

Nico Niemelä

# Laskentamallin luonti rakennuksen energiaopti- mointiin

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinööriytyö

7.4.2017

Tekijä Otsikko	Nico Niemelä Laskentamallin luonti rakennuksen energiaoptimointiin
Sivumäärä Aika	32 sivua 7.4.2017
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Talotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	LVI, suunnittelupainotteinen
Ohjaajat	yliopettaja Lauri Heikkinen projektipäällikkö Juha Pentikäinen
<p>Tässä insinööriyössä luotiin laskentamalli, jonka avulla voidaan tarkastella rakennuksen teknisten ratkaisujen vaikutusta rakennuksen energiankulutukseen korjausrakentamisessa. Luotu laskentamalli perustuu Equa Simulation AB:n IDA ICE -laskentatyökaluun sekä VTT:n ja Aalto-yliopiston yhteistyössä kehittämään MOBO-optimointityökaluun. Työ tehtiin Climaconsult Finland Oy:lle.</p> <p>Työssä käytiin aluksi läpi korjausrakentamiseen määräyksiä sekä rakennuksen energiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä ja mahdollisia energiatehokkuutta parantavia toimenpiteitä korjausrakentamisessa. Lähdeaineistona työssä käytettiin LVI- ja energia-alan kirjallisuutta sekä määräyksiä ja ohjeita.</p> <p>Työn lopuksi luotiin laskentamalli, jota testattiin suorittamalla energialaskennat esimerkkikohteeseen. Laskentamalli todettiin toimivaksi tarkastuslaskentojen avulla. Mallin käyttäminen tulevaisuudessa vaatii mallin jatkuvaa kehittämistä ja päivittämistä esimerkiksi kustannustietojen osalta. Vaikka esimerkkikohteen muuttujat olivat tiukasti rajatut, voidaan laskentojen perusteella todeta MOBO-optimointityökalun olevan tehokas ja aikaa säästävä apuväline rakennusten energiaoptimointiin.</p>	
Avainsanat	MOBO, IDA ICE, optimointi, energialaskenta, laskentamalli

Author Title	Nico Niemelä Creating a building energy optimization calculation model
Number of Pages Date	32 pages 7.4.2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services
Specialisation option	Design oriented
Instructors	Lauri Heikkinen, Principal lecturer Juha Pentikäinen, Project Manager
<p>The objective of this bachelor's thesis was to create a calculation model for building energy optimization. The calculation model was based on the IDA ICE simulation tool of Equa Simulation and MOBO, an optimization tool developed by VTT Technical Research Centre of Finland and Aalto University.</p> <p>For the thesis, the Finnish building renovation regulations, factors affecting building energy efficiency, and also possible improvements to building energy efficiency were studied. The source material also included HVAC and energy literature, parts of the National Building Code of Finland and documents published by Rakennustieto.</p> <p>The model created was tested by performing energy calculations on an example building. The proper functioning of the model was verified with separate energy calculations. To maintain the usability of the model in the future, some of the calculation data, for example cost data, needs to be updated constantly. Based on the performed calculations, it can be said that MOBO is an efficient tool for building energy optimization.</p>	
Keywords	MOBO, IDA ICE, optimization, energy simulation

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Rakennusten korjausrakentaminen ja määräykset	1
3	Rakennuksien energiankulutukseen vaikuttavat tekijät	3
3.1	Rakennuksen sijainti	4
3.2	Rakennuksen muoto, koko ja tilankäyttö	4
3.3	Rakennuksen vaippa	6
3.3.1	Rakennuksen vaipan lämmöneristävyys	6
3.3.2	Vaipan kylmäsillat	7
3.3.3	Vaipan ilmanpitävyys	7
3.3.4	Ikkunat ja ulko-ovet	8
3.4	Rakennuksen lämpökapasiteetti	8
3.5	Talotekniset järjestelmät	9
3.5.1	Lämmitysjärjestelmien ja lämmönjakotapojen vaikutus rakennuksen energiatehokkuuteen	9
3.5.2	Ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho	10
3.5.3	Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto	10
4	Mahdollisia energiaparannustoimenpiteitä rakennuksille	13
4.1	Vaipan ominaisuuksien parantaminen	13
4.1.1	Ulkoseinät	13
4.1.2	Yläpohjat ja katot	14
4.1.3	Alapohja	14
4.1.4	Ikkunoiden ja ovien vaihtaminen tai ominaisuuksien parantaminen	15
4.1.5	Vaipan ilmapitävyyden parantaminen	16
4.2	Taloteknisten järjestelmien muutokset	16
4.2.1	Lämmitysjärjestelmän muutokset	16
4.2.2	Käyttövesijärjestelmän muutokset	18
4.2.3	Ilmanvaihtojärjestelmän muutokset	18
4.3	Rakennusautomaation ja sähköjärjestelmien muutokset	18
5	Laskentamallin luominen	18

6	Esimerkkikohteen laskennat	21
6.1	Kohteen tiedot	21
6.2	Laskentamalli ja valitut muuttujat	23
6.3	Tulokset	26
6.4	Laskentojen arviointi	28
7	Yhteenveto ja päätelmät	28
	Lähteet	30

## Lyhenteet

$n_{50}$	Luku kertoo rakennuksen ilmatilavuuden vaihtuvuuden tunnissa vaipan vuotoreittien kautta, kun vaipan yli aiheutetaan 50 Pa:n yli- tai alipaine, 1/h
$q_{50}$	Luku kertoo vuotoilman keskimääräisen tilavuusvirran vaipan sisäpinta-alaa kohden, kun vaipan yli aiheutetaan 50 Pa:n yli- tai alipaine, $m^3/(h, m^2)$
U-arvo	Rakennusosan lämmönläpäisykerroin, $W/(m^2, K)$
G-arvo	Ikkunan aurinkoenergian kokonaisläpäisykerroin, -

## 1 Johdanto

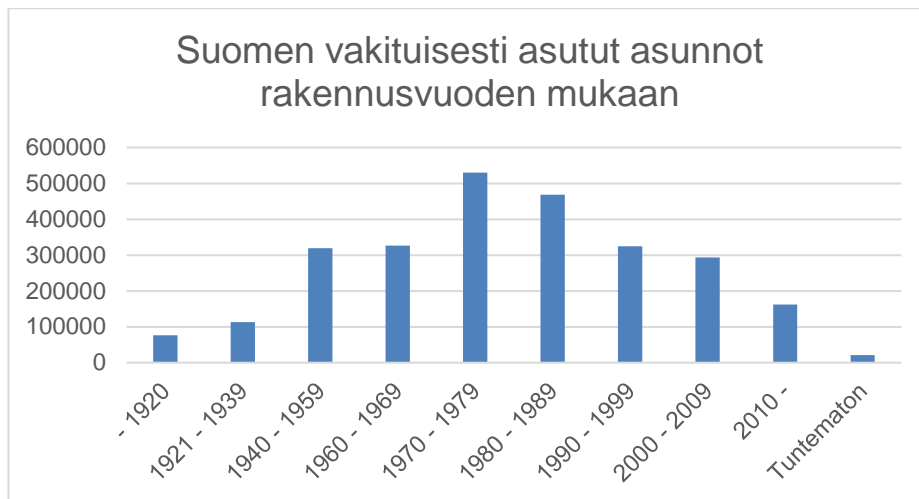
Työn tarkoituksena oli luoda laskentamalli, jonka avulla voidaan tarkastella korjattavan rakennuksen teknisten ratkaisujen vaikutusta rakennuksen energiankulutukseen. Tavoitteena oli, että laskentamallilla voidaan nopeasti vertailla teknisten ratkaisujen kokonaisvaikutusta rakennuksen energiankulutukseen sekä ratkaisuista johtuvia kustannuksia. Laskentamalli perustuu Equa Simulation AB:n IDA ICE -laskentatyökaluun sekä VTT:n ja Aaltoyliopiston yhteistyössä kehittämään MOBO-optimointityökaluun.

Työssä käydään aluksi läpi korjausrakentamiseen määräyksiä sekä rakennuksen energiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä ja mahdollisia korjaustoimenpiteitä rakennuksen energiatehokkuuteen. Rakennuksen energialaskelmia tehdessä on tärkeää ymmärtää energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät, jotta tuloksien oikeellisuutta voidaan arvioida.

Työn lopuksi suoritettiin energialaskennat luodulla laskentamallilla esimerkkikohteeseen sekä arvioitiin valittujen korjausvaihtoehtojen kannattavuutta nykyarvomenetelmän avulla.

## 2 Rakennusten korjausrakentaminen ja määräykset

Vuosina 2016–2025 Suomen rakennuskannasta noin 62 600 asuntoa vuosittain tulee teknisen kuntonsa puolesta siihen ikään, että niitä on tarpeellista korjata [1, s. 22]. Kuvassa 1 on esitetty vakituisesti asuttujen asuntojen lukumäärät rakennusvuoden mukaan.



Kuva 1. Suomen vakituisesti asutut asunnot rakennusvuoden mukaan [2].

Nykyisten määräyksien mukaan luvanvaraisissa korjaus- ja muutostöissä rakennuksen energiatehokkuutta täytyy parantaa aina, kun se on teknisesti, taloudellisesti ja toiminnallisesti mahdollista. Rakennuksen korjaus- tai muutoshankkeeseen ryhtyvän, on lupaan tarvittavan suunnittelun yhteydessä, esitettävä toimenpiteet, joilla rakennuksen energiatehokkuutta parannetaan. Korjaus- ja muutostöissä energiatehokkuuden parantamiseen on kolme tapaa. Taulukoissa 1, 2 ja 3 on selvennetty määräysten mukaisia vaatimuksia. Määräysten mukaiset energiatehokkuuden parantamisen tavat ovat [3, s.1–3]

#### 1. Energiatehokkuuden parannus rakennusosakohtaisesti.

Taulukko 1. Parannusvaatimukset rakennusosittain [3, s. 1.].

Korjattava rakennusosa	Rakennusosakohtainen vaatimus
Ulkoseinä	Alkuperäinen u-arvo x 0.5, kuitenkin enintään 0.17 W/(m <sup>2</sup> K). Rakennuksen käyttötarkoituksen muuttuessa alkuperäinen u-arvo x 0.5, kuitenkin 0.6 W/(m <sup>2</sup> K) tai parempi.
Yläpohja	Alkuperäinen u-arvo x 0.5, kuitenkin enintään 0.09 W/(m <sup>2</sup> K). Rakennuksen käyttötarkoituksen muuttuessa alkuperäinen u-arvo x 0.5, kuitenkin 0.6 W/(m <sup>2</sup> K) tai parempi.
Alapohja	Energiatehokkuutta parannettava mahdollisuuksien mukaan.
Ulko-ovet ja ikkunat	Uusien ikkunoiden ja ulko-ovien U-arvon on oltava 1.0 W/(m <sup>2</sup> K) tai parempi. Vanhoja ikkunoita ja ulko-ovia korjattaessa on lämmönpitävyyttä parannettava mahdollisuuksien mukaan.

2. Energiatohokkuuden parantaminen standardikäyttöön perustuvaa energiankulutusta pienentämällä.

Taulukko 2. Vaatimukset standardikäytön energiankulutukselle [3, s. 2.].

Rakennustyyppi	Standardikäytön energiankulutus
Pien-, rivi- ja ketjutalo	$\leq 180 \text{ kWh/m}^2$
Asuinkerrostalo	$\leq 130 \text{ kWh/m}^2$
Toimisto	$\leq 145 \text{ kWh/m}^2$
Opetusrakennus	$\leq 150 \text{ kWh/m}^2$
Päiväkoti	$\leq 150 \text{ kWh/m}^2$
Liikerakennus	$\leq 180 \text{ kWh/m}^2$
Majoitusliikerakennus	$\leq 180 \text{ kWh/m}^2$
Muu liikuntahalli kuin jää- ja uimahalli	$\leq 170 \text{ kWh/m}^2$
Sairaala	$\leq 370 \text{ kWh/m}^2$

3. Energiatohokkuuden parantaminen standardikäyttöön perustuvaa kokonaisenergiankulutusta (E-luku) pienentämällä.

Taulukko 3. E-luku-vaatimukset rakennusluokittain [3, s. 2.].

Rakennustyyppi	E-luku-vaatimus
Pien-, rivi- ja ketjutalo	E-vaadittu $\leq 0,8 \times$ E-laskettu
Asuinkerrostalo	E-vaadittu $\leq 0,85 \times$ E-laskettu
Toimisto	E-vaadittu $\leq 0,7 \times$ E-laskettu
Opetusrakennus	E-vaadittu $\leq 0,8 \times$ E-laskettu
Päiväkoti	E-vaadittu $\leq 0,8 \times$ E-laskettu
Liikerakennus	E-vaadittu $\leq 0,7 \times$ E-laskettu
Majoitusliikerakennus	E-vaadittu $\leq 0,7 \times$ E-laskettu
Muu liikuntahalli kuin jää- ja uimahalli	E-vaadittu $\leq 0,8 \times$ E-laskettu
Sairaala	E-vaadittu $\leq 0,8 \times$ E-laskettu

### 3 Rakennuksien energiankulutukseen vaikuttavat tekijät

Rakennuksien energiankäyttöön vaikuttavat useat tekijät. Energiatohokkuuteen vaikuttavat sekä rakennusvaiheessa valitut ratkaisut, että se, kuinka rakennusta käytetään.

### 3.1 Rakennuksen sijainti

Rakennuksen lämmitysenergiankäyttöön vaikuttaa niin rakennuksen maantieteellinen sijainti, kuin myös paikallinen sijainti. Paikallisia lämmitysenergiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa pienilmastolliset lämpötilaerot, tuulien suuruudet ja suunnat sekä rakennuksen aurinkoenergian saanti. [4, s. 26.]

Ääritapauksissa edellä mainitut tekijät voivat kasvattaa lämmitysenergiankulutusta jopa 40 % ihannetapaukseen verrattuna. Tällaiset ääritapaukset ovat kuitenkin harvinaisia, sillä edellä mainitut tekijät ovat toisiaan poissulkevia. Esimerkiksi rakennuksen sijaitessa mäen päällä voidaan passiivista aurinkoenergiaa hyödyntää paremmin rakennuksen lämmitykseen, mutta vastaavasti tuulet vaikuttavat enemmän rakennukseen lisäten lämmitykseen käytettävän energian määrää. [4, s. 26.]

Passiivista aurinkoenergiaa voidaan hyödyntää esimerkiksi sijoittamalla ikkunoita mahdollisimman paljon eteläseinälle, varastoimalla hyödyksi saatua energiaa rakenteisiin ja suunnittelemalla lämmityksen säätö siten, että lämmitys lopetetaan heti, kun tavoiteltava sisäilman lämpötila on saavutettu. [4, s. 27.]

### 3.2 Rakennuksen muoto, koko ja tilankäyttö

Rakennuksen muoto on merkittävä energiantarpeeseen vaikuttava tekijä. Johtumisesta aiheutuvat häviöt ja hallitsematon ilmanvaihto ovat suoraan verrannollisia rakennuksen vaipan alaan. Mahdollisimman kompaktiksi suunniteltu rakennus luo edellytykset energiatehokkaalle rakennukselle. Rakennuksen muodon kompaktiutta kuvataan rakennuksen muotokerroimella. [5, s. 17.] Muotokerroin lasketaan kaavalla 1.

$$\text{Muotokerroin} = \frac{A}{V} \quad (1)$$

jossa

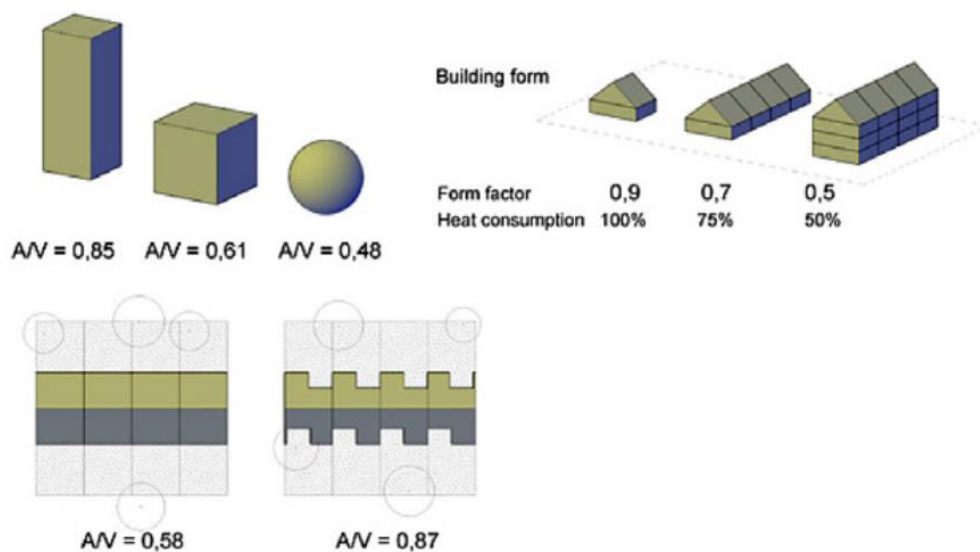
A on rakennuksen vaipan ulkopinta-ala

V on rakennuksen lämmitettävä tilavuus

Muotokerroin on riippuvainen rakennuksen koosta. Pienemmissä rakennuksissa lämmitettävää pinta-alaa on vähemmän suhteessa vaipan ulkopinta-alaan kuin suuremmissa rakennuksissa. [5, s. 17.] Kuvasta 2 voidaan nähdä erimuotoisten rakennuksien ja objektien muotokertoimia.

Tilavuuden pysyessä vakiona rakennusten muotokerrointa voidaan pienentää kasvattamalla rakennuksen kerroslukua. Pienissä rakennuksissa muotokertoimen pienenemisellä on huomattava vaikutus energiankulutukseen. Kerrosluvun kasvattamisella ei ole enää suurta merkitystä energiankulutukseen, kun kerrosluku on suurempi kuin kuusi. [4, s. 27.]

Muuttamalla rakennuksen runkosyvyyttä voidaan myös saavuttaa pieniä säästöjä lämmitysenergiassa, mutta kasvattamalla runkosyvyyttä kasvatetaan myös valaistusenergian kulutusta ja lämmitysenergiassa saavutetut säästöt voidaan menettää sähköenergiankulutuksen kasvaessa [4, s. 28].



Kuva 2. Esimerkkejä koon ja muodon vaikutuksista muotokertoimeen [6].

Suurissa rakennuksissa lämmitysenergiantarve on pienempi suhteessa hyötyneliöihin, kuin pienissä rakennuksissa. Erityisesti pienrakennuksissa koon kasvattamisen vaikutus energiankulutukseen suhteessa hyötyneliöihin on huomattava. Rakennettaessa rivi- tai kerrostaloja koon kasvattamisella on pienempi vaikutus energiankulutukseen suhteessa hyötyneliöihin kuin omakotitaloissa, joissa vaipan häviöt ovat suhteellisesti suurimmat. [4, s. 28.]

Energiankulutuksen kannalta tilankäytössä olisi hyvä pyrkiä tehokkaaseen tilankäyttöön. Tehottomasti käytettävät tilat lisäävät rakennuksen vaippapinta-alaa ja lämmitettävän tilavuuden määrää. Rakennuksen energiatehokkuuteen voidaan vaikuttaa myös sijoittamalla viileämpiä pidettäviä tiloja rakennuksen alaosiin ja pohjoispuolelle. Tällöin rakennuksen oleskelutilojen lämmitykseen voidaan hyödyntää helpommin passiivista aurinkoenergiaa. [4, s. 29.]

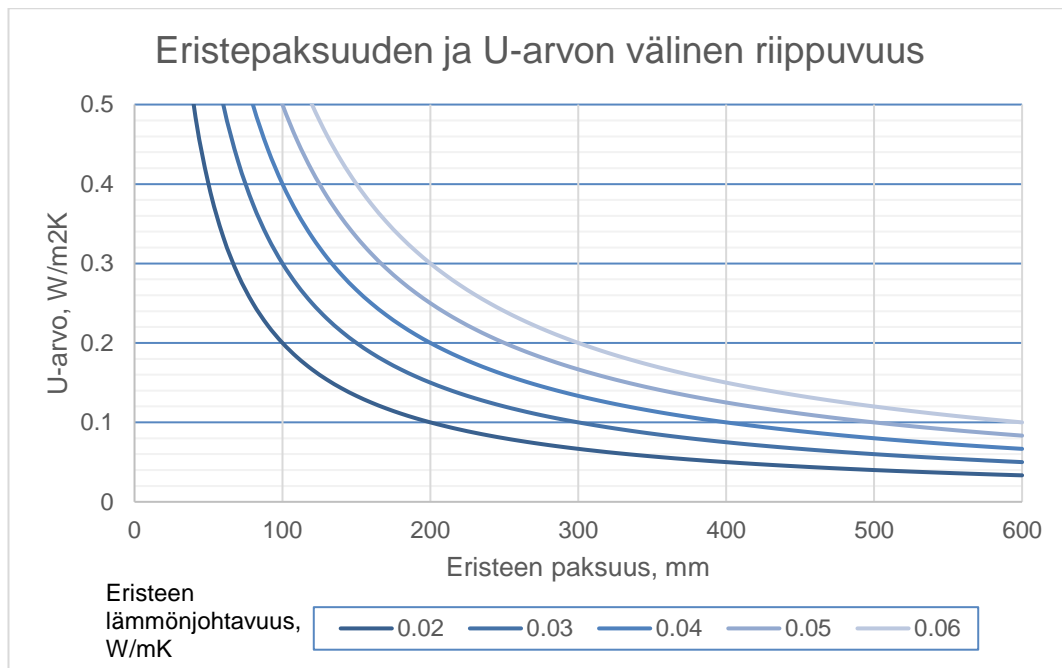
### 3.3 Rakennuksen vaippa

Rakennuksen vaipalla tarkoitetaan rakennekerroksia, jotka erottavat rakennuksen lämpimät sisätilat ulkoilmasta ja maaperästä. Rakennuksen vaipan kautta tapahtuvaan lämmitysenergiankulutukseen voidaan vaikuttaa lämmöneristävyttä lisäämällä, tiiviyttä parantamalla tai rakennuksen lämpökapasiteettia kasvattamalla. Rakennuksen muodolla ja sijainnilla on myös vaikutusta rakennuksen vaipasta johtuvaan lämmitysenergiankulutukseen. [4, s. 29.]

#### 3.3.1 Rakennuksen vaipan lämmöneristävyys

Rakennusosien lämmönjohtavuutta kuvataan U-arvolla. Rakennusosan U-arvon suuruuteen vaikuttaa eristysmateriaalin ominaisuudet, eristysmateriaalin paksuus sekä muiden materiaalien ominaisuudet, joita on käytetty rakennusosassa, esimerkiksi lujuusyistä. Rakennusosien U-arvot voidaan määrittää Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C4 ohjeiden avulla. Useimmiten valmistajat ilmoittavat oville ja ikkunoille U-arvot.

Seinien, yläpohjan ja alapohjan lämmöneristävyttä voidaan parantaa pienentämällä rakennusosien U-arvoja. U-arvoja voidaan pienentää kasvattamalla rakennusosan eristepaksuutta. Kuvassa 3 on esitetty U-arvon ja eristepaksuuden välinen riippuvuus. Eristepaksuuden kasvattaminen suuremmaksi kuin 250 mm ei vaikuta enää paljon rakennusosan U-arvoon [4, s. 29.].



Kuva 3. Eristepaksuuden ja U-arvon välinen riippuvuus.

### 3.3.2 Vaipan kylmäsilat

Rakennuksen vaipan lämmöneristävyyteen vaikuttavat myös rakennuksen vaipan kylmäsilat. Rakennuksen vaippaan muodostuu kylmäsiltoja, kun eristettä joudutaan esimerkiksi lujuussyistä paikallisesti ohentamaan tai eriste lävistetään hyvin lämpöä johtavalla aineella. Tavallisimpia kylmäsiltoja ovat rakennuksen runkorakenteet sekä rakennusosien liittymät, joissa eristys on paikallisesti ohut. Kylmäsilat lisäävät energiankulutusta, mutta ne voivat aiheuttaa myös oleskeluviihtyvyyden huononemista ja vesihöyryn tiivistymistä rakennusosan sisäpintaan. [4, s. 30.]

### 3.3.3 Vaipan ilmanpitävyys

Rakennuksen ilmanpitävyydellä tarkoitetaan rakennuksen ominaisuutta, jolla rakenne estää sen läpi tapahtuvia ilmavirtoja. Ilmavuodot rakennuksen vaipan läpi heikentävät rakennuksen energiatehokkuutta, voivat aiheuttaa epäviihtyvyyttä rakennuksen käyttäjille, haitallisia ilmavirtauksia rakennuksen sisällä sekä edesauttavat kosteuden kerääntymistä rakenteisiin. [4, s. 31.] Rakennuksen vaipan ilmanpitävyyttä kuvataan ilmanvuotoluilla  $n_{50}$  ja  $q_{50}$  [7, s. 19.].

### 3.3.4 Ikkunat ja ulko-ovet

Ikkunoilla on suuri merkitys rakennuksen energiatehokkuuteen ja rakennuksen lämpöviihtyvyyteen. Ikkunat poikkeavat rakennuksen muusta vaipasta siten, että niiden kautta saadaan rakennukseen myös ilmaista aurinkoenergiaa. Jotta rakennus olisi energiatehokas, tulisi ikkunoiden U-arvon olla alhainen. U-arvon lisäksi ikkunoiden valinnassa on otettava huomioon myös ikkunoiden G-arvo, joka kuvaa lyhytaaltoisen aurinkoenergianläpäisyä. [4, s. 37.]

Käyttämällä rakennuksessa ikkunoita, joiden G-arvo on korkea, voidaan optimoida rakennuksen ilmaisen aurinkoenergian käyttö rakennuksen lämmityksessä. On kuitenkin huomioitava, että ikkunoiden korkeat G-arvot voivat aiheuttaa rakennuksen ylikuumenemista ja aiheuttaa epäviihtyvyyttä.

Ulko-ovessa oleva ikkuna tai postiluukku heikentää oven lämmöneristävyyttä huomattavasti. Parannettaessa rakennuksen vaipan lämmöneristävyyttä, on järkevää parantaa myös ulko-ovien lämmöneristävyyttä. [4, s. 38.]

### 3.4 Rakennuksen lämpökapasiteetti

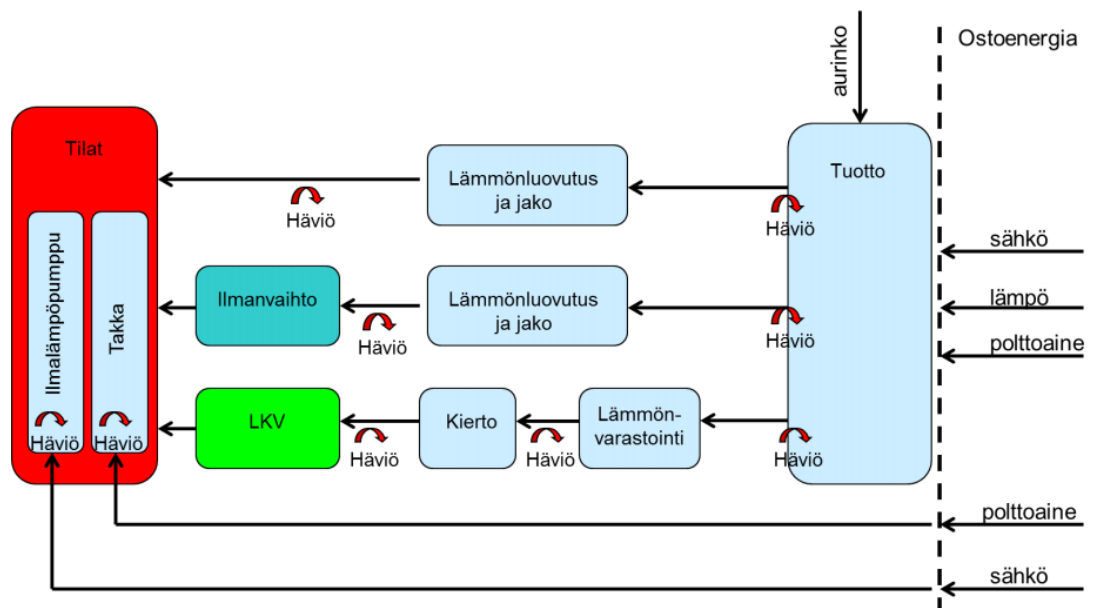
Rakennuksen lämpökapasiteetin lämmitysenergiansäästövaikutus johtuu siitä, että rakennuksessa esiintyvä ylikuumeneminen saadaan varastoitua osin rakenteisiin pienentäen samalla huonelämpötilan nousua. Rakenteisiin varastoitunut energia vapautuu myöhemmin huonetilaan pienentäen lämmitysenergian tarvetta. [4, s. 30.] Rakennuksen lämpökapasiteetin vaikutus energiankulutukseen riippuu paljon vallitsevista olosuhteista.

Jotta rakennuksen lämpökapasiteetti saataisiin hyödynnettyä, tulisi ikkunoita keskittää rakennuksen eteläseinälle, rakennusmateriaali tulisi olla valittu siten, että tehollinen lämpökapasiteetti on mahdollisimman suuri, ja lämmityksen säätö tulisi järjestää siten, että lämmitys lopetetaan heti, kun tavoiteltava sisälämpötila on saavutettu. Rakennuksen suuri lämpökapasiteetti voi pienentää huonelämpötilan huippuja ja siten parantaa sisäilman laatua. Kun rakennuksessa on massiiviset välipohjat, ei lämpökapasiteetin kasvatamisella voida enää käytännössä saavuttaa säästöjä. Jäähdytetyissä rakennuksissa suuri lämpökapasiteetti voi myös pienentää jäähdytysenergian kulutusta. [4, s. 30.]

### 3.5 Talotekniset järjestelmät

#### 3.5.1 Lämmitysjärjestelmien ja lämmönjakotapojen vaikutus rakennuksen energiatehokkuuteen

Lämmitysjärjestelmän energiankulutuksen laskennassa huomioidaan rakennuksen tilojen, ilmanvaihdon ja käyttöveden lämmitysenergian nettotarpeet. Lämmitysjärjestelmän häviöiden ja energiantuoton vaikutukset energiankulutukseen otetaan huomioon järjestelmän hyötysuhteiden sekä mahdollisen lämpökertoimen avulla. [7, s. 37.] Kuvassa 4 on esitetty laskennan periaate.



Kuva 4. Periaate lämmitysjärjestelmän huomioimiseksi laskennassa [7, s. 37.].

Erilaisilla lämmitysratkaisuilla on erisuuriset lämmönjaon ja -luovutuksen vuosihyötysuhteet. Vuosihyötysuhteiden erot johtuvat lämmönjakelun- ja luovutuksen häviöistä, lämmitysjärjestelmän säätötavasta sekä lämpötilakerrostuman vaikutuksesta. Häviöiden suuruuteen vaikuttavat muun muassa järjestelmässä käytetyt meno- ja paluuvien lämpötilat, jako- ja kiertojohtojen eristystaso sekä se, onko lämmitys toteutettu sähköisesti vai vesikiertoisesti. [7, s. 40.]

### 3.5.2 Ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho

Ilmanvaihdon ominaissähköteholla, eli SFP-luvulla, kuvataan järjestelmässä tarvittavan sähkötehon määrää yhden ilmakehän siirtämiseen sekunnissa. Tarvittavalla sähköteholla tarkoitetaan puhallinsähkön lisäksi järjestelmän apulaitteiden sähkönkulutusta. Tuloilman lämmitys ja jäähdytys lasketaan lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien energiankulutuksen osana. [8, s. 1.]

Samalle ilmanvaihtokoneelle voidaan määrittää erisuuruisia SFP-lukuja riippuen muun muassa käsiteltävän ilmavirran suuruudesta sekä kanaviston kokonaispainehäviöstä. Ilmanvaihtojärjestelmän puhaltimien sähköenergiankulutukseen vaikuttavat järjestelmän kaikki komponentit, koska järjestelmän tarvitsema sähköteho on suoraan riippuvainen järjestelmän kokonaispainehäviöstä. Yleensä ilmanvaihtokone muodostaa suurimman osan järjestelmän kokonaispainehäviöstä. Koko ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho lasketaan kaavalla 2. [8, s. 2.]

$$SFP = \frac{P_{tulo} + P_{poisto} + P_{apulaitteet}}{q_{max}} \quad (2)$$

jossa

$P_{tulo}$  on tuloilmapuhaltimien ottama sähköteho yhteensä

$P_{poisto}$  on poistoilmapuhaltimien ottama sähköteho yhteensä

$q_{max}$  on mitoittava jäteilmavirta tai ulkoilmavirta.

SFP-luku voidaan laskea myös yksittäiselle ilmanvaihtokoneelle tai puhaltimelle. SFP-lukua mitoittaessa on hyvä huomioida, että SFP-luku saattaa toteutusvaiheessa kasvaa suuremmaksi, mikäli kanavistoon joudutaan tekemään runsaasti suunnittelemattomia muutoksia asennusvaiheessa. [8, s. 1–2.]

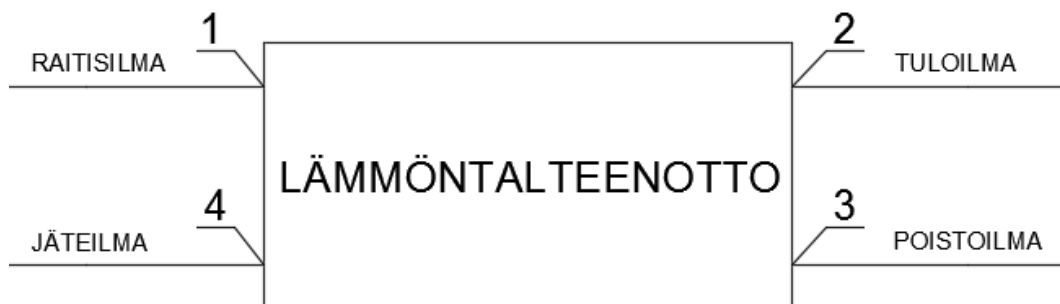
### 3.5.3 Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto

Tehokkaalla ilmanvaihdon lämmöntalteenotolla voidaan parantaa rakennuksen energia- tehokkuutta huomattavasti. Tuloilman lämmittämiseen tarvittavan energian määrä on

noin 30–50 % koko rakennuksen lämmittämiseen tarvittavasta energiantarpeesta. Ilmanvaihdon lämmöntalteenotolla tuloilman lämmittämisen tarvittavasta energiasta voidaan kattaa noin 50–80 %. Lämmöntalteenoton hyötysuhteella tarkoitetaan joko laitteen lämpötilasuhdetta tai ilmanvaihdon lämmöntalteenoton vuosihyötysuhdetta. Edellä mainitut ovat kaksi eri käsitettä, joita käytetään eri tarkoituksiin. [9, s. 1.]

Standardissa SFS EN-308 tuloilman lämpötilasuhde määritetään tilanteessa, jossa tulo- ja poistoilmavirrat ovat yhtä suuret. Standardissa tuloilman lämpötilasuhde lasketaan kaavalla 3. [10, s. 7.] Kuvassa 5 on esitetty mittauspisteet suhteessa lämmöntalteenottolaitteeseen.

$$\text{Lämpötilasuhde, } \eta_t = \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_1} \quad (3)$$



Kuva 5. Lämpötilojen mittauspisteet standardin SFS EN-308 mukaan. [10, s. 7.]

Lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde on lämmöntalteenottolaitteistolla talteen otettavan energian suhde energian määrään, joka tarvittaisiin, jos ilmanvaihdossa ei käytettäisi lämmöntalteenottoa. Lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde on laskennallinen arvo, jonka laskennassa otetaan huomioon koko lämmityskausi, mukaan lukien myös lämmönsiirtimen jäätyminen esto. Koska laskennassa otetaan huomioon edellä mainitut tekijät, on vuosihyötysuhde käytännössä aina pienempi kuin laitteen lämpötilasuhde. [9, s. 2.]

Lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde ei ole laitteen ominaisuus. Samaa laiteratkaisua käytettäessä voi vuosihyötysuhde poiketa eri puolilla Suomea toisistaan jopa noin 20 %. Ilmanvaihdon lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteeseen vaikuttavat edellä mainitut tekijät. [9, s. 2.]

### **Jäätymisen esto**

Kylminä vuodenaikoina lämmöntalteenottoa joudutaan usein rajoittamaan talteenottolaitteen poistoilmapuolelle muodostuvan huurteen ja mahdollisen jään haittavaikutuksen estämiseksi. Jäteilmän lämpötilan keskiarvon ollessa korkeampi kuin 0 °C, voi osa jäteilmasta jäähtyä alle 0 °C:n, tästä syystä asuinrakennuksissa jäteilmän rajoituslämpötilaksi on suositeltu +5 °C ja toimistotiloissa ja vastaavissa 0 °C. Lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen määrittämisessä voidaan käyttää myös alhaisempia rajoituslämpötiloja, jos laitteenvalmistaja on osoittanut luotettavalla tavalla, ettei laitteessa tapahdu jäätymistä. [9, s. 2.]

### **Rakennuksen sijainti**

Rakennuksen sijainti vaikuttaa lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteeseen, koska mitä enemmän laitteen jäätymisen estoa joudutaan käyttämään, sitä heikommaksi muodostuu lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde. Esimerkiksi Helsingissä käytettävällä lämmöntalteenottoratkaisulla saavutetaan parempi vuosihyötysuhde kuin täysin vastaavalla ratkaisulla Sodankylässä. [9, s. 2.]

### **Ilmavirtojen suhde**

Tyypillisesti asuinrakennukset suunnitellaan hiukan alipaineiseksi, siten että tuloilmavirta on 90 % poistoilmavirrasta. Tiiviissä rakennuksissa ilmavirrat voidaan suunnitella lähes yhtä suuriksi. Vuosihyötysuhteen määrittämisessä on otettava huomioon myös, että joissakin tapauksissa osa poistoilmavirroista johdetaan hetkittäin tai jatkuvasti lämmöntalteenoton ohi. Tällaisia tapauksia ovat esimerkiksi toimisto- ja liiketilojen wc-tilojen poistoilma sekä asuintilojen liesituulettimien poistoilmavirta. [9, s. 2.]

## 4 Mahdollisia energiaparannustoimenpiteitä rakennuksille

### 4.1 Vaipan ominaisuuksien parantaminen

Vaipan lämpöhäviöt määräytyvät kaavasta 4.

$$\phi = \Sigma G_a \Delta T_a \quad (4)$$

jossa

$G_a$  on rakennusosan a konduktanssi

$\Delta T_a$  on rakennusosan a yli vallitseva lämpötilaero.

Rakennusosan a konduktanssi on kuvattu kaavalla 5, jossa

$U_a$  on rakennusosan a u-arvo

$A_a$  on rakennusosan pinta-ala. [11, s. 403.]

$$G_a = U_a A_a \quad (5)$$

Olemassa olevien rakennuksien vaipan lämpöhäviöitä voidaan pienentää pienentämällä vaipan konduktanssia tai laskemalla lämpötilaa rakennuksen sisällä [8, s. 403.]. Sisäilmaston ollessa Suomen rakentamismääräysten mukainen tavoitearvo operatiivisen lämpötilan on vuodenajasta riippuen 21–25 °C [12, s. 4–5.]. Rakennuksen sisälämpötilalla on viihtyvyyden lisäksi vaikutusta myös työn tuottavuuteen, joten sisälämpötilaa ole järkevää laskea tarpeettoman alas [11, s. 7.].

#### 4.1.1 Ulkoseinät

Nykyisten rakennuksien ulkoseinät voi olla toteutettu betonisandwich-elementeillä, tiilillä betoni-tiiliseinäinä tai puurakenteisina. Eristeinä on tyypillisesti käytetty mineraalivillaa tai sahanpurua. [13, s. 13–20.]

Eristeen lisäämisen suunnittelussa on otettava huomioon rakenteen kosteustekninen käyttäytyminen, rakenteiden lämpötila sekä tukirakenteen kuormitus [14, s. 309.]. Eristettä voidaan lisätä sekä ulkopuolelle, mutta myös sisäpuolelle [15]. Pääsääntöisesti lisälämmöneristys lisätään rakennuksen ulkopuolelle, tällöin vanha rakenne lämpenee ja kuivuu [16]. Ulkopuolisella lisälämmöneristyksellä voidaan myös tehokkaasti katkaista vanhan rakenteen kylmäsillat [16].

Lisälämmöneristys voidaan rakentaa vanhan rakenteen päälle tai vanha lämmöneriste ja ulkokuori voidaan korvata kokonaisuudessaan uudella. Ulkoseinän lisälämmöneristys voidaan toteuttaa tuuletettuna tai tuulettamattomana. [13, s. 14–15.] Vanhan rakenteen kunto ja mahdollisten vaurioiden laajuus vaikuttavat valittavaan korjausmenetelmään [14, s. 308.]. Ulkoseinissä kosteusteknisiä riskitekijöitä ovat muun muassa rakenteen ilmanpitävyys, lämmöneristeen riittävä tuuletus sekä mahdollisen rappausmateriaalin toimivuus [13, s. 13–20.].

#### 4.1.2 Yläpohjat ja katot

Olemassa olevien rakennuksien kattorakenteet ovat tyypillisesti loivia, tasakattomallisia kattoja tai jyrkempiä harjakattoja. Eristemateriaalina on käytetty mineraalivillaa, kevytso-  
raa tai sahanpuruja. Riippuen eristemateriaalista, mahdollisista kattorakenteen vaurioista ja rakenteen kosteuspitoisuudesta lisälämmöneristys voidaan rakentaa vanhan eristeen päälle tai vanha lämmöneristys tulee korvata kokonaan uudella eristyksellä. [13, s. 21–25.]

Yläpohjan lisälämmöneristystä suunniteltaessa on tärkeää ottaa huomioon vanhan rakenteen tuuletus ja kuivumismahdollisuudet. Yläpohjissa ja katoissa kosteusteknisiä riskitekijöitä ovat lämmöneristysten kastuminen rakentamisen aikana, vanhan eristeen huono kuivuminen, mahdolliset vesivuodot sekä puutteelliset höyrysulut ja heikko ilmanpitävyys. [13, s. 21–25.]

#### 4.1.3 Alapohja

Alapohjan lämmöneristysten parantaminen voi olla järkevää silloin, kun rakennuksessa on tuulettuva alapohja ja käytetyn eristysmateriaalin lämmöneristävyys on huono. Lämmöneristysten parantaminen tehdään yleensä vaihtamalla eristysmateriaali tehokkaam-

paan materiaaliin, mutta lämmöneristystä voidaan myös parantaa lisäämällä lämpöeristettä alapuolelta. Lisälämmöneristyksen vesihöyrynläpäisevyyden tulisi olla hyvä, jotta purukerroksen homehtumisen riski vältetään. [13, s. 25–26.]

Alapohjissa mahdollisia kosteusteknisiä riskitekijöitä ovat muun muassa vanhan purukerroksen riittävä tuulettuminen, maaperän kosteusvirtaus ja alapohjan kosteussuojaus. Maaperän kosteusvirtausta voidaan rajoittaa lämpöeristämällä maanpinta ja perustusten pystyseinämät sisäpuolelta. Tarvittaessa alapohjan kosteussuojaus ja vedenpoisto on toteutettava uudelleen. [13, s. 25–26.]

#### 4.1.4 Ikkunoiden ja ovien vaihtaminen tai ominaisuuksien parantaminen

Vesi, auringonsäteily, ilman epäpuhtaudet, tuuli ja lämpötilavaihtelut voivat aiheuttaa ikkunarakenteeseen vaurioita. Mahdollisia ikkunarakenteen vaurioita ovat muun muassa pintakäsittelyn vauriot, lahoamisvauriot ja tiivisteiden vauriot. Ikkunoiden säärasituksille alttiimpia osia ovat rakennuksen nurkat ja yläosat sekä etelä- ja länsijulkivivut. Olemassa olevan rakennuksen ikkunan energiatehokkuutta voidaan parantaa parantamalla ikkunan tiiviyyttä, asentamalla ikkunaan lisälasi tai vaihtamalla ikkuna kokonaan uuteen. [14, s. 355.]

Ikkunan heikko tiiviys ilmenee yleensä vedon tunteena ja kosteuden tiivistymisenä lasipintoihin. Ikkunan tiiviyyttä voidaan parantaa uusimalla ikkunan tiivisteet. Tiivisteiden keskimääräinen kestoikä vaihtelee tiivistemateriaalin mukaan ja riippuu voimakkaasti olosuhteista. Tiivisteiden kestoikä vaihtelee 1 vuodesta 15 vuoteen. [17, s. 1–2.]

Ikkunan lisälasi voidaan asentaa sisäpuolelle, ikkunan väliin tai ulkopuolelle. Lisälasilla voidaan parantaa olemassa olevan ikkunan U-arvoa sekä ääneneristävyyttä ja pienentää ikkunan G-arvoa. Ulkopuolelle asennettava, alumiinikehyksinen lisäikkuna pysäyttää vanhan ikkunarakenteen lahoamisen ja pienentää vanhan ikkunan huoltotarvetta. [14, s. 356.] Lisäikkunan asentaminen voi tulla kyseeseen tapauksessa, jossa rakennuksen vaippaan lisätään lämmöneriste, mutta ikkunoita ei vaihdeta, jolloin vanhat ikkunat voivat jäädä syvälle seinärakenteeseen [18, s. 14.]

Kun rakennuksen ikkunat uusitaan kokonaisuudessaan, vanhat ikkunat poistetaan ja uudet ikkunat asennetaan vanhoihin aukkoihin [14, s. 356.]. Uudet, nykyaikaiset ikkunat ovat tekniseltä iältään pidempiä ja vaativat vähemmän huoltoa kuin esimerkiksi vanhat,

puukehysteiset ikkunat [19, s. 7.]. Uusittaessa rakennuksen ikkunat kokonaan on suunnittelussa huomioitava huonetilojen pienenevä lämmitystarve sekä mahdolliset muutokset huoneiston ilmanvaihtoon [20, s. 19.].

Ulko-ovien energiatehokkuutta voidaan parantaa vaihtamalla ovien tiivisteet tai vaihtamalla ovet kokonaisuudessaan. Ovitivisteiden vaihto on samankaltainen kuin ikkunativisteiden vaihto, mutta ovitivisteiden materiaalilta vaaditaan parempaa kestävyttä. [4, s. 38.]

#### 4.1.5 Vaipan ilmapitävyyden parantaminen

Olemassa olevissa kerrostaloissa huonekohtaiset ilmanvuotoluvut ovat olleet luokkaa 2,0–3,0 l/h [21, s. 127.]. Ovien ja ikkunoiden huono tiiviys voi aiheuttaa vaipan ilmavuodoista merkittävän osan [4, s. 37.]. Muita mahdollisia ilmavuotojen syitä ovat puutteellinen höyrysulku tai puutteellisesti tiivistetyt läpiviennit höyrysulussa [4, s. 31.].

Rakennuksen ilmapitävyys voidaan mitata rakennuksen tiivysmittauksella. Tiivysmittauksessa rakennuksen vaipan yli aiheutetaan 50 Pa:n paine-ero ja mitataan paine-eron ylläpitämiseen tarvittava ilmavirta. Mittauksen tuloksena saadaan rakennuksen ilmanvuotoluvun arvot  $q_{50}$  ja  $n_{50}$ . [22, s. 155.] Rakenteen ilmavuotokohdat voidaan paikallistaa tarkemmin rakenteen lämpökuvauksen tai merkkiainekokeiden avulla [21, s. 128.].

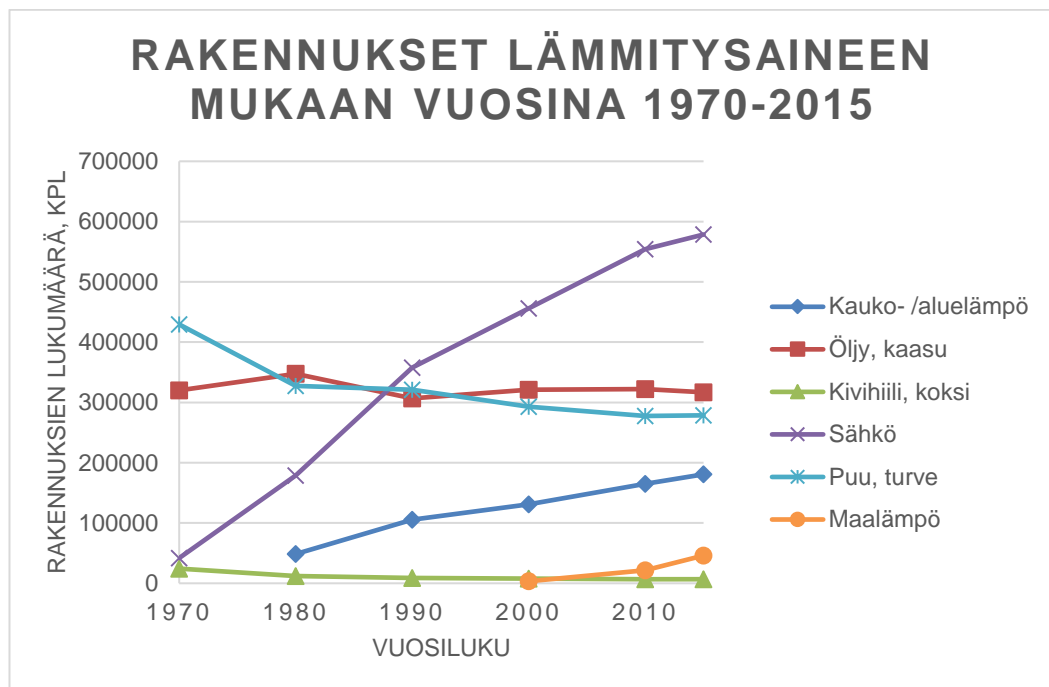
Mahdollisia vaipan ilmapitävyyden korjaustoimenpiteitä voivat olla ikkunoiden ja tiivisteiden uusiminen sekä ikkunoiden ja ovien karmien ja seinän välinen tiivistys. Mahdollisia muita vaipan ilmapitävyyden korjaustoimenpiteitä voivat olla seinärakenteen ja ylä-, alaja välipohjien välisten liitoskohtien tiivistys, rakenteiden mahdollisten vaurioiden korjaus ja tiivistys sekä mahdollisten läpivientien tiivistys. Rakenteiden tiivistys voidaan tehdä esimerkiksi pinnoitteilla, tasoitteilla tai vedeneristemassajärjestelmällä. [23, s. 75–107.]

## 4.2 Taloteknisten järjestelmien muutokset

### 4.2.1 Lämmitysjärjestelmän muutokset

Olemassa olevien rakennusten lämmitysaineena on käytetty kaukolämpöä, öljyä, kivihiiltä, sähköä, puuta ja maalämpöä. Kuvassa 6 on esitetty rakennuksien määrät lämmi-

tysaineen mukaan vuosina 1970- 2015. [24] Mahdollisia muita syitä lämmitysjärjestelmän muutoksille energiatalouden parantamisen lisäksi voivat olla esimerkiksi sisäolosuhteiden ja toimintavarmuuden parantaminen [14, s. 360].



Kuva 6. Rakennuksien määrät lämmityksineen mukaan vuosina 1970- 2015 [24].

Edellä mainittujen lämmitysmuotojen lisäksi rakennuksissa voi olla käytössä tukilämmitysjärjestelmiä, joita käytetään, kun saatavilla on halvempaa energiaa tai kun päälämmitysjärjestelmää huolletaan. Tukilämmitysjärjestelmiä voivat olla esimerkiksi poistoilma- lämpöpumput, ilmalämpöpumput ja aurinkolämmitys. [25, s. 7.]

Lämmityssaneerauksessa lämmitysmuoto voidaan vaihtaa kokonaan uuteen tai olemassa olevan lämmitysjärjestelmän rinnalle voidaan asentaa tukilämmitysjärjestelmä. Suunnitellessa lämmitysjärjestelmän muutosta tulee huomioida uuden järjestelmän tilantarve, mahdollisten keräyslaitteiston sijoitus, mahdolliset polttoaineen varastointitilat sekä varmistaa lämmönjakotavan toimivuus yhdessä uuden lämmitysjärjestelmän kanssa. Lämmöntuotantotapaa valittaessa tulee huomioida myös järjestelmän hankinta- ja käyttö- ja huoltokustannukset, mutta myös energian saatavuus tulevaisuudessa. [25, s. 7.]

Olemassa olevien rakennusten lämmönjakotapana on voitu käytetty lattialämmitystä tai patterilämmitystä sähköisenä tai vesikiertoisena, ilmalämmitystä sekä säteilylämmitystä.

Lämmönjakotapaa valittaessa tulee huomioida hankinta- ja käyttökustannuksien lisäksi myös rakennuksen käyttötarkoitus ja koko. [25, s. 7–8.]

#### 4.2.2 Käyttövesijärjestelmän muutokset

Mahdollisia käyttövesijärjestelmään tehtäviä energiatehokkuutta parantavia toimenpiteitä voivat olla järjestelmän lämmöneristysten parantaminen, lämmöntalteenoton asennus jäteveteen, lämmitysmuodon muutokset, vesimittauksen muuttaminen huonekoh- taiseksi ja vettä säästävien vesipisteiden asennus.

#### 4.2.3 Ilmanvaihtojärjestelmän muutokset

Ilmanvaihtojärjestelmän energiatehokkuutta voidaan parantaa parantamalla lämmöntal- teenottoa, vaihtamalla puhaltimet energiatehokkaammiksi, tarpeenmukaistamalla ilman- vaihtoa tai pienentämällä kanaviston painehäviöitä, jolloin puhaltimien tarvitsema sähkö- teho pienenee.

#### 4.3 Rakennusautomaation ja sähköjärjestelmien muutokset

Laadukkaalla rakennusautomaatiolla ja sähköjärjestelmillä voidaan säästää huomatta- vasti rakennuksessa käytettävä energiaa. Mahdollisia energiatehokkuutta parantavia toi- menpiteitä rakennusautomaatioon voivat olla lämmityksen ja jäähdytyksen säädön pa- rantaminen, päivänvalo-ohjauksen asentaminen, valaistuksen energiankulutuksen pie- nentäminen vaihtamalla olevat valaisimet energiatehokkaampiin valaisimiin.

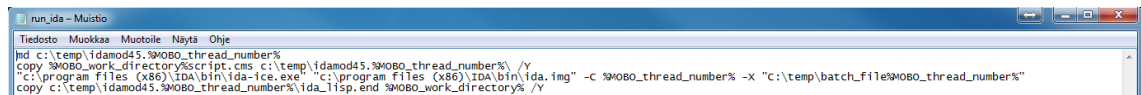
## 5 Laskentamallin luominen

Luodussa laskentamallissa käytettiin EQUA Simulation AB:n kehittämää IDA Indoor Cli- mate and Energy -simulointiohjelmaa ja MOBO-optimointiohjelmistoa. IDA ICE on simu- lointityökalu, jolla voidaan simuloida rakennuksien sisäilmastoa sekä energian kulutusta [26].

MOBO on VTT:n ja Aalto-yliopiston yhteistyössä kehittämä optimointiohjelmisto, joka voidaan yhdistää useisiin eri simulointiohjelmiin. MOBOon voidaan asettaa jatkuvia sekä

erillisiä muuttujia, tällaisia voivat olla esimerkiksi rakennusosien eristyksen paksuus, ikkunoiden tyyppi ja lämmitysmuoto. Muuttujia muuttamalla voidaan pyrkiä minimoimaan tai maksimoimaan simulointiohjelmalla laskettuja tuloksia; tällaisia voivat olla esimerkiksi rakennuksen E-luku, sisäilman laatu tai investointikustannukset. MOBO on java-pohjainen ohjelmisto. Ohjelmistossa on laaja valikoima algoritmeja, joita voidaan käyttää eri tyyppisten optimointiongelmien ratkaisussa. [27, s.2567.]

Laskentamallin luominen aloitettiin tutustumalla ohjeisiin ja esimerkkeihin, joita on esitetty Equa Simulation Finlandin ohjeessa Guide for using MOBO with IDA-ICE. Jotta IDA-ICE ja MOBO voivat toimia yhdessä, tulee luoda kolme tekstitiedostoa. Ennen tekstitiedostojen luomista päätettiin luoda esimerkkikohteen ida-malli, sillä mallista saadaan tietoja seuraavaksi luotaviin tekstitiedostoihin. Ensimmäinen tekstitiedosto, joka luotiin, oli Windows-komentojonotiedosto, joka nimettiin run\_ida:ksi. Run\_ida-tiedosto avaa IDA-ICE:n ja lukee seuraavaksi luotavan tiedoston, batch\_filen. Ohjeessa esitetyn esimerkkitiedoston sisältö on esitetty kuvassa 7.



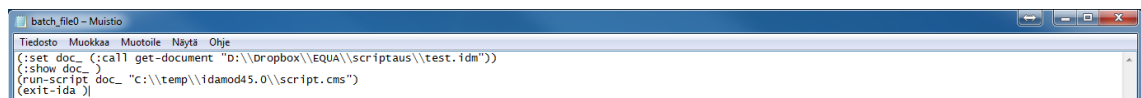
```

run_ida - Muistio
Tiedosto Muokkaa Muotoile Näytä Ohje
hd c:\temp\idamod45.%MOBO_thread_number%
copy %MOBO_work_directory%\script.cms c:\temp\idamod45.%MOBO_thread_number% /Y
copy c:\program files (x86)\ida\bin\ida-ice.exe "c:\program files (x86)\ida\bin\ida.img" -c %MOBO_thread_number% -x "c:\temp\batch_file\%MOBO_thread_number%"
copy c:\temp\idamod45.%MOBO_thread_number%\ida_11sp.end %MOBO_work_directory% /Y

```

Kuva 7. Kuvakaappaus esimerkkitiedoston sisällöstä [28].

Batch\_file on tiedosto, joka kertoo simulointiohjelmalle mitä tehdä sen jälkeen, kun run\_ida-tiedosto on avannut ohjelman. Tähän tiedostoon kirjoitettiin laskentojen kohteena olevan .idm-tiedoston sekä seuraavaksi luotavan .cms-tiedoston tiedostopolku. Ohjeessa esitetyn esimerkkitiedoston sisältö on esitetty kuvassa 8.



```

batch_file0 - Muistio
Tiedosto Muokkaa Muotoile Näytä Ohje
(:set doc_ (:call get-document "D:\Dropbox\EQUA\scriptaus\test.idm"))
(:show doc_ )
(run-script doc_ "c:\temp\idamod45.0\script.cms")
(exit -ida )

```

Kuva 8. Kuvakaappaus esimerkkitiedoston sisällöstä [28].

Viimeiseksi luotiin .cms-tiedosto, johon asetetaan muuttujat, joita halutaan muuttaa rakennuksessa sekä simulointityyppi, jota halutaan käyttää. Tiedosto nimettiin script\_temp:iksi. Ohjeessa esitetyn esimerkkitiedoston sisältö on esitetty kuvassa 9.

```

script_temp - Muistio
Tiedosto Muokkaa Muotoile Näytä Ohje
((:UPDATE [0]
((CE-ZONE :N "vyöhyke")
((ENCLOSING-ELEMENT :N WALL_3)
((CE-WINDOW :N "ikkuna")
(:PAR :N dx :V $x1$)
(:PAR :N dy :V $x2$))))))
(ice-run-load-sim [@ simulations energy])

```

Kuva 9. Kuvakaappaus esimerkkitiedoston sisällöstä [28].

Kun edellä mainitut tiedostot oli luotu, MOBOon asetettiin jatkuvien ja erillisten muuttujien arvot sekä rajat muuttujille. MOBOon paimittiin myös IDA:n tulostiedostosta tulokset, joihin haluttiin vaikuttaa muuttujia muuttamalla. Kuvissa 10,11 ja 12 on esitetty ohjeen esimerkkejä MOBOon asetetuista yksittäisistä ja jatkuvista muuttujista sekä tuloksista joita IDA:n tulostiedostosta halutaan kerätä.

Continuous variables		Discrete Variables	Functions	Algorithm	Simulation
Add variable		Delete variable	Modify variable		
Name	Values	Delimiter	Function		
window	100, 150, 200, 250	%win%			
shading	0, 40, 50, 55, 60, 80	%shade%			

Kuva 10. Kuvakaappaus. Esimerkki MOBOon asetetuista yksittäisistä muuttujista. [28]

Continuous variables		Discrete Variables	Functions	Algorithm	Simulation
Add variable		Delete variable	Modify variable		
Name	Min	Max	Delimiter	Function	Step
win_dx	1.5	2.5	%dx%		0.1
win_dy	1.5	2.5	%dy%		0.1
x	0.0	100.0	%xx%	1.5-win_dx/2	0.1
y	0.0	100.0	%yy%	1.3-win_dy/2	0.1

Kuva 11. Kuvakaappaus. Esimerkki MOBOon asetetuista yksittäisistä muuttujista. [28]

Continuous variables		Discrete Variables	Functions	Algorithm	Simulation
Add Function		Delete Function	Modify Function		
Name	type	Delimiter	Formula		
lighting	Other	Emeter_1.Totenergy			
cooling	Other	Emeter_5.Totenergy			
HVACaux	Other	Emeter_8.Totenergy			
fuelheat	Other	Emeter_10.Totenergy			
DHW	Other	Emeter_13.Totenergy			
equip	Other	Emeter_4.Totenergy			
Primary Energy	Min		1.7*lighting+1.7*cooling+1.7*HVACau...		
pdh	Other	Pdh_int.Y_var			
pdh1	Other	Pdh_int1.Y_var			
pdh2	Other	Pdh_int2.Y_var			
pdh3	Other	Pdh_int3.Y_var			
tot_pdh	Other		2*pdh+pdh1+2*pdh2+pdh3		
windowprice	Min		win_dx*win_dy*(window+shading)		
PDH const	Less or Equal to 0		tot_pdh-1500		

Kuva 12. Kuvakaappaus. Esimerkki MOBO:n functions-välilehdestä. [28]

## 6 Esimerkkikohteen laskennat

### 6.1 Kohteen tiedot

Esimerkkikohteeksi valittiin Helsingissä sijaitseva, viisikerroksinen, 1970-luvulla rakennettu asuinkerrostalo. Rakennuksen ensimmäisessä kerroksessa sijaitsevat kaksi asuntoa, varastot ja tekninen tila. Kerrokset 2–4 ovat asuinkerroksia. Asunto-osakeyhtiön hallituksen mukaan asukkaat ovat valittaneet talvisin vedosta ja kylmyyden tunteesta sisätiloissa. Osakeyhtiön huoltoyhtiön mukaan vedon ja kylmyyden tuntemisen pääsyyinä ovat rakennuksen alkuperäiset, heikosti lämpöä eristävät ikkunat ja niiden heikko tiiviys. Energialaskentojen avulla asunto-osakeyhtiö haluaa selvittää ikkunoiden vaihdon ja ilmanvaihdon energiatehokkuuden parantamisen vaikutukset rakennuksen energiatalouteen sekä remontin takaisinmaksuajan.

Kerrostalon lämmitetyn pohjan pinta-ala on noin 2 250 m<sup>2</sup>. Rakennuksen rakenteet, ovet ja ikkunat ovat alkuperäiset. Rakennuksen lämmitysmuoto on kaukolämmitys ja rakennuksessa on radiaattorilämmitys. Taulukossa 4 on esitetty rakennuksen rakenteiden tiedot. Laskelmissa rakennusvaipan ilmanvuotolukuna  $q_{50}$  käytettiin arvoa 4 m<sup>3</sup>/(h,m<sup>2</sup>).

Taulukko 4. Kohteen rakennusosien tiedot.

Rakennusosa	U-arvo, W/m <sup>2</sup> K	Lisätietoja
Seinä	0.41	Pinta-ala: 1 170 m <sup>2</sup>
Yläpohja	0.15	Pinta-ala: 449 m <sup>2</sup>
Alapohja	0.3	Pinta-ala: 449 m <sup>2</sup>
Ovet, lasituksella	2 0.2	Lasituksen g-arvo: 0.68 Pinta-alat ilmansuunnittain: Pohjoinen: 3 m <sup>2</sup> Itä: 7.6 m <sup>2</sup> Etelä: 34 m <sup>2</sup> Länsi: 7.6 m <sup>2</sup> Karmien osuus pinta-alasta: 10 % Karmien u-arvo: 2 W/m <sup>2</sup> K
Ovet, ilman lasitusta	1.38	Pinta-ala: 9.6 m <sup>2</sup>
Ikkunat	2 0.2	Lasituksen g-arvo: 0.68 Pinta-alat ilmansuunnittain: Pohjoinen: 42.1 m <sup>2</sup> Itä: 48.9 m <sup>2</sup> Etelä: 87.2 m <sup>2</sup> Länsi: 59.5 m <sup>2</sup> Karmien osuus pinta-alasta: 10 % Karmien u-arvo: 2 W/m <sup>2</sup> K

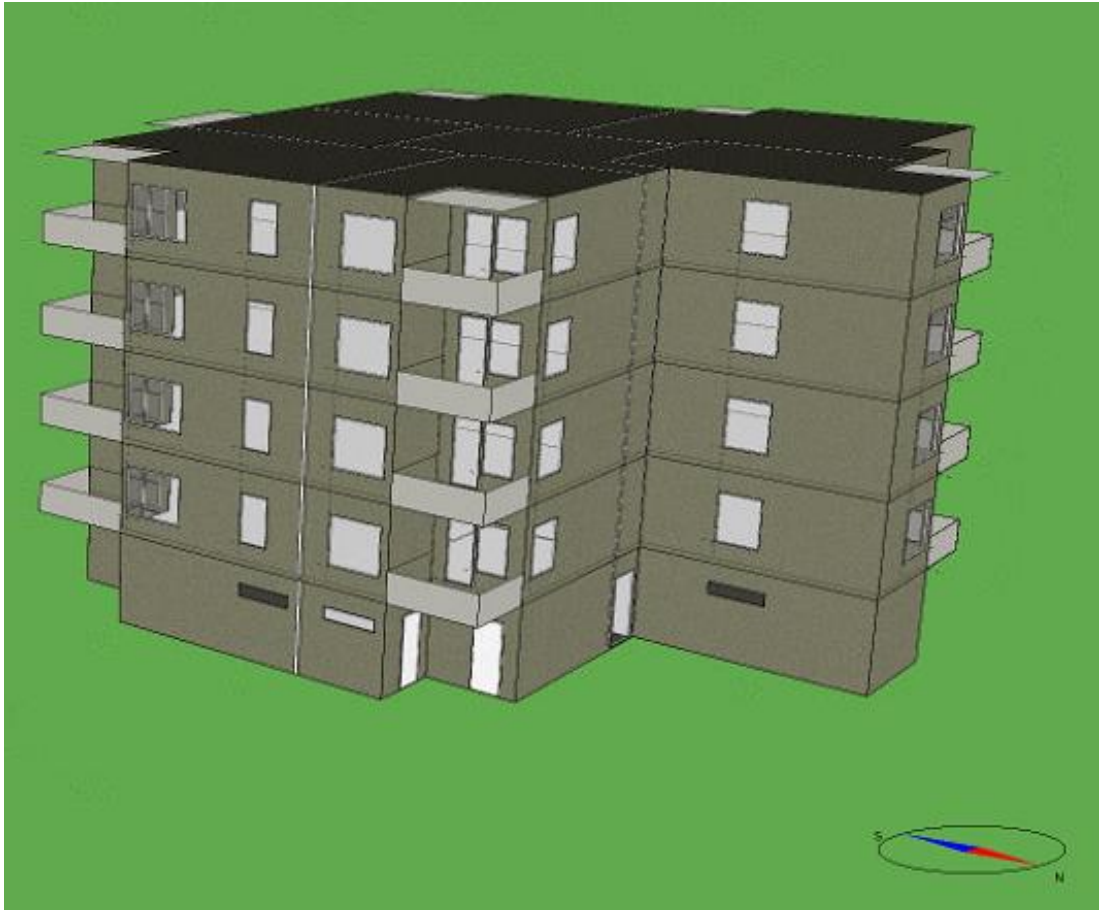
Rakennukseen on asennettu keskitetty, koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä. Varastoilla, porrashuoneella ja asunnoilla on oma ilmanvaihtokone. Porrashuoneen ja varastojen koneet on uusittu, mutta asuntoja palveleva kone on alkuperäinen ja siinä ei ole lämmöntalteenottoa. Taulukossa 5 on esitetty rakennuksen ilmanvaihtokoneiden tiedot.

Taulukko 5. Rakennuksen nykyisten ilmanvaihtokoneiden tiedot.

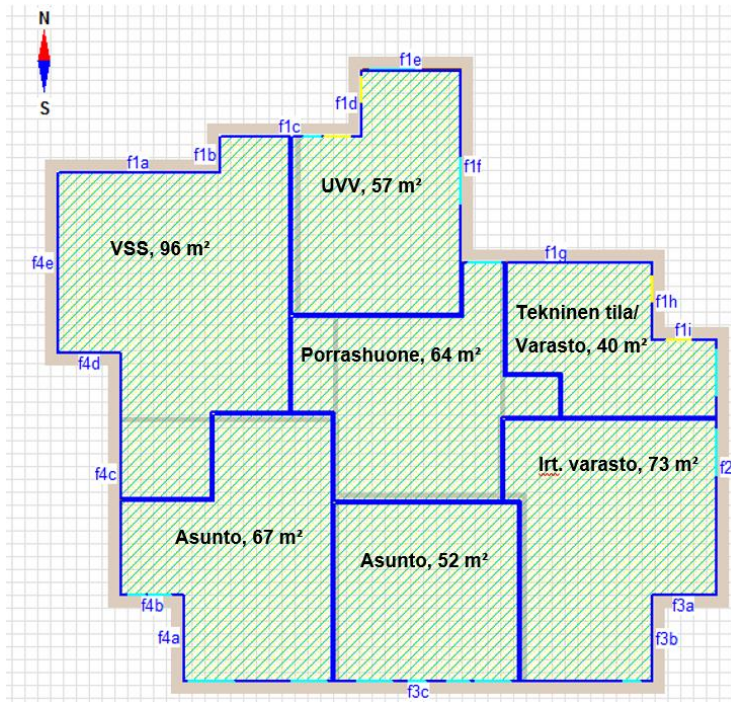
Palvelualue	Ilmavirta, m <sup>3</sup> /s	Sähköteho, kW	SFP, kW/(m <sup>3</sup> /s)	LTOa, %	LTO, jäätymisen esto, °C
Asunnot	0.85	2.5	2.9	0	-
Uloskäytävä	0.13	0.22	1.7	45	5
Varastot	0.13	0.195	1.5	45	5

## 6.2 Laskentamalli ja valitut muuttujat

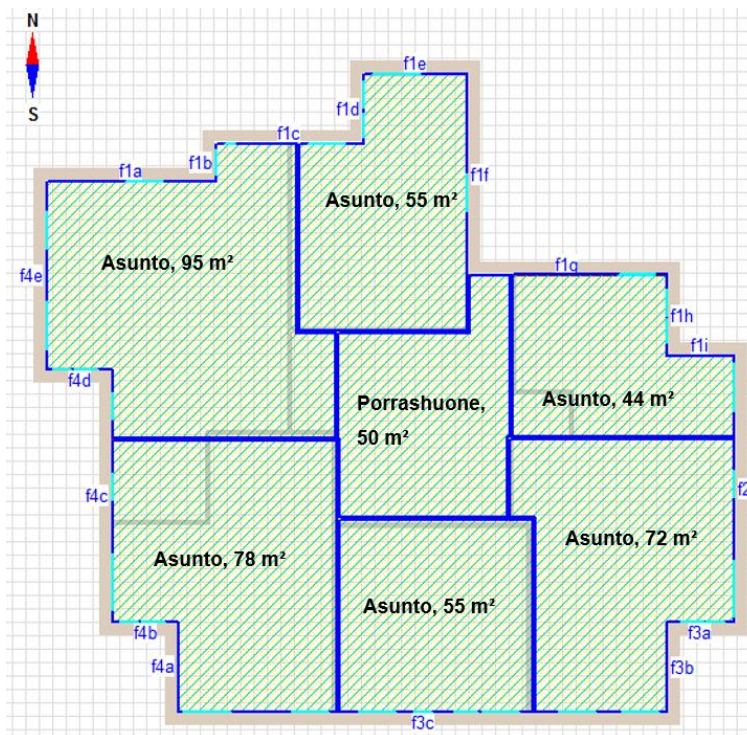
Energialaskentojen tekeminen aloitettiin luomalla IDA-malli kohteesta. Kuvassa 13 on esitetty kuvakaappaus simulointiohjelmaan luodusta mallista. Kuvissa 14 ja 15 on esitetty kohteen pohja- ja asuinkerroksien pohjakuvat.



Kuva 13. 3D-kuva simulointiohjelmaan luodusta mallista.



Kuva 14. Rakennuksen ensimmäisen kerroksen pohjakuva.



Kuva 15. Asuinkerroksen pohjakuva.

Laskennoissa sisäisten lämpökuormien arvona käytettiin rakentamismääräyskokoelman osan D3 standardikäytön arvoja. Taulukossa 6 on esitetty laskelmissa käytettyjen sisäisten kuormien tiedot sekä käyttöasteet.

Taulukko 6. Laskennoissa käytettyjen sisäisten kuormien arvot.

Käyttöaika		Valaistus	Valaistuksen	Laitteet	Laitteiden	Ihmiset	Läsnäolon
h/d	d/w	W/m <sup>2</sup>	käyttöaste	W/m <sup>2</sup>	käyttöaste	W/m <sup>2</sup>	käyttöaste
24	7	11	0.1	4	0.6	2	0.6

Laskennoissa vertailtiin viiden ikkunatyyppin, kahden passiivisen aurinkosuojaratkaisun ja neljän ilmanvaihtokoneen yhteisvaikutusta rakennuksen e-lukuun ja investoinnin kannattavuuteen. Algoritmina laskelmissa käytettiin Pareto-Archive NSGA-II -algoritmia, koska sen on todettu olevan tehokkain algoritmi ratkaistaessa rakennusten optimointiongelmia [27]. Laskennoissa MOBO asetettiin minimoimaan sekä alkuinvestointeja että e-lukua. Taulukoissa 7, 8 ja 9 on esitetty vertailtujen ikkunoiden, sälekaihtimien ja ilmanvaihtokoneiden tiedot.

Taulukko 7. Vertailtujen ikkunoiden tiedot. Ikkuna 1 on rakennuksen nykyinen ikkuna.

Ikkunat nro	U-arvo, W/m <sup>2</sup> K	G-arvo
Ikkuna 1	2	0,68
Ikkuna 2	0,98	0,47
Ikkuna 3	0,82	0,47
Ikkuna 4	0,92	0,47
Ikkuna 5	0,67	0,47

Taulukko 8. Vertailtujen sälekaihtimien tiedot. Nykyisissä ikkunoissa on sälekaihtimet ikkunoiden uloimmassa välissä.

Sälekaihdintyyppi	Keroin G-arvolle	Keroin U-arvolle	Keroin T-arvolle
Ei sälekaihtimia	1	1	1
Sälekaihtimet uloimmassa ikkunavälissä	0,33	0,95	0,12
Sälekaihtimet sisäpuolella	0,65	1	0,16

Taulukko 9. Vertailtujen ilmanvaihtokoneiden tiedot. Kone 1 on rakennuksen nykyinen ilmanvaihtokone.

Kone nro.	Ilmavirta, m <sup>3</sup> /s	Sähköteho, kW	SFP, kW/(m <sup>3</sup> /s)	LTOa, %	Jäätymisen esto, °C
Kone 1	0.85	2.5	2.9	0	-
Kone 2	0.85	1.8	2.1	65	5
Kone 3	0.85	1.1	1.3	76	5
Kone 4	0.85	1.3	1.6	75.5	5

### 6.3 Tulokset

Investointien kannattavuuden arvioinnissa käytettiin nykyarvomenetelmää. Kaavassa 6 on esitetty nykyarvomenetelmän laskentakaava. Menetelmässä kaikki maksut, tulot ja menot diskontataan laskentakoron avulla nykyhetkeen. Investointi on kannattava, kun hankinta- ja käyttökustannusten erotus on suurempi tai yhtä suuri kuin nolla (0). Vertailtavista investoinneista kannattavin on se, jonka nykyarvo on suurin. [29]

$$\text{Investoinnin nykyarvo} = \sum_{t=1}^n \frac{S_t}{(1+i)^t} + \frac{JA}{(1+i)^n} - H \quad (6)$$

jossa

$S_t$  on investoinnin nettotuotto vuonna  $t$

$i$  on laskentakorkokanta

$t$  on laskenta-ajankohta (vuosi)

$JA$  on investoinnin jäännösarvo laskenta-ajan lopussa

$H$  on alkuinvestointi. [29]

Investointien kannattavuutta tarkasteltiin 4 %:n laskentakorkokannalla. Vuotuisena energian hinnannousuna käytettiin 1 %:a. Investoinnin pitoaikana käytettiin kolmeakymmentä vuotta ja investointien jäännösarvona pidettiin laskenta-ajan lopussa 0 euroa. Lisäksi

laskelmissa huomioitiin taulukossa 10 esitetyt kunnostustoimenpiteet. Kunnostustoimenpiteiden arvioinnissa on hyödynnetty rakennustietokortteja ja talonrakennuksen kustannustietoa [19; 30].

Taulukko 10. Laskennoissa huomioidut kunnostustoimenpiteet.

Kunnostustoimenpide	Aikaväli, v	Kustannus, e/m <sup>2</sup>
Ikkunoiden kunnostus	12	5.5
Ilmanvaihtokoneen huolto	15	0.2
Ilmanvaihtokoneen suodattimien vaihto	0.5	0.04

Energian hintoina laskennassa käytettiin taulukossa 11 esitettyjä arvoja. Taulukossa 12 on esitetty laskentojen oleellisimpien tulosten lähtötiedot ja taulukossa 13 on esitetty laskentojen tulokset. Alkuinvestointeihin on huomioitu uusittavien järjestelmien ja rakennusosien purku- ja asennuskustannukset sekä uusien järjestelmien ja rakennusosien hankkimiskustannukset. Kustannuksien arvioimisessa on käytetty valmistajien hinta-arvioita sekä talonrakennuksen kustannustietoa [30].

Taulukko 11. Investointien kannattavuuksien laskemisessa käytetyt energian hinnat. [31; 32]

Energia	e/MWh
Sähkö, sis. Alv	116.8
Kaukolämpö, sis. Alv	71.43

Taulukko 12. Oleellisimpien tulosten lähtötiedot

Tapaus	Lasitus nro.	Ilmanvaihtokone nro.	Sälekaihdin
1	1	1	Uloimmassa välissä
2	5	3	Ei kaihdinta
3	5	3	Uloimmassa välissä
4	4	1	Uloimmassa välissä
5	1	4	Uloimmassa välissä
6	4	4	Uloimmassa välissä

Taulukko 13. Laskentojen oleellimmat tulokset

Tapaus	Lisätieto	Alkuinvestointi, e/m <sup>2</sup>	E-luku, kWh/m <sup>2</sup>	Lämmitysenergian kulutus, kWh/a,m <sup>2</sup>	Sähköenergian kulutus, kWh/a,m <sup>2</sup>	Investoinnin nykyarvo, e/m <sup>2</sup>
1	Alkuperäinen tilanne	0.0	178	144.6	43.3	-
2	Pienin e-luku	67.2	130	90.9	37.8	20.0
3	Pienin e-luku, kun huomioidaan sisäilmaolosuhteet	70.4	132	93.3	37.8	13.5
4	Korkein investoinnin nykyarvo, kun vain ikkunat vaihdetaan	52.6	171	134.9	43.2	-38.9
5	Korkein investoinnin nykyarvo, kun vain ilmanvaihtokone vaihdetaan	9.3	142	105.5	38.7	55.8
6	Korkein investoinnin nykyarvo, kun ikkunat ja iv-kone vaihdetaan	61.8	135	95.8	38.7	16.7

## 6.4 Laskentojen arviointi

Alhaisin e-luku saavutetaan tapauksessa 2, jolloin ikkunoihin ei asenneta sälekaihtimia. Aurinkosuojaratkaisun poistaminen kokonaan kuitenkin heikentää sisäilmaolosuhteita, mikä ei ole järkevää.

Parhaiden mahdollisten sisäilmaolosuhteiden saavuttamiseksi valittiin vertailuun tulokset, joissa sälekaihtimet on sijoitettu ikkunoiden uloimpaan väliin. Tällöin alhaisin e-luku saavutetaan tapauksessa 3. Tapauksen 3 e-luku on hiukan korkeampi kuin tapauksen 2, koska tapauksessa 3 ilmaista aurinkoenergiaa ei hyödynnetä niin paljon kuin tapauksessa 2.

Tässä kohteessa ikkunoiden vaihtaminen energiatehokkaampiin ei ole taloudellisesti järkevää, koska investoinnin nykyarvo jää pienemmäksi kuin nolla. Mahdollisesti muita taloudellisesti järkevämpiä vaihtoehtoja sisäilmaolosuhteiden parantamiseksi voivat olla ikkunoiden huoltaminen ja lisälasin asentaminen ikkunaan. Mikäli ikkunat kuitenkin päädytään vaihtamaan, on järkevintä vaihtaa kohteeseen ikkunat, joita tarkasteltiin tapauksessa 4.

Valituista muuttujista paras investoinnin nykyarvo saavutetaan, kun vaihdetaan ilmanvaihtokone tapauksen 5 mukaisesti. Laskentaja tarkasteltaessa on kuitenkin huomiotava, että tapauksen 5 alkuinvestoinnin kustannusarvio sisältää vain paremman ilmanvaihtokoneen vaihtamisen kohteeseen. Mikäli kohteeseen jouduttaisiin tekemään suurempia ja kalliimpia investointeja, investointi ei välttämättä olisi kannattava.

## 7 Yhteenveto ja päätelmät

Tämän insinööriyön tavoitteena oli luoda laskentamalli rakennusten energiaoptimointiin ja käyttää luotua mallia esimerkkikohteeseen. Luotu laskentamalli on alkuvaikeuksien jälkeen todettu toimivaksi tarkastuslaskennoin.

Esimerkkikohteen laskennoista olisi saatu haastavammat lisäämällä enemmän muuttujia laskentaan. Mielenkiintoisia lisämuuttujia olisivat voineet olla seinän eristepaksuuden lisäys, rakennuksen lämmitystavan muutos ja lisälämmönlähteiden, esimerkiksi aurinkolämmön ja poistoilmalämpöpumpun lisääminen rakennukseen.

Tulevaisuudessa mallin käyttäminen vaatii jatkuvaa kehittämistä ja päivittämistä, jotta esimerkiksi investointikustannukset pysyvät todellisuutta vastaavina. Nykyistä mallia voisi tulevaisuudessa päivittää siten, että sitä voisi käyttää myös uudisrakentamisen laskennoissa, joissa sitä voitaisiin käyttää esimerkiksi eristepaksuuden ja lämmitysjärjestelmän tehon optimointiin.

## Lähteet

- 1 Hietala, M., Huovari, J., Kaleva, H., Lahtinen, M., Niemi, J., Ronikonmäki, NM., Vainio, T. 2015. Asuinrakennusten korjaustarve. 2015. PTT raportteja 251.
- 2 Asunnot ja asuinolot. 2016. Suomen virallinen tilasto. Verkkodokumentti. Tilastokeskus [Luettu: 2.11.2016]. Saantitapa: <http://www.stat.fi/til/asas/tau.html>
- 3 Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatehokkuuden parantamisesta korjaus- ja muutostöissä, säännös. 2013. LVI YM-00527. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- 4 Lappalainen, Markku. 2010. Energia- ja ekologiakäsikirja. Suunnittelu ja rakentaminen. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- 5 Sepponen, M. ym. 2013. Lähes nollaenergiatalon suunnitteluohjeet. Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskuksen raportteja. Lahti: Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus.
- 6 Heiduk, Ernst. 2008. Passive House Standard. Luentoaineisto. Passive House Summer School. Spittal a.d Drau, Itävalta.
- 7 Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D5. Helsinki. Ympäristöministeriö.
- 8 Ilmanvaihdon ominaissähköteho SFP, ohje. 2013. LVI 30-10529. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- 9 Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto, ohje. 2010. LVI 38-10454. 2010. Helsinki: Rakennustieto Oy
- 10 SFS-EN 308. Heat exchangers. Test procedures for establishing performance of air to air and flue gases heat recovery devices. 1997. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 11 Seppänen, Olli. 2001. Rakennusten lämmitys. 2. painos. Helsinki: Suomen LVI-liitto ry.
- 12 Sisäilmastoluokitus 2008, ohje. 2008. LVI 05-10440. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- 13 Nieminen, J. Virta, J. 2016. Rakennusten lisälämmöneristäminen. Helsinki: Kiinteistöalan kustannus.
- 14 Kaivonen, Juha-Antti. ym. 1994. Rakennusten korjaustekniikka ja talous. Tampere: Rakennustieto Oy.

- 15 Ulkoseinän lisäeristys sisä- ja ulkopuolelta. 2013. Verkkodokumentti. Rakentaja.fi. < [https://www.rakentaja.fi/artikkelit/10444/ulkoseinan\\_lisaeristys\\_saint\\_gobain\\_isover.htm](https://www.rakentaja.fi/artikkelit/10444/ulkoseinan_lisaeristys_saint_gobain_isover.htm)>.Julkaistu 9.9.2013. Luettu 5.2.2017.
- 16 Julkisivukorjauksella energiatehokkuutta. 2016. Verkkodokumentti. Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu. < [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Korjaustieto/Pientalot/Korjaushankkeet/Julkisivu\\_ ja\\_kattokorjaukset/Energiatehokkuus](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Korjaustieto/Pientalot/Korjaushankkeet/Julkisivu_ ja_kattokorjaukset/Energiatehokkuus)>. Päivitetty 12.1.2016. Luettu 5.2.2017.
- 17 Ikkunoiden tiivistäminen, ohje. 1992. KH 94-00162. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- 18 Puuikkunat, ohje. 2000. RT 41-10726. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- 19 Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitajaksot, ohje. 2008. KH 90-00403. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- 20 Puu- ja alumiini-ikkunat sekä niiden asennus, ohje. 2009. RT 41-10947. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- 21 Kauppinen, Timo. 2010. Rakennusten ilmanpitävyys. Teoksessa: Rakentajain kalenteri 2011, 95.vuosikerta, Käsikirja ja hakemisto. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- 22 Paloniitty, Sauli. 2012. Rakennusten tiiviysmittaus. Teoksessa: Rakentajain kalenteri 2013, 97.vuosikerta, Käsikirja ja hakemisto. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- 23 Laine, Katariina. 2014. Rakenteiden ilmatiivyyden parantaminen sisäilmakorjauksessa. Opinnäytetyö. Itä-Suomen yliopisto.
- 24 Rakennukset ja kesämökit. 2015. Verkkodokumentti. Tilastokeskus [Luettu: 12.2.2017]. Saantitapa: [http://www.stat.fi/til/rakke/2015/rakke\\_2015\\_2016-05-26\\_tau\\_003\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/rakke/2015/rakke_2015_2016-05-26_tau_003_fi.html)
- 25 Rakennusten lämmitys, ohje. 2006. RT 10-10937. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- 26 IDA Indoor Climate and Energy. 2016. Verkkodokumentti. EQUA Simulation AB. <http://www.equa.se/en/ida-ice>. Luettu 25.2.2017.
- 27 Palonen, M. ym. MOBO a new software for multi-objective building performance optimization. 2013. 13th Conference of International Building Simulation Association, Chambéry, France, August 26–28.
- 28 Karjalainen, E. 2014. Guide for using MOBO with IDA-ICE. Espoo. Equa Simulation Finland Oy.
- 29 Investointilaskelmat ja laskelmataulukot, ohje. 2005. LVI 02-10383. Helsinki: Rakennustieto Oy.

- 30 Talonrakentamisen kustannustieto 2015. Helsinki, Haahtela-kehitys Oy
- 31 Energian hinnat. 2016. Verkkodokumentti. Tilastokeskus [Luettu: 7.3.2017].  
Saantitapa: [http://www.stat.fi/til/ehi/2016/03/ehi\\_2016\\_03\\_2016-12-08\\_tau\\_003\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/ehi/2016/03/ehi_2016_03_2016-12-08_tau_003_fi.html)
- 32 Kaukolämmön hintatilasto. 2017. Verkkodokumentti. Energiateollisuus Ry. <  
[http://energia.fi/ajankohtaista\\_ja\\_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukolammon\\_hintatilasto.html#material-view](http://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukolammon_hintatilasto.html#material-view)>. Julkaistu 3.3.2017. Luettu 12.3.2017.