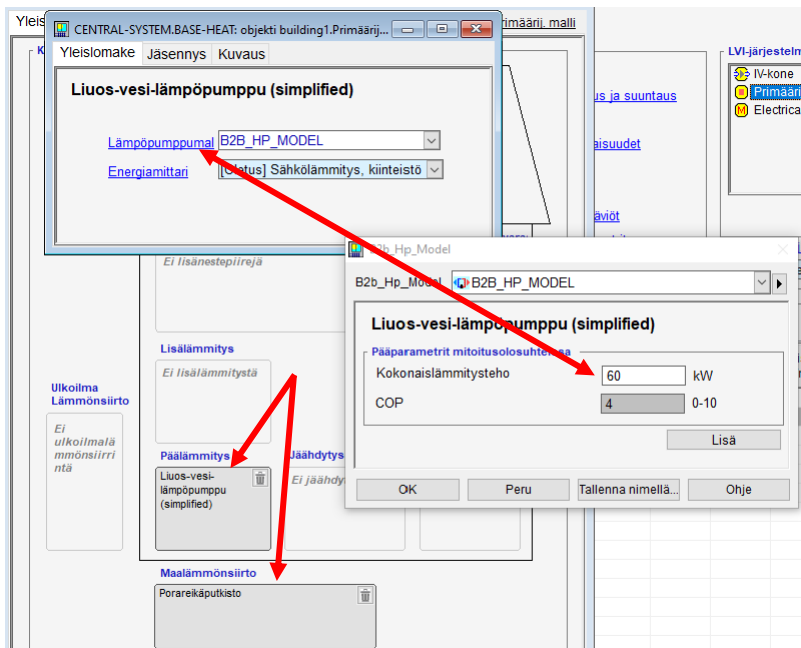
SPF-luvut määritettiin Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta -ohjeen [34] taulukon 7.9 mukaisesti. Taulukko esitetty alla kuvassa 36.

Taulukko 7.9 Maalämpöpumppujen SPF-lukuja

Maalämpöpumput: menoveden korkein lämpötila, °C	SPF-luku	
	Vuotuinen keruupiirin pailunesteen keskilämpötila, °C	
	-3	+3
Tilojen lämmitys		
30	3,4	3,5
40	3,0	3,1
50	2,7	2,7
60	2,5	2,5
Käyttöveden lämmitys		
60	2,3	2,3

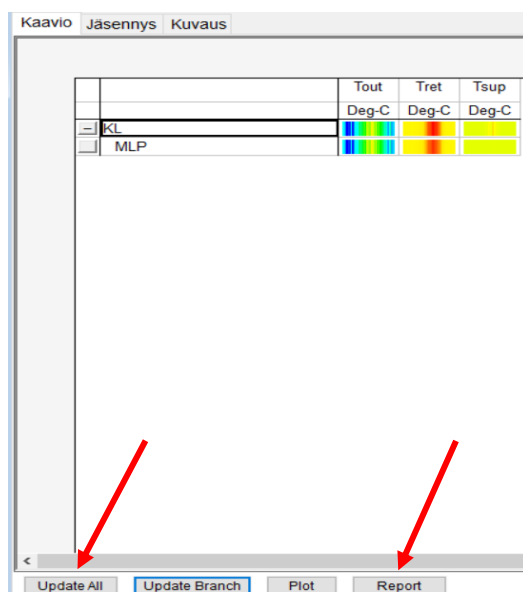
Kuva 36. Toimistorakennuksen maalämpöpumpun SPF-luvut [34, s. 55]

Primäärijärjestelmän lisävalikot aukeavat, kun lämpöpumpun tai porakaivoputkiston sijaintia painetaan kaksi kertaa tietokoneen hiirellä. Lämmitysverkoston lämpötiloina käytettiin projektin suunnitelmien mukaisia lämmitysverkoston lämpötiloja (+40/30°C). Sivulla 39 havainnekuva 37 tilanteesta.



Kuva 37. Maalämpöpumpun ja porakaivojen asetukset

Lopuksi versiot tallennettiin ja aloitettiin simulointi painamalla Update All -painiketta. Update Branch -toiminnolla voidaan päivittää yksittäinen versio, jos muihin versioihin ei tule muutoksia. Simuloinnin jälkeinen tulos näyttää alla olevan kuvan 38 mukaiselta ja vertailuraporttia voidaan tarkastella Report-kohdasta, josta nähdään lopputulokset taulukoina ja kaavioina eri variaatioiden kesken. Kyseisellä laskentamallilla voidaan tarkastella koulurakennukselle erityyppisiä lämmitysenergianlähteitä tai rakenteellisia ratkaisuja muuttamalla eri versioiden laskenta-arvoja. Kuvassa 38 on myös esitetty, mistä lopputulokset saadaan näkyviin.



Kuva 38. Valmis simulaatio

Eri lämmitysjärjestelmien elinkaarikustannukset laskettiin tämänhetkisten sähkön ja kaukolämmön markkinahintojen mukaisesti (31.3.2022). Kaukolämmön hinta muodostuu perus- ja energiamaksusta. Kaukolämmön hinnastot ovat esitetty Kuopion energian hinnastossa [48]. Kaukolämmön energiamaksu laskettiin kaavan 2 mukaisesti, energianhinta oli 77,96 €/MWh [47; 48]. Laskentaan vaadittava sopimusteho saatiin laskettua IDA ICE:n lämmitystarvesimulaatiolla kuvan 29 mukaisesti.

$$\left(\frac{Q_{KL}}{1000}\right) * \epsilon_{\text{Energia}} = \epsilon_{KL} \quad (2)$$

jossa	Q_{KL}	kaukolämmön energiankulutus	[kWh]
	1000	jakaja (kWh → MWh)	[kWh/MWh]
	$\epsilon_{\text{Energia}}$	energian hinta	[€/MWh]
	ϵ_{KL}	kaukolämpöenergian hinta	[€/a]

Kaukolämmön perusmaksu laskettiin kaavan 3 mukaisesti [48]. Kaukolämmön kokonaishinta muodostuu yhteensä kaavoista 2 ja 3.

$$K * (8000 + 12 * P) * T_P = \epsilon_{\text{Perusmaksu}} \quad (3)$$

jossa	K	vakio	[-]
	8000	vakiokerroin	[-]
	12	sopimustehon mukainen vakio	[-]
	P	Sopimusteho	[kW]
	T_P	vakio (0,9...1,1)	[-]
	$\epsilon_{\text{Perusmaksu}}$	Kaukolämmön perusmaksu	[€/a]

Maalämpöpumpun tarvitsema sähkönhinta muodostuu sähkön siirtomaksusta, sähköverosta ja sähköenergian maksusta. Koulurakennuksen sähköliittymän liittymän pääsulakkeet olivat kooltaan 2x3x200 A, jonka mukaan lasketaan siirtomaksun perusmaksu. Siirtomaksu laskettiin päivä- ja yönsähkön hinnoilla, näistä muodostui yhteensä siirtomaksun hinta. Sähkövero on huomioitu kaavassa 5 siirtomaksun hinnassa. Sähköhinnat ovat esitetty PKS Verkkopalvelu hinnastossa [49]. Sähkönsiirtomaksu laskettiin kaavojen 4 ja 5 mukaisesti. [47, s. 31–33.]

$$2 * \epsilon_{Pm} * 12 = \epsilon_{Pm,kok} \quad (4)$$

jossa	2	vakiokerroin	[-]
	ϵ_{Pm}	perusmaksun hinta (3x200 A)	[€/kk]
	12	vakiokerroin	[kk/a]
	$\epsilon_{Pm,kok}$	Vuosittainen perusmaksu	[€/a]

$$E_{MLP} * \epsilon_{SM} * \frac{h}{24} = \epsilon_{SM,kok} \quad (5)$$

jossa	E_{MLP}	maalämpöpumpun sähkönkulutus	[kWh/a]
	ϵ_{SM}	siirtomaksun hinta	[€/kWh]
	h/24	vuorokausikerroin	[h/24 h]
	$\epsilon_{SM,kok}$	siirtomaksun kokonaiskustannus	[€/a]

Sähkön energiamaksu laskettiin kaavan 6 mukaisesti [47, s. 31–33]. Fortumin kiinteään yrityssähkön hinta oli 9,20 c/kWh + 5 €/kk perusmaksu (hinta 31.3.2022). Sähkön kokonaishinta muodostuu yhteensä kaavoista 4, 5 ja 6.

$$\epsilon_{Sähkö} * E_{MLP} + (\epsilon_{PM} * 12) = \epsilon_{Sähkö,kok} \quad (6)$$

jossa	$\epsilon_{Sähkö}$	sähkön hinta	[€/kWh]
	E_{MLP}	maalämpöpumpun sähkönkulutus	[kWh/a]
	ϵ_{PM}	perusmaksun hinta	[€/kk]
	12	vakiokerroin	[kk/a]
	$\epsilon_{Sähkö,kok}$	sähköenergian kokonaiskustannus	[€/a]

Lämmitysjärjestelmien elinkaarikustannus laskettiin 20 vuodelle. Elinkaarikustannusten vertailuprosentti laskettiin kaavan 7 mukaisesti [50].

$$\frac{\epsilon_{KL} - \epsilon_{Sähkö,kok}}{\epsilon_{KL}} * 100 = \%_{vertailu} \quad (7)$$

jossa	ϵ_{KL}	kaukolämpöenergian hinta	[€/a]
	$\epsilon_{Sähkö,kok}$	sähköenergian kokonaiskustannus	[€/a]

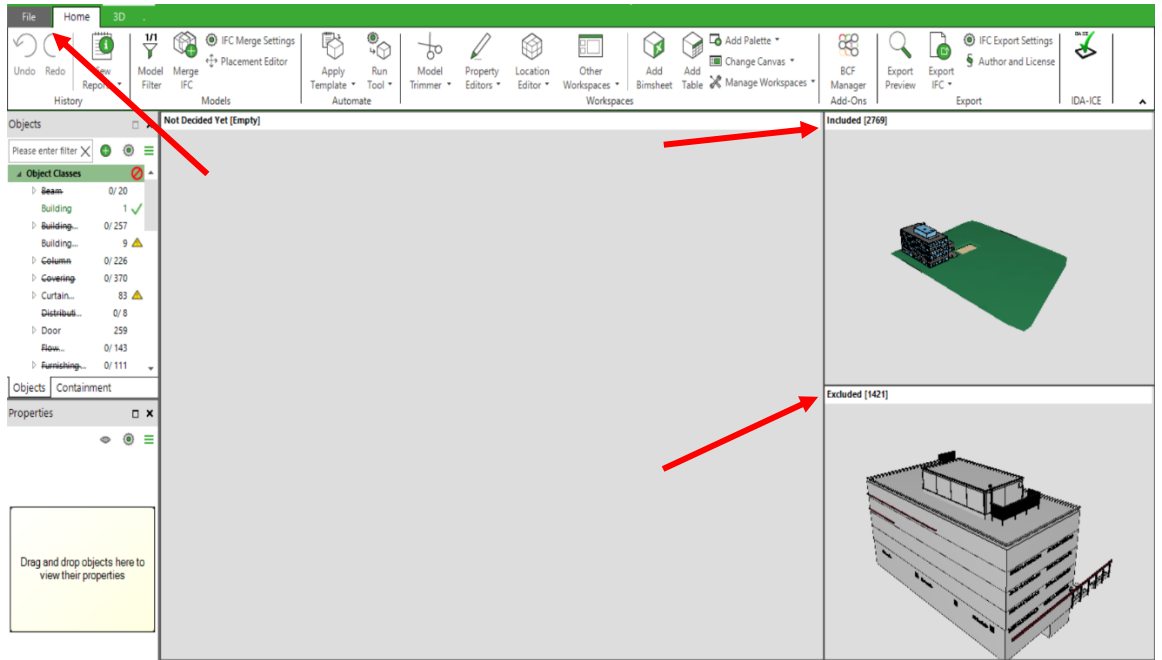
100	vakiokerroin	[%]
%Vertailu	%-kuinka paljon MLP on halvempi	[%]

6.3 Tietomalli

IDA ICE -ohjelmistoon voidaan tuoda suoraan kokonainen rakennuksen IFC-tietomalli tai rakennuksen DWG-pohjakuva, jonka perusteella rakennus mallinnetaan itse ohjelmassa. Tutkimuksen aikana käytettiin molempia keinoja, koska koulurakennuksen tietomalli ei toiminut IDA ICE -ohjelmistossa yhteensopimattomien rakenneosien takia, joita ei voinut poistaaakaan IFC-mallista mallin toimivuuden takia.

Tutkimuksen ohessa tehtiin tutkimusta tietomallin yhteensovitusongelmista IDA ICE -ohjelmiston kanssa. Aiheesta löytyi yksi aikaisempi tutkimus, jonka tuloksia verrattaessa omaan opinnäytetyöhön päädyttiin samoihin lopputuloksiin yhteensovitusongelmista, joita aiemmassa tutkimuksessa oli esitetty [51]. Tietomallin tuli olla oikea versio IFC-mallista, esimerkiksi IFC 2x3, jotta ohjelmisto tuki mallia. Lisäksi IDA ICE-ohjelmisto antoi varoituksen ja virhekoodin, jonka mukaan IFC-mallissa oli liikaa ylimääräisiä objekteja tai tunnistamaton rakenneosa. Lisäksi ovien ja ikkunoiden tuli sijaita kokonaisuudessaan omassa kerroksessa eikä kerrosten välillä tietomallin toimimiseksi.

Tutkimusta toteutettaessa tutustuttiin Simplebim-ohjelmaan sekä sen IDA ICE -lisäosaan, jonka avulla IFC-mallia pelkistettiin yksinkertaisemmaksi. Toinen vaihtoehto oli hyödyntää ArchiCAD-ohjelmistoa, jonka avulla mahdollistuisi IFC-mallin ongelmien rakennekohtainen tarkastelu. Viimeisenä vaihtoehtona tutkimuksessa todettiin, että ongelmia voidaan yrittää paikantaa myös tietomallin lähdekoodista. IDA ICE-ohjelmisto antaa virheen lähdekoodin rivinumeron mukaisesti, jolloin virheellisen rivin ja sen viitteiden poistaminen lähdekoodista voivat korjata tietomallin ongelmat. Sivulla 43 kuvassa 39 on esimerkkikuva Simplebim-ohjelmistosta ja IDA ICE Validation -työkalusta. Included-kohdassa ovat rakennuksen osat, jotka tuodaan IFC-malliin. Excluded-kohdassa ovat rakennuksen osat, jotka ovat poistettu rakennuksen mallista. IDA ICE -lisäosa löytyy Simplebim-ohjelmasta File-valikon alta kohdasta Add-Ons ja IDA ICE Validation, jolloin ohjelmaan tuotava IFC-malli pelkistetään mahdollisimman hyväksi IDA ICE -ohjelmistoa varten.



Kuva 39. IDA ICE Validation-työkalun näkymä Simplebim-ohjelmassa

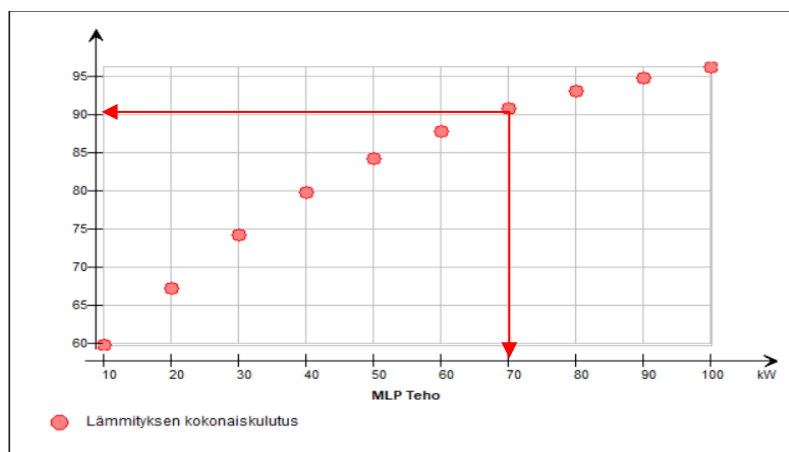
7 TULOKSET

Toimistorakennuksen lämmityksen huipputehontarve. Tulokset osoittavat toimistorakennuksen lämmityksen huipputehontarpeen olevan yhteensä 371,3 kW. Alla olevassa taulukossa 1 on lisäksi nähtävillä rakennuksen tilojen, ilmanvaihdon ja lämpimän käyttöveden lämmitykseen vaadittavat tehontarpeet.

Taulukko 1. Lämmityksen tehontarpeet

Järjestelmien energia	
	Maks., kW
■ Tilalämmitys	193.8
■ Lämmitys IV-k...	173.5
■ Lämmin käytt...	4.017
Yhteensä	371.3

Toimistorakennuksen maalämpöpumpunteho. Tutkinnasta saatujen tulosten perusteella toimistorakennukseen tarvitaan 70 kW maalämpöpumppu. Lopputulos nähdään myös sivulla 44 kuvasta 40, eli 70 kW maalämpöpumpulla saadaan katettua 90 prosenttia rakennuksen vuotuisesta lämmitysenergian kokonaiskulutuksesta.



Kuva 40. Optimaalinen maalämpöteho (90 %)

Toimistorakennuksen maalämpöenergian tarve laskettiin kaavan 1 mukaan. Kaavasta saadaan selville toimistorakennuksen maalämpöenergian tarve, jotta sillä saadaan katettua 90 prosenttia toimistorakennuksen vuotuisesta lämmitysenergiankulutuksesta. Maalämpöpumpun täytyy tuottaa energiaa 705788 kWh/a, jotta vaatimus täyttyy. Energiatarve laskettiin IDA ICE -ohjelmiston energiasimuloinnilla.

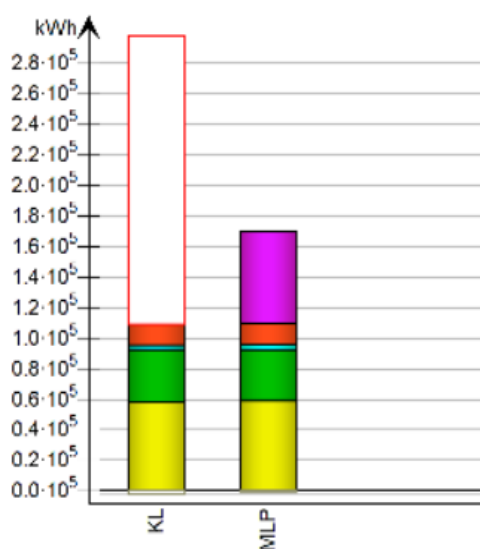
$$784209 \frac{kWh}{a} * 0,9 = 705788 \frac{kWh}{a} \quad (1)$$

Koulurakennuksen erilaisten lämmitysenergianlähteiden vaikutus rakennuksen ostoenergiankulutukseen on nähtävissä sivulla 45 kuvassa 41 ja taulukossa 2. Tutkimusten tulosten mukaan kaukolämmön ostoenergiatarve yhden vuoden aikana koulurakennukselle on yhteensä 54,5 kWh/m². Maalämmön ostoenergiatarve yhden vuoden aikana on tutkimusten tulosten mukaan 17,4 kWh/m². Verrattaessa kaukolämmön ostoenergiankulutusta maalämmön ostoenergiankulutukseen voidaan todeta maalämmön ostoenergiatarpeen olevan noin kolme kertaa pienempi kuin kaukolämmön.

Taulukko 2. Koulurakennuksen ostoenergiatarpeet

Ostoenergia

		KL		MLP	
		kWh	kWh/m ²	kWh	kWh/m ²
■	Valaistus, kiinteistö	58556	16.9	58917	17.0
■	Laitteet, kiinteistö	33457	9.7	33664	9.7
■	LVI sähkö	3633	1.0	3610	1.0
■	IV-kone, kiinteistö	13835	4.0	13900	4.0
■	LP Sähkö			60077	17.4
	Yhteensä, Kiinteistösähkö	109481	31.6	170168	49.1
	Yhteensä	109481	31.6	170168	49.1
□	Lämmitys, kaukolämpö	188746	54.5		
	Yhteensä, Facility district heat	188746	54.5	0	0.0



Kuva 41. Ostoenergiatarpeet

Kuvassa 41 havainnollistuu koulurakennuksen kaukolämmön ja maalämmön vuotuinen ostoenergiatarve. Kuvasta nähdään, kuinka maalämmön ostoenergiatarve on huomattavasti alhaisempi verrattuna kaukolämpöön.

Koulurakennuksen erilaisten lämmitysenergianlähteiden vaikutus rakennuksen elinkaarikustannuksiin. Tutkimuksen tulokset osoittavat maalämmön olevan 444960 euroa (24 %) edullisempi 20 vuoden elinkaaren käyttökustannuksiltaan verrattuna kaukolämpöön, jonka 20 vuoden elinkaaren käyttökustannukset ovat 581860 euroa. Sivulla 48 taulukossa 3 on nähtävissä rakennuksen lämmitysenergian kokonaiskustannukset maalämmön sekä kaukolämmön mukaan.

Kaukolämpöenergian hinnan laskemiseen käytetty kaava 2

$$\left(\frac{188746 \frac{kWh}{a}}{1000 \frac{kWh}{MWh}} \right) * 77,96 \frac{\text{€}}{MWh} = 14714,64 \frac{\text{€}}{a} \quad (2)$$

Kaukolämmön perusmaksun laskentaan käytetty kaava 3

$$1,3 * (8000 + 12 * 255 kW) * 1,0 = 14378 \frac{\text{€}}{a} \quad (3)$$

Kaukolämmön kokonaishinta

$$(14714,64 + 14378) \frac{\text{€}}{a} = 29092,6 \frac{\text{€}}{a}$$

Sähkön siirron perusmaksun laskentaan käytetty kaava 4

$$2 * 524,83 \frac{\text{€}}{kk} * 12 \frac{kk}{a} = 12595,9 \frac{\text{€}}{a} \quad (4)$$

Sähkön siirtomaksun laskentaan käytetty kaava 5 (yö-/päiväsähkö)

$$\text{yösähkö} = 60077 \frac{kWh}{a} * 0,0481 \frac{\text{€}}{kWh} * \frac{9}{24} h = 1083,64 \frac{\text{€}}{a} \quad (5)$$

$$\text{päiväsähkö} = 60077 \frac{kWh}{a} * 0,0794 \frac{\text{€}}{kWh} * \frac{15}{24} h = 2981,32 \frac{\text{€}}{a} \quad (5)$$

Siirtomaksun kokonaishinta

$$(12595,9 + 1083,64 + 2981,32) \frac{\text{€}}{a} = 16660,86 \frac{\text{€}}{a}$$

Sähköenergian hinnan laskentaan käytetty kaava 6

$$0,092 \frac{\text{€}}{a} * 60077 \frac{kWh}{a} + \left(5 \frac{\text{€}}{kk} * 12 \frac{kk}{a} \right) = 5587,08 \frac{\text{€}}{a} \quad (6)$$

Sähköenergian kokonaishinta

$$(16660,86 + 5587,08) \frac{\text{€}}{\text{a}} = 22247,94 \frac{\text{€}}{\text{a}}$$

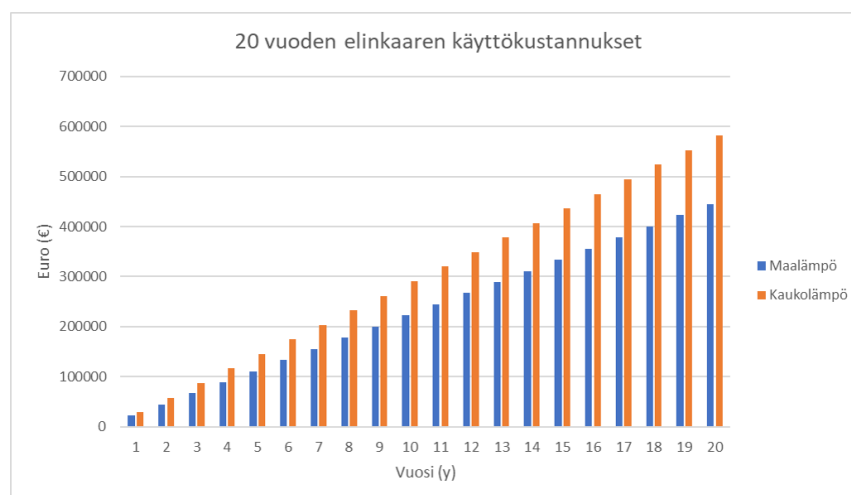
Taulukko 3. Energiamuotojen käyttökustannukset

Maalämmön kokonaiskustannukset		Kaukolämmön kokonaiskustannukset	
Kuukaudessa	1854 €/kk	Kuukaudessa	2424 €/kk
Vuodessa	22248 €/a	Vuodessa	29093 €/a
20 vuoden elinkaari	444960 €	20 vuoden elinkaari	581860 €

Lämmitysenergianlähteiden vertailuprosentin laskentaan käytetty kaava 7

$$\left(\frac{581860 - 444960}{581860} \right) \frac{\text{€}}{\text{a}} * 100 \% = 23,586 \% \quad (7)$$

Alla olevassa kuvassa 42 on kuvattu rakennuksen 20 vuoden elinkaaren käyttökustannukset maalämmön ja kaukolämmön lämmitysenergian osalta. Kaavioista nähdään maalämpöenergian käyttökustannusten olevan merkittävästi matalammat kaukolämpöenergian käyttökustannuksiin nähden.



Kuva 42. Lämmitysenergianlähteiden elinkaarivertailu

Työssä tehdyt laskenta- ja optimointimallit. Rakennuksista saatiin tehtyä toimivat laskenta- ja optimointimallit eli työn aikana tehdyt IDA ICE -tiedostot toimivat laskenta- ja optimointimalleina. Malleja voidaan hyödyntää tulevaisuudessa tilaajan tarpeen mukaan. Mallit toimivat laskennoissa ja niihin voitiin tehdä muutoksia tarpeen mukaisesti.

Energiakonsultointi. Opinnäytetyöhön kerätyllä teorialiedolla ja energialaskentaan vaaditun osaamisen avulla saavutettiin energiakonsultointiin tarvittava tietopohja.

8 TULOSTEN ARVIOINTI

Tutkimuksen tuloksia arvioitaessa tulee ottaa huomioon tutkimuksen kohteena olleet yksittäiset rakennukset. Tämän tutkimuksen tuloksia ei siten voida yleistää sellaisenaan koskemaan muita rakennuksia. Arvioinnissa täytyy muistaa myös tekijän kokemattomuus tutkijana sekä IDA ICE -ohjelmiston käyttäjänä, jotka ovat saattaneet vaikuttaa tutkimuksen luotettavuuteen. Opinnäytetyön eri vaiheissa työn luotettavuuden pohdinnan avulla pyrittiin raportoimaan mahdollisimman totuudenmukaisia ja objektiivisiä tuloksia. Työn luotettavuutta lisää myös opinnäytetyön teoriataustaan hyödynnetyt validit lähteet. Tutkimuksen teoriaosiossa viitattiin pääosin ympäristöministeriön ja Motivan lähdekirjallisuuteen, jotka valtionyhtiöinä toimivat puolueettomasti. Toteutusvaiheessa hyödynnettiin IDA ICE -ohjelmiston omia, Equa Simulation AB:n laatimia ohjeistuksia tiedon alkuperäisyyden varmistamiseksi. Lisäksi aiemman tutkimustiedon lähteinä käytettiin vain kansainvälisiä ja vertaisarvioituja tutkimusartikkeleja luotettavuuden varmistamiseksi.

Tutkimuksessa käytetyt asetuksen 1010/2017 vertailu U-arvot ja rakennemateriaalit sekä rakennuksen ilmanvuotoluku vaikuttavat tuloksiin negatiivisesti korottaen rakennuksen energiankulutusta arvojen ollessa todellisia suunnitteluarvoja suurempia. Tästä syystä tutkimuksessa olevat rakennusten ratkaisut saattavat olla tutkimuksen tuloksia energiatehokkaampia.

Toimistorakennuksen lämmityksen huipputehontarpeen pinta-alaa kohden oleva kilowattimäärä oli linjassa A-insinöörien tarjoaman, samassa käyttötarkoitukseluokassa olevan, vertailukohteen kanssa. Lisäksi toimistorakennuksen aikaisemmat energialaskelmat olivat osittain samat kuin opinnäytetyössä. Lämmityksen huipputehontarpeen ollessa linjassa vertailukohteeseen ja aikaisempiin laskelmiin aiemmat tulokset tukevat opinnäytetyön lopputuloksia. Eroavaisuuksia syntyi maalämpöpumpun tehossa, joka oli odotettavissa oleva lopputulos.

Toimistorakennuksen lämmityksen huipputehontarpeeseen vaikuttavat rakennuksen ilmatiiviyys, rakenteiden U-arvot, rakennuksen käyttö ja ilmavirrat. Haluttaessa vähentää rakennuksen lämmityksen huipputehontarvetta voidaan analysoida huipputehontarpeeseen vaikuttavat tekijät sekä tarvittaessa tehdä toimenpiteitä esimerkiksi rakennuksen ilmatiiviyden parantamiseksi.

Tutkimuksen tulokset toimistorakennuksen maalämpöpumpun tehosta olivat eriävät rakennuksen aikaisempien laskentatulosten kanssa, joka oli odotettu lopputulos. Lopputuloksen odotettavuus tukee opinnäytetyön luotettavuutta. Myös verrattaessa toimistorakennuksen lämmitysenergiankulutusta aiempaan tutkimukseen, tulokset olivat samansuuntaisia. Toimistorakennuksen lämmitysenergiankulutukseen pystytään vaikuttamaan parantamalla rakennusvaipan energiatehokkuutta ja ilmatiiveyttä sekä valitsemalla mahdollisimman energiatehokkaat ilmanvaihto- ja lämmitysjärjestelmät.

Tutkittaessa erilaisten lämmitysenergianlähteiden vaikutusta koulurakennuksen ostoenergiankulutukseen havaittiin maalämmön ($17,4 \text{ kWh/m}^2$) ostoenergiantarpeen olevan noin kolme kertaa pienempi verrattaessa kaukolämpöön ($54,5 \text{ kWh/m}^2$). Tuloksen mukaan voidaan todeta maalämmön olevan kaukolämmön sijasta optimaalisin ratkaisu koulurakennuksen lämmitysenergianlähteeksi sen ollessa kustannus- ja energiatehokkaampi vaihtoehto.

Koulurakennuksen lämmitysenergianlähteiden vaikutuksen rakennuksen elinkaarikustannuksiin vertailussa todettiin maalämmön olevan huomattavasti edullisempi lämmitysenergiaratkaisuksi koulurakennukselle 20 vuoden elinkaaren käyttökustannusten osalta. Tulosten mukaan maalämpö koulurakennuksen lämmitysenergiaratkaisuna pienentää rakennuksen 20 vuoden elinkaaren kokonaiskustannuksia. Maalämpö sijoittuu siis kustannus- ja energiatehokkaammaksi ratkaisuksi koulurakennukselle myös rakennuksen elinkaarikustannusten osalta.

Sankelon ym. [52] tutkimuksen tulokset toimenpiteistä uuden päiväkodin kustannusoptimaalisen energiatehokkuuden saavuttamiseksi tukevat osin opinnäytetyön tulosta. Myös Sankelon ym. tulosten mukaan uuden päiväkodin lämmitysenergianlähteenä maalämpöpumppu osoittautui kustannustehokkaammaksi vaihtoehdoksi kaukolämmön sijasta. [52.]

Tilaaajan toiveen johdosta työssä perehdyttiin myös energiakonsultoinnin teoreettiseen pohjaan. Aiheeseen tutustuminen toi ilmi energiakonsultoinnin olevan laaja osaamisalue, jota ohjaa useat direktiivit, asetukset, lait sekä laskentaohjeet. Energiakonsultoinnissa aiheellista on osata etsiä tietoa oikeista lähteistä sekä käyttää tietoa tarkoituksenmukaisesti. Työssä havaittiin myös, kuinka energiakonsultointi omaa yhä laajemman painoarvon nykypäivän ja tulevaisuuden rakentamisen saralla. Lisäksi tulevaisuuden energiakonsultointia ohjaavat lait, asetukset ja direktiivit tulevat tiukentumaan hiilidioksidipäästötaoitteiden tiukentuessa.

Laskenta- ja optimointimallit ovat toimivia ja tilaaja voi hyödyntää niitä oman tarpeensa mukaan. Mallit todettiin toimiviksi tekemällä muutoksia malleihin ja suorittamalla simulaatiot muutetuilla arvoilla. Simulaatioiden tuloksia vertailemalla alkuperäistuloksien kanssa todettiin mallit toimiviksi. Toimistorakennuksesta tehtyä IDA ICE -tiedostoa voidaan hyödyntää tulevaisuudessa rakennuksen taloteknisten järjestelmien tarkasteluun, koska kohderakennukselle on meillä juuri uusi selvitys lämmitysjärjestelmän energiankulutuksesta. Koulurakennuksen mallia voidaan markkinoida tulevaisuudessa asiakkaille esimerkiksi erilaisten lämmitysjärjestelmien vertailemiseksi eri kohteissa ja samalla tarjota kokonaista energiakonsultointipalvelua.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää toimistorakennuksen lämmityksen huipputehontarve ja optimaalisin teho rakennuksen maalämpöpumpulle. Koulurakennuksen osalta tavoitteena oli verrata kauko- ja maalämmön elinkaarikustannuksia ostoenergiankulutuksen ja käyttökustannusten osalta. Lisäksi tavoitteena oli rakentaa rakennusten lämmitysenergianlähteiden optimointiin soveltuvia IDA ICE laskenta- ja optimointimalleja, joita voidaan hyödyntää IFC-tietomallin kanssa. Tavoitteet saavutettiin tutustumalla aiheen teoreettiseen viitekehukseen, syventymällä energialaskentaan ja IDA ICE -ohjelmiston käyttöön sekä perehtymällä IFC-mallin toimintaan. Tutkimuksen tulokset todettiin oikeiksi vertailemalla niitä todellisiin vertailulaskelmiin ja käymällä tulokset läpi yhdessä tilaaajan kanssa.

Opinnäytetyön teoriatausta ja tulokset muodostavat laajan kokonaisuuden energialaskennan ollessa opinnäytetyön teoriataustana sekä tutkimuskysymysten koskiessa kahta eri kohderakennusta. Laajuuden vuoksi opinnäytetyössä päädyttiin useisiin johtopäätöksiin.

IDA ICE -ohjelmisto soveltuu hyvin tutkimuksen kohteena olleiden uudis- ja olemassa olevien rakennusten sekä muiden käyttötarkoituksiluokkien rakennusten energialaskentaan ja -selvitykseen. IDA ICE -ohjelmisto myös mahdollistaa yksityiskohtaisen tarkastelun rakennuksen rakenteista, rakennusmateriaaleista ja taloteknisistä järjestelmistä etsittäessä energiatehokkuuden kannalta optimaalisinta ratkaisua. Ohjelmistolla on mahdollista tarkastella koko rakennusta tai tarpeen mukaan rakennuksen yksittäisiä tiloja.

IDA ICE -ohjelmistoa kannattaa hyödyntää erilaisten lämmitysjärjestelmien ja -energianlähteiden kohdekohtaiseen tarkasteluun. Lisäksi kyseinen ohjelmisto soveltuu hybridijärjestelmien kuten esimerkiksi kaukolämmön, lämpöpumpun ja aurinkoenergian hyödyntämismahdollisuuksien kartoitukseen. Ohjelmisto mahdollistaa lämmitys- ja jäähdytystehontarpeen laskennan, rakennuksen ylikuumenemisen tarkastelun sekä erilaisten optimointien suorittamisen. Ohjelmistoon on tarjolla myös erilaisia lisäosia, jotka mahdollistavat energiakaivon ja -kaivokentän mitoituksen sekä kohteen monitavoiteoptimoinnin. IDA ICE -ohjelmistolla saaduilla tuloksilla voidaan auttaa suunnittelijoita, valvojia ja työn toteuttajia.

Maalämpö on energiatehokkaampi lämmitysjärjestelmä useimmissa kohteissa kaukolämpöön verrattaessa. Sähkön hintojen noususta huolimatta maalämpö on käyttökustannuksiltaan kustannustehokkaampi ratkaisu kuin kaukolämpö. Opinnäytetyössä otettiin elinkaarikustannuksia laskettaessa huomioon vain käyttökustannukset. Elinkaarikustannusten laskennan lopputulokset olisivat olleet erilaiset huomioitaessa myös järjestelmien investointi- ja huoltokustannukset.

Energiakonsultointi luo oman, alati laajenevan, erityisosaamisalueen rakennus- alalla. Energiakonsultointi on tärkeässä roolissa tulevaisuudessa rakennusten energiatehokkuutta ja päästöjä koskevien määräysten tiukentuessa. Konsul-

tointia tarvitaan yhä enemmän myös ilmastonlämpenemisestä johtuvan rakennusten jäähdytystarpeiden kasvaessa. Rakennusten yllämpenemisen vuoksi tarvitaan lisääntyvässä määrin tilakohtaisia energiatehokkaita jäähdytysratkaisuja. Lisäksi meneillään olevan energiamurros ja pyrkimys energiatuotannon omavaraisuuteen lisäävät energia-alan työllisyyttä ja energiakonsultoinnin tarvetta.

Opinnäytetyön aiheen laajuus ja haastavuus vaativat perinpohjaista tutustumista sekä runsasta ajankäyttöä energialaskennan ja -konsultoinnin hallitsemiseksi. Opinnäytetyön sisällön pystyisi pilkkomaan useiksi eri tutkimuksiksi, jos haluttaisiin syventyä tarkemmin vain yhteen aihepiiriin tai kohderakennukseen.

Opinnäytetyön teoriataustan ja tulosten pohjalta työn tilaajalle esitetään toimenpide-ehdotuksena hyödyntämään opinnäytetyöhön luotuja laskentamalleja sekä energiakonsultointia koskevaa tietopohjaa konsultoinnin käytännön työkaluksi. Tutkimuksen helpottamiseksi ja tulosten parantamiseksi olisi hyvä tarkastella ainoastaan yhtä kohderakennusta, josta olisi jo valmista vertailuaineistoa. Toinen vaihtoehto olisi vertailla kahta samankokoista ja -tyylistä eri käyttötarkoituseräluokan rakennusta keskenään, jolloin nähtäisiin käyttötarkoituseräluokan vaikutukset energiatehokkuuteen.

Yksittäisen rakennuksen tapauskohtaisella tutkimuksella voitaisiin selvittää rakennuksen optimaalisimmat energiaratkaisut ja niiden tuottamat säästöpotentiaalit. Jatkotutkimusaiheena kannattaisi myös selvittää energiaratkaisujen tuottaman säästöpotentiaalinvaihtelu rakennuskustannuksiin ja niiden hyödyntämismahdollisuudet, jota kautta mahdollistuisi entistä energiatehokkaampi rakennus verrattaessa eri toteutusmuotojen elinkaarikustannuksia. Jatkotutkimuksessa yksittäistä rakennusta voisi tarkastella myös monitavoiteoptimointityökalun (MOBO-työkalu) avulla.

Jatkossa voitaisiin myös toteuttaa yksityiskohtainen tarkastelu eri rakenneosien ja taloteknisten järjestelmien vaikutuksesta rakennuksen E-lukuun. Tutkimuksen rakennuksille olisi mielenkiintoista toteuttaa tulevaisuudessa myös kokonainen energiaselvitys sekä rakennuksen hiilijalanjälkilaskenta. Myös IDA ICE

-ohjelmiston ja IFC-tietomallien yhteensovitusongelmista olisi hyödyllistä toteuttaa yksityiskohtainen tutkimus. Lisäksi tulevaisuudessa pystyttäisiin tarkastelemaan pelkästään kohteiden jäähdytystarvetta ja -ratkaisuja sekä aurinkoenergian hyödyntämismahdollisuuksia. Jatkotutkimuksena voisi toimia myös tutkimuksen kaltaisten rakennusten keskinäinen vertailu rakennusten eroavaisuuksista eri käyttötarkoituseroissa.

LÄHTEET

1. Motiva. Rakentaminen ja rakennukset. WWW-dokumentti. 2020. Saatavissa: https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kestavat_julkiset_hankinnat/tietopankki/rakentaminen_ja_rakennukset [viitattu 20.2.2022].
2. Rubio-Bellino, C., Pérez-Fargallo, A. & Pulido-Arcas, J. Energy Optimization and Prediction in Office Buildings. *SpringerBriefs in Energy*. Springer, Cham, 2018, 1–12.
3. Benndorf, G.A., Wyrstcil, D. & Réhault, N. Energy performance optimization in buildings: A review on semantic interoperability, fault detection, and predictive control. *Applied Physics Reviews* 5/2018, 041501.
4. Jokisalo, J., Sankelo, P., Vinha J., Sirén, K. & Kosonen, R. Cost-optimal energy performance renovation measures in a municipal service building in a cold climate. Clima 2019 Congress. E3S Web of Conferences, Vol 111 (2019). Bukarest, Romania, 26–29. Konferenssijulkaisu. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/129619/Jokisalo_Cost_optimal_energy_performance_renovation_measures_in_a_municipal_service_in_a_cold_climate.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 6.3.2022].
5. Salvalai, G. Implementation and validation of simplified heat pump model in IDA-ICE energy simulation environment. *Energy and Buildings* 2012, vol 49, 132–141. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0378778812000692> [viitattu 7.3.2022].
6. Seppänen, O. Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi 20 vuotta. The Finnish Association of HVAC Societies FINVAC ry. WWW-dokumentti. 2022. Saatavissa: <https://finvac.org/rakennusten-energiatehokkuusdirektiivi-20-vuotta/> [viitattu 1.3.2022].
7. Työ- ja elinkeinoministeriö. Energiatehokkuusdirektiivi ja energiatehokkuuslaki. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://tem.fi/energiatehokkuusdirektiivin-toimeenpano> [viitattu 25.2.2022].
8. Motiva. Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjauskeinot/direktiivit/rakennusten_energiatehokkuusdirektiivi [viitattu 25.2.2022].
9. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2012/27/EU.
10. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatodistuksesta 1048/2017.
11. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017.
12. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017.

13. Liedes, R. Rakennusten energiatehokkuus. Sähköinfo Oy, Espoo. 2017.
14. Ensto. Sähkölämmitysratkaisut. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://docplayer.fi/58694-Sahkolammitysratkaisut-building-technology.html> [viitattu 27.2.2022].
15. HSY. Taloyhtiön energiatehokas ylläpito. Energiaeksperttikoulutus. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://slideplayer.fi/slide/15162988/> [viitattu 25.2.2022].
16. Väylävirasto. Mikä on tietomalli? WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://vayla.fi/palveluntuottajat/inframallit/mika-on-tietomalli-> [viitattu 4.3.2022].
17. Lehtoviita, T. Rakennetun ympäristön tietomallit ja niille asetettavat vaatimukset. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://rakentaminen.karelia.fi/wp-content/uploads/2020/10/Rakennetun-ympa%cc%88risto%cc%88n-tietomallit-ja-niille-asetettavat-vaatimukset_Lehtoviita.pdf [viitattu 7.3.2022].
18. Building Smart Finland. Standardit. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://buildingsmart.fi/standardit/> [viitattu 28.2.2022].
19. Building Smart Finland. Tietomallityöskentelyn kehittäminen talotekniikka-alalla. WWW-dokumentti. 2017. Saatavissa: <https://buildingsmart.fi/tietomallityoskentelyn-kehittaminen-talotekniikka-alalla/> [viitattu 4.3.2022].
20. A-insinöörit. Energiakonsultointi. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ains.fi/palvelut/vahahiilinen-rakentaminen-ja-kiertotalous/energiakonsultointi> [viitattu 20.3.2022].
21. Sieniutycz, S. & Jezowski, J. Energy Optimization in Process Systems. Elsevier Science. E-kirja. 2009. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/book/9780080451411/energy-optimization-in-process-systems#book-info> [viitattu 1.3.2022].
22. Lahtinen, T. Alueellinen energiaoptimointi. Aalto-yliopisto. Diplomityö. PDF-dokumentti. 2020. Saatavissa: https://aalto-doc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/43598/master_Lahtinen_Toni_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 10.3.2022].
23. Hasan, A., Palonen, M. & Hamdy, M. Simulation-Based Optimization for Energy and Buildings. Teoksessa Sayigh, A. (toim.) Renewable Energy in the Service of Mankind Vol I. Springer, Cham. 2015.
24. Greenfoot. Rakennussimulointi. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.greenfoot.fi/rakennussimulointi> [viitattu 5.3.2022].
25. IDA Indoor Climate and Energy. HTML-ohje. IDA Modeler. Simulating. Param runs and optimization.

26. Equa. IDA Indoor Climate and Energy. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.equa.se/en/ida-ice> [viitattu 23.3.2022].
27. IDA Indoor Climate and Energy. HTML-ohje. ESBO User Guide.
28. IDA Indoor Climate and Energy. HTML-ohje. IDA Modeler. Modeling. .
29. IDA Indoor Climate and Energy. HTML-ohje. ICE manual. Getting started with the advanced level.
30. Equa Simulation Technology Group. IDA ICE Getting Started Guide. 2018.
31. Equa. IDA Indoor Climate and Energy. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.equa.se/images/building/pdf/IDA_ICE_brochure.pdf [viitattu 11.3.2022].
32. Ashrae. Standard 90.1-2019—Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-90-1> [viitattu 16.3.2022].
33. Equa. ASHRAE 90.1. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.equa.se/fi/ida-ice/extensions/ashrae-90-1> [viitattu 16.3.2022].
34. Ympäristöministeriö. Energiatohokkuus. Suomen rakentamismääräyskokoelma. PDF-dokumentti. 2018. Saatavissa: https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Ohje---Rakennuksen-energiankulutuksen-ja-lammitystehontarpeen-laskenta-20-12-2017-4332AA81_75E1_4CA0_B208_B0ACB60A267F-133692.pdf/277c79e7-2a12-5052-ba33-cb2e2c8709ab/Ohje---Rakennuksen-energiankulutuksen-ja-lammitystehontarpeen-laskenta-20-12-2017-4332AA81_75E1_4CA0_B208_B0ACB60A267F-133692.pdf?t=1603260201597 [viitattu 28.2.2022].
35. Ympäristöministeriö. Tasauslaskentaopas. Rakennuksen lämpöhäviön määräysten mukaisuuden osoittaminen. PDF-dokumentti. 2018. Saatavissa: [https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Tasauslaskenta-opas-2018-310317-181217-\(002\)-8DA891B6_94AC_4367_9E45_D59ECED00CCF-133703.pdf/acb4fd5e-e622-c6e7-c0f0-97aa59de0886/Tasauslaskenta-opas-2018-310317-181217-\(002\)-8DA891B6_94AC_4367_9E45_D59ECED00CCF-133703.pdf?t=1603260250564](https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Tasauslaskenta-opas-2018-310317-181217-(002)-8DA891B6_94AC_4367_9E45_D59ECED00CCF-133703.pdf/acb4fd5e-e622-c6e7-c0f0-97aa59de0886/Tasauslaskenta-opas-2018-310317-181217-(002)-8DA891B6_94AC_4367_9E45_D59ECED00CCF-133703.pdf?t=1603260250564) [viitattu 1.4.2022].
36. Lylykangas, K., Andersson, A., Kiuru, J., Nieminen, J. & Päätaalo, J. Rakenteellinen energiatohokkuus -Opas. PDF-dokumentti. 2015. Saatavissa: https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/oppaat-ohjeet/ret_opas_20150917.pdf [viitattu 10.3.2022].
37. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatodistuksesta 176/2013.

38. Energiatodistuksen kokonaisenergiankulutuksen (E-luvun) määrittäminen. PDF-dokumentti. 2016. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/16567/Energiatodistuksen kokonaisenergiankulutuksen - E-luvun - maarittaminen liite 1 - 353-2016.pdf](https://www.motiva.fi/files/16567/Energiatodistuksen_kokonaisenergiankulutuksen_-_E-luvun_-_maarittaminen_liite_1_-_353-2016.pdf) [viitattu 26.2.2022].
39. Rakentaja. Mitä E-luku kertoo rakennuksen energiatehokkuudesta? WWW-dokumentti. 2012. Saatavissa: https://www.rakentaja.fi/artikkelit/9692/mita_eluku_kertoo.htm [viitattu 4.3.2022].
40. Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu. Rakennuksen energiatodistus. WWW-dokumentti. 2020. Saatavissa: [https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennuksen energia ja ekotehokkuus/Rakennuksen energiatodistus](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennuksen_energia_ja_ekotehokkuus/Rakennuksen_energiatodistus) [viitattu 2.3.2022].
41. Motiva. Mikä on energiatodistus? WWW-dokumentti. 2021. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiatodistusneuvonta/mika_on_energiatodistus [viitattu 25.2.2022].
42. Ympäristöministeriö. Energiatodistusopas 2018. Rakennuksen energiatodistus ja E-luvun määrittäminen. PDF-dokumentti. 2018. Saatavissa: [www.motiva.fi/files/16464/Energiatodistusopas 2018 - Rakennuksen energiatodistus ja E-luvun maarittaminen](http://www.motiva.fi/files/16464/Energiatodistusopas_2018_-_Rakennuksen_energiatodistus_ja_E-luvun_maarittaminen) [viitattu 25.2.2022].
43. Laki rakennuksen energiatodistuksesta 18.1.2013/50.
44. Mononen, T. Kokonaisten rakennusten energiamallintaminen kuukausi- ja tuntitasolla. Jyväskylän yliopisto. Uusiutuvan energian koulutuslaitos, fysiikan laitos. Pro gradu -tutkielma. PDF-dokumentti. 2014. Saatavissa: <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/43145/1/URN%3ANBN%3Afi%3Aju-201404031458.pdf> [viitattu 3.3.2022].
45. Equa. IDA Indoor Climate and Energy. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.equa.se/fi/ida-ice> [viitattu 11.3.2022].
46. MagiCAD s.a. MagiCAD Comfort & Energy. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.magicad.com/fi/mc_software/magicad-comfort-energy/#ominaisuudet-autocadille [viitattu 11.3.2022].
47. Runsten, S., Berninger, K., Heljo, J., Sorvali, J., Kasanen, P., Vihola, J & Uotila, U. Pienituloisen omistusasujan energiaköyhyys. Energia- köyhyyden jatkoselvitys liittyen asuntojen lämmitysremontteihin ja energiakuluihin. Ympäristöministeriö, Helsinki. PDF-dokumentti. 2015. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10138/153653/YMra_6_2015.pdf?sequence=1 [viitattu 10.4.2022].

48. Kuopion Energia. Riistavesi, Kaukolämpöhinnasto. WWW-dokumentti. 2022. Saatavissa: https://www.kuopionenergia.fi/wp-content/uploads/2021/11/ke_kaukolampo_hinnasto_A4_2022_riistavesi_web.pdf [viitattu 15.4.2022].
49. PKS Sähkönsiirto Oy. Verkkopalveluhinnasto. WWW-dokumentti. 2021. Saatavissa: https://www.pks.fi/wp-content/uploads/2022/02/PKS-sa%CC%88hko%CC%88nsiirto_verkkopalveluhinnasto_2022.pdf [viitattu 15.4.2022].
50. Opetus.TV s.a. MAB6 – Talousmatematiikka. Prosenttilaskentaa. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://opetus.tv/lukio-ops2016/matematiikka/mab6/prosenttilaskentaa/> [viitattu 16.4.2022].
51. Laurila, T. ArchiCadin ja IDA ICEN välinen IFC-yhteentoimivuus. Tampereen ammattikorkeakoulu. Rakennusarkkitehtikoulutus. Opinnäyte-työ. PDF-dokumentti. 2018. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/149813/Laurila_Topias.pdf?sequence=2&isAllowed=y [viitattu 4.4.2022].
52. Sankelo, P., Jokisalo, J., Nyman, J., Vinha, J. & Sirén, K. Cost-optimal energy performance measures in a new daycare building in cold climate. *International Journal of Sustainable Energy* 38/2019, 104–122.