



Emmanuel Madukaibe

Energian optimointi rakennusalalla tietomallinnuksen avulla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Opinnäytetyö

15.5.2024

Tiivistelmä

Tekijä:	Emmanuel Madukaibe
Otsikko:	Energian optimointi rakennusalalla tietomallinnuksen avulla
Sivumäärä:	59 sivua
Aika:	15.5.2024
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	talotekniikka
Ammatillinen pääaine:	LVI-suunnittelu
Ohjaaja:	Lehtori Timo Värinen

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli ymmärtää tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen käsitteitä rakennusalalla ja näiden teknologioiden hyödyntämistä rakennuksen energian optimoinnissa.

Insinööritö toteutettiin hyödyntämällä kirjallisuus- ja haastattelututkimusta. Lisäksi kerättiin ja analysoitiin vastauksia haastattelututkimukseen. Yhdistelemällä haastattelututkimusta kirjallisuustutkimukseen saatiin kattava yleiskuva olemassa olevasta tiedosta tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen nykyisestä käytöstä rakennusalalla.

Opinnäytetyössä käsiteltiin integroinnin etuja tietomallinnusta energiamallinnukseen eli tietomallinnuspohjainen energiamallinnus, näiden järjestelmien käyttöönottoon liittyviä asioita, koulutuksen tärkeyttä näissä teknologioissa rakennusten energiatehokkuuden parantamiseksi sekä kestäväen kehityksen edistämiseksi.

Työssä päädyttiin tulokseen, että tietomallinnus voi sisältää lämpö- ja fyysisiä tietoja eri rakennuksen komponenteista, mutta se ei vielä pysty suorittamaan perusteellista analyysia rakennuksen energiatehokkuudesta ja hahmottelemaan optimointiskenariaatioita. Näin ollen tietomallinnuksen ominaisuudet olisi toteutettava energiamallinnusohjelmiston mahdollisuuksilla, jotka on kehitetty erityisesti energiasimulointien suorittamiseen. Lisäksi tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen käyttöönottoon vaikuttaa yhteentoimivuuden puute, joka johtuu geometrinen tietojen epä johdonmukaisuudesta muuntamisen aikana eli tietomallinnuksesta energiamallinnukseen.

Avainsanat: Energia optimointi, BIM, rakennusten tietomallinnus, BEM, rakennusten energiamallinnus, tiedonvaihto.

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check ohjelmalla.

Abstract

Author: Emmanuel Madukaibe
Title: Energy Optimization in Building Industry by Building Information Modelling
Number of Pages: 59 pages
Date: 15.5.2024

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Building Services Engineering
Professional Major: HVAC Design
Supervisor: Timo Värinen, Senior Lecturer

The purpose of this thesis was to study the concepts of Building Information Modelling (BIM) and Building Energy modelling (BEM) in building industry, and the use of them in buildings' energy optimization.

The thesis was done by collecting information from literature and conducted interviews, whose answers were analysed for this study. The answers combined with the literature review provided a comprehensive overview of the existing information of the use of BIM and BEM in building industry.

The thesis highlighted the advantages of the integration of BIM and BEM, that is BIM-based BEM methodology, discussed problems in the implementation of the systems, the importance of relevant education in these technologies for the enhancement of the energy efficiency of buildings and the promotion of sustainable development.

This thesis concluded that BIM can contain thermal and physical information of different building components, but it is not able to perform a thorough analysis of a building's energy performance and outline optimization scenarios. Therefore, the capabilities of BM should be supported by BEM, specifically designed for energy simulation. In addition, the implementation of BIM and BEM in building industry is affected by lack of interoperability between BIM and BEM, which results from the inconsistency of geometrical information during transformation.

Keywords: Energy optimisation, Building Information Modelling, BIM, Building Energy Modelling, BEM, Information exchange.

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	9
2	Rakennusten tietomallinnus	10
2.1	Tietomallinnuksen tekniset ominaisuudet	11
2.2	Tietomallinnuksen ulottuvuudet rakennusalalla	13
2.3	Rakennusten energiamallinnus	16
2.4	Tietomallinnus-sovellukset energiamallinnukseen	19
2.4.1	Tietomallinnuspohjaiset energiamallinnus-menetelmät	22
2.4.2	Tietomallinnuspohjaisen energiamallinnuksen rajoitukset	24
2.5	Yhteentoimivuus	25
2.6	Tietomallinnus- ja energiamallinnustyökalut	28
2.6.1	VIP Energy	28
2.6.2	IDA-ICE	29
2.6.3	Energy Plus	29
2.6.4	GBS	30
2.7	Tietomallinnus- ja energiamallinnuksen edut	30
2.8	Tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen käyttöönoton haasteet	32
2.8.1	Muutosvastarinta	33
2.8.2	Osaamisvaje ja työvoima	34
2.8.3	Standardoinnin puute	34
3	Tutkimusmenetelmät	35
3.1	Tutkimuksellinen lähestymistapa	35
3.2	Tutkimuskysymykset	36
3.3	Haastattelun toteuttaminen	37
3.4	Haastateltavan taustatiedot	38
4	Haastattelun tulokset	39
4.1	Tietomallinnus- ja energiamallinnuksen määritelmät	39
4.2	Tiedonvaihto tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen välillä	40
4.3	Tietojen tarkkuus tietomallinnuksesta energiamallinnukseen	42
4.4	Mallien yksityiskohtaisuus	42
4.5	Tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen mahdolliset edut	43

4.6	Tietomallinnus- ja energiamallinnustyökalut	46
4.7	Tietomallinnus- ja energiamallinnusosaaminen	47
4.8	Tietomallinnus- ja energiamallinnuksen käyttöönotossa haasteita	48
4.9	Tietomallinnus- ja energiamallinnuksen tulevaisuus	50
5	Yhteenveto	51
	Lähteet	53

Lyhenteet ja käsitteet

3D-malli:	Digitaalinen geometrinen kolmiulotteinen malli, joka muodostuu X-, Y- ja Z-akselista, joka helpottaa visuaalisessa hahmottamisessa.
4D-malli:	Tietomallinnus, joka koostuu kolmiulotteisesta ja aika-muuttujan lisäyksestä.
5D-malli:	Tietomallinnus, joka koostuu 4D-mallista ja kustannustiedon lisäyksestä.
6D-malli:	Tietomallinnus, joka sisältää kestävän kehityksen tietoa 5D-mallin lisäksi.
7D-malli:	Tietomallinnus, joka sisältää kiinteistön tai rakennuksen ylläpidon tietoa 6D-mallin lisäksi.
ANSI:	<i>American National Standards Institute</i> eli järjestö, joka on voittoa tavoittelematon ja hallinnoi sekä koordinoi Yhdysvaltain vapaaehtoisia standardeja ja vaatimustenmukaisuuden arviointijärjestelmää.
ASHRAE:	<i>The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning</i> . Kansainvälinen organisaatio, joka keskittyy rakennusjärjestelmien, energiatehokkuuden, sisäilman laadun, jäähdytyksen ja kestävän kehityksen edistämiseen toimialalla.
BuildingSMART Finland:	Omistajien ja palvelujen tuottajien muodostama foorumi suomalaisista kiinteistö- ja infra-ala.
CAD:	<i>Computer Aided Design</i> . Tietokoneavusteinen suunnittelu.

<i>EnergyPlus:</i>	Energiasimulaatio-ohjelmisto, joka on ilmainen, avoimen lähdekoodin ja monialustainen ohjelmisto, jota käytetään rakennusten energian- ja vedenkäytön mallinnukseen.
<i>gbXML:</i>	Lyhenne <i>Green Building</i> tietojenkäsittelystä (gbXML), joka on Autodeskin kehittämä tiedostomuoto helpottamaan rakennustietojen siirtoa tietomallinnuksesta energia-analyysityökaluihin.
GUI:	<i>Graphical User Interface (GUI)</i> . Graafinen käyttöliittymä,
IAI:	<i>International Alliance for Interoperability</i> . Kansainvälinen järjestö, jonka tavoitteena on parantaa tiedonvaihtoa käytettävien ohjelmistosovellusten välillä rakennus- alalla.
IDA-ICE:	<i>IDA Indoor Climate and Energy</i> , joka on rakennuksen suorituskyvyn simulointiohjelmisto energiankulutuksen, sisäilman laadun ja lämpömukavuuden simulointiin.
IDF:	<i>Input Data Format</i> . Tiedostomuoto, jota käytetään EnergPlus-ohjelmassa.
IFC:	<i>Industry Foundation Classes</i> . BuildingSmartin kehittämä tiedonsiirtoon standardi, joka on alustaneutraali ja mahdollistaa eri rakennusaloilla käytettävien tietomallinnus-ohjelmien yhteistoimivuuden. Ohjelmistosta toiseen voidaan siirtää IFC-tiedostona malleja.
ISO:	<i>International Organization for Standardization</i> . Kansainvälinen standardisointijärjestö.

LCA:	<i>Life Circle Assessment</i> eli elinkaariarviointi
LVI:	Lämpö, vesi, ilmanvaihto.
Objekti:	Komponentit, jotka muodostavat tietomallinnuksen mallin, ovat älykkäitä, geometrisia ja tallentavat tietoja. Jos jotakin elementtiä muutetaan, tietomallinnusohjelmisto päivittää mallin muutosta vastaavaksi.
Parametri:	Objektin annettu arvo tai sen ominaisuus.
USDOE:	<i>United States Department of Energy</i> . Yhdysvaltain energiaministeriö.
XML:	<i>Extensible Markup Language</i> . Lyhenne tietojenkäsittelystä eli sen avulla tietoa tiedosta kuvataan.

1 Johdanto

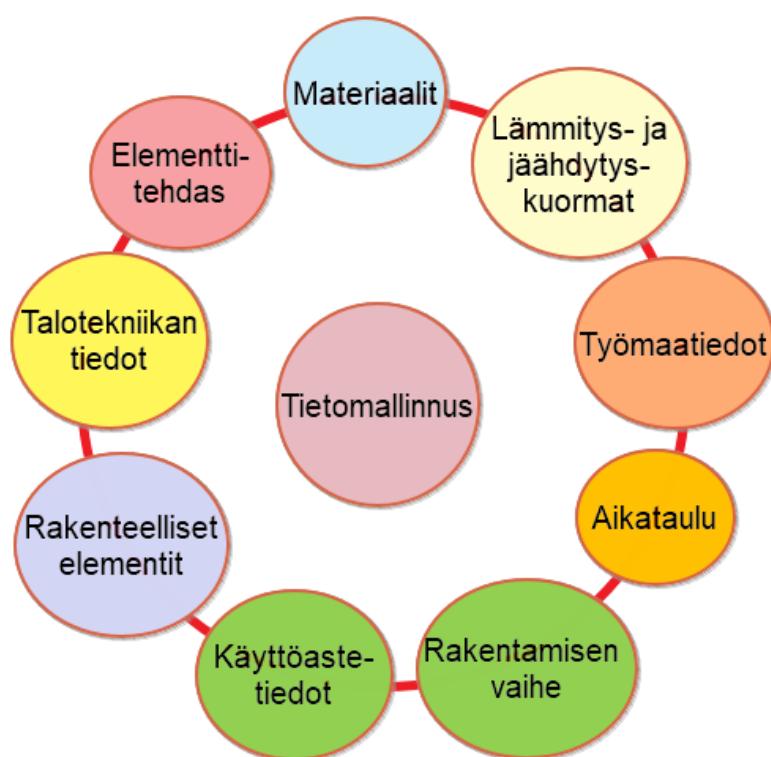
Energiankulutus rakennusalalla on noin 20–40 prosenttia maailman energiankulutuksesta, mikä vastaa kolmasosaa kaikista kasvihuonekaasupäästöistä [Laine ym. 2017]. Ilmastonmuutos vaikuttaa energiankulutukseen, hiilijalanjälkeen ja rakennusten sisäilmastoon. Siksi rakennusalojen asiantuntijat ja sääntelyelimet tunnustavat tarvetta rakentaa energiatehokkaita rakennuksia ilmaston haitallisten vaikutusten lieventämiseksi. [Egwunatum ym. 2016: 19–28.]

Rakennusten energiatehokkuuden analysointi suunnitteluvaiheessa on tärkeää sen ympäristövaikutusten ja rakennuksen elinkaaren vuoksi [Laine ym. 2017]. Useimmissa energia-analyyseissä käytetään menetelmää, jossa käytetään tilastollisia arvioita tai yksinkertaistettuja staattisia laskelmia, joilla on rajoituksia. On edullista käyttää energia-analyysityökalua tietomallinnuksen yhteydessä energia-analyysiprosessin nopeuttamiseksi, yksityiskohtaisempien ja tarkempien tulosten saamiseksi sekä energiatehokkaiden rakennussuunnitelmien luomiseksi. [Gao ym. 2019: 320–343.] Energiasimulaatio-ohjelmistot, kuten Energy Plus, ja IDA ICE, on kehitetty tarjoamaan tarkempia energia-analyysituloksia [Laine ym. 2017].

Insinööriyön tavoitteena on tarkastella tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen käsitteitä rakennusalalla ja näiden teknologioiden hyödyntämistä rakennuksen energian optimoinnissa. Työssä perehdytään aiheeseen kirjallisuuskatsauksella sekä kyselytutkimuksella. Lisäksi tarkastellaan etuja tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen integroinnissa, käyttöönottoon liittyviä asioita, kuten tiedonvaihtoa, yhteensopivuutta, tietojen eheyttä ja standardointia, koulutuksen tärkeyttä näissä teknologioissa rakennusten energiatehokkuuden parantamiseksi sekä kestäväen kehityksen edistämiseksi. Työssä ei käsitellä määrälueteloita, tietomallinnusprojektin toteutuskustannuksia eikä törmäystarkasteluja.

2 Rakennusten tietomallinnus

Tietomallinnus on yhteisöllinen tapa parantaa suunnittelun, rakentamisen sekä työskentelyn laatua. Tietomallinnuksessa yhdistetään teknologiaa, rakennusprosessia ja ihmisten rakentamista tulosten saavuttamiseksi. Tietomallinnus helpottaa myös projektin esittämistä visualisesti päättäjille sekä yleisölle. Kuvassa 1 on esimerkki tietomallinnuksen syöttötiedoista eli tarvittavat tiedot, jotka toimivat lähtökohtina suunnittelun ja rakentamisen dokumentaatioihin. Tällaiset tiedot kuvaavat hankkeen alueella olemassa olevia kohteita.



Kuva 1. Tietomallinnuksen syötteet [Zhao 2017].

Tietomallinnuksen avulla rakentaminen digitaalisella aineistolla on turvallisempaa ja tehokkaampaa. Rakennusten tietomallinnus on myös rakennuksen digitaalinen esitys, joka sisältää runsaasti tietoa sekä on objektikeskeinen, älykäs ja parametrinen. Tietomallinnuksen avulla voidaan tuottaa tietoja, jotka vastaavat monenlaisiin käyttäjien tarpeisiin ja auttavat suunnittelijoita tekemään päätöksiä

sekä parantamaan hankkeiden toteutusta helpottamalla tietojen keräämistä ja analysointia. [Gao ym. 2019: 320–343.]

Tietomallinnus sisältää tietoa, joka helpottaa objektien erottelemista kokonaisuudesta sekä tukee geometriatietoja. Tietomallinnus on tulkittu digitaaliseksi muodoksi mallinnuksesta, jonka ansiosta käsitellä tietokoneella ja kopioina usealla tavalla. [Jäväjä & Lehtoviita 2016: 12.] Tietomallinnus ei ole vain ohjelmistokokonaisuus tai 3D-malli. Se ei sisällä ainoastaan malliobjekteja vaan valtavat määrät tietoja, jotka muodostavat prosessin sekä projektin tiedonvaihdolle kaikkien asianomaisten osapuolten kanssa. [Mitä on BIM]

Perinteisen työnkulut perustuivat useisiin tiedostomuotoihin ja irrotettuihin prosesseihin. Ne menivät nopeasti sekaisin, kun muutoksia tehtiin. Tietomallinnuksen työnkulut mahdollistavat paljon dynaamisempia ja yhtenäisempiä lähestymistapoja projektinhallintaan [Mitä on BIM]. Tietomallinnusteknologiaa voidaan hyödyntää eri hankkeen vaiheissa, kuten tiedon hankkimisessa, tarkistamisessa sekä muuttamisessa, jolloin tarkoituksena on vahvistaa yhteistyötä.

Suomessa rakennusalan ammattilaiset käyttävät rakennushankkeen suunnitteluun ja hallintaan yleisesti seuraavia tietomallinnussovelluksia: Solibri, ArchiCAD, Navisworks, Trimble, Revit [Bolpagni ym. 2021: 29–54]. Näillä sovelluksilla käytetään tietomallinnusobjekteja. Tietomallinnusobjekti on tarkka digitaalinen esitys fyysisestä tuotteesta, joka on mallinnettu 3D:ssä [Mitä on BIM].

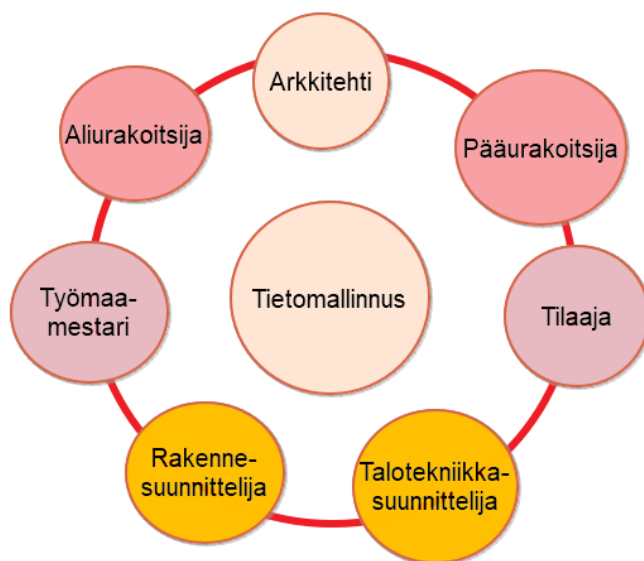
2.1 Tietomallinnuksen tekniset ominaisuudet

Simulaatioilla voidaan tarkastella hankkeen suunnitteluvaiheessa esimerkiksi lämmönsiirtymistä, poistumisturvallisuutta, energiankulutusta ja auringonvaloa. Kolmiulotteisia tai vastaavia malleja käytetään tarjouskilpailutus- ja rakennusvaiheessa hankkeen kehitysaikana rakennusorganisaation suunnittelun ja kustannusten hallintaan sekä kohtuullisen rakennussuunnitelman määrittämiseen rakentamisen ohjaamiseksi. Simulointia voidaan tehdä myös päivittäisten

hankkeiden käytössä tapahtuvien hätätilanteiden takia, kuten tulipalon evakuoinnin tai maanjäristyksen. [Yang ym. 2017: 1–7.]

Visualisoinnilla tietomallinnuksessa tarkoitetaan prosessia, jossa rakennus tai infrastruktuuriprojekti esitetään visuaalisessa muodossa. Tämä antaa katsojille realistisen kuvan rakennuksesta. Tässä teknologiassa käytetään kehittynyttä 3D-kuvantamiskäsitettä luotaessa virtuaalinen malli, joka kuvaa tarkasti todellista hanketta. Visualisointi hankkeen suunnittelu-, rakentamis- sekä käyttövaiheessa helpottaa luomaan yhteyden visuaalisen esityksen ja todellisen tilan välille. [Yang ym. 2017: 1–7.] Tietomallinnus-teknologiassa digitaalisina rakennuspalikkoina ovat objektit. Nämä objektit sisältävät olennaiset tiedot suunnittelu-kohteista. Näihin kuuluvat kolmiulotteiset tai topologisten suhteiden kuvaukset ja moniulotteiset geometriset tiedot. [Yang ym. 2017: 1–7.]

Tietomallinnus edistää yhteistyötä eri hankkeeseen osallistuvien osapuolten välillä. Kuvassa 2 on esimerkki koordinoitiprosessista tietomallinnuksessa hankkeeseen liittyvien osapuolten välillä. Ensiksi kerätään useita erilaisia malleja yhteen paikkaan, minkä jälkeen käsitellään monialaisia malleja ja päätetään, mikä malli on paras. Tämä prosessi auttaa etsimään rakentamiseen liittyviä vaikeuksia.



Kuva 2. Avoin tietomallinnus [Jäväjä 2016].

Tietomallinnuksen koordinointisovelluksen avulla on mahdollista tunnistaa ja ratkaista mahdolliset ristiriidat hankkeen alkuvaiheessa niin sanottujen yhteentörmäysten tarkastelulla eri suunnittelualojen välillä. Koordinointisovelluksia voidaan myös hyödyntää tehokkaan yhteistyön ja tiedon jakamista edistävän koordinoitidatan tuottamiseen. [Yang ym. 2017: 1–7.] Se parantaa aikataulua ja kustannussäästöjä rakentamisen aikana vähentämällä materiaalihävikkiä ja asennusvirheitä [Mitä on BIM].

Hankkeen suunnittelu ja suunnitelman optimointi edellyttää kokonaisvaltaista analyysia, joka tasapainottaa hankkeen arvoa ja vastaa samalla omistajien tarpeisiin. Pienetkin osat rakennuksesta, kuten katot, suuret tilat ja verhoseinät, vaativat merkittäviä investointeja ja aiheuttavat rakentamisessa haasteita. Suunnittelu- ja rakennussuunnitelman optimointi voi johtaa merkittävään ajan säästöön ja kustannuksiin [Yang ym. 2017: 1–7].

2.2 Tietomallinnuksen ulottuvuudet rakennusalalla

Kuvassa 3 esitetään, miten tietomallinnusta voidaan käyttää projektin tai rakennuksen kulissien takana olevien näkökohtien hallintaan. Näihin osatekijöihin kuuluvat muun muassa aikataulu, kustannukset ja toiminta.



Kuva 3. Tietomallinnuksen ulottuvuuksia [BIM-Dimensions].

Kaikki tarvittavat tiedot suunnittelusta rakentamiseen ja ylläpitoon ovat tietomallinnuksessa. Rakennuksen tietomallinnuksessa käytetään useita ulottuvuuksia,

jotka lisäävät tiettyjä alueita tietomallinnukseen. Seuraavassa on esitetty joitakin eniten viitattuja tietomallinnusulottuvuuksia [Omar 2014: 8].

3D-mallit ovat tärkeitä rakennuksen suunnitteluvaiheessa, koska näiden mallien avulla voidaan simuloida tilojen ja laitteiden välistä suhdetta virtuaalisessa tilassa, jolloin voidaan valmistautua mahdollisiin ristiriitoihin ennen rakentamista. Tietomallinnuksen avulla voi integroida, visualisoida ja parametrisoida tietoa, jolloin käyttöliittymävaikeuksia ja toistuvia tehtäviä vähennetään. [Lau ym. 2018]

4D-mallien objekteille on lisätty aikataulutiedot. Perinteisessä menetelmässä rakennusaikataulun hallinnassa käytetään perinteisiä 2D-piirustuksia, mikä voi johtaa viestinnän vaikeuteen hankkeeseen osallistuvien välillä. Tietomallinnuksen visualisointityökalun avulla on mahdollista simuloida rakennusprosessia ja luoda 4D-hallintajärjestelmä, joka pystyy seuraamaan rakentamisen resurssien, kuten laitteiden, materiaalien ja työvoiman käyttöä. [Lau ym. 2018]

Ganiyun ja Egbun (2018: 82) mukaan tietomallinnuksella pystytään hallitsemaan aikataulua koko rakennusprosessin ajan. Urakoitsijan näkökulmasta on tärkeää, että aikaulottuvuuden lisääminen antaa hankeryhmälle mahdollisuuden parempaan visualisointiin siitä, miten rakentaminen toteutetaan. Tämän toiminnon avulla voidaan ohjata työjärjestystä rakentamisen aikana, ja toiminto toimii myös tehokkaana työkaluna visualisoinnissa ja viestinnässä hankkeen osapuolten välillä. Ominaisuuden avulla osapuolet ymmärtävät helposti rakennusaikataulun ja seuraavat hankkeen etenemistä. Rakennusprosessin työmaavaatimusten hallinnassa tietomallinnuksen 4D-mallit ovat erittäin tärkeitä. [Bataglin ym. 2017: 4–12.]

5D-malliin on aikataulutietojen lisäksi lisätty kustannustiedot. Manuaaliset laskelmat tehdään tavanomaisessa määramittausprosessissa, mikä riippuu CAD-dokumenteista ja tämä voi rajoittaa niiden sisältämää tietoa. Tämän seurauksena automaattiset laskelmat tietokoneella vaikeutuvat, mikä vaatii työvoimaa ja johtaa mahdollisiin poikkeamiin. Ismail ym. [2018] mukaan tietomallinnuksen luotettavan 5D-tietokannan kautta voidaan saada luotettavampia

kustannusarvioita. Tietomallinnuksen 5D-toiminto helpottaa määrältään suurempien tietojen päivittämisessä ja vähentää mahdollisia virheitä.

6D-tietomalliinnus ottaa huomioon kestävän kehityksen, kun hanke käy läpi aiemmin esitetyt viisi ulottuvuutta. Kestävyyttä tarkastellaan kolmesta näkökulmasta: ympäristövaikutus, taloudellinen vaikutus ja sosiaalinen vaikutus. Hankkeen suorituskkyä tällaista ulottuvuutta vasten voidaan osoittaa avainindikaattorilla (KPI, Key Performance Indicator) [Hansmann ym. 2012: 451–459].

Kestävän kehityksen ajatusta edisti ensimmäisenä Brundtland vuonna 1987 julkaisemassaan raportissa [Kestävä kehitys]. Raportin esitteli maailman ympäristö- ja kehityskomissio, joka tunnetaan myös nimellä Brundtland-komissio. Kestävän kehityksen käsite voidaan selittää seuraavasta kolmesta eri näkökulmasta:

- Ympäristö, joka ilmaistaan luonnonvarojen lisääntymis- ja ylläpitokapasiteettina.
- Taloudellinen, jolla tarkoitetaan tuloja ja työtä tuottavaa voimaa.
- Sosiaalinen, joka ilmaistaan ihmisen hyvinvoinnin tuottajana. [Hansmann ym. 2012: 451–459.]

Lin ym. [2018:178–193] mukaan tietomallinnuksen 7D-malleja käytetään rakennuksen hallinnassa rakennustietojen yhdistämiseen käyttö- ja ylläpitotietoihin. Tämä mahdollistaa toiminnan tarkastamisen, muuttamisen ja vahvistuksen ennen hankkeen päättymistä, mikä saattaa johtaa pienempiin kustannuksiin, vähentyneisiin virheisiin ja parempaan rakennuksen tehokkuuskykyyn.

Rakennustietojen hankkiminen perinteisellä tavalla usein edellyttää erilaisten tietojen saantia eri toimittajilta ja urakoitsijoilta, mikä johtaa riippuvuuteen manuaalisesta kirjaamisesta ja suureen virhemahdollisuuteen. Tietomallinnuksen käyttöönoton avulla projektinhallinta voisi olla tehokkaampaa kehittämällä uusia osaamisia rakennusten luovutuksia varten. [Iyakoregha ym. 2018]

2.3 Rakennusten energiamallinnus

Energiamallinnus on tehokas fysiikkapohjainen rakennusenergian käytön simulointiohjelmisto. Energiamallinnus-ohjelma toimii ottamalla syötteen rakennuksen yksityiskohdista, kuten geometriasta, LVI:stä, vedenlämmityksestä, jäähdytyksestä, ohjausstrategioista, rakennusmateriaaleista, uusiutuvista energianlähteistä, valaistuksesta ja komponenttien tehokkuudesta. Se myös ottaa tietoja rakennuksen käytöstä ja toiminnasta, kuten käyttöaikatauluista, termostaattiasetuksista ja pistokekuormituksesta, mikä mahdollistaa rakennuksen tehokkuuden tutkimista. [About Building Energy Modelling.] Kuvassa 4 on esitetty energiamallinnuksen yleiset lähtökohdat energiamallin luomiseksi.



Kuva 4. Energiamallinnustyökalujen syötteet [Maile ym. 2007].

Energiamallinnusohjelma yhdistää nämä syötteet paikallisten säätietojen kanssa. Fysiikan yhtälöiden avulla lasketaan lämpökuormitukset, laitteen reagointi näihin kuormiin sekä niistä aiheutuva energiankäyttö. Energiamallinnusohjelma suorittaa laskelman koko vuodelle tunneittain tai lyhyemmin. Niissä otetaan huomioon myös järjestelmien vuorovaikutuksia esimerkiksi valaistuksen ja lämmityksen tai jäähdytyksen välillä.

Eräät merkittävät ongelmat perinteisessä rakennuksen energiankulutuksen analysointimenetelmässä ovat tiedonhankinnan vaikeus ja epätarkat tulokset. Rakennuksen energiankulutuksen analysoinnissa käytetään kahta päämenetelmää. Ensimmäinen on staattisen algoritmin käyttö. Menetelmä ei ota huomioon häviöstä ja lämmönvarastoitumista, mikä johtaa suuriin poikkeamiin tuloksissa. Toinen menetelmä on tietojen syöttäminen manuaalisesti simulointiohjelmistoon, mikä vaatii ammattitaitoa ja paljon manuaalista syöttöä. Ilman asianmukaista koulutusta jälkimmäistä menetelmää on vaikea hyödyntää tai käyttää. [Shou 2013]

Tarkat ja täsmälliset rakennuksen energiamallit on luotava, jotta simulointiohjelmisto voidaan räätälöidä sopivasti rakennuksen tarpeisiin ja tehdä ennusteita kuukausittaisesta energiankulutuksesta, vuosittaisista hiilidioksidipäästöistä ja energiakustannuksista. Luotettavat energiamallit tarvitaan myös kustannussäästöjä koskevien päätösten tekemiseen sekä useiden tehokkuustoimenpiteiden arvioimiseen. Energiatehokkuusanalyysiin vaikuttavat muun muassa ilmastotiedot, energiankäyttötiedot, lämpötehokkuus, tuottavuusominaisuudet ja energianhallinta [Pezeshki ym. 2019: 1–17]. Rakennuksen energianarvioinnin ja lämpömukavuuden edistämiseksi energianmallinnus on tehokas työkalu, koska sen avulla suunnittelutiimit saavat tiedot eri suunnitteluvaihtoehtojen ekologisista vaikutuksista ja tehokkuudesta [Carvalho ym. 2021: 246].

Dongin ym. [2007] mukaan energiamallinnustyökaluja on kahdenlaisia. Ensimmäinen käyttää Yhdysvaltain energiaministeriön (USDOE) laskentamoottoria, kuten Autodeskin Green Building Studio (GBS), EnergyPlus, DesignBuilder DOE-2 ja eQUEST. Toinen käyttää omaa laskentamoottoriaan, kuten IDA-ICE ja IES Virtual Environmental (IES-VE). Eri energiamallinnustyökaluilla saattaa olla erilaisia ominaisuuksia syötetyn tiedon ja simulointioletusten perusteella. Esimerkiksi EnergyPlus ja IDA-ICE tekevät siitä paremmin todellisiin olosuhteisiin mukautuvan, koska niissä käyttäjä voi määrittää jäähdytys- ja lämmityslaitteiden komponentteja, toisin kuin BLAST ja DOE-2, jotka sallivat vain kiinteästi kytkettyjen malli-LVI-järjestelmien käytön.

Crawleyin ym. [2001: 319-331] mukaan seuraavat kriteerit ovat aiemmin olleet tutkijoilla rakennusten energiamallinnuksen työkalujen arvioinnin perustana: yleinen mallinnuskyky, rakennuksen vaipan, vyöhykekuormitusanalyysin, päivänvalon ja auringon tehokkuus, ilmanvaihto ja monivyöhykkeinen ilmavirta, tunkeutuminen, LVI-järjestelmät ja laitteet, sähköjärjestelmät ja laitteet, uusiutuvan energian järjestelmät, ympäristöpäästöt, taloudellinen analyysi, käyttöliittymä, ilmastotietojen saatavuus, tulosten raportointi ja validointi. Näiden energiamallinnus-työkalujen oletukset, yhteenvedot syötteistä ja rajoitukset on esitetty näissä teoksissa [Maile ym. 2007: 1–49; 2010: 96].

Energiamallinnus-teknologioita on käytetty tutkimuksessa, rakennusten suunnittelussa, rakentamisessa, käytössä ja optimoinnissa. Monet kaupalliset energiamallinnus-työkalut käyttävät fysikaalisia malleja, jotka eivät tarvitse ylimääräisiä tietoja suorituskyvyn ennustamiseen useissa olosuhteissa, mutta dynaamisen suorituskyvyn mallintamisessa fyysisillä malleilla on rajoituksia, koska niistä puuttuu rakennusautomaatio-ohjaimen kehitys, kyvyttömyys sisällyttää mukaan matemaattisia malleja uusille materiaaleille ja kehittyneille ohjaimille, mikä voi johtaa epätarkkoihin tuloksiin energiamallinnuksessa. [Buonomano ym. 2016: 361–386.]

Energiamallinnus on erittäin tarpeellinen eri vaiheissa eri tehtävien suorittamiseksi, siksi sitä olisi käytettävä koko suunnitteluprosessissa. Energiamalli alkaa karkeana ja tarkentuu suunnittelun edetessä. Energiamallinnus-suunnitteluvaiheiden kolme pääosaa ovat: alustava konseptisuunnittelu, lopullinen konseptisuunnittelu ja suunnittelun kehittäminen. Energiamallinnusta olisi käytettävä seuraavissa vaiheissa. [GSA 2015]

Perusenergiamalli luodaan käyttämällä yksinkertaisia lämpövyöhykkeitä, joita käytetään alustavassa konseptisuunnitteluvaiheessa. Tämän mallin avulla suunnitteluryhmä pystyy tekemään tärkeitä päätöksiä, koska se mahdollistaa alustavien suunnitteluideoiden, kuten rakennuksen sijainnin, muodon, suunnan ja vaihtoehtoisten energialähteiden arvioinnin. Suunnitteluprosessin edetessä loppuvaiheeseen, tarkempaa tietoa rakennuksesta muodostetaan ja kehitetään

tarkempi energiamalli. Tämä auttaa suunnitteluryhmää arvioimaan erilaisia suunnitteluvaihtoehtoja. Arvioitavia suunnitteluvaihtoehtoja mukaan lukien pohjaratkaisu, LVI-järjestelmät, polttoainevaihtoehdot, rakennusmateriaalit ja arkkitehtuurielementit arvioidaan suhteessa aiemmin tehtyihin suunnitteluvalintoihin. [GSA 2015]

Energiamallinnusteknologia on hyödyllinen rakennussuunnittelussa, mutta perinteisellä energiamallinnuksella on rajoituksia. Tämän perusteella energiamallinnuksen kaikkia mahdollisuuksia ei voida hyödyntää täysimääräisesti käytännössä. Tavanomaisessa energiamallinnuksessa on seuraavia rajoituksia:

- Tulos on hidas, koska rakennusten energiatehokkuuden simulointitehtävä on haastava. Simulointitehtävä vaatii resursseja, yritystä ja aikaa, mikä voi johtaa korkeisiin kustannuksiin ja pitkittyneeseen prosessiin.
- Simulaatiomallin määrittelyssä tehdyistä oletuksista ja päätöksistä johtuen energiamallinnuksen tuloksia ei voida toistaa, mihin ei voi luottaa kaikissa olosuhteissa.
- Arkkitehtuuri- ja LVI-suunnittelusta tarvitaan riittävästi tietoa mallin luomiseen. Tämän perusteella energiamallinnus-prosessia ei voi alkaa ennen tiettyjen keskeisien suunnittelupäätöksien tekemistä.
- Perinteiset energiamallinnus-tulokset ovat aina suunnittelun ajoituksesta jäljessä, koska päätöksentekoaika on pitkä.
- Simulaatiossa ja analyysissä käytetään henkilökohtaista lämpönäkyä. Tämän perusteella tapa, jolla rakennusgeometria valmistetaan simulaatiotyökaluissa, on epäjohdonmukaisen pitkä. [Bazjanacin 2008]

2.4 Tietomallinnus-sovellukset energiamallinnukseen

Toistuva ja aikaa vievä energiamallin laatimisprosessi perinteisellä energiamallinnusohjelmalla on yksi tärkeimmistä ongelmista. Simulaatiota koskevan osaamisen puutteen vuoksi arkkitehdit ja insinöörit kamppailevat usein energiamallinnus-työkalujen käytön kanssa. Jopa käyttäjäystävällisimmät simulointityökalut vaativat huomattavan määrän yritystä ja asiantuntemusta, jotta niitä voitaisiin käyttää tehokkaasti. [Lilis ym. 2017; Ahn ym. 2014: 671–678.]

Koska perinteisen suunnitteluprosessin varhaisemmissa vaiheissa syötemuuttujien määrä on rajallinen, energiamallinnus otetaan käyttöön vasta lopullisessa suunnitteluvaiheessa, mikä johtaa usein ristiriitoihin rakennussuunnitteluvalintojen ja energiamallinnus-analyysin välillä, koska suunnitelmiin ei voida tehdä muutoksia [Zhu 2014: 678–681]. On mahdollista, että saadut simulaatiotulokset saattavat jäädä hyödyntämättä [Ahn ym. 2014: 671–678].

Perinteisen energiamallinnuksen ratkaisun rajoituksiin on tarjottu tietomallinnuspohjainen energiamallinnus-lähestymistapa, joka mahdollistaa digitaalisen suunnittelun saumattoman integroinnin energiamallinnukseen. Tietomallinnuspohjainen energiamallinnus on kehittyvä teknologia, joka perustuu tietomallinnukseen ja mahdollistaa räätälöidyn rakennuksen energiamallinnukseen. [Gao ym. 2019: 320–343.] Energiamallinnus-työkalujen syöte tuotetaan käyttämällä valmiita tietomallimalleja. Tietomallinnuspohjainen energiamallinnus luo tehokkaampaa, tarkempaa ja johdonmukaisempaa prosessia, joka on myös edullinen, helppokäyttöinen, aikaa säästävä ja käytännöllinen [Carvalho ym. 2021: 246].

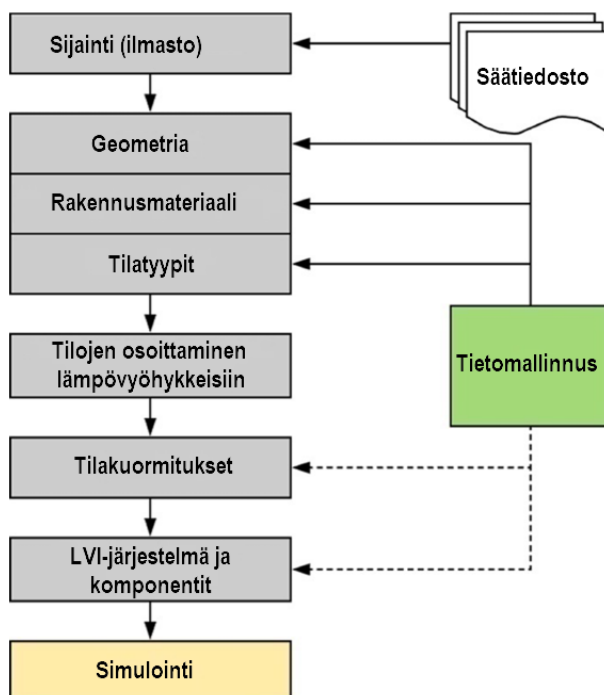
Tutkijat ovat osoittaneet kiinnostusta tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen integrointiin, koska tietomallit, sisältävät jo arkkitehtuurista suunnittelua, LVI-kuormat, ominaisuudet ja järjestelmät [Pezeshki 2018]. Nämä tietomallit voidaan tuoda energiamallinnukseen, toisin kuin perinteisessä lähestymistavassa, jossa energiamallinnusohjelmistossa rakennetaan manuaalisesti suunnittelun asiakirjojen perusteella. Näitä suunnittelumalleja käytetään tuottamaan automaattisesti tarvittavat syötteet rakennuksen energiamalleihin.

Tietomallinnuspohjainen energiamallinnus yksinkertaistaa rakennuksen energiamallien luomista, koska se pääsee suoraan rakennuksen suunnittelutietoihin ja automatisoimalla tiedonsiirtoprosessin alkuperäisistä lähteistä. Tämä poistaa tarpeen toistaa geometrinen tietojen syöttämistä suunnittelumallista. Näin se säästää aikaa ja vähentää ihmisen toiminnasta johtuvia virheitä. [Tran ym. 2015: 4489–4497.] Bazjanacin ym. [2009: 595–602] mukaan energiamallin tarkkuus ja johdonmukaisuus eri käyttäjille voitaisiin taata sisällyttämällä

tietomallinnuspohjaiseen energiamallinnukseen erityisiä ohjeita, joilla estetään tietojen virheellinen muuttaminen. Työnkulkukaavion tietomallinnuspohjaiset energiamallinnukseen-menetelmät voidaan jakaa kuuteen vaiheeseen:

- geometria
- materiaalit ja rakenteet
- tilatyypit tai rakennus
- lämpövyöhykkeet
- tilakuorma
- LVI-järjestelmä ja komponentit.

Kuvassa 5 on Mailen ym. [2007: 1–49] luoma työnkulkukaavio tietomallinnuspohjainen energiamallinnukseen. Alkuvaiheessa selvitetään rakennuksen sijainti, joka voidaan sitten yhdistää säätiedostoon. Sen jälkeen materiaalien rakenne- ja lämpöominaisuudet, tilatyypit ja geometria on tuotava tietomallinnuksen mallista.



Kuva 5. Ideaalinen työnkulku tietomallinnuspohjaiseen energiamallinussimulointiprosessiin [Mailen ym. 2007]

Saattaa olla tarpeen yksinkertaistaa geometriaa, jotta se voidaan muuttaa lämpönäkymäksi ja noudattaa asiaankuuluvan lämpötehokkuussimulointityökalun geometriamääritelmää. Käyttöliittymän tulee myös mahdollistaa tilojen yhdistäminen lämpövyöhykkeiksi ja tilojen jakaminen alaosiin lämpövyöhykkeisiin geometrian määrittelyn perusteella. Seuraavassa vaiheessa tilakuormat osoitetaan tietyille tilatyypeille, jotka olisi myös annettava tietomallinnuksen avulla. Lopuksi LVI-järjestelmän ja komponenttien tiedot olisi myös annettava tietomallinnuksesta. [Mailen ym. 2007]

Jeongin ja Kimin [2016: 648] mukaan perinteisen tietomallinnuksen puutteita voidaan korjata tekemällä saumaton tiedonsiirtoprosessi tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen välillä. Tämä on askel oikeaan suuntaan kohti tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen saumatonta integrointia. Pää tavoitteena on saumaton integrointi kaikkien tärkeimpien tietomallinnusohjelmistojen välillä.

2.4.1 Tietomallinnuspohjaiset energiamallinnus-menetelmät

Tietomallinnuspohjainen energiamallinnus on tärkeä aihe ohjelmistoteollisuudessa ja tutkimuksessa. Tietomallinnus-mallien yhteentoimivuus ohjelmistojen välillä luodaan tavallisesti käyttämällä esimerkiksi IFC-standardia (Industry Foundation Classes) tai gbXML:ää (Green Building XML). Nämä ovat eniten käytettyjä avoimen standardin tietomallitekniikoita tiedonvaihtoon tietomallinnus- ja energiamallinnus-työkalujen välillä.

Gaon ym. [2019: 320–343] mukaan tiedot siirretään tietomallinnuksesta energiamallinnukseen seuraavan kahden menetelmän avulla: IFC-menetelmä ja gbXML-menetelmä. Kamel ja Memari [2019: 164–180] tekivät eron gbXML:n ja IFC:n välillä energiasimuloinnin osalta ja yksilöi niiden väliset erot. Tietojen muunnostasot ovat geometria, materiaali, tilatyppi, lämpövyöhyke, tilakuorma ja LVI-järjestelmä. Heidän havaintojensa mukaan useimmat IFC-menetelmät ovat vielä geometrian muunnosvaiheessa, kun taas gbXML-menetelmät ovat edenneet tilatyypimuunnoksiin. Tietomallinnuspohjaisen energiamallinnus

prosessin eduista huolimatta yhteentoimivuus on edelleen tärkeä asia rakennusalalla ja käytännössä IFC-menetelmä on yleinen lähestymistapa.

IFC on 3D-oliosuuntautunut tiedonsiirtoformaatti. International Alliance for Interoperability (IAI) aloitti sen kehittämisen vuonna 1996. BuildingSMART allianssi ylläpitää tietformaattia. Tavoitteena on tarjota ainutlaatuinen pohja tiedon jakamiselle ja prosessien parantamiselle sekä rakentamisen että kiinteistönhoidon aloilla. IFC mahdollistaa tiedonsiirron eri asiantuntemusta omaavien tiimien välillä ja voi kuvata minkä tahansa muotoista rakennusgeometriaa. Viime aikoina monet tutkimuslähestymistavat yrittävät käyttää IFC:tä yleisenä kielenä sekä tietomallinnukseen että energiamallinnukseen. [Gourlis & Kovacic 2017: 953–963.]

Suurin osa tekniikoista, jotka yhdistävät tietomallinnuksen ja IFC:n, painottavat vain geometrian siirtämistä tietomallinnuksesta energiamallinnukseen. Tämä tarkoittaa, että loput tarvittavat tiedot on syötettävä manuaalisesti tai valittava oletusarvoiset. Nämä lähestymistavat ovat kuitenkin vielä alkuvaiheissaan, eivätkä ne voi taata tarkkoja ja virheettömiä muunnoksia, koska muunnosvaiheessa saattaa syntyä virheitä, kuten puuttuvia kohteita, toistettuja pintoja ja risiriitaisia rajoja [Hitchcock & Wong 2011: 1089–1095].

Toinen tietomallinnuspohjaisessa energiamallinnuksessa käytetty lähestymistapa on Autodesk Green Building Studion kehittämä Green building XML (gbXML)-pohjainen menetelmä. gbXML on tiedostoformaatti, joka käyttää Extensible Markup Language (XML) -kieltä. Tämä formaatti on pysyvä, vankka, eimistusoikeudellinen, ja todennettavissa, joten se on hyödyllinen tekstin ja tietojen tallentamiseen ja siirtämiseen sekä online- että offline-tilassa [Lam ym. 2012]. Green Building Studio -verkkopalvelun kautta tietomallinnusohjelmistot voivat vaihtaa tietoja käyttämällä gbXML:ää. [Karola ym. 2002: 901–907.]

gbXML:ää käytetään tietyllä oletuksella, jotta energiasimulaatio saadaan, koska sen avulla käyttäjät saavat oikean tiedostoformaatin tietomallinnustyökaluista ja voivat siirtää sen asianmukaisesti energiamallinnustyökaluihin, jotta rakennuksen simulaatiotuloksia saadaan nopeasti. IFC:hen verrattuna gbXML:n pääpaino on auttaa muuttamaan tietoa muihin työkaluihin teknisen analyysin

tietomallinnuksesta energiamallinnus-työkaluihin, kun taas IFC-tiedostomuotoa käytetään yleiseen ja kattavaan tekniikkaan rakennushankkeen esittämiseksi. Ainoastaan suorakulmaiset muodot gbXML hyväksyy geometrisina konfiguraationa. gbXML hyväksyy myös kokoonpanot, mikä on yleensä riittävä useimpien rakennusten rakenteiden simulointiin. [Gourlis & Kovacic 2017: 953–963.]

2.4.2 Tietomallinnuspohjaisen energiamallinnuksen rajoitukset

Ensimmäinen vaihe tietomallinnuspohjaisesta energiamallinnuksesta on geometrian muunnos tietomallinnuksesta energiamallinnukseen. Muut vaaditut energiamallinnuksen tiedot valitaan oletuksena tai edellyttävät käyttäjien manuaalista syöttämistä. Ehdotetut menetelmät eivät voi taata, että IFC-pohjainen geometria voidaan kääntää ilman virheitä. Muunnoksen aikana saattaa tapahtua virheitä, kuten puuttuvia objekteja. [Gao ym. 2019:320–343.] IFC-menetelmät eivät täytä tietomallinnuspohjaisen energiamallinnuksen tavoitetta, koska se vaatii edelleen ihmisen syötettä.

IFC-pohjaisen materiaalin ja rakenteen muuntamisen tietomallinnuksesta energiamallinnukseen ajatellaan olevan toisessa vaiheessa tietomallinnuspohjainen energiamallinnus, koska ainoastaan rakenteen materiaalinimi, tunnus ja materiaalikerrokset voidaan käsitellä tietomallinnuksesta energiamallinnukseen. Lämpöominaisuudet tulevat ulkoisesta materiaalikirjastosta, eivät tietomallinnuksen mallista. Koska tietomallinnus- ja energiamallinnus-työkalut käyttävät erilaisia materiaalikuvauksia ja tietokantoja, useimmat nykyiset tietomallinnus-työkalut eivät tarjoa kaikkia olennaisia lämpöominaisuuksia. Siksi nykyiset IFC-pohjaiset menetelmät toteuttavat vain osan toisen vaiheen tietomallinnuspohjaisesta energiamallinnuksesta. [Osello ym. 2011:1521–1526.]

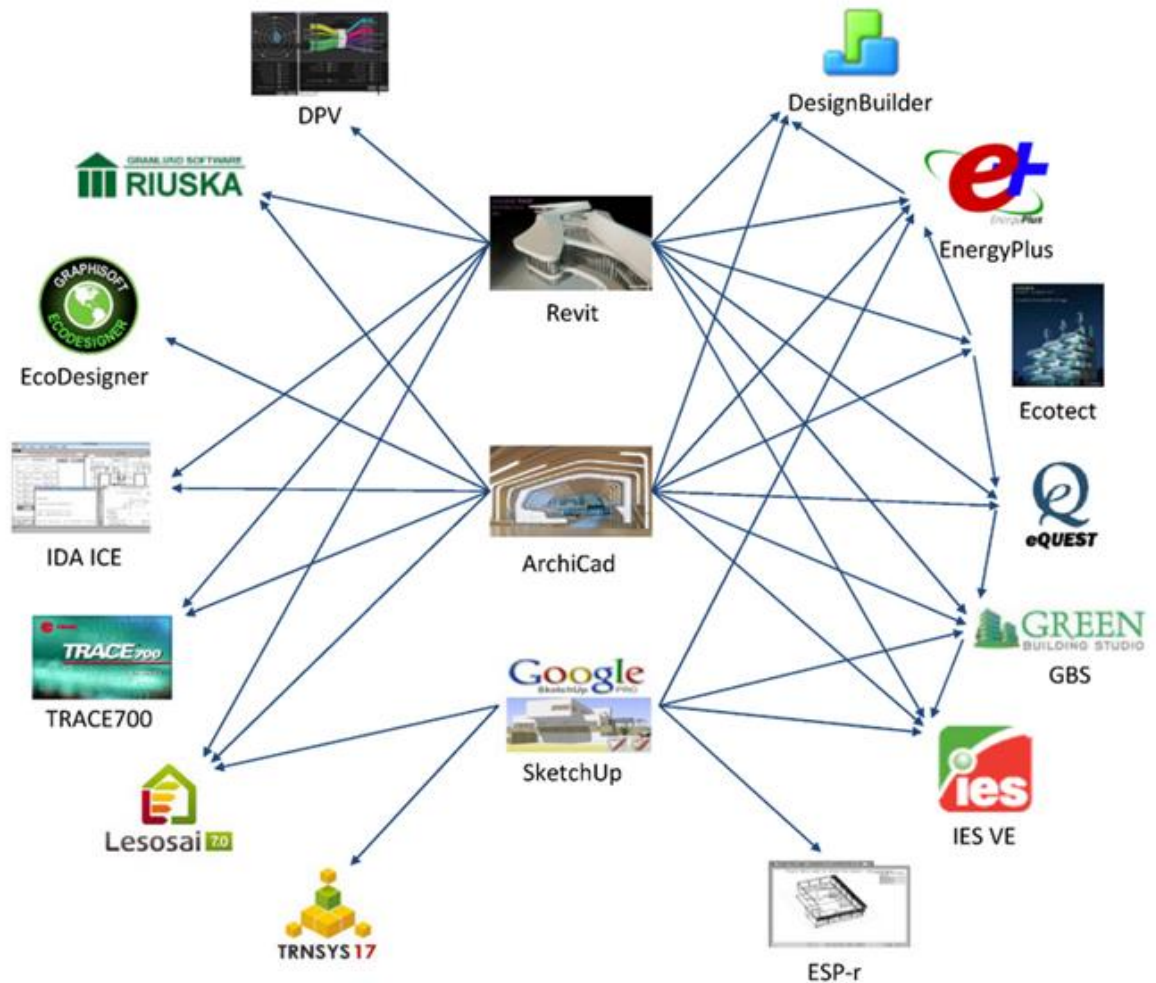
IFC-formaatin rajallisen kyvyn vuoksi energiamallinnustietojen esityksissä vain muutamista IFC-menetelmistä keskittyy tietomallinnuspohjaisen energiamallinnuksen muihin vaiheisiin, mukaan lukien tilatyypit, lämpövyöhyke, sisäinen kuormitus ja LVI-järjestelmä. Lämpövyöhyke asetetaan yleensä yksinkertaistetuksi lämpövyöhykkeeksi, mikä tarkoittaa, että kaikki tilat yhdistetään yhdeksi

lämpövyöhykkeeksi. IFC-formaatti tarjoaa kuitenkin luokkia ryhmittelyä varten jotkin tilat vyöhykkeiksi ilmaistakseen yksityiskohtaisen lämpövyöhykkeen energiamallinnuksessa, mutta tämä prosessi ei ole yhteensopiva vielä käytännössä nykyisten tietomallinnus- ja energiamallinnustyökalujen välillä. [Gao ym. 2019: 320–343.]

On vaikea poimia käyttöaikataulutietoja tilakuormitukseen tietomallista, koska siitä tulee monimutkaista ja erilaista tietomallia. Kaksi IFC-menetelmää pääsevät LVI-muunnokseen, mutta ainoastaan muutamat ideaaliset järjestelmät voidaan muuntaa energiamallinnus-tiedoiksi ja IFC-tietomuoto ei pysty ilmaisemaan kehittyneitä LVI-komponentteja ja järjestelmiä. Voidaan päätellä, että IFC-pohjaiset menetelmät ovat energiamallinnuksen alkuvaiheessa. [Gao ym. 2019: 320–343.]

2.5 Yhteentoimivuus

Yhteentoimivuus on mahdollisuus siirtää tietoja eri sovellusten välillä. Yhteentoimivuus on tärkeää, kun mukana on enemmän työkaluja ja malleja, jolloin se mahdollistaa mallien nopean toistamisen poistamalla tietojen toiston ja vähentää inhimillisen virheen riskin [Cemesova 2013]. Eastmanin [2011] mukaan se on välttämätöntä sujuvaan työkulkuun ja mallitapahtumien automatisointiin. Kuvassa 6 esitetään erilaisia tietomallinnus- ja energiamallinnustyökaluja sekä havainnollistetaan tiedonvaihtoa niiden välillä.



Kuva 6. Tiedonvaihto tietomallinnus- ja energiamallinnustyökalujen välillä [Bahar 2013]

Yhteentoimivuus on tärkeää tietomallinnuspohjaisessa energiamallinnuksessa. Se helpottaa tiedonvaihtoa kahden erillisen ohjelmiston välillä. Kestävien ominaisuuksien integrointi suunnittelun alkuvaiheessa voitaisiin varmistaa, koska sujuva tiedonsiirto vähentää tietojen päällekkäisyyttä tai tietojen puuttumista analyttisissä malleissa [Kumar 2008].

Kuvan 6 mukaisesti sujuva tiedonsiirto tietomallinnus- ja energiamallinnusjärjestelmien välillä voi olla haaste tietomallinnuspohjainen energiamallinnusmenetelmässä [Aranda ym. 2020: 9581]. Merkittävät yhteensopivuusongelmat tietomallinnuspohjaisessa energiamallinnusmenetelmässä ovat seuraavat: vaikeus tietomallinnuksen mallien yhdistämisen energiasimulointiohjelmistoon, tarve luoda energiamallinnuksen manuaalisten toistuvien tehtävien kautta ja prosessin

standardoinnin puute. Nämä voivat johtaa väärintulkintaan ja tietojen menetykseen suunnittelun alkuvaiheessa. [Pinheiro ym. 2018: 91–103; Gerrish ym. 2017]

Akbariehin [2018] mukaan kolme tarvittavaa osaa tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen väliseen yhteyteen ovat tietomallinnustyökalu, mallikaavion vaihtomaatti ja energiamallinnusohjelmisto. Energiamallinnus-työkalujen kyvyttömyys muuntaa tietomallinnuksen syöttötietoja ei ole ainoa syy haasteisiin, sillä yhteentoimivuutta voi esiintyä missä tahansa tai kaikissa näistä komponenteista.

Parametrit, kuten tuulen nopeus ja suunta, ilmanpaine, paikallinen lämpötila, säteen voimakkuus, auringon säteily ja niin edelleen riippuvat yksinomaan ympäröivästä ilmastosta. Todelliset arvot näille parametreille tarvitaan perusteellisen energia-analyysin suorittamiseksi ja ne saadaan yleensä rakennuksen maantieteellisen sijainnin perusteella. Vaikka tiedot voidaan tallentaa datakaavioihin kirjoitusohjelman avulla, simulaatiotyökaluilla ei ole kykyä hakea tällaista tietoa ja koordinaatit palautetaan ohjelmiston oletussijaintiin. [Nasyrov ym. 2014: 479–486.]

Yhteensopimattomuus tietomallinnus- ja energiamallinnustyökalujen välillä on suurin haaste toteutettaessa energiatehokkaita toimenpiteitä ja kestävyyttä rakennushankkeessa [Carvalho ym. 2021: 246]. Energiasimulointiohjelmisto ei pysty käsitellä monimutkaisia tietoja tietomalleissa ja tämä on haaste energiasimulointiohjelmoille [Gao ym. 2019: 320–343]. Pezeshkin ym. [2019: 1–17] mukaan yhteensopimattomuutta tietomallinnus- ja energiamallinnus-ohjelmistojen estää kestävien ja energiatehokkaiden hankkeiden toteuttamista koko niiden elinkaaren ajan. Tällaiset hankkeet johtavat puutteellisiin tai epätarkkoihin LVI-järjestelmien mallinnuksesta ja riittämättömiä tietoja ohjauksesta.

2.6 Tietomallinnus- ja energiamallinnustyökalut

Solibri, Revit, ArchiCAD ja Navisworks ovat merkittäviä tietomalliohjelmistoja. Revit-ohjelmisto on tietomallinnustyökalu, joka on suunniteltu auttamaan suunnittelijoita luomaan ja hallitsemaan rakennuksen laatua ja parantamaan energiatehokkuutta. Arkkitehdit, insinöörit ja rakennusliikkeet voivat päättää yhdessä aiemmassa vaiheessa suunnitteluprosessia hyödyntämällä tietoja malleista, jotka on luotu Revit-ohjelmalla. Tämä johtaa tehokkaampaan hankkeen toteuttamiseen. Malli päivittyy automaattisesti, jos suunnitteluun tehdään muutoksia missä tahansa Revit-suunnitelmassa, poikkileikkauksessa tai korkeudessa, mikä tekee suunnitelmista ja dokumentaatiosta yhtenäisiä ja luotettavia. [Aljundi ym. 2016: 24–25]

Aikaisemmin on mainittu muutamia energiamallinnustyökaluja. Jokaisella työkalulla on omat ominaisuudet. Insinööriyössä käsitellään tarkemmin neljää erilaista rakennusten energiamallinnustyökalua: VIP-Energy, IDA-ICE (IDA-Indoor Climate Energy), Energy Plus ja GBS (Green Building Studio).

2.6.1 VIP Energy

VIP Energy -energiamallinnustyökalu on Strusoftin kehittämä tuntipohjainen aika-askel ja moniväyhykkeinen dynaaminen energiasimulointiohjelma rakennusten energiankulutuksen laskemiseksi. Työkalua käytetään rakennusten energiataseen analysointiin. VIP-Energy sisältää materiaalikirjaston, seinät, katot ja katot, lattiat, ikkunat, venttiilit, lämpöpumput ja paljon muuta, jonka avulla on helppo aloittaa [VIP-Energy].

Kansainväliset ASHRAE-standardit 140 ja EN 15265 ovat validoineet tämän ohjelman luotettaviksi algoritmeiksi ja laskentamalleiksi. VIP-Energyn avulla saadaan yksityiskohtainen analyysi rakennusten lämpösilloista. Se mallintaa rakennusten lämmönvarastointia olettaen, että rakennuksen vaipan kokoonpanot ovat lämpövastuksen ja kapasitanssin sarja, jossa on äärellinen ero lämpövastuksen vasteena, ottaen huomioon erilaiset lämpöfysikaaliset ominaisuudet, kuten

materiaalien lämmönjohtavuus, tiheys ja lämpökapasiteetti. [Validation methods.] Duffien ja Beckmanin [2013] mukaan ohjelmassa on kattava materiaali- ja komponenttiluettelo. Näiden avulla voidaan arvioida rakennukseen käytettävissä oleva auringonsäteily.

2.6.2 IDA-ICE

IDA-ICE -energiamallinnustyökalu on dynaaminen koko rakennuksen sisäilman ja energiataseen laskentaohjelma. Ylläpitäjänä on Equa simulation AB. Tätä ohjelmaa käytetään yleisesti tutkimus- ja konsultointitarkoituksiin Euroopassa.

[Validations & certifications] mukaan ohjelma on validoitu ASHRAE 140-2004 ja EN 15265–2007-standardien kanssa. Tämä osoittaa, että IDA-ICE voi antaa tarkkoja laskelmia rakennusten energia- ja sisäilmastosta suorituskykyä verrattuna muihin simulointiohjelmiin. Se perustuu yleiseen järjestelmäsimulointialustaan, jossa on modulaarinen järjestelmä.

Laskelmien toleranssien määrittäminen ohjaa IDA-ICE-ohjelmassa tehtävän ratkaisun tarkkuutta. Ohjelma tarjoaa ominaisuuden monivyöhykelaskentaa varten ja mallintaa rakennusten sisäilmastoa ja energiatehokkuutta muuttuvilla aika-askeleilla, mukaan lukien tunti- ja minuuttipohjaiset aikaresoluutiot. Ohjelmalla on tietomallinnus tuontilaajennustoiminto, joka mahdollistaa 3D-CAD-objektien tuonnin seuraaviin paikkoihin avoimessa tai IFC-muodossa. [Validation of IDA Indoor Climate and Energy 4.0 with respect to CEN Standard EN 15255-2007 and EN 15265-2007]

2.6.3 Energy Plus

Yksi tunnetuimmista rakennusten energiankäyttö- ja kustannusanalyysiohjelmistoista on DOE-2, jolla on jo 25 vuoden historia. EnergyPlus on uuden sukupolven simulointiohjelma, joka perustuu DOE-2:n ja BLAST:n parhaisiin ominaisuuksiin. Verrattuna muihin energiasimulaatiotyökaluihin EnergyPlusilla on erittäin joustava simulointi. [Crawleyin ym. 2001: 319–331.]

EnergyPlusilla on enemmän ominaisuuksia kuin DOE-2:lla, koska siinä voidaan laskea alle tunnin aika-askeleella ja integroida dynaamisesti kuormituksia sekä järjestelmän suorituskykyä rakennuksen energiataselaskennassa. Jotta rakennusmalleille olisi visuaalinen käyttöliittymä, EnergyPlus on lämpösimulaatiomoottori, joka käyttää tekstiä syötteenä, joten graafinen käyttöliittymä (GUI) Graphical User Interface, kuten Sketchup tai Design Builder, voidaan käyttää yhdessä EnergyPlusin kanssa. [Crawleyin ym. 2001: 319–331.]

2.6.4 GBS

GBS on pilvipohjainen palvelu energiamallinnukseen. GBS on mukautettavissa ja mahdollistaa suunnittelijoille tehdä simulaatioita rakennuksen toimivuudesta ja parantaa energiatehokkuutta aiemmassa vaiheessa suunnitteluprosessissa. Tämä johtaa siihen, että pystyy suunnittelemaan tehokkaita rakennuksia lyhyemmässä ajassa ja pienemmillä kustannuksilla perinteisiin lähestymistapoihin verrattuna. [Aljundi ym. 2016: 24–25.]

2.7 Tietomallinnus- ja energiamallinnuksen edut

Kun tietomallinnuspohjaisen energiamallinnus-haasteet on ratkaistu, saadaan monia hyötyjä. Tietomallinnus voi edistää energiamallinnusta lähinnä tarjoamalla paremman ympäristön tietojen vaihtoa varten. [Kamel & Memari 2019] Tietomallinnuksen soveltamisen edut energiamallinnuksessa voidaan esittää kuvassa 7.



Kuva 7. Tietomallinnussovelluksen tärkeimmät edut energiamallinnuksessa [Kamel & Memari 2019]

Tietomallinnus parantaa energiamallinnuksen lähestymistapaa mahdollistamalla paremman ympäristön tiedonvaihtoon, mikä johtaa seuraaviin etuihin: automaattinen energiamallinnus, parempi tulosten esittäminen, kykyä tallentaa ja järjestää rakennustietoja sekä kykyä lisätä uusia päivityksiä olemassa olevaan energiasimuloinnin standardiprosessiin. [Kamel & Memari 2019]

Yksi merkittävästä eduista integroinnista tietomallinnuksen energiamallinnukseen on, että se johtaa automaattiseen energiamallinnusprosessiin, mikä voi säästää aikaa, vähentää kustannuksia ja inhimillisten virheiden mahdollisuuksia verrattuna tavallisiin energiamallinnusprosesseihin [Somboonwit ym. 2017: 2–5]. Aikaisemmat energiamallinnusprosessit sisältävät graafisen mallin kehittämisen energiamallinnustyökaluissa käyttämällä laitteita, geometriatietoja, aikatauluja ja materiaalien ominaisuuksia.

Toiseksi tietomallinnuksen etuna on, että se helpottaa tuotosten esittämistä energianhallintajärjestelmässä. Tämän avulla käyttäjä voi tarkistaa reaaliaikaisen energiasimuloinnin suorituskyvyn rakennuksen eri vyöhykkeillä. Käytettäessä tietokonetyökaluja, joissa ei ole graafista käyttöliittymää edellä mainitusta edusta tulee entistä arvokkaampi. [Kamel & Memari 2019]

Kolmanneksi tietomallinnussovelluksen merkittävä etu on se, että rakennuksen kattavat energiatiedot voidaan järjestää ja tallentaa tehokkaasti. Esimerkiksi valvontajärjestelmät reaaliaikaisen energiasimuloinnin tuottavat tietoa rakennuksen energiankulutuksesta, käyttöasteesta ja lämpötilasta ja nämä tiedot on tallennettava asianmukaisesti tietyissä olosuhteissa. Tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen integrointi auttaa seuraamaan reaaliaikaisesti käyttöasteen muutoksia, tilojen päivittämistä ja energiaan liittyvien strategioiden muutoksia, jotta päivitettyt ja reaaliaikaiset tiedot voidaan tallentaa. [Kamel & Memari 2019]

Tietomallinnus voi olla hyödyllinen myös parantamaan olevia kirjastoja. Näitä kirjastoja sisältävät tietoa materiaalien ominaisuuksista, joita käytetään energiamallinnussimuloinnissa. Esimerkiksi, vaikka näistä kirjastoista voivat tarjota lämpöön liittyviä ominaisuuksia, kuten materiaalin lämmönjohtavuutta, jotkin erityishankkeet vaativat enemmän tutkimusta ja tietoa rakennuksen elinkaariarvioinnista. [Kamel & Memari 2019]. Tietomallinnusta voidaan käyttää energiasimulointityökalujen ja CAD-työkalujen välisenä yhdyssiteenä ja voi antaa lisämittauksia elinkaariarviointiin, joita ei ehkä ole saatavilla CAD-työkalujen ja energiasimulaatiotyökalujen kirjastoissa. Esimerkkinä suunnittelun optimoinnissa ja prosessin helpottamisen tarjoamaan erilaisten suunnitteluvaihtoehtojen, järjestelmiä ja materiaaleja, joita voidaan käyttää LVI-järjestelmän mitoituksessa, voidaan tehdä aikaisemmin. [Jalaei & Jrade 2014: 494–519.]

2.8 Tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen käyttöönoton haasteet

Integrointi tietomallinnuksen energiamallinnukseen on kohdannut monia vaikeuksia. Kahdella yleisimmällä tietomallinnuksessa käytetyllä tiedostomuodolla (IFC ja gbXML) on erilaisia vaikeuksia integroinnin tasolla energiamallinnustyökalujen kanssa. Nämä haasteet voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: muutostavastarinta, osaamisvaje ja työvoima, ja standardointi. Lisäksi ymmärretään, että tällainen integraatio tuottaa valtavia etuja kaikille rakennusalan sidosryhmille. [Nasyrov ym. 2014: 479–486; Maile ym. 2013]

2.8.1 Muutosvastarinta

Ihmisten yleistä reaktiota johonkin uuteen kutsutaan muutosvastarinnaksi. Ihmiset voivat reagoida spontaanisti vastustaakseen muutosta, mikä on luonnollista ja normaalia. Yksilöt voivat omaksua muutoksia vain tiettyyn rajaan asti, ja työntekijät saattavat vastustaa muutosta, koska he eivät ole tietoisia liiketoiminnan vaatimuksesta. Onnistunut muutosvastarinnan hallinta edellyttää, että työntekijöille tarjotaan tarvittavat tiedot, jotka voivat lisätä heidän tietoisuuttaan. On tärkeää, että arvioija pystyy määrittämään, ovatko halu, tietoisuus, tieto, vahvistus tai kyky perussyitä tai esteitä tällaiselle vastarinnalle. Vastarinnan tehokkaan hallinnan saavuttamiseksi on erittäin tärkeää kouluttaa työntekijöitä ja lisätä heidän tietoisuuttaan. Paras tapa arvioida työntekijöiden huolenaiheita on suora vuorovaikutus eli kasvokkain tapahtuva vuorovaikutus. Näin työntekijät voivat ilmaista huolensa aktiivisesti. Esimiehet ja johtajat voivat tehdä tämän arvioinnin selvittääkseen syitä muutosvastarintaan [Arayici ym. 2011: 189–195].

Tässä opinnäytetyössä ehdotetaan strategiana alhaalta ylöspäin-lähestymistapaa tämän haasteen ratkaisemiseksi. Jotta johtamiskäyttäytymistä voidaan muuttaa ja vähentää muutosvastarintaa onnistuneesti, tietomallinnuspohjaisen energiamallinnuksen käyttöönotto on parempi toteuttaa alhaalta ylöspäin suuntautuvana eikä ylhäältä alaspäin suuntautuvana, kuten tutkimus on osoittanut. Lisäksi toteutusstrategia edellyttää ammatillista ohjeistusta operatiivisella tasolla. Tämä on tärkeää, jotta tietomallinnuspohjainen energiamallinnusjärjestelmä voidaan ottaa käyttöön onnistuneesti rakennusosalalla. [Arayici ym. 2011: 189–195].

On normaalia huomata, että vastaanottoprosessi on hitaampi kuin odotettu. Tämä johtuu siitä, että muutosprosessi on kattavaprosessi, johon osallistuu monia sidosryhmiä ja yksilöitä. Lisäksi on normaalia huomata, että suurin osa tiimityöstä ei ole perehtynyt tietomallinnuspohjaiseen energiamallinnus -menetelmään ennen käyttöönottoprosessin toteuttamista, lukuun ottamatta jotkut ylimmän johdon jäsenet, jotka ovat ennakoineet tällaisen skenaarion etukäteen. Tämä osoittaa ylimmän johdon roolin tärkeyden vastaavissa tilanteissa.

Ylimmän johdon tuki ja ohjaus on tässä skenaariossa tärkeää. Näin tiimityöskentely voi huomata merkittävän saavutuksen siinä, miten taitaviksi he ovat tulleet ja miten kehittyneeksi kyseinen projekti on kehittynyt lyhyessä ajassa. Ainostaan silloin tällaisen työpaikan etenemistä tietomallipohjaisen energiamallinnuksen osalta olisi vaikea pysäyttää. Tällaisen strategian soveltamisen pitkän aikavälin tavoitteena ei ole vain se, mitä on mainittu, vaan jatkuvalla kehittämisellä täydellisen käyttöönoton jälkeen pyritään luomaan uusia palveluita, kuten kiinteistönhallinnon. [Arayici ym. 2011: 189–195.]

2.8.2 Osaamisvaje ja työvoima

Työvoiman esteenä on ammattitaitoisen työntekijöiden riittämätön saatavuus ja riittämättömät taidot nykyisestä työvoimasta. Tämä sisältää ohjelmistotyökalun tehottoman ja sopimattoman käytön sekä kouluttajien kestävyyttä koskevan tiedon puutteen. [Arayici ym. 2011: 189–195.] Suunnittelukumppanit, jotka eivät tunne energiamallinnuksen edellyttämiä yksityiskohtia usein luovat tietomalleja. Tämän seurauksena nämä mallit ovat epäjohdonmukaisia ja alttiita virheille luomisvaiheessa. Lisäksi ne rakennetaan tietomallinnus-työkaluja käyttäen, joilla on merkittävästi eri objekteja ja parametreja tarvittavista simulointityökaluista [Wetter & Van Treeck. 2017]. Tämä johtaa vaikeuksiin näiden mallien muuntamisessa energiamallinnusohjelmiksi, koska ne on tarkoitettu rakentamisen dokumentointiin eikä suoritussimulaatioihin.

2.8.3 Standardoinnin puute

Tietomallinnus- ja energiamallinnustyökalujen välillä havaitaan monia eroja geometrinen tietojen siirrettäessä johtuen muuttuvista lämpövyöhykkeistä, huonerajoista ja sekä ei-tasomaisessa geometriassa tulkintavirheistä, joka muuttuu puuttuviksi tai päällekkäisiksi elementeiksi sekä tilatilavuuksien virheelliseen määrittämiseen [Maile ym. 2013]. Esimerkiksi alakattojen ja lattioiden aiheuttama virheellinen tilavuuden määrittäminen, keskilinjalaskelmat ja virheelliset seinät voivat aiheuttaa poikkeamia rakennuksen geometriassa. Useissa tutkimuksissa on väitetty, että nykyisten ohjelmistojen mahdottomuutta tuoda kaarevia seiniä

käyttämällä vaihtotietojärjestelmien [Kim & Yu. 2016: 333–345; Ugliotti ym. 2016: 3–8.] Huolimatta siitä, että tietojärjestelmissä voi olla pitkiä tietoja, useammin näihin tietoihin ei päästä asianmukaisella tavalla simulaatiotyökaluilla tai luomalla. Vaikka tiedoston muodossa on kyky säilyttää siihen liittyvät materiaaliominaisuudet, analyysityökaluilla tai tekijöillä ei ole kapasiteettia viedä tai tuoda näitä ominaisuuksia [Hitchcock & Wong. 2011]. Gourlisin ja Kovacicin [2017] mukaan, he asensivat materiaalin ominaisuudet manuaalisesti EnergyPlus-ohjelmaan, koska gbXML- ja IFC-järjestelmät eivät pystyneet viemään tietoja rakennekerrosten tiheyttä, lämmönjohtavuutta ja ominaislämpökapasiteettia, vaikka nämä järjestelmät tarjoavat siihen vaihtoehtoja.

LVI-järjestelmän elementtien yhteentoimivuuden kannalta energiasimulointityökaluilla on rajalliset mahdollisuudet. Tällaisten LVI-järjestelmän elementtien merkitys on kasvanut viime aikoina ja tämä ongelma on kärjistynyt, koska ongelmaan ei ollut ratkaisu edes uusin IFC-formaatin versio (IFC4) [Gourlis & Kovacic 2017]. Tämän seurauksena käyttäjän on syötettävä tiedot manuaalisesti, vaikka järjestelmäkuvauksessa ei ole vaihtoehtoa, mikä voi johtaa virheellisiin simulointituloksiin.

Ohjelmistotyökaluilla ei ollut valmiuksia hakea toimintatietoja tietojärjestelmistä. Lopulta ohjelmistotyökalut käyttävät oletusarvojaan ja syötteitään koko ajan. Nasyrovin ym. [2014] mukaan toimintatietojen vaihto on onnistunut tuomalla tiedot Green Building Studioon Revitistä, mutta Revit ei kuitenkaan onnistunut viemään tietoja muihin ohjelmistotyökaluihin [Sanhudo ym. 2018: 249–260].

3 Tutkimusmenetelmät

3.1 Tutkimuksellinen lähestymistapa

Tutkimukseen löydettiin yhteensä yli 65 asiaa koskevaa tietolähdettä. Jokainen tietolähde hankittiin tiettyyn tarkoitukseen tutkimuksen parantamiseksi. Tämän perustella tehtiin kattava kirjallisuuskatsaus tietomallinuksen ja energiamallinuksen käyttöönotosta rakennusten energian optimointiin rakennusosalalla. Lisäksi

suoritettiin haastatteluja yksityiskohtaisten näkemysten saamiseksi ammattilaisilta ja toimijoilta tietomallinuksen ja energiamallinuksen käyttöönottoon liittyvistä hyödyistä, haasteista ja työkaluista rakennusalalla.

3.2 Tutkimuskysymykset

Perinteisen rakennusten energiamallinuksen huomattavat ongelmat, kuten aikaa vievä valmistelu, epäjohdonmukaiset mallit ja korkeat kustannukset, voidaan ratkaista käyttämällä tietomallinnusta sen tarjoamien mahdollisuuksien vuoksi. Jotta voidaan suunnitella tehokkaasti ja vähentää energiakulutuksen määrää rakennusalalla, tarve tietomallinnuspohjaisen energiamallinnukseen on tullut keskeiseksi aiheeksi. Rakennusten kestävyyttä ja energiatehokkuutta voidaan parantaa ottamalla käyttöön tietomallinnuspohjainen energiamallinnusmenetelmä sen mahdollisten etujen vuoksi. Tietomallinuksen käyttöä energiasimulaatioon, suorituskyvyn analysointiin ja järjestelmän optimointiin on tutkittu lukuisissa tutkimuksissa, mutta pääpaino on tietomallinuksen ja energiamallinuksen integroinnissa suunnitteluvaiheessa sekä tietomallinuksen tehokkuudessa rakennuksen energiankäytön seurannassa ja hallinnassa.

Kirjallisuuskatsauksen mukaan tietomallinnuspohjaisen energiamallinnus teknologian käyttöönotto rakennusalalla on hidasta johtuen merkittävistä haasteista. Opinnäytetyön tutkimuksessa selvitettiin, miten tietomallinnusta ja energiamallinnusta toteutetaan rakennusalalla. Tässä tutkimuksessa analysoitiin myös hyötyjä ja tulevaisuutta tietomallinuksen ja energiamallinuksen käytön osalta rakennusalalla.

Kuusi kriteeriä on otettu huomioon tarkasteltaessa tietomallinnus- ja energiamallinnus-käsitettä rakennusalalla, sen toteuttamiseen liittyviä vaikeuksia, käytettyjä työkaluja ja tekniikoita sekä hyötyjä ja esteitä näiden järjestelmien integroinnissa:

- tiedonvaihtomuoto
- syöttötietojen tarkkuus
- tiettyjen käytettyjen työkalujen syy

- kannattavuus tietomallinnuspohjaisen ja energiamallinnuksen investoinnissa
- haasteet tietomallinnus- ja energiamallinnuksen käyttöönotossa
- tietomallinnus- ja energiamallinnuksen asiantuntemus.

Haastattelujen avulla on mahdollista saada syvempää ymmärrystä tietomallinnuksesta ja energiamallinnuksesta, kuten niiden vahvuudet ja rajoitukset. Sen selvittäminen, miten niitä voidaan soveltaa tehokkaasti rakennusallalla hankkeiden tulosten parantamiseksi, voidaan saavuttaa tutkimalla kutakin edellä mainittua kuutta osa-aluetta ja analysoimalla tietoja tutkimuskysymysten yhteydessä.

3.3 Haastattelun toteuttaminen

Menetelmänä käytettiin haastatteluja, jotta saatiin yksittäisiltä henkilöiltä tai ryhmiltä tietoa tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen toteuttamisesta rakennusallalla. Haastattelut toteutettiin Microsoft Teams -ohjelmalla ja puhelimitse. Haastateltavat valittiin tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen tutkijoista ja ammattilaisista sekä rakennusalan ammattilaisista. Heillä on asianmukaista tietoa ja kokemusta tietomallinnuksesta ja energiamallinnuksesta. Pää tarkoitus oli saada oivalluksia alan toimijoilta. Haastateltaviin otettiin yhteyttä sähköpostitse ja haastattelut tehtiin Microsoft Teamsin kautta.

Haastattelun aikana käytettiin tehokkaita menetelmiä, kuten aktiivista kuuntelua, jatkokysymysten esittämistä ja lisätietojen etsimistä. Haastattelujen suorittamisen jälkeen aineisto analysoitiin huolellisesti ja lajiteltiin kuuteen eri osa-alueeseen. Koko tutkimusprosessin ajan eettisiä periaatteita ja ohjeita noudatettiin, ja näihin kuuluvat osallistujien suostumusten saaminen, haastateltujen luottamuksellisuuden ja yksityisyyden turvaaminen.

Haastattelu rakentui kolmesta osasta:

1. Tietomallinnusosassa tutkittiin tietomallinnuksen soveltamisen haasteita, käytettyjä työkaluja ja tekniikoita sekä saavutettuja hyötyjä.

2. Energiamallinnusosassa keskityttiin energiamallinnuksen toteutuksen aikana kohtaamiin esteisiin, käytettyihin työkaluihin ja tekniikoihin sekä saavutettuihin etuihin.
3. Tietomallinnuspohjainen energiamallinnus-menetelmäosiossa käsiteltiin tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen käsitteen tiedustelua osallistujilta, tietomallinnuspohjainen energiamallinnus menetelmän toteutuksen haasteita, käytettyjä työkaluja ja tekniikoita sekä saatuja hyötyjä.

3.4 Haastateltavan taustatiedot

Haastateltava 1 on suorittanut kandidaatin tutkinnon ja on töissä Skanskassa Ruotsissa. Hän on työskennellyt kyseisessä yrityksessä yli viisi vuotta ja käyttää tietomallinnusta viestintään, projektien osallistujien väliseen yhteistyöhön sekä projektien visualisointiin ennen rakentamista. Hän käyttää energiamallinnus-työkaluja rakennusten energiatehokkuuden tarkistamiseen rakennustilanteessa ja korjaushankkeissa.

Hänen mukaansa tietomallinnus on hyödyllinen projektihallintatekniikalle, ja se helpottaa yhteistyötä ja viestintää arkkitehtien, insinöörien ja muiden osapuolien välillä ja parantaa rakennusta koskevaa tiedonvaihtoa. Tietomallinnuksesta on myös hyötyä korjaushankkeissa, mutta sen käyttö on rajallista, koska monista olemassa olevista rakennuksista puuttuu tietomallinnus.

Haastateltava 2 on sähköinsinööri JDD Integrated Resources Oy Lagosissa. Hän on toiminut rakennusalalla noin kaksikymmentä vuotta. Hänen mielestään tietomallinnus on hyvä, mutta se vie aikaa ja lisää hankkeiden kustannuksia. Tämän vuoksi hän ei ota tietomallinnusta mukaan hankkeisiin.

Haastateltava 3 on tohtorin tutkinnon suorittanut Tampereen ammattikorkeakoulun lehtori. Hänen mukaansa he käyttävät tietomallinnusta viestintään, yhteistyöhön, määrä- ja kustannusarviointiin sekä energiatehokkaisiin rakennuksiin.

Hän mainitsi myös, että heidän tehokkuuttaan voidaan lisätä tietomallinnus- ja energiamallinnuksen avulla.

Haastateltava 4 on LVI-suunnittelija ja hän on suunnitellut useita vuosia. Hän tekee rakennusten energiasimulointia, suursuunnittelua, tilasimulointia ja optimointia. Hänen mukaansa tarkka geometria ei ole niin tärkeää rakennuksen hyvän energiasimuloinnin kannalta, mutta materiaalien ominaisuudet, tilatyypit ja niin edelleen ovat tärkeämpiä hyvän simuloinnin saamiseksi.

Haastattelija 5 on Corriersin arkkitehtuuriprojektien johtaja Isossa-Britanniassa. Hän tekee paljon tutkimusta maankehityksen, vihreän rakentamisen ja nettonollaenergiarakennusten aloilla. Hän käyttää tietomallinnusta rakentamisen mallintamiseen, päätöksentekoon tai auttaa suunnitteluryhmää työskentelemään yhdessä yhteistyöympäristössä ja energiasimulaatiossa rakennusten energiatehokkuuden parantamiseksi.

Haastateltava 6 on urakoitsija Pajala Yhtiöt Oy: ssä. Hän on työskennellyt teollisuudessa useita vuosia. Hän ei käytä tietomallinnusta hankkeiden visualisointiin. Hän työskentelee vain hankkeessa pääkaupunkiseudulla. Hänen mukaansa heillä ei ole niin paljon kokemusta Revitistä. Hänen mielestään se ei ole järkevää, koska he tietävät mitä tehdä. Hän jatkoi sanomalla, että eivät myöskään suunnittele töitä Revitillä ja lopuksi hän sanoi, että ei ole järkevää tuhata aikaa ja rahaa siihen mitä he osaavat jo tehdä.

4 Haastattelun tulokset

4.1 Tietomallinnus- ja energiamallinnuksen määritelmät

Haastatteluun osallistuneille annettiin mahdollisuus määritellä tietomallinnus ja energiamallinnus omien kokemustensa perusteella. Seuraavassa taulukossa esitetään useita heidän määritelmistään.

Taulukko 1. Osallistujien määritelmät tietomallinnuksesta ja energiamallinnuksesta.

Haastateltava 1	Tietomallinnus on erittäin yhteistyöprosessi, jonka avulla arkkitehdit, insinöörit, kiinteistökehittäjät, urakoitsijat, valmistajat ja muita rakennusalan ammattilaisia voivat suunnitella, muotoilla ja rakentaa rakenteen tai rakennuksen yhden 3D-mallin sisällä.
Haastateltava 2	Tietomallinnuksella tarkoitetaan prosessia kaikkien osapuolten rakentamiseen ja elinkaaren hallintaan liittyvä rakennetun omaisuuden
Haastateltava 3	Tietomallinnus on toimia yhteistyössä ja tietoja jakaminen. Tietomallin todellinen voima piilee kuitenkin tiedoissa. Kaikkea kerättyä tietoa suunnittelusta valmistamiseen ei vain tallenneta, vaan sitä myös on toimintakelpoista.
Haastateltava 4	Tietomallinnus on yksityiskohtaista tietoa, joka määrittelee tuotteen, ja geometriaa, joka edustaa tuotteen fyysisiä ominaisuuksia. Visualisointitiedot, jotka antavat esineelle tunnistettavan ulkonäön ja käyttäytymistiedot.
Haastateltava 5	Tietomallinnus on älykäs ohjelmistomallinnusprosessi, jonka avulla arkkitehdit, insinöörit ja urakoitsijat voivat tehdä yhteistyötä rakennuksen suunnittelussa, rakentamisessa ja käytössä. Se mahdollistaa reaaliaikaisen yhteistyön kaikkien rakennusprojektiin osallistuvien välillä, mikä johtaa huomattaviin kustannusten, turvallisuuden ja tehokkuuden parannuksiin.

Tietomallinnus ja energiamallinnus ovat välttämättömiä työkaluja arkkitehtuurin, insinööriyön ja rakentamisen alalla. Tietomallinnus mahdollistaa digitaalisen mallin luomisen, joka kuvastaa tarkasti rakennuksen fyysisiä ja toiminnallisia ominaisuuksia, kun taas energiamallinnus hyödyntää tietokonepohjaisia simulaatioita rakennuksen energiatehokkuutta analysoimiseksi ja optimoimiseksi. Ympäristöystävällisten ja energiatehokkaiden rakennusten kehittämistä voidaan parantaa näiden työkalujen yhdistämisellä.

4.2 Tiedonvaihto tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen välillä

Keskusteltaessa tiedonvaihtohaasteesta tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen välillä. Haastateltava 5 sanoi, että haasteena on löytää ratkaisu näiden

kahden teknologian väliseen kuiluun. Hänen kokemuksensa mukaan tarkka geometria ei ole ratkaisevaa rakennuksen hyvän energiasimuloinnin kannalta, mutta materiaalien ominaisuudet ja niin edelleen ovat tärkeitä hyvän simuloinnin kannalta. Haastateltavan 5 näkemys poikkeaa kirjallisuuskatsauksen tuloksista, sillä hän ajattelee, että hän voi saada geometrian tietomallinnuksesta heidän energiasimulaatio-ohjelmistoonsa.

Keskusteltaessa tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen haasteista, haastateltava 1 sanoi, että yksi haasteista on vaikeus määrittellä geometriaa energiamallinnuksessa, kun simulaatiotyökalusta on saatavilla erilaisia versioita. Hänen mukaansa tietostandardi tietomallinnuksessa ja energiamallinnuksessa on tärkeä asia. Hän jatkoi sanomalla, että IFC on tunnetuin formaatti, joka sisältää paljon yksityiskohtia ja yksi alan meneillään olevista tutkimusaiheista on, miten kehittää standardeja, jotka ovat käytännöllisempiä tiettyihin sovelluksiin. Hän totesi, että energiamallinnuksessa on olemassa IDF, jota käytetään EnergyPlus-ohjelmassa. Myös gbXML:n kanssa on helpompi työskennellä. Hän totesi lopuksi, että rakennustoiminnan standardoitu menettely auttaa parantamaan hankkeen yhteistyötä ja lisäämään hankkeen tehokkuutta.

Toinen haastateltava mainitsi, että IFC ja gbXML on luotu standardeina helpotamaan tiedonvaihtoa tietomallinnus- ja energiamallinnus-työkalujen välillä, mutta kaikki ohjelmistosovellukset eivät ole yhteensopivia näiden standardien kanssa. Tämä voi johtaa ristiriitaisuuksiin ja virheisiin tiedonvaihtoprosessin aikana.

Haastattelun aikana haastateltavat nostivat esille monia tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen välisen tiedonvaihdon, kuten ratkaisujen löytämistä suunnittelu- ja simulointialueiden välillä, kaikkien aspektien sisällyttämistä tietomallinnukseen ja käsitystä, että tarkka geometria ei aina ole välttämätöntä tehokkaan energiasimulaatioon. He korostivat myös tarvetta käytännön tietostandardien, kun otetaan huomioon geometrian määrittely energiamallinnuksessa. Lisäksi nousi esiin kysymys ohjelmistosovelluksista, jotka eivät täysin täytä alan standardeja, koska mahdolliset virheet voivat vaikuttaa tiedonvaihtoon.

4.3 Tietojen tarkkuus tietomallinnuksesta energiamallinnukseen

Ensimmäisen haastateltavan mukaan syöttötiedon tarkkuuden tärkeys riippuu siitä, kuinka yksityiskohtaisia tietoja on saatavilla. Hän sanoi, että jos tietoa rakennuksesta, asukkaista, ulkosääolosuhteista ja niin edelleen on riittävästi saatavilla, sitä voidaan käyttää, muuten käytetään oletuksia. Hän totesi, että tämän perusteella voidaan määrittellä energiamallinnuksen tarkkuutta. Hän kertoi esimerkin hankkeesta, jossa hän työskenteli näin: asukkaiden aikataulu ei ole todellista tietoa, vaan oletettua tietoa tai sää tiedot ovat vakio muotoisia, jotka kuvaavat ulkotilanteen pitkän aikavälin tilaa. Lopuksi hän totesi, että vaikka se ei ehkä edustakaan todellista tulevaisuuden tilaa, käytetään ennustetta siitä, mitä tulevaisuudessa tapahtuu säätilanteen osalta.

Toinen haastateltava selvitti simulaatioiden syötetietojen ja oletusten tärkeyttä näin: suuret oletukset ovat käyttöaste ja miten rakennusta tullaan käyttämään. LVI-järjestelmää ohjaavat suurelta osin ulkoiset sääolosuhteet, mutta suurin oletus, jonka he tekevät, on valaistus- ja käyttöaikatauluista johtuva energiankulutus. Syöttötiedot vaikuttavat ennustettuun energiankäyttöön tai energiankulutukseen. Joten hän uskoo siis, että syötetietojen ja oletusten tärkeyttä vaikuttaa aikaan ja rahaan.

4.4 Mallien yksityiskohtaisuus

Ensimmäinen haastateltava ilmaisi hänen näkemyksensä näin: energiamallinnus, kuten mikä tahansa mallinnusprosessi riippuu mallinnuksen monimutkaisuudesta ja syötteiden tarkkuudesta. Sillä on merkitystä projektin käytettävissä olevien tietojen tarkkuuden kannalta. Hän korosti, että on tärkeää säilyttää tietomallinnus- ja energiamallinnus-malleissa tietty yksityiskohta, jotta saadaan tarkkoja simulointituloksia. Hänen mukaansa, jos mallia yksinkertaistetaan liikaa, simulaatitulokset ovat epätarkkoja, toisaalta, jos se on liian yksityiskohtainen, voi olla vaikeaa hallita sitä. Keskusteltaessa simuloinnin tuloksista korjaushankkeessa hän ehdotti seuraavaa, että simulointitulosten vertaaminen rakennuksen energialaskuun ja säätöjen tekeminen tämän vertailun perusteella on yksi tapa

parantaa simuloinnin tarkkuutta. Hän totesi kuitenkin myös, että vaikka tämä lähestymistapa on hyödyllinen, se on yksi rajallisista menetelmistä luotettavien arvioiden luomiseen.

Toisen haastateltavan mukaan syöttötietojen tärkeys on riippuvainen hankkeen tyypistä. Hän selitti asian antamalla esimerkin näin: liikerakennusten energiamallin tulee olla riittävän yksityiskohtainen kattamaan alueet, kuten LVI-järjestelmät, valaistus ja pistokekuormat, mutta asuinrakennusten energiamallin tulee sisältää tiedot eristyksestä, ikkunoista ja laitteista.

Haastateltava 3 totesi, että simulaatiossa monet tehdyt oletukset, kuten ilmasto, joidenkin materiaalien lämpöominaisuudet, ulkoilma henkilöä kohti, LVI-järjestelmä, käyttöaikataulu vaikuttavat simuloinnin tulokseen. Hänen mukaansa hän käyttää asiantuntijoiden mielipiteitä ja tutkimusartikkeleita näiden oletusten osalta.

Haastateltava 6 kertoi, että tietojen tarkkuus tietomallinnuksesta energiamallinnukseen riippuu henkilöstä toiseen. Hän jatkoi käyttämällä esimerkkiä kokeesta kolmen oppilaan kanssa yhdessä luokkahuoneessa. Hän antoi heille saman tiedoston ja pyysi heitä viemään se energiamalliin ja suorittamaan energiankulutuksen simulaation. Hän kertoi, että valitettavasti hän sai erilaisia tuloksia, koska jokaisella on oma tapansa viedä tiedoston.

4.5 Tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen mahdolliset edut

Ensimmäiseltä haastateltavalta kysyttiin, jos käytetty aika tietomallinnus- ja energiamallinnus-integrointiin sen arvoista. Hän vastasi näin: jos tietomallinnus on saatavilla aina, se voi säästää aikaa tietomallinnuksesta energiamallinnukseen muuntamisessa. Hän sanoi, että tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen integroinnin avulla suunnittelijat voivat määrittää energiatehokkaimpia suunnitteluvaihtoehtoja rakennukselle. Hänen mukaansa otetaan huomioon tietomallinnuksen tarkkaa 3D-rakennusmallilla, suunnittelijat voivat luoda tarkan

energiamallinnussimuloinnin, jonka avulla he voivat arvioida ja verrata erilaisia energiansäästömenetelmiä.

Keskusteltaessa siitä, kuka saa eniten hyötyä energiasimuloinnista, omistaja vai suunnittelijat? Toinen haastateltava sanoi, että noin 70–80 prosenttia hänen työskentelystään projekteista hän ajattelee, että omistaja saa energiamallinnuksesta taloudellista tai ulkoista hyötyä. Hän totesi, että hankkeen omistaja ei tarvinnut tehdä sitä, mutta sanoisi, että he saavat sijoitetun pääoman tuoton.

Toiselta haastateltavalta myös kysyttiin kuka saa hyötyjä energiasimulaatioista. Hän vastasi, että energiasimulaatioiden hyötyjä menevät aina hankkeen omistajalle ja sitten suunnittelijalle. Hänen mukaansa se riippuu projektista, sanoisi, että keskimäärin luultavasti 80–120 tuntia heidän aikaansa. Hän ilmaisi hänen näkemyksensä integroimisesta tietomallinnuksen energiamallinnukseen näin: jos olisi parempi Revitissä, ehkä, mutta ei usko, että se on suoraa vastaus, ja siksi he eivät yrittäneet sijoittaa aikaa paremmin.

Haastateltavan 3 mukaan tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen integrointi voi auttaa vähentämään käyttökustannuksia ja ympäristövaikutuksia, ja säästää aikaa, mutta alkuinvestointikustannuksia voivat korkeat.

Tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen avulla voidaan arvioida rakennuksen energiatehokkuutta koko sen elinkaaren ajan, mikä mahdollistaa energiatehokkuuden jatkuvan parantamisen ja käyttökustannusten vähentämisen. Keskustellessaan tästä haastateltava 4 sanoi, että hän uskoo rakennuksen käytön aikana, voidaan säästää paljon rahaa. Hänen mukaansa tietomallinnus ja energiamallinnus -ongelma ei ole kovin kallis, mutta ei ole tarpeeksi asiantuntijoita, jotka osaavat tehdä sen, tämä voi tehdä siitä niin kalliin. Hän on sitä mieltä, että vaikka se voi johtaa säästöihin toimintakustannuksissa, mutta hän ei usko, että tietomallinnuspohjainen energiamallinnus-menetelmä on hyvä idea.

Hän korosti tätä sanomalla, että hän kertoo kaikille energiasimulaatioita tekeville ihmisille, että älkää käyttäkö tietomallinnusta, koska ihmiset käyttävät tietomallinnusta geometrian määrittämiseen, vaan määrittää geometrian suoraan

energiasimulaatio-ohjelmistossa. Hän sanoi miksi ihmiset käyttävät tietomallinnusta energiasimulaatioiden kanssa? Hänen mielestään ihmiset toivovat sen nopeuttavan simulaatiota, mutta hän ei usko, että he onnistuvat. Hän totesi, että hän ei usko, että tietomallinnus- ja energiamallinnusintegraatio säästää aikaa. Hän uskoo, että se vie enemmän aikaa ja lopulta maksaa enemmän. Hän jatkoi kertomalla, että tarvitsemasi tiedot tietomallinnuksessa tehdään pääasiassa rakennuksen arkkitehtoniseen suunnitteluun tietomallinnusohjelmistossa, mutta ne eivät sisällä tietoa energiasimulaatioon, vaan energiamallintajat haluavat luoda sen energiamallinnusohjelmistossa, joten ei ole järkevää integroida näitä kahta tiukasti yhteen.

Haastateltava 5 sanoi, että on olemassa monia etuja ja mahdollisuuksia muuttaa hänen arkkitehtuuripäätöstänsä kyseisen mallin perusteella. Hän totesi, että tietomallinnus- ja energiamallinnusintegroinnin ansiosta suunnittelijoilla ja rakennusten omistajilla on enemmän tietoa rakennuksen energiatehokkuudesta. Hänen mukaansa nämä kattavat tiedot mahdollistavat asiantuntevien päätösten tekemisen rakennusmateriaaleista ja suunnitteluvaihtoehdoista. Hän on samaa mieltä, että se säästää aikaa ja kustannuksia. Lopuksi sanoi, että jos tähän käytetään aikaa ja työkalut asetetaan oletusarvoisesti ja tehdään niistä käyttäjälle helppokäyttöisiä, siitä on hänen mielestään paljon hyötyä.

Yhteenvetona voidaan todeta, että tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen integrointi säästäisi aikaa ja antaa yksityiskohtaista tietoa energiatehokkaista. Haastateltavilla on erilaisia näkemyksiä tämän integroinnin eduista ja haitoista. Jotkut heistä sanovat, että se voi säästää aikaa ja rahaa, ja auttaa tekemään päätöksiä, jotka auttavat säästämään energiaa, kun taas toiset uskovat, että se vie enemmän aikaa eikä sitä välttämättä tarvita. Siitä huolimatta tarve investoida käyttäjäystävällisiin työkaluihin integroinnin tehokkuuden parantamiseksi pitkällä aikavälillä on yksimielinen.

4.6 Tietomallinnus- ja energiamallinnustyökalut

Haastateltava 1 ilmaisi näkemyksensä sanomalla, että hän ole käyttänyt IDA-ICE:tä monta kertaa ja IDA-ICE:n tärkein etu muihin simulointiohjelmiin verrattuna on ohjaussekvenssien toteuttaminen, mikä on melko tehokas. Hän uskoo, että se antaa enemmän joustavuutta passiivisten strategioiden, kuten luonnollisen ilmanvaihdon ja kaksoisjulkisivujen osalta verrattuna muihin ohjelmistoihin. Hänen mukaansa 3D-mallintaminen on kuitenkin erittäin vaikeaa, koska oma geometrinen käyttöliittymä on erikoinen toisin kuin EnergyPlus, joka tarjoaa erilaisia keinoja vakaan geometrian tuomiseen. Hän sanoi, että tämä on hänen käsityksensä ja saattaa vaihdella verrattuna johonkin, joka on IDA-ICE:n asiantuntijakäyttäjä.

Haastateltava 2 totesi, että eQuestin graafinen käyttöliittymä on intuitiivisempi kuin muiden ohjelmien, minkä vuoksi hän käyttää sitä. Hänen mukaansa heidän insinöörit käyttävät joitakin ominaisuuksia, jotka ovat valmistajien maksullisia ohjelmia. He tekevät niitä yleensä siksi, että he voivat tehdä mitoitussajoja selvittääkseen, kuinka suuri LVI-laitteiston on oltava, ja sitten he pystyvät suorittamaan simulaatioita näissä ohjelmissa. Hän sanoi, että koska se on maksullinen, se rajoittaa kaikkien mahdollisuuksia käyttää sitä.

Haastateltavan 4 mukaan he käyttävät monia erilaisia lähestymistapoja energiasimulaatioon. He käyttävät EnergyPlusia ja yksi todella hyvä yritys on ESP-r (Energiasimulationohjelmatyökalu), jolla on luultavasti eniten edistystä ja työkaluja saatavilla. Hän totesi, että ESP-r on matemaattinen ohjelmistotyökalu, joka on suunniteltu projektipäälliköille ja integroi erilaisia sovelluksia sekä työkaluja, kuten tietojen koordinointi, simulointi, CAD ja suorituskyvyn arviointi. Lopuksi sanoi, että ESP-r -ohjelmisto käyttää monimutkaisia yhtälöitä käsitelläkseen useita projektin aspektia samanaikaisesti, kuten geometriaa, rakentamista, toimintaa, jakelua ja lämmöntuottoa.

Haastateltava 3 esitti näkemyksensä sanomalla, että he käyttävät Autodeskin Green Building Studiota energiasimulaatioon ja he käyttävät yleisesti

energiasimulaatiota energiatehokkaisiin rakennuksiin. Hänen mukaansa se on pilvipohjainen ohjelmistotyökalu, joka tarjoaa kehittyneitä rakennussimulointi- ja analyysitoimintoja, jotka tukevat tehokkaiden rakennusten suunnittelua ja optimointia. Hän totesi, että työkalu integroituu muihin Autodeskin rakennussuunnitteluohjelmistoihin, jolloin käyttäjät voivat tuoda 3D-malleja ja simuloida energiankulutusta, lämpöviihtyvyyttä, sisäilman laatua ja muita kriittisiä suorituskykyparametreja.

Haastattelussa haastateltava 5 totesi seuraavalla tavalla:

yksi asia, joka on todella ainutlaatuinen IDA-ICE:lle on, että se simuloi laitosta, ohjausta ja verkkoilmavirtaa hyvin integroidusti. Itse asiassa nämä kolme näkökohtaa liittyvät pysyvästi toisiinsa. Niitä ei voi irrottaa. Tämä mahdollistaa erittäin vankan energia-analyysin.

Kun kaikki haastateltavien näkökulmien on otettu huomioon, voi päätellä, että monet käyttivät EnergyPlusia, IDA-ICE:tä, Autodeskin Green Building Studiota, ESP-r kehittyneiden työkalujensa ja matemaattisten ohjelmistojensa suunnittelu ja muita kolmannen osapuolen ohjelmistoja energiasimulointiin, kun taas toiset käyttävät eQuestia sen intuitiivisen graafisen käyttöliittymän vuoksi.

4.7 Tietomallinnus- ja energiamallinnusosaaminen

Keskustellessaan tietomallinnus- ja energiamallinnus-asiantuntemuksen puutteesta, haastateltava 4 totesi seuraavalla tavalla: monilla arkkitehdeillä on tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen sisäistä asiantuntemusta, mutta monilla ei ole osaamista energiasimulaatiosta. Hänen mukaansa syynä asiantuntemuksen puutteeseen on, että tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen teknologiat ovat vielä suhteellisen uusia, joten monilla ammattilaisilla ei ole siihen koulutusta ja kokemusta. Toiseksi tietomallinnus- ja energiamallinnustyöskentelyyn edellyttää erikoistietoja ja taitoja, mikä voi olla kallista hankkia. Kolmanneksi osaamisen kehittäminen on vaikea, koska monialaista yhteistyötä tarvitaan ja ohjelmisto on monimutkainen. Lopuksi tietomallinnus- ja energiamallinnusteknologiat eivät välttämättä ole edullisia pienyrityksille, koska niiden käyttöönottokustannukset

voivat olla liian korkeat, mikä voi estää niitä investoimasta vaadittuihin ohjelmistoihin ja koulutukseen.

Ensimmäisen haastateltavan mukaan rakennusinsinööreillä ja energia-asiantuntijoilla on yleensä tämä asiantuntemus. Ohjelmistoja kehitettävät yleensä ohjelmistokehittäjät, mutta hänen mielestään alan asiantuntemus tällaisten työkalujen kehittämiseksi on peräisin rakennusinsinööreiltä.

Toinen haastateltava selvitti yrityksen sisäisen asiantuntemuksen etuja sanomalla, että se tarjoaa paremman hallinnan ja mukautumiskyvyn suunnittelu- ja simulointiprosessissa, jolloin yritykset voivat mukauttaa lähestymistapaansa ja työkalujaan erityistarpeidensa mukaan. Hän sanoi, että tämä johtaa sujuvampiin ja tehokkaampiin työnkulkuihin, mikä poistaa tarpeen ulkoistaa työtä ulkopuolisille konsulteille tai urakoitsijoille. Hänen mukaansa se johtaa myös kustannussäästöihin pitkällä aikavälillä, koska ulkopuolisia palveluita vältetään. Lopuksi hän sanoi myös, että sisäinen asiantuntemus voi johtaa simulaatiotulosten parempaan ymmärtämiseen.

Yhteenvedona haastateltavien näkökulmista yrityksessä voidaan kehittää lopullisesti omaa tietomallinnus- ja tietomallinnusosaamista tarjoamalla työntekijöille koulutus- ja kehitysohjelmia. Jotkut yritykset saattavat mieluummin palkata ulkopuolisia konsultteja tai urakoitsijoita, joilla on asiantuntemusta näistä teknologioista, auttamaan niitä tietomallinnus- ja energiamallinnusprojektien toteutuksessa ja hallinnassa. Valinta yrityksen sisäisen asiantuntemuksen ja ulkopuolisten konsulttien välillä riippuu usein yrityksen budjetista, aikataulusta ja käytettävissä olevista resursseista.

4.8 Tietomallinnus- ja energiamallinnuksen käyttöönotossa haasteita

Ensimmäinen haastateltava totesi selvästi, että tietomallinnus ja energiamallinnus-menetelmien tietostandardit ovat tärkeät asiat. Hänen mielestään IFC on tunnetuin ja sisältää paljon yksityiskohtia. Hän kertoi, että yksi alan meneillään olevista tutkimusaiheista on se, miten kehittää standardeja, jotka ovat

käytännöllisempiä tiettyihin sovelluksiin. Hän mainitsi, että rakennustoiminnan standardoitu menettely parantaa hankekumppaneiden välistä yhteistyötä ja lisää hankkeen tehokkuutta. Haastateltava 3 kertoi, että suurin haaste on asianmukaisen tiedon puute tietomallinnus- ja energiamallinnusteknologioiden integroinnista.

Kun tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen käyttöönottoon liittyvät suurimmat haasteet otettiin esille, haastateltava 4 sanoi, että suurin haaste on tiedon siirtäminen tietomallinnuksesta energiasimulaatio-ohjelmistoon. Hän ei usko, että tietomallinnuksessa on tarvittavat tiedot energiasimulaatioon. Hän jatkoi sanomalla, että geometria voidaan määritellä tietomallinnusohjelmistossa, mutta ei energiamallinnusohjelmistossa ja geometrian vieminen automatisoidun prosessin kautta on varsin tehokas prosessi, joka on paljon ylimääräistä työtä. Hän myös mainitsi, että hän on samaa mieltä siitä, että asiantuntemuksen puute on haaste ja hyvin harvalla on osaamista energiasimulaatiosta. Hän tunnusti, että tämä on iso ongelma rakennusalalle.

Haastateltava 5 totesi, että haasteena on se, että tietoja ei voida vaihtaa kahden toimialueen välillä. Kyseissä on kahdesta toimialueesta eli tiedoista simulointi- ja suunnittelualueen. Hänen mukaansa ratkaisu piilee näiden kahden ohjelmiston välisen välin kurominen umpeen.

Haastateltavan 6 mukaan, asiantuntemuksen puute vaikuttaa simuloinnin tuloksiin. Hän perusteli väitteensä sanomalla, että jos eri asiantuntijoita pyydetään viemään mallia energiasimulaatio-ohjelmistosta. Hän saisi erilaisia tuloksia, koska jokaisella on oma tapansa viedä tiedosto ja tietojen vaihdossa ei siis ole standardointia. Joten miten he voivat luottaa tähän asiaan, jos ne eivät ole mahdollisia?

Yhteenvetona voidaan todeta, että tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen käyttöönottoa haittaavat standardoinnin puute, asiantuntemuksen puute, rakennustietojen siirtämiseen tietomallinnuksesta energiamallinnukseen kuluva aika ja yhteentoimivuus. Standardien puute vaikeuttaa johdonmukaisuuden ja

yhteentoimivuuden varmistamista. Tietomallinnus ja energiamallinnus edellyttävät erikoisosaamista ja asiantuntemusta, joka saattaa puuttua organisaatiosta. Rakennustietojen siirtämiseen tarvittava aika riippuu useista tekijöistä, kuten rakennuksen monimutkaisuudesta ja koosta.

4.9 Tietomallinnus- ja energiamallinnuksen tulevaisuus

Keskustellessaan tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen tulevaisuudesta rakennusalalla, haastateltava 1 sanoi, että tietomallinnus ja energiamallinnus ovat hyödyllisiä, koska niiden avulla insinöörit ja ammattiharjoittajat voivat tehdä yhteistyötä ja välittää rakennustietoja helpommin. Hänen mukaansa se auttaa myös huomattavasti korjaushankkeita, koska monissa olemassa olevissa rakennuksissa ei ole tietomallinnuksen ominaisuuksia. Hän totesi myös, että yksi tärkeimmistä näkökohdista, joka saa eri ohjelmistot vaihtamaan tietoja keskenään on tietomallinnuksen muuntaminen energiamallinnukseksi, jotta voidaan sisällyttää tarvittavat tiedot ja ratkaista geometrian muuntamiseen liittyvät haasteet. Lisäksi hän sanoi, että toinen näkökohta on energiamallinnukseen saatavilla oleva tietostandardi. Hän totesi, että EnergyPlus -ohjelmassa käytetään IDF-standardia, joka on suosittu standardi, mutta jotkut ohjelmistot edistävät gbXML:n käyttöä ja gbXML on toinen muoto, jota on helpompi muokata sekä käyttää.

Haastateltavalta 2 kysyttiin, miten tietomallinnus ja energiamallinnus muuttavat rakennusalaa. Hänen mielestään se vain auttaa edistämään entistä tehokkaampia LVI-suunnitelmia, koska monesti rakennuksen vaipan tehottomuutta vaihdetaan LVI-järjestelmän tehokkuuteen.

Keskustellessaan tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen vaikutuksesta rakennusalalle tulevina vuosina, haastateltava 5 kommentoi seuraavalla tavalla: Kun suurimmasta haasteesta on selvitetty, joka liittyy tietojen siirtämiseen energiamallinnuksesta energiasimulaatio-ohjelmistoon, voidaan odottaa hyötyjä tulevaisuudessa. Koska nykyiset automatisoidut menetelmät tietojen viemiseksi näiden kahden ohjelmiston välillä eivät toimi niin hyvin. Rakennusalan

asiantuntijoiden on siis tehtävä paljon lisätyötä. Hän myös suositteli, että tietomallinnusta ei käytetä energiasimulaatioihin, koska geometrian määrittäminen suoraan energiasimulaatio-ohjelmistossa on tehokkaampaa. Hän sanoi, että ihmiset käyttävät tietomallinnusta energiasimulaatioihin nopeuttaakseen prosessia, mutta tämä integrointi maksaa lopulta enemmän aikaa ja rahaa. Hänen mukaansa tietomallinnus on pääasiassa tarkoitettu käytettäväksi arkkitehtuurisuunnitteluun ja siitä puuttuu yleensä tarvittava tieto energiasimulaatioiden suorittamiseen. Lopuksi hän totesi, että seurauksena ei ole järkevää yhdistää niitä yhteen.

Yhteenvetona tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen käyttö on yleisesti ottaen yhä tärkeämpää rakennusalalla. Suunnittelu- ja simulointialojen välisessä tiedonvaihdossa on kuitenkin vaikeuksia, jotka on ratkaistava, jotta energiansäästötavoitteet voidaan saavuttaa ja varmistaa näiden välineiden merkitys myös tulevaisuudessa.

5 Yhteenveto

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli ymmärtää tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen käsitteitä rakennusalalla ja näiden teknologioiden hyödyntämistä rakennuksen energian optimoinnissa. Energian käytöllä on suora vaikutus ilmastomuutokseen. Suunnittelemalla kestäväällä tavalla on yksi tapa toteuttaa energiankulutuksen vähentämistä rakennusalalla. Energiatehokkaiden rakennuksien suunnittelu edellyttää työkaluja, joka tarjoaa suunnittelijoille ominaisuuksia suunnitella ympäristöystävällisesti. Tietomallinnus ja energiamallinnus ovat työkaluja rakennusalalla, joilla on mahdollisuuksia suunnitella tehokkaalla ja kestäväällä tavalla.

Työssä tehtiin kirjallisuus- ja haastattelututkimus. Näiden avulla opinnäytetyön tavoitteeseen vastattiin. Lisäksi kerättiin and analysoitiin vastauksia avoimeen kyselytutkimukseen. Kyselytutkimus suunnattiin haastateltaville, joilla on tietomallinnus- ja energiamallinnuskokemus. Tavoitteena oli saada laajasti

oivalluksia heiltä. Yhdistelemällä haastattelututkimusta kirjallisuustutkimukseen saatiin yleiskatsaus tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen käytöstä rakennusosalalla.

Sisällyttämällä näitä työkaluja hankkeeseen, hankkeiden omistajat voivat säästää jopa 80 prosenttia ajasta, kustannuksista, toistuvista töistä, asennusvirheistä ja materiaalihävikeistä. Näiden teknologioiden yhdistäminen IoT:hen ja tekoälyyn johtaa älykkäisiin rakennuksiin ja infrastruktuuriin, mikä voi vähentää energiankulutusta ja kustannuksia.

Tietomallinnuspohjainen energiamallinnus-järjestelmä on rakennusalan keskeinen työkalu, joka parantaa yhteistyötä ja päätöksentekoa. Se voi myös pienentää rakennuksen hiilijalanjälkeä, koska sen avulla voidaan tunnistaa parannusmahdollisuuksia. Tiedonvaihdossa tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen välillä on kuitenkin haasteita, kuten tietojen yhteensopivuus, eheys ja standardoinnin puute yhteentoimivuuden vuoksi. Yhteentoimivuus johtuu muunnoksesta tietomallinnuksen geometristen tietojen energiamallinnukseen, tietojen standardointiin vaikuttaa, koska jokaisella ohjelmistolla on oma tietomuoto, mikä voi johtaa tietojen epätarkkoihin. Geometrisen mallin tarkistus on olennaista, ja automaattisen mallin tarkistuksen käyttö voi varmistaa tietojen johdonmukaisuuksia ja laatuja muunnosprosessissa.

Tulevaisuuden tutkimuksessa tulisi pohtia, helpottavatko vai vaikeuttavatko tietomallinnuspohjaiset energiamallinnus-menettelyt työtämme. Tutkimuksen tulokset ovat rajalliset osallistujien lukumäärän ja otannan vuoksi. Strategiana yhteentoimivuuteen on, että reaaliaikainen yhteys välitysohjelmiston korjaustyökaluilla voi automatisoida tiedonvaihdon ja eliminoida inhimilliset virheet. Vaihtoehtona on yhden ohjelmistoympäristön kehittäminen, jossa voidaan luoda tietomallinnusmalleja ja suorittaa energiatehokkuussimulaatioita. Tästä syystä tämän alan lisätyötä suositellaan ja kannustetaan. Rakennusalan odotetaan lisäävän tietomallinnuksen ja energiamallinnuksen käyttöä hiilijalanjäljen vähentämiseksi ja ilmastonmuutoksen torjumiseksi vuoteen 2050 mennessä.

Lähteet

Ahn, Ki-Uhn; Kim, Young-Jin; Park, Cheol-Soo; Kim, Inhan & Lee, Keonho. 2014. Bim interface for full vs. semi-automated building energy simulation, *Energy and Buildings*. Vol. 68, s. 671–678.

Akbarieh, Arghavan. 2018. Systematic Investigation of Interoperability Issues between Building Information Modelling and Building Energy Modelling BIM-based BEM Information Exchange Issues. Master's thesis. Norwegian University of Science and Technology.

Aljundi, Kamar; Pinto, Armando & Rodrigues, Fernanda. 2016. Energy analysis using cooperation between Bim tools (Revit and Green Building Studio) and EnergyPlus, in *Proceedings of the 1^o Congresso Portugues de Building Information Modelling*, Guimaraes, Portugal. s. 24–25.

Aranda, José; Martin-Dorta, Norena; Naya, Ferran; Conesa-Pastor, Julian; & Cantero, Manuel. 2020. Sustainability and interoperability: An economic study on Bim implementation by a small civil engineering firm, *Sustainability*. Vol. 12, no 22, s. 9581.

Arayici, Yusuf; Coates, Paul, Koskela, Lauri; Kagioglou, Mike; Usher, C & O'Reilly, Karen. 2011. Technology adoption in the Bim implementation for lean architectural practice. *Automation in construction*. Vol. 20, no. 2, s. 189–195.

Bataglin, Fernanda; Viana, Daniela; Formoso, Carlos & Bulhdes, Iamara. 2017, Application of Bim for supporting decision making related to logistics in prefabricated building systems, in *Proceedings of the 25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Heraklion, Greece. s. 4–12.

Bazjanac. Vladimir. 2008. IFC him-based methodology for semi-automated build-ing energy performance simulation, Lawrence Berkeley National Lab. (LBNL), Berkeley, CA United States: Tech. Res.

Bazjanac. Vladimir. 2009. Implementation of semi-automated energy performance simulation: building geometry, in *CIB W*. Vol. 78, s. 595–602.

Bolpagni, Marzia; Gavina, Rui & Ribeiro, Diogo. 2021. Building information modelling and information management. *Industry 4.0 for the Built Environment: Methodologies, Technologies, and Skills*. Springer. s. 29–54.

Buonomano, Annamaria; Montanaro, Umberto; Palombo, Adolfo & Santini, Stefania. 2016. Dynamic building energy performance analysis: A new adaptive control strategy for stringent thermohygrometric indoor air requirements, *Applied Energy*. Vol. 163, s. 361–386.

- Carvalho, José; Almeida, Manuela; Bragança, Luís & Mateus, Ricardo. 2021. Bim-based energy analysis and sustainability assessment-application to portuguese buildings. Vol. 11, no. 6, s. 246.
- Cemesova, Alexandra. 2013. Enhancing Bim-based data transfer to support the design of low energy buildings, Ph.D. dissertation, Cardiff University.
- Crawley, Drury; Lawrie, Linda; Winkelmann, Frederick; Buhl, W; Huang, Joe; Pedersen, Curtis; Strand, Richard; Liesen, Richard; Fisher, Daniel; Witte, Michael & Glazer Jason. 2001. Energy- plus: creating a new generation building energy simulation program, Energy and buildings. Vol. 33, no. 4, s. 319–331.
- Dong, Bing; Lam, Khee; Huang, Y & Dobbs, G. 2007. A comparative study of the IFC and gbXML informational infrastructures for data exchange in computational design support environments, in Building Simulation. Carnegie Mellon University, Pittsburgh.
- Duffie, John & Beckman, William. 2013. Solar engineering of thermal processes. 4th Ed. New York: Wiley.
- Eastman, Chuck; Teicholz, Paul; Sacks, Rafael & Liston, Kathleen. 2011. BIM hand- book: A guide to building information modelling for owners, managers, designers, engineers, and contractors. John Wiley & Sons.
- Egwunatum, Samuel; Joseph, Akwara; Esther & Akaigwe, Richard. 2016. Optimizing energy consumption in building designs using building information model (BIM). Slovak Journal of Civil Engineering. Ozoro.
- Validations & certifications. 2023. EQUA Simulation AB. Verkkoaineisto. <<https://www.equa.se/en/ida-ice/validation-certifications/>>. Luettu 2.3.2024.
- Validation of IDA Indoor Climate and Energy 4.0 with respect to CEN Standard EN 15255-2007 and EN 15265-2007. 2010. Equa Simulation AB. Verkkoaineisto. <www.equaonline.com/iceuser/validation/CEN_VALIDATION_EN_15255_AND_15265.pdf>. Luettu 1.4.2024.
- Ganiyu, Sikiru & Egbu, Charles. 2018. Developing a Bim-knowledge (Bim-k) framework for improved decision making in construction projects: A sequential exploratory approach, in Proceedings of Arcom Doctoral Workshop Research Methodology. Vol. 2018, s. 82. London South Bank University, UK.
- Gao, Hao; Koch, Christian & Wu, Yupeng, 2019. Building information modelling based building energy modelling: A review, Applied Energy. Elsevier. Vol. 238, s. 320–343.

Gerrish, Tristan; Ruikar, Kirti; Cook, Malcolm; Johnson, Mark & Phillip, Mark. 2017. Using Bim capabilities to improve existing building energy modelling practices. *Engineering, Construction and Architectural Management*.

Gourlis, Georgious & Kovacic, Iva. 2017. Building Information Modelling for analysis of energy efficient industrial buildings. A case study: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 68, s. 953–963.

GSA. 2015. Verkkoaineisto. 05-energy performance. United States General Services Administration. <https://www.gsa.gov/system/files/GSA_BIM_Guide_05_Version_2.1.pdf>. Luettu 10.3.2024.

Hansmann, Ralph; Mieg, Harald & Frischknecht, Peter. 2012. Principal sustainability components: empirical analysis of synergies between the three pillars of sustainability. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*. s. 451–459.

Hitchcock, Robert & Wong Justin. 2011. Transforming IFC architectural view BIMs for energy simulation, in *Proceedings of building simulation 2011, 12th Conference of International Building Performance Simulation Association*. s. 1089–1095.

Ismail, Noor; Idris, N H; Ramli, H; Muhammad Rooshdi, Raja, Rafidah Raja & Sahamir, S R. 2018. The relationship between cost estimates' reliability and Bim adoption: Sem analysis, in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 117, no. 1. IOP Publishing Ltd.

Iyakoregha, Miesinne; Mahamadu, Abdul-Majeed; Manu, Patrick; Aigbavboa, Clinton; Ajayi, Saheed & Emuze, Fidelis. 2018. Competencies needed by construction project managers for Bim-enabled projects, in *10th CIDB Postgraduate Conference*. s. 153–158. Port Elizabeth, South Africa.

Jalaei, Farzad & Jrade, Ahmad. 2014. Integrating building information modelling (BIM) and energy analysis tools with green building certification system to conceptually design sustainable buildings. *Journal of Information Technology in Construction*. s. 494–519.

Jeong, WoonSeong & Kim, Kee, 2016. A performance evaluation of the Bim-based object-oriented physical modelling technique for building thermal simulations. A comparative case study, *Sustainability*. Vol. 8, no. 7, s. 648.

Jeong, WoonSeong; Kim, Jong; Clayton, Mark; Haberl, Jeff & Yan Wei. 2016. A framework to integrate object-oriented physical modelling with building information modelling for building thermal simulation," *Journal of Building Performance Simulation*. Vol. 9, no. 1, s. 50–69.

Jävää, Päivi & Lehtoviita, Timo. 2016. Tietomallintaminen talonrakennustyömaalla. E-kirja. Rakennustieto.

Kamel Ehsan & Memari, Ali. 2019. Review of Bim's application in energy simulation: Tools, issues, and solutions," *Automation in construction*. Vol. 97, s. 164–180.

Karola, Antti; Lahtela, Hannu; Hänninen, Reijo; Hitchcock, Robert; Chen, Qingyan; Dajka, Stephen & Hagström, Kim. 2002. Bspro com-server-interopability between software tools using industrial foundation classes. *Energy and buildings*. Vol. 34, no. 9, s. 901–907.

Kestävä kehitys. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <https://www.motiva.fi/kestava_kehitys>. Luettu 17.3.2024.

Kim, Karam & Yu, Jungho. 2016. A process to divide curved walls in IFC-BIM into segmented straight walls for building energy analysis. *Journal of Civil Engineering and Management*. s. 333–345.

Kumar, Sumedha. 2008. Interoperability between building information models (BIM) and energy analysis programs. University of Southern California.

Laine, Tuomas, Karola, Antti & Olof Granlund Oy. 2007. Benefits of building information models in energy analysis. *Proceedings of Clima 2007 WellBeing Indoors*. Verkkoaineisto. Academia < https://www.academia.edu/73157149/Benefits_of_Building_Information_Models_in_Energy_Analysis>. Luettu 21.1.2024.

Lam, Khee; Karaguzel, Omer; Zhang, Rongpeng & Zhao, Jie. 2012. Identification and analysis of interoperability gaps between bims/open standards and building performance simulation tools. Center for Building Performance and Diagnostics, Carnegie Mellon University: Pittsburgh, PA, USA.

Lau, Santi; Zakaria, Rozana; Aminudin, Eeydzah; Saar, Chai; Yusof, Aswadi & Wahid, Che. 2018. A review of application building information modelling (bim) during pre-construction stage: Retrospective and future directions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 143, no.1. IOP Publishing.

Lilis, Georgios; Giannakis, Georgios; & Rovas, Dimitrios. 2017. Automatic generation of second level space boundary topology from IFC geometry inputs," *Automation in Construction*. Vol. 76, s. 108–124.

Mitä on BIM? Verkkoaineisto. MagiCAD Group. <<https://www.magcad.com/fi/bim>>. Luettu 1.2.2024.

- Maile, Tobias; Fischer, Martin & Bazjanac, Vladimir. 2007. Building energy performance simulation tools-a life cycle and interoperable perspective, Center for Integrated Facility Engineering (CIFE) Working Paper. Vol. 107, s. 1–49.
- Maile, Tobias; Fischer, Martin; Haymaker, John & Bazjanac, Vladimir. 2010. Formalizing approximations, assumptions, and simplifications to document limitations in building energy performance simulation. s. 96.
- Maile, Tobias; O'Donnell, James; Bazjanac, Vladimir & Rose, Cody. 2013. Bim-geometry modelling guidelines for building energy performance simulation in BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association (IBPSA). Chambery, France. s. 3242–3249.
- Bahar, Yudi; Pere, Christian; Landrieu, Jérémie & Nicolle, Christophe. 2013. A Thermal Simulation Tool for Building and Its Interoperability through the Building Information Modelling (BIM) Platform. Verkkoaineisto. MDPI. < <https://www.mdpi.com/2075-5309/3/2/380>>. Luettu 2.4.2024.
- Nasyrov, Vladislav; Stratbilcker, Sebastian; Ritter, Fabian; Borrmann, André; Hua, Shan & Lindauer, Manuel. 2014. Building information models as input for building energy performance simulation—the current state of industrial implementations. s. 479–486.
- O'Donnell, James; Maile, Tobias; Rose, Cody; Mrazović, Nataša; Elmer, Morrissey; Regnier, Cynthia; Parrish, Kristen & Bazjanac, Vladimir 2013. Transforming BIM to BEM: Generation of Building Geometry for the NASA Ames Sustainability Base BIM.
- Omar, Razaqi. 2014. Tietomallien hyödyntäminen työmaalla. Opinnäytetyö. Turun ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- Osello, Anna; Cangialosi, Greg; Dalmasso, Daniele ; Paolo, ; Turco, Massimiliano; Piumatti, Paolo & Vozzola, Mariapaola. 2011. Architecture data and energy efficiency simulations: Bim and interoperability standards, in proceedings of Building Simulation. s. 1521–1526.
- Pezeshki, Zahra; Soleimani, Ali & Ahmad, Darabi. 2019. Application of bem and using Bim database for bem: A review, Journal of Building Engineering. Vol. 23, s. 1–17.
- Pezeshki, Zahra & Ivani, SAS. 2018. Applications of BIM: A Brief Review and Future Outline. Arch. Comput. Methods. s. 273–312.
- Pinheiro, Sergio; Wimmer, Reinhard; O'Donnell, James; Muhic, Sergej; Bazjanac, Vladimir; Maile, Tobias; Frisch, Jerome & Van Treeck. Christoph. 2018.

Mvd based information exchange between Bim and building energy performance simulation, *Automation in Construction*. Vol. 90, s. 91–103.

Sanhudo, Luís; Ramos, Nuno; Martins, João & Almeida, Ricardo. 2018. Building information modelling for energy retrofitting. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. s. 249–260.

Shou, Lingli. 2013. Comparative research on building energy consumption analysis based on Bim with traditional building energy consumption analysis of china. Chongqing University, Chongqing.

Somboonwit, Nuttasit; Boontore, Amon & Rugwongwan, Yanin. 2017. Obstacles to the Automation of Building Performance Simulation: Adaptive Building Integrated Photovoltaic (BIPV) design. *Environment Behaviour Proceedings Journal*. s. 2–5.

Tran, Du; Bourdev, Lubomir; Fergus, Rob; Torresani, Lorenzo & Paluri, Manohar. 2015. Learning spatiotemporal features with 3D convolutional networks, 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Santiago, Chile.

About Building Energy modelling. U.S. Department of Energy (DOE). Verkkoaineisto. <<https://www.energy.gov/eere/buildings/about-building-energy-modeling/>>. Luettu 13.2.2024

Ugliotti, Francesca; Dellosta, Maurizio & Osello, Anna. 2016. Bim-based energy analysis using edilclima EC770 plug-in, case study Archimede library EEB project. *Procedia engineering*. Vol. 161, s. 3–8

Validation methods. Verkkoaineisto. VIP-Energy. <<https://www.vipenergy.net/Validating.htm>>. Luettu 2.3.2024

VIP-Energy. Verkkoaineisto. StruSoft. <https://strusoft.com/wp-content/uploads/2021/11/Broschyr_VIP_ENG.pdf>. Luettu 9.4.2024.

BIM-Dimensions. Verkkoaineisto. Waldeck Consulting. <<https://www.waldeckconsulting.com/wp-content/uploads/2017/04/BIM-Dimensions.png>>. Luettu 14.2.2024.

Wetter, Michael & Van Treeck, Christoph. 2017. New generation computational tools for building and community energy systems-annex 60 final report, Paris, France: International Energy Agency.

Yang, Tianqi & Liao, Lihui. 2017. Research on building information model (BIM) technology. Vol. 5, no. 1, s. 1–7.

Zhao, Xianbo. 2017. A scientometric review of global bim research: Analysis and visualization. *Automation in Construction*. Vol. 80, s. 37–47.

Zhu, Hua, 2014. Practice on green design of building energy efficiency based on Bim. *Compute Model New Tech*. Vol. 18, s. 678–81.