



ECOOL

Simuloinnin hyödyntäminen vaativien kohteiden energiatehokkuuden kehittämisessä

Ville Kakkonen



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Ville Kakkonen

ECOOL

Simuloinnin hyödyntäminen
vaativien kohteiden
energiatehokkuuden kehittämisessä

KYMEN
LAAKSON
LIITTO

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



XAMK KEHITTÄÄ 31

KAAKKOIS-SUOMEN AMMATTIKORKEAKOULU
MIKKELI 2017

© Tekijät ja Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

Kannen kuva: Manu Eloaho

Taitto: Grano Oy

ISBN: 978-952-344-060-9 (PDF)

ISSN 2489-3102 (verkkójulkaisu)

julkaisut@xamk.fi

SISÄLTÖ

JOHDANTO	5
1 MALLINNUSTEKNIikka	6
1.1 Simulointimallin rakentamisen vaiheet	7
1.2 Lähtötiedot	14
1.3 Olemassa olevien rakennusten simulointi	19
1.4 Allasmoduulin käyttö	20
2 LASKENTATAPAUKSET	21
2.1 Kapyysi	22
2.2 Maretarium	27
2.3 Mikkelin tuomiokirkko	28
3 TULOSTEN VERTAILU MITTAUSTULOksiIN	32
3.1 Kapyysi	32
3.1.1 Simuloidun ja mitatun lämpöenergian kulutuksen vertailu	32
3.1.2 TK2-ilmanvaihtokoneen sisäänpuhalluslämpötilan pudotus	38
3.1.3 Ilmanvaihtokoneiden sisäänpuhalluslämpötilojen pudotus	39
3.1.4 TK2-ilmanvaihtokoneen vapaajäähdytys	41
3.2 Maretarium	41
3.2.1 Simuloidun ja mitatun lämpöenergian kulutuksen vertailu	42
3.2.2 Luentosalin ilmanvaihtokoneen hyötysuhteen parantaminen	45
3.2.3 Ilmanvaihtokoneiden ja poistopuhaltimien aikatauluohjaus	45
3.2.4 Allasmoduulien käyttö	46
3.2.5 Valaisimien uusiminen	47
3.2.6 Sisäilman hiilidioksidipitoisuuteen perustuva ilmanvaihdon ohjaus	49
3.3 Mikkelin tuomiokirkko	51
3.3.1 Simuloidun ja mitatun lämpöenergian kulutuksen vertailu	51
3.3.2 Muutosehdotusten arviointi	54
Yhteenveto	55
Lähteet	56

JOHDANTO

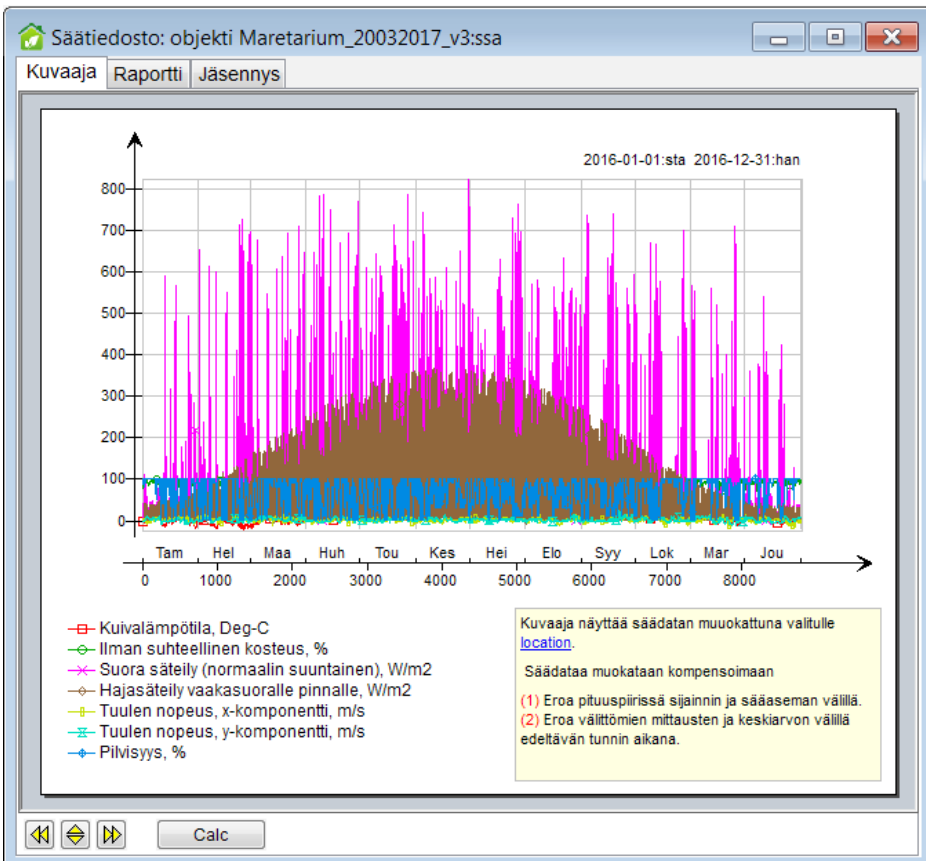
Ecool-hanke on Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun kolmivuotinen hanke, jota on toteutettu yhteistyössä Mikkelin ja Kotkan kampuksilla. Hankkeessa luodaan toimintamalli ja -ohjeistus vaativien erityiskohteiden energiatehokkuuden kehittämiseksi ja uusiutuvan energian käytön edistämiseksi. Toimintamallin perustana ovat energiankäytön nykytilan selvitykset sekä niiden perusteella tehdyt toimenpiteet ja ohjeistukset, joilla tähdätään energiankulutuksen vähentämiseen. Tarkoitus on, että tuloksena saatavaa toimintamallia voidaan hyödyntää myös muiden kuin hankkeessa mukana olleiden erityiskohteiden energiatehokkaiden ratkaisujen selvittämisessä ja laajentaa niihin. Ecool-hankepari koostuu Ecool-investointihankkeesta ja Ecool-kehittämishankkeesta. Ecool-investointihankkeessa on tarkoitus investoida mittalaitteisiin, joita tarvitaan Ecool-kehittämishankkeen toteutuksessa. Ecool-hankkeen päärahoittajana toimii Uudenmaan liitto, Euroopan aluekehitysrahasto (EAKR). Hanketta ovat lisäksi rahoittamassa Maretarium, Kymijoen ravintopalvelut, Kotka-Kymin seurakunta, VR-Group, Virolahden kunta ja Mikkelin tuomiokirkkoseurakunta. Tämä julkaisu käsittelee Mikkelin kampuksen osuutta hankkeessa. Osuus perustuu rakennussimuloinnin käyttöön muutosten vaikutusten arvioinnissa. Mallinnustyökaluksi oli projektin suunnitteluvaiheessa valikoitunut IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE). Mallinnustyökalun valinta perustui siihen, että ohjelmisto oli opetuskäytössä Mikkelin kampuksella ja tarvittaessa ohjelman käyttöön saataisiin tukea. IDA ICE on dynaaminen simulointiohjelmisto monivyöhykemallinnukseen. IDA ICE -laskentamalleilla voidaan tutkia rakennuksen lämpöasetta sekä koko rakennuksen energiankulutusta. IDA ICE:n avulla voidaan mallintaa kaikki rakennuksen järjestelmät ja niihin sisältyvät säätölaitteet.

Haluan kiittää hankkeen rahoittajia kehittämistyön mahdollistamisesta sekä hankkeen ohjausryhmän jäseniä ja muita hankkeeseen osallistuneita aktiivisesta osallistumisesta hanketyöhön.

Mikkelissä 8.12.2017

1 MALLINNUSTEKNIikka

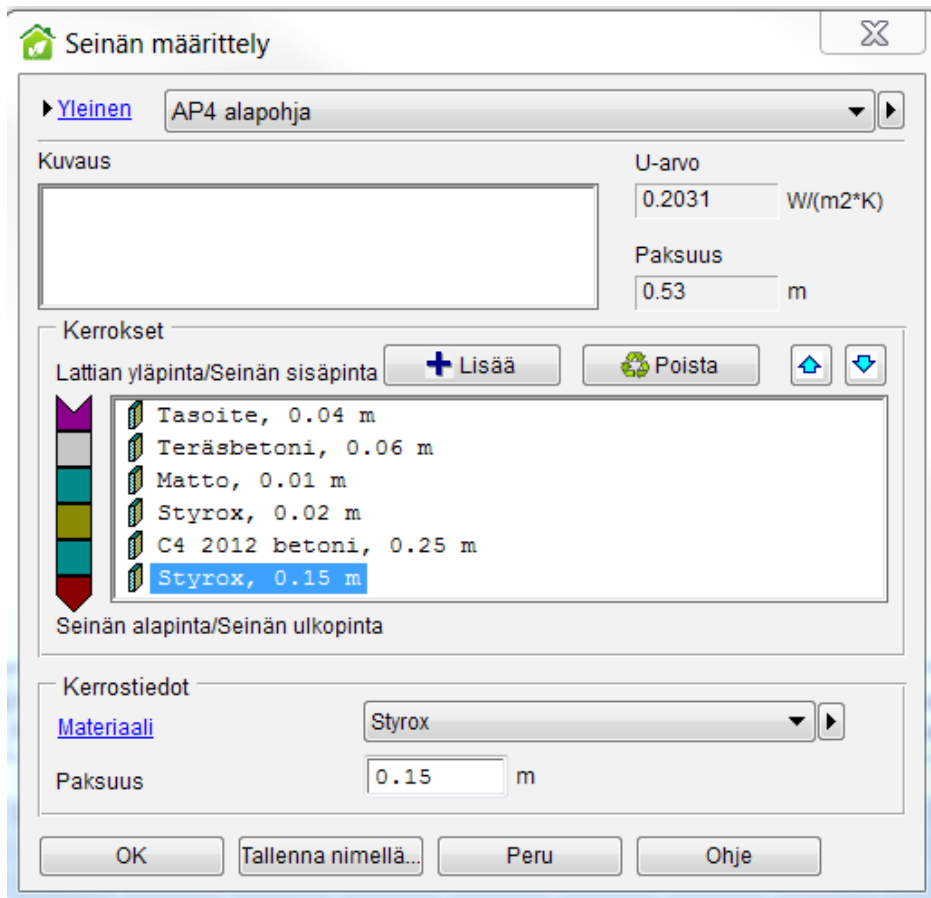
IDA ICE -simulointimalli pohjautuu sääolosuhteisiin ja rakennuksen sijaintiin, joiden perusteella saadaan tuntikohtaista tietoa rakennuksen energiankulutuksesta ja sisäilmasto-olosuhteista. Kuvassa 1 on esitetty paikallinen säätiedosto Kotkan kaupungille. IDA ICE -mallinnuksen avulla voidaan tutkia eri toimenpiteiden vaikutusta rakennuksen sisäilmasto-olosuhteisiin. Hankkeessa tutkimuksen kohteena olevien rakennusten osalta energiankulutuksesta suuri osa kohdistuu ilmanvaihdon tuloilman lämmittämiseen, joten ilmanvaihtokoneiden erilaiset käyntiajat ja ohjaustavat ovat tärkeä tutkimuksen kohde. IDA ICE -perusversion lisäksi projektissa otettiin käyttöön uima-altaat-laajennus, jonka avulla päästiin tutkimaan akvaariotalon kala-altaiden vaikutusta sisäilman kosteuteen.



Kuva 1. Paikkakuntakohtainen säätiedosto.

1.1 SIMULOINTIMALLIN RAKENTAMISEN VAIHEET

Simulointimallin rakentaminen aloitetaan rakennuksen geometriasta. Geometrian mallintaminen aloitetaan piirtämällä rakennuksen ulkoseinät pohjapiirustusten mukaisesti. Rakennusten ulkoseinien määrittämisen jälkeen määritellään erilaiset huonetilat, joista käytetään nimitystä vyöhyke. Kun rakennuksen geometriat on määritelty pohjapiirustusten mukaan, voidaan määrittää rakenteiden ominaisuudet rakennepiirustusten avulla. Ohjelma osaa määrittää itse rakenteiden lämmönläpäisykertoimen materiaalien ominaisuuksien ja paksuuksien avulla. Kuvassa 2 on esitetty seinän määrittely ja kuvassa 3 materiaalin määrittely. Kuvassa 4 on esitetty akvaariotalon pohjapiirros, ja kuvissa 5, 6 ja 7 sama rakennus on kuvattu 3D-mallissa.



Seinän määrittely

Yleinen AP4 alapohja

Kuvaus

U-arvo 0.2031 W/(m²*K)

Paksuus 0.53 m

Kerrokset

Lattian yläpinta/Seinän sisäpinta + Lisää Poista

- Tasoite, 0.04 m
- Teräsbetoni, 0.06 m
- Matto, 0.01 m
- Styrox, 0.02 m
- C4 2012 betoni, 0.25 m
- Styrox, 0.15 m

Seinän alapinta/Seinän ulkopinta

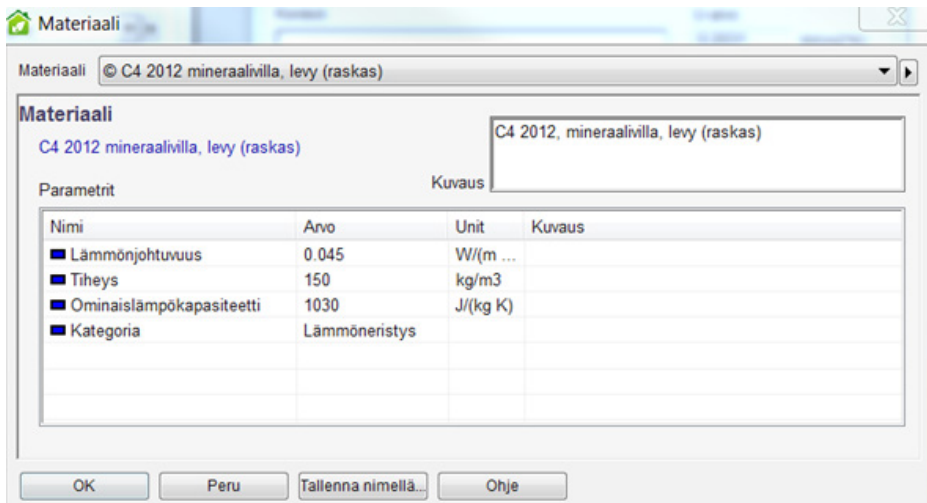
Kerrostiedot

Materiaali Styrox

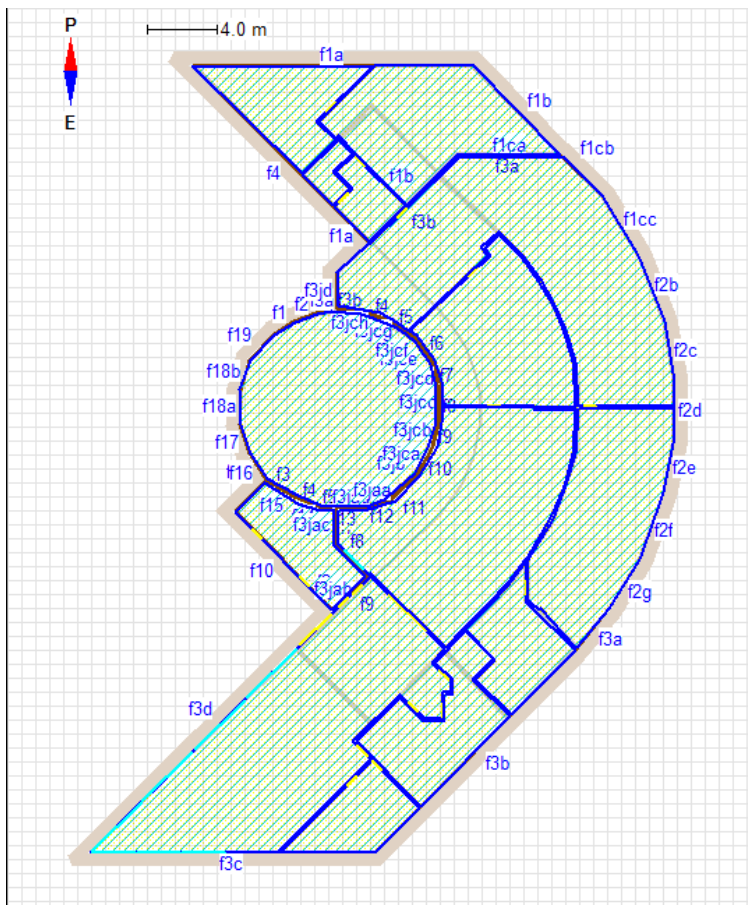
Paksuus 0.15 m

OK Tallenna nimellä... Peru Ohje

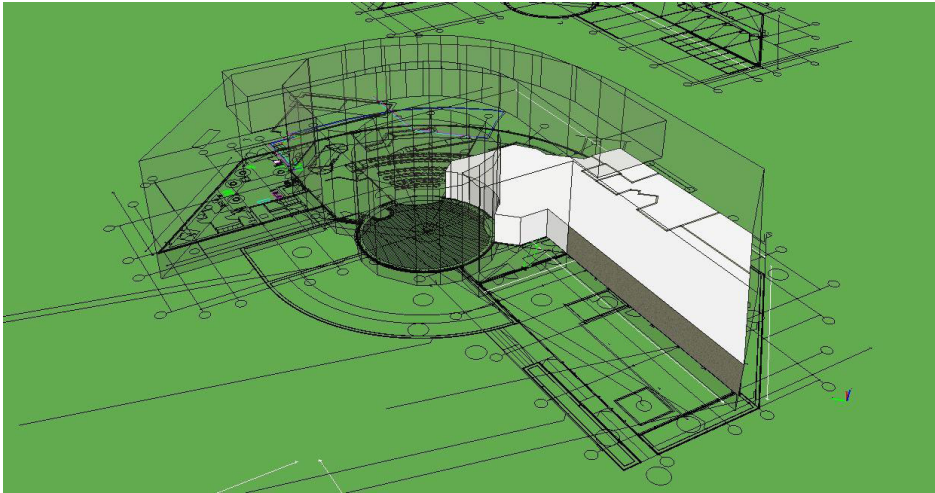
Kuva 2. Seinän määrittely.



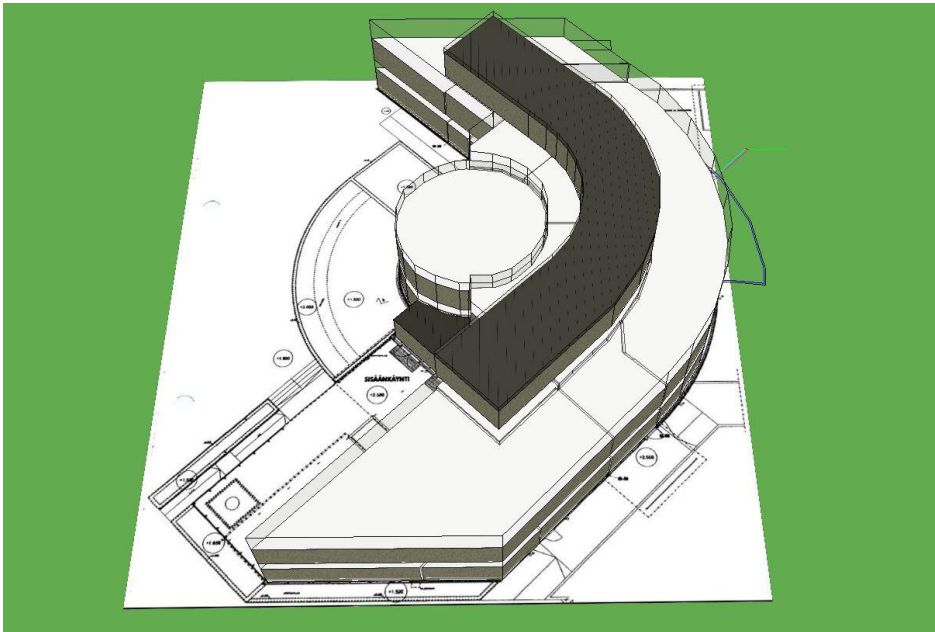
Kuva 3. Materiaalin määrittely.



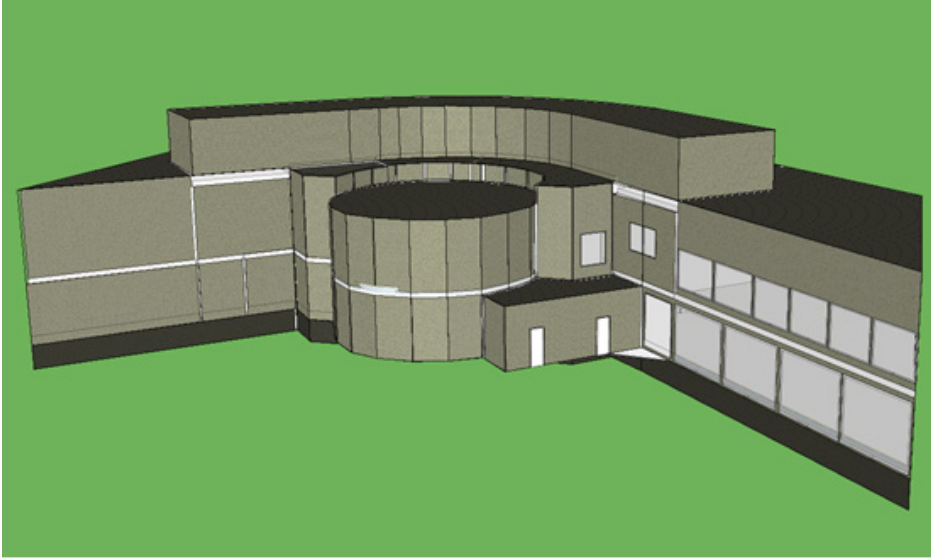
Kuva 4. Maretariumin pohjakuva.



Kuva 5. Maretariumin rakenteiden mallinnus alussa.

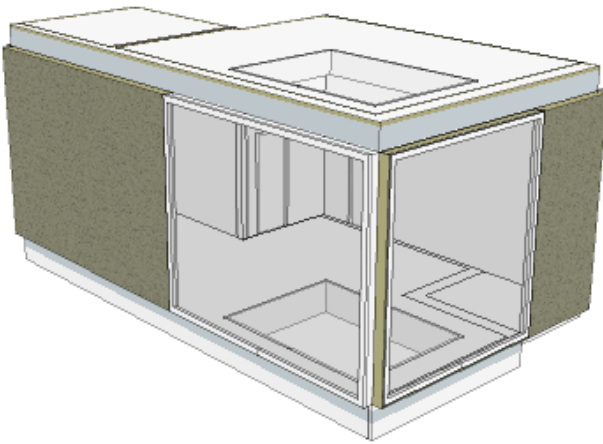


Kuva 6. Maretariumin rakenteiden mallinnus lähes valmiina.



Kuva 7. Maretariumin 3D-kuva.

Lisäksi simulointimalliin määritellään rakenteiden kylmäsillat ja vuotoilmavirrat. Kaikkiin vyöhykkeisiin määritellään sisäiset kuormat eli esimerkiksi tilan käyttäjät sekä laitteistoista ja valaistuksesta tulevat kuormat. Sisäisille kuormille voidaan luoda erilaisia profileita. Esimerkiksi toimistotiloihin voidaan määrittää ihmisten läsnäolo ja valaistuksen päälläolo vain toimistotyöaikana. Kuvassa 8 on vyöhyke, jossa on porraskäytävä ylä- ja alakerrokseen ja kaksi suurta ikkunaa. Kuvassa 9 on esitetty kirkkosalin yleislomake, jossa määritellään vyöhykkeen tiedot. Kylmäsiltojen määrittäminen erilaisille liitostyypeille on esitetty kuvassa 10.



Kuva 8. Käpyysin porrashuone.

Kirkkosali2: vyöhyke Mikkelin kirkko_1804017_v1_koko vuosissa

Yleistietoa Lisä Jäsenitys Results

Yleinen
Samanlaisten vyöhykkeiden lukumäärä 1
Kulmakäsitteen kondutaanasi 12.114 W/C
Asetusarvot kirkko

Imuvahto
Valitse ilmastointikone Lisä...
Imuvahtokone
Jäsenitysoptio IMS, aikataulutettu ilman

Tuloilmavirta, VIV L/(sm)
Poistoilmavirta, VIV L/(sm)
Sekoittuminen 0 0-1
Vuotoala 0.0913 m2
Annettu vuotoalimääri 0 L/(s.m2 ulkoviippa)

Huonekorkeus
Välipohjaan 10 m
Kattoon 21.0 m
Lattian korkeus maanpinnasta 0.0 m

Polyjapiirustus

Huoneilteet
Ideal heater

Kuormat
Occupant 1
Equipment 1
Valaistus

3D-kuva rakennuksesta

Nimi	Typppi	Ulkoseinä ala, m2	Kytketty	Atsimmauti/kalteus kuilma, *	Rakennus	U-avo W/(m2.K)	Paksuus, m	Kerrosma tenaali	Kerrosma ksuus, m	Kerrosma tenaali	Kerrosma ksuus, m	Kerrosma tenaali	Kerrosma ksuus, m	Kerrosma tenaali	Kerrosma ksuus, m	Kerrosma tenaali	Kerrosma ksuus, m	Kerrosma tenaali	Kerrosma ksuus, m	
Lattia	Alapoi	628.7	Maap.	0.0	[Oletu.]	0.2459	0.5	Styrox	0.1	Täli	0.4									
Katto r1@Kirk.	Katto	369.1	Kirkk.	15.0	[Oletu.]	0.1339	0.7	Täli	0.4	© C4...	0.1	Miner...	0.2							
Katto r2@Kirk.	Katto	2.375	Kirkk.	180.0	[Oletu.]	0.1339	0.7	Täli	0.4	© C4...	0.1	Miner...	0.2							
Katto r4@Kirk.	Katto	2.764	Kirkk.	180.0	[Oletu.]	0.1339	0.7	Täli	0.4	© C4...	0.1	Miner...	0.2							
Katto r5@Kirk.	Katto	5.164	Kirkk.	284.9...	[Oletu.]	0.1339	0.7	Täli	0.4	© C4...	0.1	Miner...	0.2							
Katto r6@Kirk.	Katto	4.818	Kirkk.	285.0	[Oletu.]	0.1339	0.7	Täli	0.4	© C4...	0.1	Miner...	0.2							
Katto r7@Kirk.	Katto	4.818	Kirkk.	105.0	[Oletu.]	0.1339	0.7	Täli	0.4	© C4...	0.1	Miner...	0.2							
Katto r8@Kirk.	Katto	5.164	Kirkk.	104.9	[Oletu.]	0.1339	0.7	Täli	0.4	© C4...	0.1	Miner...	0.2							
Katto r9@Kirk.	Sisäk.	2.097	Ei mit.	180.0	[Oletu.]	0.3525	0.8	Täli	0.8											
Katto r10@Kirk.	Katto	1.957	Kirkk.	180.0	[Oletu.]	0.1339	0.7	Täli	0.4	© C4...	0.1	Miner...	0.2							
Katto r11@Kirk.	Katto	4.818	Kirkk.	285.0	[Oletu.]	0.1339	0.7	Täli	0.4	© C4...	0.1	Miner...	0.2							
Katto r12@Kirk.	Katto	5.164	Kirkk.	284.9...	[Oletu.]	0.1339	0.7	Täli	0.4	© C4...	0.1	Miner...	0.2							
Katto r13@Kirk.	Katto	4.818	Kirkk.	105.0	[Oletu.]	0.1339	0.7	Täli	0.4	© C4...	0.1	Miner...	0.2							
Katto r14@Kirk.	Katto	5.164	Kirkk.	104.9	[Oletu.]	0.1339	0.7	Täli	0.4	© C4...	0.1	Miner...	0.2							
Katto r15@Kirk.	Katto	4.866	Kirkk.	480.0	[Oletu.]	0.4390	0.9	Täli	0.4	© C4...	0.1	Miner...	0.2							

Kuva 9. Kirkkosali.

Kylmäsiilit

Ei yhtää Hyvä Normaali Huono Erittäin huono

Ulkoseinä / alapohja 0.05 W/K/(m liitos) Yhteensä vierekkäisille tiloille

Ulkoseinä / sisäseinä 0.03 W/K/(m liitos) Yhteensä vierekkäisille tiloille

Ulkoseinä / ulkoseinä 0.08 W/K/(m liitos)

Ulkoikkunoiden ympärystämitta 0.03 W/K/(m piiri)

Ulko-ovien ympärystämitta 0.03 W/K/(m piiri)

Katto / ulkoseinät 0.09 W/K/(m liitos)

Alapohja / ulkoseinä 0.14 W/K/(m liitos)

Parvekkeen lattia / ulkoseinä 0.2 W/K/(m liitos)

Alapohja / sisäseinä 0.03 W/K/(m liitos) Yhteensä vierekkäisille tiloille

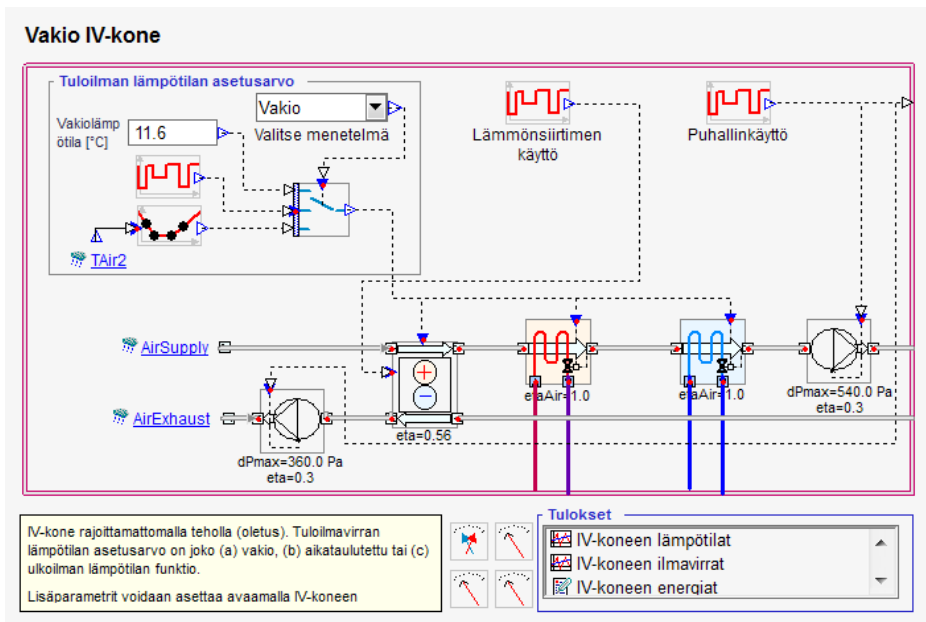
Ulkokatto / sisäseinä 0.03 W/K/(m liitos) Yhteensä vierekkäisille tiloille

Ulkoseinä, sisänurkka 0 W/K/(m liitos) Negatiivinen luku

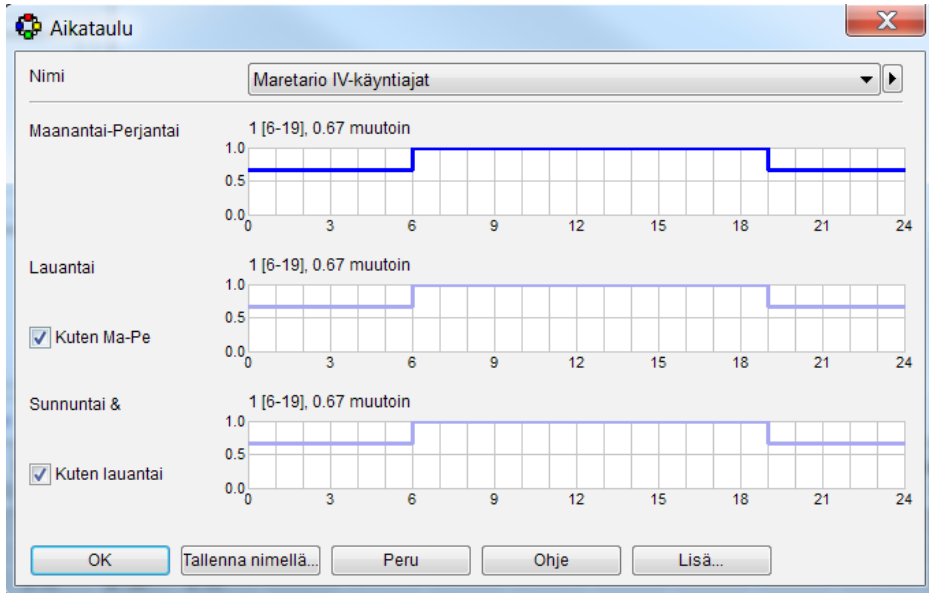
Ulkoseinät (vaihtoehtoisesti syötä W/K/(m2 lattia-ala)) 0 W/K/(m2 ulkoseinä)

Kuva 10. Kylmäsiiltojen määritys.

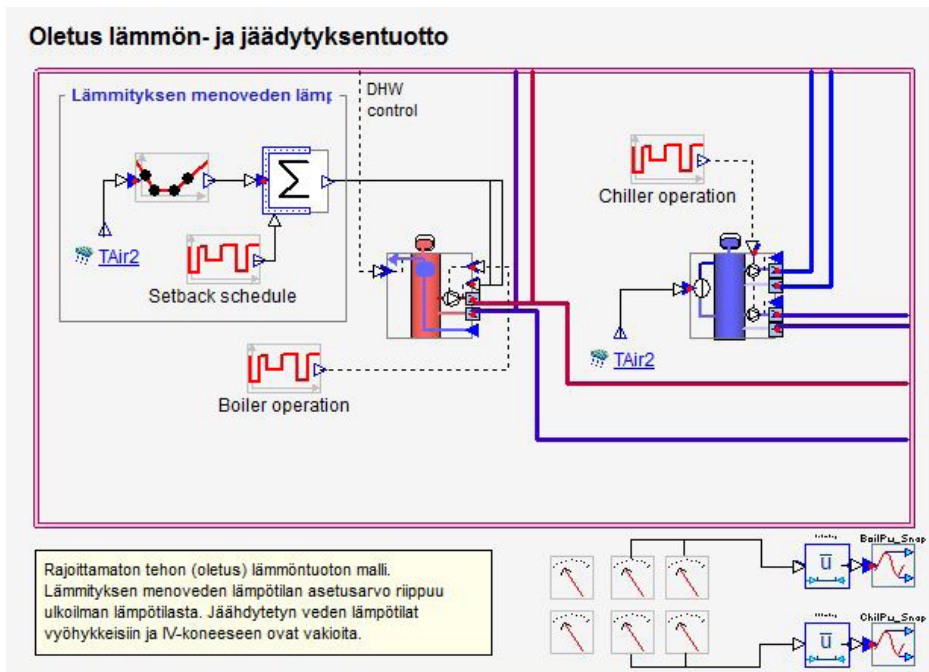
Ilmanvaihto mallinnetaan lisäämällä laskentamalliin rakennuksen ilmanvaihtokoneet ja poistopuhaltimet. Vyöhykkeille määritellään ilmamäärät ja ilmanvaihtokoneille vaikutusalueet ja käyttöajat. Ilmanvaihtoon on mahdollista käyttää perinteisen aikaohjauksen lisäksi myös esimerkiksi sisäilman lämpötilaan, kosteuteen tai hiilidioksidipitoisuuteen perustuvaa ohjausta. Ilmanvaihtokoneille voidaan määrittää puhaltimien hyötysuhde sähköstä ilmaan, lämmöntalteenoton hyötysuhde sekä lämmitys- ja jäähdytyspatterien hyötysuhde. Kuvassa 11 on esitetty lämmöntalteenotolla sekä lämmitys- ja jäähdytyspatterilla varustetun ilmanvaihtokoneen prosessikaavio. Kuvassa 12 on esitetty ilmanvaihtokoneen käyntiaikojen määrittely. Rakennuksen lämmityksen- ja jäähdytyksentuoton määrittely on esitetty kuvassa 13.



Kuva 11. Vakiomallinen ilmanvaihtokone.



Kuva 12. Ilmanvaihtokoneen käyntiaikojen määrittäminen.



Kuva 13. Lämmön- ja jäähdytysentuoton määrittäminen.

1.2 LÄHTÖTIEDOT

Rakennuksen lähtötietoina tarvitaan pohjakuvat, rakennepiirustukset ja LVI-piirustukset. Pohjakuvien avulla saadaan selville rakennuksen seinien sijainti ja vyöhykkeiden muoto sekä ikkunoiden ja ovien sijainti. Rakennepiirustuksista saadaan lähtötiedot seinien, ikkunoiden ja ovien materiaaleista ja materiaalipaksuuksista. Lisäksi rakennepiirustukset sisältävät tiedot ala- ja välipohjien ja katon rakenteesta. Rakennuksen LVI-piirustusten avulla voidaan määrittää ilmanvaihtokoneiden palvelualueet ja ilmanvaihtomäärät eri vyöhykkeissä.

Ilmanvaihtokoneiden lämmöntalteenoton hyötysuhde voidaan määrittellä konetyypille tyypillisen hyötysuhteen mukaan tai hyötysuhteen määrittelyssä voidaan käyttää mittaustuloksia, jos kyseessä on olemassa oleva rakennus. Lämmöntalteenoton hyötysuhteen lisäksi ilmanvaihtokoneelle määritellään hyötysuhde sähköstä ilmaan puhallinkohtaisesti. IDA ICE laskee hyötysuhteen avulla, kuinka paljon tuloilma eri massavirroilla lämpenee puhaltimessa. Vaihtoehtoisesti on mahdollista käyttää vakioarvoa tuloilman lämpenemiselle puhaltimessa. Ilmanvaihtokoneiden puhaltimien hyötysuhde osakuormilla on mahdollista määrittellä itse esimerkiksi mittaustuloksien perusteella, tai määrittelyssä voidaan käyttää osakuormille määriteltyjä standardeja.

Sisäisten kuormien vaikutus määritellään vyöhykekohtaisesti. Sisäisiä kuormia ovat tilan läsnäolijat, valaisimet ja laitteet. Tilan läsnäolijoille määritetään lähtöarvoiksi lukumäärä, aktiivisuus ja vaatetustaso. Tilan läsnäolijoiden määrittely on esitetty kuvassa 14. Valaisimien lähtöarvoja ovat valaisimien tehot, lukumäärät ja käyttöajat. Valaisimien määrittely vyöhykkeeseen on esitetty kuvassa 15. Muut sisäiset lämmön, kosteuden ja hiilidioksidin lähteet määritellään laite-komponentilla. Laitteelle määritellään lähtöarvoksi lämmönluovutusteho, hiilidioksidin tuotto ja kosteuskuorma höyrynä, jonka höyrystymislämpöä ei oteta huoneilmasta. Laitteiden määrittely vyöhykkeeseen on esitetty kuvassa 16.

Occupant 1: henkilöt Maretarium_20032017_v3.121 Jakel...

Henkilöiden lkm.

[Aikataulu](#) 06-18 every day

Aktiveettitaso MET [* Aikataulumuutos ei ole askelmainen .

Vaatetus

Vakio ± * CLO

Aikataulu

[*vaatetus sopeutuu automaattisesti raja-arvojen välille viihtyisyyden saavuttamiseksi]

Objekti

Nimi **Occupant 1**

Kuvaus

Kuva 14. Läsnaolijoiden määrittely vyöhykkeeseen.

Light: valaistus Maretarium_20032017_v3.121 Jakelukeitti...

Yleislomake **Geometry**

Yksiköiden lukumäärä

[Säätöstrategia](#) Käyttöaikataulu

[Aikataulu](#) 06-18 every day

Nimellisteho/yksikkö W [* Aikataulumuutos ei ole askelmainen .

Valaistusvoimakkuus lm/W Muutos ei ole askelmainen .

Konvektion osuus 0-1

[Energiamittari](#) [Oletus] Lighting, facility

Objekti

Nimi **Light**

Kuvaus

Kuva 15. Valaistuksen määrittely vyöhykkeeseen.

Equipment 1: laitteet Maretarium_20032017_v3.109 Maretaario:ssa

Yksiköiden lukumäärä

[Aikataulu](#) *

Lämmönluovutus yksikköä k W [*] Aikataulumuutos ei ole askelmainen .
Vain tämä vaikuttaa

Energiamuoto

[Energiamittari](#)

Lisä

Pitkäaaltoisen säteilyn osuus	<input type="text" value="0.0"/>	0-1	
Kosteudenluovutus yksikköä kohti	<input type="text" value="0.0"/>	kg/s	Kosteuskuorma höyrynä, jonka höyrystymislämpöä ei ole otettu huoneilmasta
Kosteudenluovutus yksikköä kohti	<input type="text" value="0.0"/>	kg/s	Kosteuskuorma höyrynä, jonka höyrystymislämpöä ei ole otettu huoneilmasta
CO2-tuotto yksikköä kohti	<input type="text" value="0.0"/>	mg/s	
Osuus tilaan	<input type="text" value="1"/>	0-1	Osuus lämpö- ja kosteuskuormasta, joka vapautuu tilaan

Objekti

Nimi

Kuvaus

Kuva 16. Laitteiden määrittely vyöhykkeeseen.

Lisäenergia ja häviöt määritellään omalla lomakkeella. Lisäenergian kuluttajiin kuuluvat olennaisena osana lämpimän käyttöveden kulutus ja jakelujärjestelmien häviöt. Häviöihin voidaan määrittellä esimerkiksi lämpimän käyttöveden jakelujärjestelmän häviöt ja tuloilmakanaviston häviöt. Häviöistä voidaan määrittellä haluttu prosenttiosuus kohdistumaan vyöhykkeisiin. Vyöhykkeiden häviöiden osuus jaetaan suhteessa lattia-alaan. Lisäenergia ja häviöt -lomake on esitetty kuvassa 17.

Lisäenergia ja häviöt: objekti Maretarium_20032017_v3:ssa

Lisäenergia ja häviöt

Lämpimän käyttöveden kulutus

Keskimääräinen lämpimän käyttöveden m³/vrk [LKV jakelu](#)

[T_DHW = 55°C (saapuva 5°C); lisää yksityiskohtia täältä [Lämmön- ja jäähdytyksen tuotto](#) ja lämmöntuotto]

[Käyrä automaattisesti uudellen skaalataan annettuun keskimääräiseen käyttöön]

Jakelujärjestelmän häviöt

Lämmin käyttövesi W/(m2 lattia-ala) % vyöhykkeis

Lämpö vyöhykkeisiin [Lämmitysjärjestelmän lämmöntuoton osuus \[%\]\(ml. ideaaliset lämmityslaitteet\)](#) % vyöhykkeis

Jäähdytys vyöhykkeisiin W/(lattia-m²) % vyöhykkeis

Tuloilmakanaviston häviöt W/m2 lattia-ala, 7 °C dT:lla_kanavasta vyöhykkeeseen % vyöhykkeis

[*vyöhykkeiden häviöiden osuus jaetaan suhteessa lattia-alaan]

Lämmöntuoton häviöt

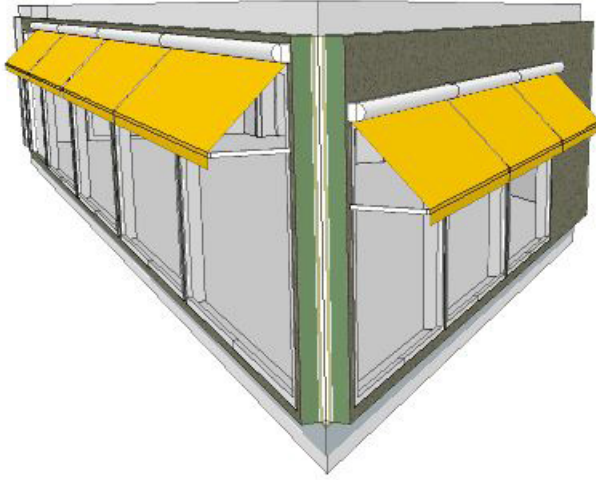
Häviö jäähdytyksen tuotosta W Häviö lämmityksen tuotosta W

Lisäenergiankulutus

Nimi	Nimellisteho, kW	Nimellisteho, W/m2	Kok. nimelliste... kW	Aikataulu	Energiamittari

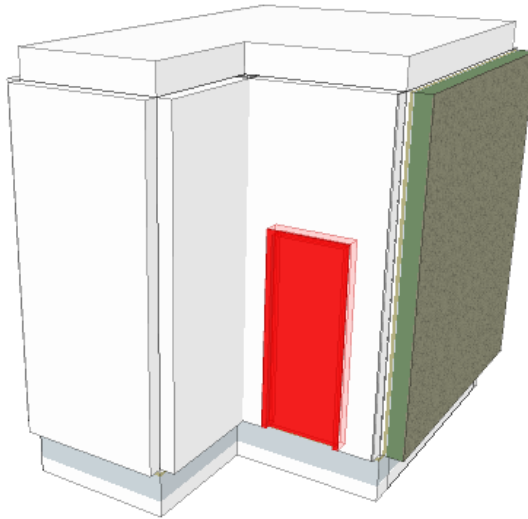
Kuva 17. Lisäenergia ja häviöt.

Ikkunoiden lasirakenteen määritykseen voi syöttää tietoja manuaalisesti tai käyttää ohjelman kirjastoa, josta löytyy esimerkkilaseja ja usean eri valmistajan lasimalleja. Ikkunoille määriteltäviä asetusarvoja ovat lasirakenteen lisäksi esimerkiksi mahdollinen lasirakenteeseen integroitu suojaus, ikkunan ulkopuolinen suojaus ja ikkunassa oleva aukko eli esimerkiksi tuuletusikkuna. Lasirakenteeseen integroitu suojaus voi olla esimerkiksi verho tai sälekaihdin. Ikkunan ulkopuolisia suojauksia ovat esimerkiksi erilaiset markiisit, joista yksi esimerkki on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Markkiisit ikkunoissa.

Ovien rakenne tulee määrittää rakennepiirustusten perusteella saatavista lähtötiedoista tai käyttämällä ohjelman kirjastosta löytyviä valmiita ovirakenteita. Oven rakenteen lisäksi ovelle määritellään vuoto-ala ja purkauskerroin, jota käytetään vuotoaukkojen paine-ero-yhtälössä. Ohjelma laskee oven läpi virtaavan ilman massavirran eri simulointitilanteissa. Ovelle voidaan määrittää myös aukioloaikataulu, jonka perusteella oviaukosta vuotava ilmavirta lasketaan. Oven vuotoilmavirralla on huomattava merkitys energiankulutukseen esimerkiksi kylmä- ja pakastuhuoneiden osalta. Kuvassa 19 on esitetty ovi 3D-näkymässä.



Kuva 19. Ovi 3D-näkymässä.

1.3 OLEMASSA OLEVIENTEN RAKENNUSTEN SIMULOINTI

Uusien rakennusten mitoituksessa käytettävät tiedot tulevat rakennusmääräyskokoelmasta. Olemassa olevien rakennusten osalta lähtötiedot voidaan määrittää rakennusaikaisten rakennusmääräysten mukaisesti tai mittaamalla. Merkittäviä epävarmuustekijöitä ovat esimerkiksi sisäiset kuormat, käyttäjien vaikutus, laitteiden ja koneiden muuttuva suorituskyky ja suunnittelumateriaalin vastaavuus rakennukseen. Sisäisten kuormien vaikutus on merkittävä rakennuksissa, joissa on paljon koneita ja laitteita. Jos tiloja on useita ja koneita on paljon, voi tiettyyn vyöhykkeeseen kohdistuva sisäinen kuorma olla vaikea määrittää. Ihmisten vaikutus rakennuksen sisäilmastoon on osassa rakennuksista merkittävä, mutta saatavilla ei välttämättä ole tietoa siitä, miten paljon tiloissa on ihmisiä mihinkin aikaan.

Tilojen käyttäjien vaikutusta tilojen energiankulutukseen ja sisäilmaston laatuun on vaikea määrittää. Käyttäjät voivat vaikuttaa tiedostamattaan erittäin paljon rakennuksen ilmanvaihdon toimimiseen esimerkiksi ikkunoiden ja ovien aukipitamisellä. Käyttäjät voivat vaikuttaa myös esimerkiksi huonelämpötilojen asetusarvojen muuttamisella rakennuksen energiankulutukseen. Simuloinnissa käytetään lähtökohtaisesti vyöhykkeille suunniteltuja sisäilman lämpötiloja, joita käyttäjät ovat voineet esimerkiksi nostaa ylemmäs. Tilan laitteiden ja koneiden ylläpidolla, tai sen tekemättömyydellä, voi olla merkittäviä vaikutuksia laitteiden ja koneiden suorituskykyyn ja hyötysuhteeseen. Esimerkiksi ilmanvaihtokoneiden suodattimien puutteellinen puhdistus ja vaihtaminen voivat kasvattaa merkittävästi rakennuksen energiankulutusta ja heikentää rakennuksen sisäilman laatua. Simuloinnissa laitteille ja koneille oletetaan lähtökohtaisesti niiden tyypillinen suorituskyky, jolloin simulointituloksien epävarmuus kasvaa kohteissa, joissa koneiden ja laitteiden suorituskyky on laskenut puutteellisen kunnossapidon vuoksi.

Ilmanvaihdon mallinnus pohjautuu eri vyöhykkeille määriteltäviin ilmavirtoihin. Ilmavirtojen määrä tulee rakennusmääräyskokoelman tilatyypille suositellusta ilmamäärästä tai olemassa olevan rakennuksen mittaustiedoista. Ilmamäärät voivat poiketa suositellusta ilmamäärästä tai erota merkittävästi mittauspöytäkirjan tuloksista. Ilmamäärän eroavaisuudet ovat suoraan verrannollisia ilmanvaihdon energiankulutukseen, joten ne voivat aiheuttaa merkittäviä eroavaisuuksia simuloitujen ja todellisen energiankulutuksen välille.

Laskentakoodin validointi erilaisissa laskentatilanteissa on tarkastettava ennen laskennan aloittamista. Ohjelman laskentakoodin validointiraportit ovat saatavissa ohjelmiston kotisivuilta. Simulointimallin validointi ja lähtötietojen paikkansapitävyys on mahdollisuuksien mukaan pyrittävä tarkastamaan erityisesti olemassa olevien rakennusten osalta.

Olemassa olevien rakennusten energiankulutusta ja sisäilman laatua voidaan tutkia hyödyntämällä rakennussimulointia. Erilaiset simuloinnin avulla tehtävät tarkastelut kannattaa suorittaa energiakatselmuksen ja rakennuksessa suoritettavien mittauksien yhteydessä,

jolloin tuloksia pystytään vertaamaan keskenään. Mahdolliset eroavaisuudet laskentamallin ja mitatun energiankulutuksen välillä paljastavat joko mittaus- tai mallinnusvirheen, ja tällaisen tarkastelun avulla energiakatselmoinnin luotettavuus paranee. Lähtökohtaisesti rakennussimulointi on paljon työtä vaativa projekti, jonka hyödyt kasvavat sitä mukaa, mitä monimutkaisempia ongelmia tutkitaan. Esimerkkinä voidaan mainita sisäilman lämpötilan, hiilidioksidipitoisuuden, kosteuden ja muiden monimutkaisten ohjauslogiikoiden hyödyntäminen samaan aikaan IV-koneen ohjauksessa. Rakennussimuloinnin käyttö tulee tarpeelliseksi myös rakennusten jäähdytystarpeen laskennassa, jossa auringonsäteilyllä on merkittävä vaikutus rakennuksen jäähdytystarpeeseen.

1.4 ALLASMODUULIN KÄYTTÖ

IDA ICE -ohjelmistossa on lisäosa, joka on suunniteltu uimahallien mallintamista varten. Malli laskee, kuinka suuri vesialtaista sisäilmaan haihtuvan veden massavirta on, ja huomioi haihtumisessa tarvittavan energian. Projektin kohde Maretarium soveltuu erikoisuuteensa vuoksi erinomaisesti allasmoduulin testaamiseen. Samalla saadaan hyödyllistä tietoa Maretariumin sisäilman laadusta ja mahdollisten energiansäästöön tähtäävien muutosten vaikutuksesta sisäilman kosteuteen. Allasmoduulin laskenta perustuu kokemukseräiseen ratkaisuun, jota voidaan pitää pätevänä aktiivisessa käytössä oleville altaille, joissa haihtuminen on voimakasta.

Haihtumisen laskentayhtälö voidaan esittää seuraavasti (ASHRAE 2007):

$$w_p = \frac{A}{Y} (p_w - p_a) (0.089 + 0.0782V) \quad (1)$$

missä

$$w_p = \text{haihtuvan veden massavirta } \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$A = \text{vesialtaan pinta-ala } m^2$$

$$Y = \text{tarvittava höyrystymislämpö altaan pinnan lämpötilassa } \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$p_w = \text{kylläisen höyryn paine altaan pinnan lämpötilassa } \text{kPa}$$

$$p_a = \text{kylläisen höyryn paine huoneilman kastepisteessä } \text{kPa}$$

$$V = \text{ilman virtausnopeus altaan päällä } \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Vakion } 0.089 \text{ yksikkö on } \frac{\text{Ws}}{\text{m}^3 \text{Pa}}$$

$$\text{Vakion } 0.0782 \text{ yksikkö on } \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{Pa}}$$

Laskentayhtälö (1) voidaan muuntaa kertomalla se aktiivisuusmuuttujalla F_a , jolloin haihtumisnopeudessa saadaan huomioitua altaan käytön aktiivisuus. Höyrystymislämmön ollessa noin $2400 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$ ja ilman virtausnopeuden ollessa $0,05-0,15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ voidaan haihtumisen yhtälö kirjoittaa seuraavaan muotoon (ASHRAE 2007):

$$w_p = 4 * 10^{-5} A (p_w - p_a) F_a \quad (2)$$

missä

$$w_p = \text{haihtuvan veden massavirta } \frac{kg}{s}$$

$$A = \text{vesialtaan pinta-ala } m^2$$

$$p_w = \text{kylläisen höyryn paine altaan pinnan lämpötilassa } kpa$$

$$p_a = \text{kylläisen höyryn paine huoneilman kastepisteessä } kpa$$

$$F_a = \text{aktiivisuusmuuttuja}$$

Aktiivisuusmuuttujalle on määritetty seuraavia yleispäteviä arvoja allastyypistä riippuen:

Taulukko 1. Aktiivisuusmuuttujat allastyypeittäin (ASHRAE 2007).

Allastyyppi	Yleinen aktiivisuusmuuttuja (F_a)
Käyttämätön	0.5
Asuinrakennus	0.5
Asunto-osakeyhtiön yhteiskäyttö	0.65
Terapia	0.65
Hotelli	0.8
Yleinen, koulutus	1.0
Poreallas, kylpylä	1.0
Aalto, vesiliukumäki	1.5 (minimi)
Kala-altaat	Määritetään mittauksien avulla

Maretariumin osalta aktiivisuusmuuttujan arvo pystytään määrittämään kiinteistöstä saatavan mittausdatan perusteella. Ilmankosteusmittauksista voidaan arvioida haihtuvan veden määrä ja näin voidaan määrittää tunnetuissa olosuhteissa altaiden aktiivisuusmuuttuja, kun yhtälön muut muuttujat ovat tunnettuja. Kun aktiivisuusmuuttuja on määritelty ja laskentamalli toimii validoinnin jälkeen käyttötarkoitukseen nähden riittävän tarkasti, voidaan mallin avulla tutkia energiansäästöön liittyvien muutoksien vaikutuksia sisäilman laatuun.

2 LASKENTATAPAUKSET

Laskentatapauksien lukumääräksi oli projektin tavoitteissa asetettu kaksi tai kolme kappaletta. Simuloitaviksi kohteiksi valikoituivat Mikkelin tuomiokirkko, akvaariotalo Maretarium ja Kotkan ravintopalveluiden keskuskeittiö Kapyysi. Kohteille ei ollut projektin alkuvaiheessa määritelty tarkemmin, mihin ongelmaan simuloinnilla haluttiin saada ratkaisu. Laskentamallien rakentaminen oli näin ollen aloitettava ilman selkeää päämäärää siitä, mihin ongelmaan laskentamallilla haetaan ratkaisua. Laskentamallien rakentaminen

aloitettiin keskuskeittiö Kapyysistä, vaikka se oli rakennuksista kaikkein suurin ja teknisiltä laitteiltaan monimutkaisin, koska rakennuksesta saatavat materiaalit olivat riittävän tarkat simulointimallin rakentamiseksi. Mikkelin tuomiokirkon ja Maretariumin osalta lähtötietoja haettiin Mikkelin ja Kotkan kaupunkien arkistoista, museovirastosta ja Etelä-Savon maakunta-arkistosta. Molemmista kohteista löydettiin riittävästi lähtötietoja simulointimallin rakentamiseksi.

Simulointia päätettiin hyödyntää energiakatselmuksessa esitettyjen muutosehdotusten vaikutusten arviontiin. Käytännössä tämä tarkoitti muutosten tekemistä simulointimalliin ja simulointituloksen perusteella saadun energiankulutuksen vaikutuksen vertailua muilla menetelmillä laskettuun tulokseen. Simuloinnin avulla saatiin myös lisätietoja esimerkiksi rakennuksen sisäilmaston laadusta muutosten jälkeen. Simuloinnista nähtiin olevan erityisesti hyötyä monimutkaisissa tapauksissa ja erilaisten variaatioiden testaamisessa.

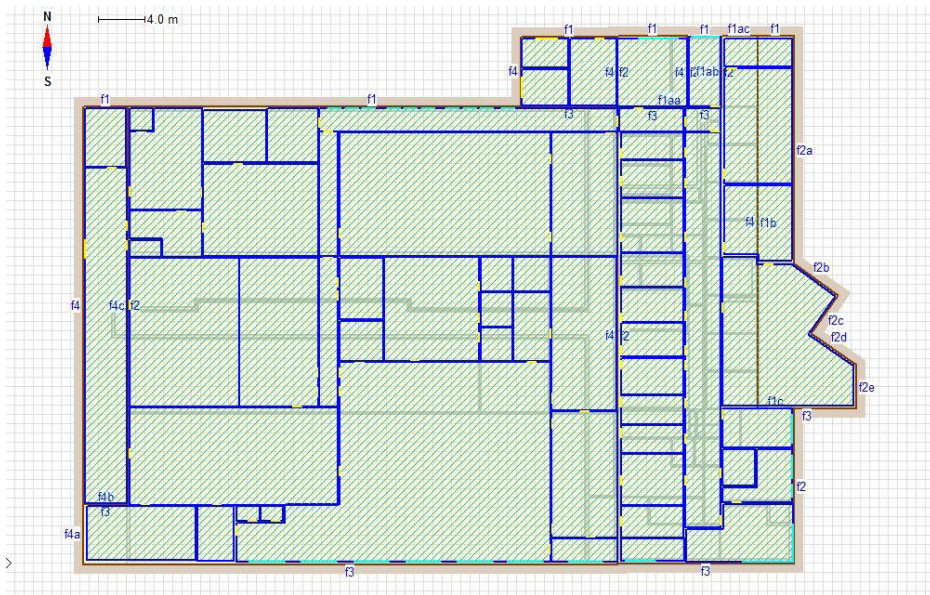
2.1 KAPYYSI

Kapyysi on Kotkassa sijaitseva suurikokoinen keskuskeittiö, jossa valmistetaan päivittäin yli 14 000 ruoka-annosta. Rakennuksen pinta-ala on yhteensä 4 500 m² ja tilavuus noin 20 000 m³. Rakennuksen maan tasalla olevassa kerroksessa sijaitsevat tuotantotilat, lastauslaiturit ja jättilat, joiden yhteenlaskettu pinta-ala on 2 600 m². Rakennuksen 2. kerroksessa sijaitsevat toimistotilat, henkilöstöravintola ja osa teknisistä tiloista, joiden yhteenlaskettu pinta-ala on 1 200 m². Maanpinnan tason alapuolella sijaitsevat henkilökunnan sosiaalilat, saunat, laitohuollon tilat, tekniset tilat ja väestönsuoja. Kellarikerroksen pinta-ala on yhteensä noin 700 m². (Kymen ravintopalvelut 2016.)

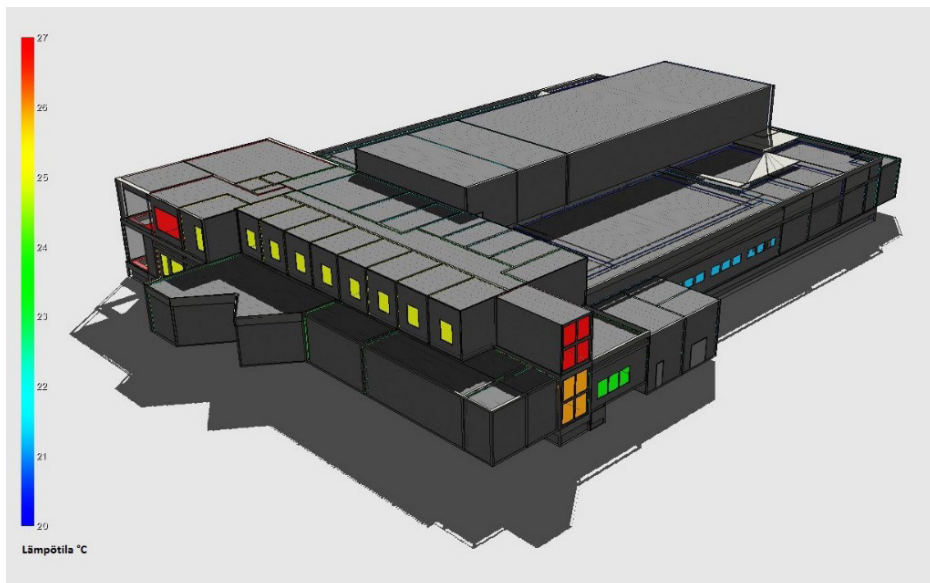
Keittiössä on käytössä kolme erilaista tuotantotapaa. Tuotantotapoja ovat perinteinen lämminvalmistus, cook and chill sekä kylmävalmistus. Lämminvalmistuksessa ruoka tehdään keittiössä valmiiksi ja toimitetaan lämpimänä asiakkaalle. Cook and chill -mallissa ruoka valmistetaan ja jäähdytetään keittiössä ja toimitetaan asiakkaalle kylmänä. Kylmävalmistuksessa ruoka valmistetaan yhdistelemällä esikäsitellyt ruoka-aineet keskenään ja ruoka toimitetaan kylmänä vastaanottajan kypsennettäväksi. Toimintatavat vaativat erilaiset olosuhteet tuotantotiloissa huoneilman lämpötilan suhteen. Vierekkäisten huonetilojen eri lämpötilat monimutkaistavat rakennuksen energiataselaskelmia, koska lämmönsiirto rakennuksen sisällä vyöhykkeiden välillä on jatkuvaa. (Kymen ravintopalvelut 2016.)

Viime vuosina rakennuksen tuotantotilat ovat olleet käytössä arkin ja lauantaisin klo 6–19. Henkilökuntaa tuotantotiloissa on yhteensä noin 60. Rakennus on kytketty Kotkan Energia Oy:n kaukolämpöverkkoon, ja kaukolämpöliittymän tilausteho on 1 100 kW ja tilausvesivirta 18,92 m³/h. Rakennuksessa on yksi tuloilmanvaihtokone, useita erillispoistopuhaltimia ja seitsemän kappaletta lämmöntalteenotolla varustettua tulo-poistoilmanvaihtokonetta. Ilmanvaihtojärjestelmien valvonta ja ohjaus on toteutettu Atmostech-automaatiojärjestel-

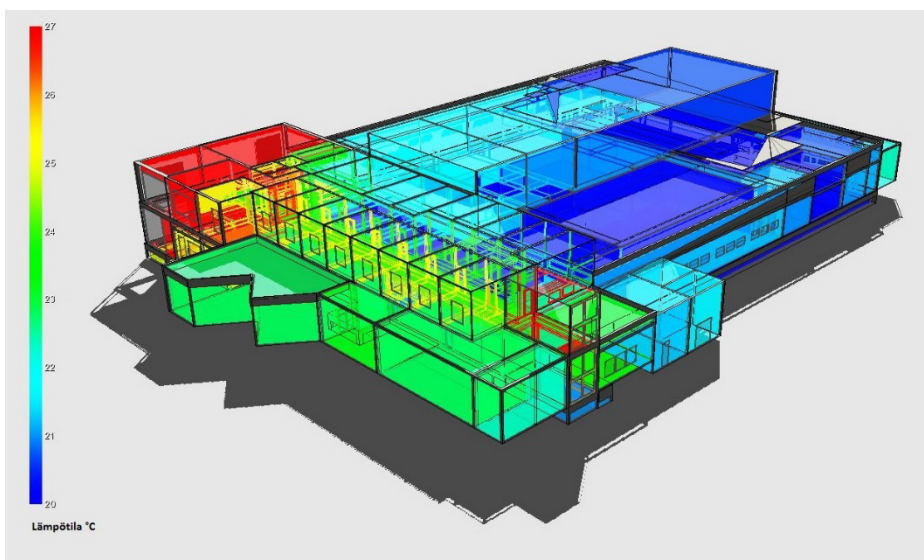
mällä. Kuvassa 20 on esitetty Kapyysin tuotantokerroksen pohjakuva. Kuvissa 21 ja 22 on esitetty Kapyysin animaatiokuvat sisäilman lämpötiloista 28. heinäkuuta klo 16.



Kuva 20. Kapyysin tuotantokerroksen pohjakuva IDA ICE -ohjelmistossa.

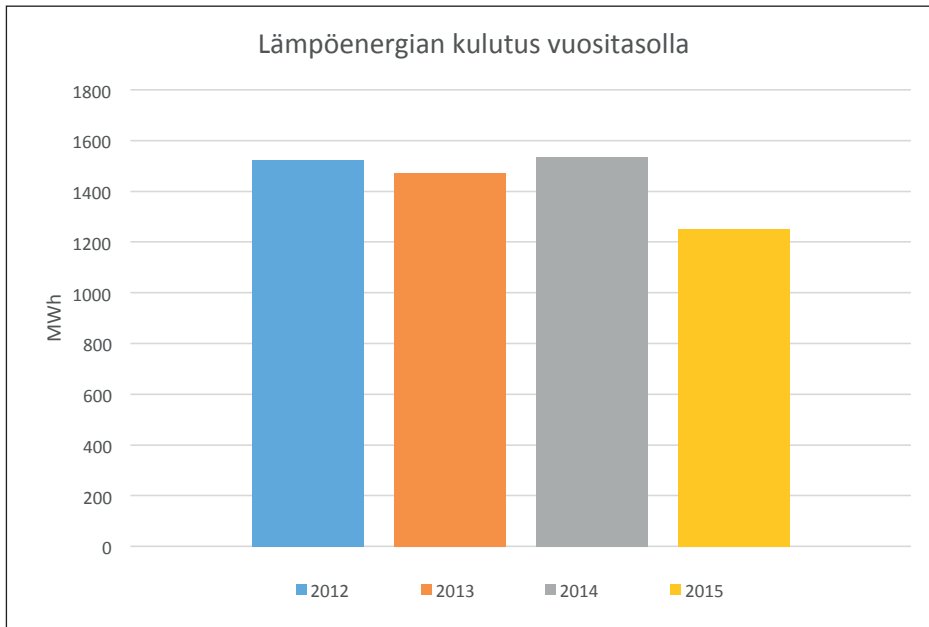


Kuva 21. Kapyysin laskentamallin animaatiokuva huonelämpötiloista 28. heinäkuuta klo 16.00.

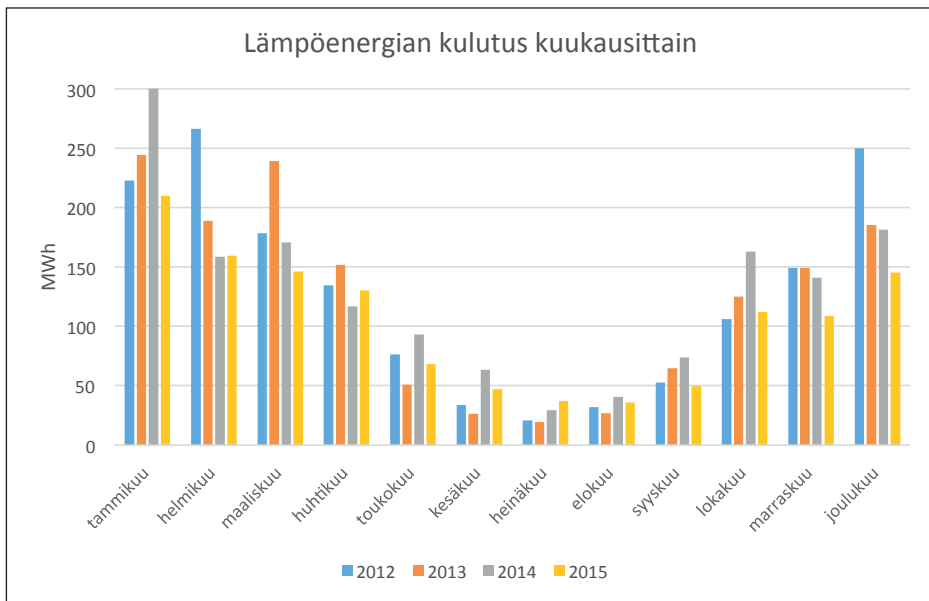


Läbrö 22. Kopyysin laskentamallin animaatiokuva huonelämpötiloista 28. heinäkuuta klo 16.00 läpivalaistuna.

Kymijoen Ravintopalveluiden energiakatselmuksessa saaduista tuloksista simuloinnin avulla käsiteltäviksi valittiin ilmanvaihtoon liittyvät muutosehdotukset. Muutosehdotuksia olivat TK2-ilmanvaihtokoneen (tuloilmakoneen) sisäänpuhalluslämpötilan asetusarvon alentaminen, kaikkien ilmanvaihtokoneiden sisäänpuhalluslämpötilan alentaminen ja vapaajäähdytys TK2-ilmanvaihtokoneella. Simuloinnin tuloksissa on keskitytty vertailemaan pääasiassa energiankulutuksen muutoksia. Kustannussäästöissä on huomioitu vain energian hinta energiayksikköä kohden, eli esimerkiksi säästöt liittymätehon pienentämisestä huipputehontarpeen laskemisen vuoksi eivät kuulu säästölaskelmiin. Kiinteistön lämpöenergian ja sähkön kulutus on huomattava, joten säästöpotentiali on euromääräisesti suuri. Esimerkiksi vuonna 2015 rakennus kulutti lämpöenergiaa 1 250 MW ja sähköä 1 750 MW. Kustannus sähkön ja lämpöenergian kulutuksesta oli yhteensä noin 230 000 €. Kuvissa 23 ja 24 on esitetty rakennuksen mitattu lämpöenergian kulutus vuosina 2012–2015. Normitetun kulutuksen muutoksista voimme havaita, että rakennuksen kulutus ei ole tasaista. Vaihtelun on oletettu johtuvan lämpimän käyttöveden suhteellisen osuuden vaihtelusta. Energiakatselmuksessa lämpimän käyttöveden määräksi on oletettu 55 % kokonaisvedenkulutuksesta.

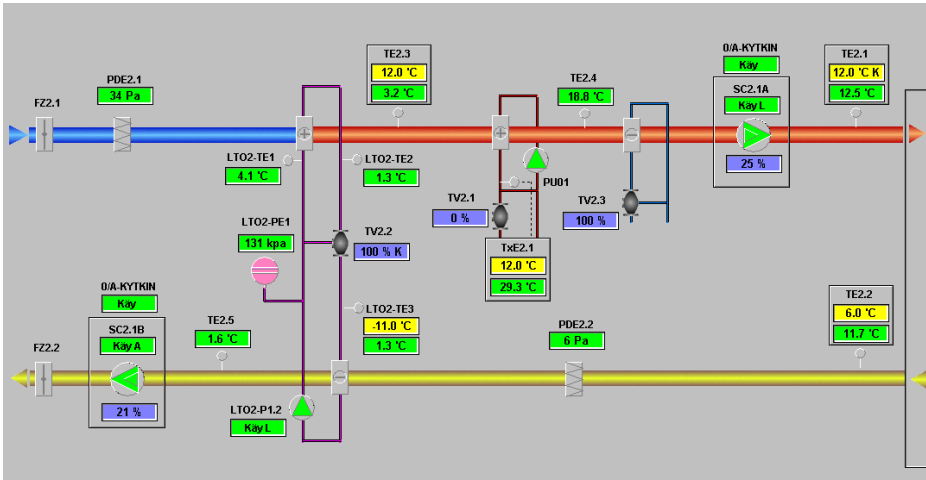


Kuva 23. Kapyysin lämpöenergian kulutus vuosina 2012–2015.



Kuva 24. Kapyysin lämpöenergian kulutus kuukausittain.

Kapyyisin TK2-ilmanvaihtokoneen (tuloilmakoneen) sisäänpuhalluslämpötilan havaittiin energiakatselmoinnissa heiluvan paljon keskiarvolämpötilan ollessa noin 27,6°C. Ilmanvaihtokone palvelee cook cold -tilaa, jossa lämpötilan tavoitearvo on 12°C. Liian korkea sisäänpuhalluslämpötila aiheutti näin myös tarpeetonta jäähdystarvetta. Kone säädettiin niin, että sisäänpuhalluslämpötilan keskiarvo on 11,6°C vaihteluvälin ollessa 11–12°C. Tästä arvioitiin saatavan säästöjä lämmityksen osalta vuositasolla 70,6 MWh. Myös jäähdytyksen tarpeen arvioitiin laskevan 70,6 MWh/a. Kuvassa 25 on esitetty, miltä ilmanvaihtokone TK2 näyttää kiinteistön valvontajärjestelmässä.



Kuva 25. Ilmanvaihtokone TK2 kiinteistön valvontajärjestelmässä.

Energiakatselmuksen mittauksien aikana havaittiin, että osa ilmanvaihtokoneiden sisäänpuhalluslämpötiloista on liian korkeita. Ilmanvaihtokoneiden TK3 ja TK4 osalta arveltiin saatavan suoria säästöjä lämmitysenergian kulutuksessa. TK2-, TK3- ja TK5–8-ilmanvaihtokoneiden tuloilman laskemisella arvioitiin saatavan energiansäästöjä jäähdytyksen tarpeen pienentyessä. TK3 palvelee yhteensä neljää tilaa, joista kylmän keittiön sisälämpötilan asetusrvo on 15°C. TK3:n sisäänpuhalluslämpötila on 16 °C. Sisäänpuhalluslämpötilan laskeminen lopettaisi yllämmittämisen, ja siitä syntyväksi säästökksi on arvioitu 8,6 MWh/a. TK4 palvelee tiskaamoa, jossa lämpötilan havaittiin nousevan korkeaksi, kun tiskaamon laitteistoa kuormitetaan. Laskemalla ilmanvaihtokoneen sisäänpuhalluslämpötilaa voidaan estää sisäilman lämpötilan nousu työympäristössä liian korkealle ja samalla säästää energiaa. Energiakatselmuksessa lämpöenergian säästökksi on vuositasolla arvioitu 28,5 MWh.

Energiakatselmuksessa on tuotu ilmi myös mahdollisuus käyttää vapaajäähdystystä TK2-ilmanvaihtokoneessa ajanjaksolla syyskuun alusta toukokuun loppuun. Vapaajäähdytyksellä olisi mahdollista pudottaa energiankulutusta ilmanvaihtokoneen jäähdytyksen ja lämmityksen osalta sekä kylmätilojen jäähdytyskompressorien osalta. Lämmitysenergian säästökksi

on arvoitu vuositasolla 22 MWh, IV-koneen jäähdytysenergian säästöksi 31 MWh ja kylmätilojen kompressorien säästöksi 32 MWh. Kokonaissäästöksi muodostuu siis arvion mukaan 85 MWh vuositasolla. Kokonaissäästön saavuttaminen edellyttäisi ilmanvaihtokone TK2:n lämmityspatterin uusimista. Lämmityspatteri tulisi muuttaa kestävämpään matalampi sisäänpuhalluslämpötila 5°C.

2.2 MARETARIUM

Maretarium on akvaarioratalo, joka sijaitsee Kotkassa meren rannalla. Akvaarioissa asustaa noin 60 eri kalalajia. Kalat ovat suomalaisia järvi-, joki- ja murtovesilajeja. Kiinteästi asennettuja akvaarioita on 22 kappaletta, joissa on vettä yhteensä 700 000 litraa. Kesällä on kiinteiden altaiden lisäksi käytössä vesiliskojen, sammakoiden ja muiden pieneläinten altaita ja terraarioita. Talvisin pieneläimet horrostavat rakennuksen kellarissa. (Maretarium 2016.)

Vesialtaista suurin eli sylinterin muotoinen Itämeri-allas on avonainen ulkoilmaan rakennuksen katolta. Itämeri-altaan vesitilavuus on 500 000 litraa. Muut 21 vesiallasta ovat avonaisia rakennuksen sisälle, ja niiden yhteenlaskettu vesitilavuus on 200 000 litraa. Altaisiin pumpataan vettä Suomenlahdesta Kotkan edustalta viiden metrin syvyydeltä. Veden suolapitoisuus on vain 0,2 %, joten siinä menestyvät murtovesikalalajien lisäksi myös järvi- ja jokikalalajit. Vesi pumpataan ensin kvartsihiekkapatjan läpi ja puhdistetaan sen jälkeen hiekka- ja ultravioletivalosuodattimien avulla. Pumpattavaa vettä ei yleensä lämmitetä, ellei ole kyse normaalia kylmemmästä talvesta. Veden lämpötila vaihtelee siis vuodenaikojen mukaan, ja näin ollen Maretariumia voidaan pitää luonnonmukaisena akvaariona. (Maretarium 2016.)

Kokemusten mukaan kala-altaiden vedestä haihtuu keskimäärin noin 10 % viikossa. Rakennuksen sisälle haihtuva vesi siirretään koneellisen ilmanvaihdon avulla ulkoilmaan. Rakennuksen sisäilman kosteutta lisäävät myös rakennuksessa oleilevat ihmiset ja ravintolan ruuanlaitossa sisäilmaan siirtyvä kosteus. Maretariumin IDA ICE -mallinnuksella pyritään selvittämään ensisijaisesti, miten erilaiset ilmanvaihdon ohjaustavat vaikuttavat rakennuksen sisäilman laatuun ja energiankulutukseen. Maretariumin simulointimallin animaatiokuva on esitetty kuvassa 26.

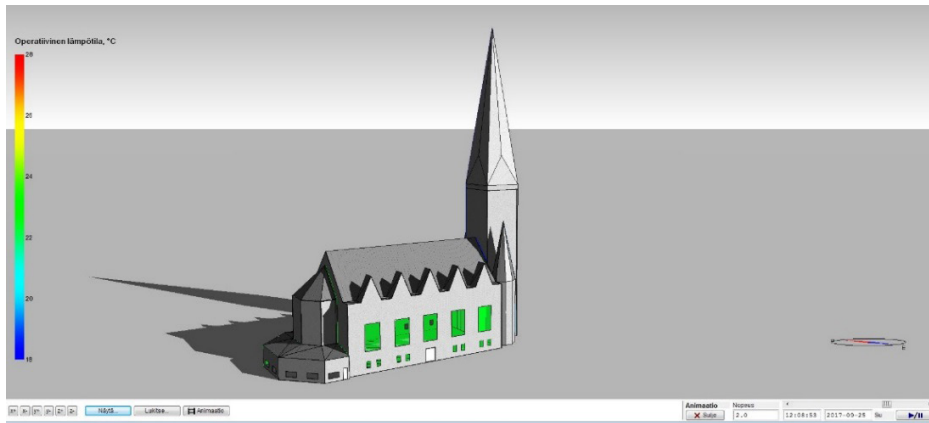


Kuva 26. Maretariumin simulointimallin animaatiokuva.

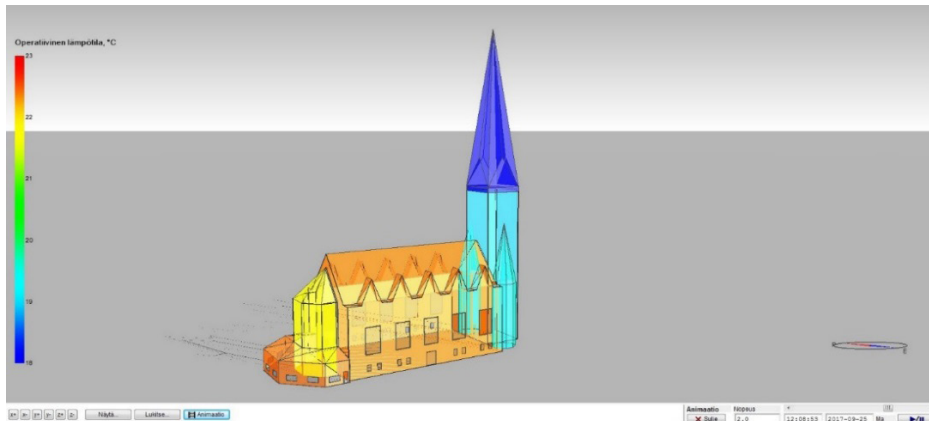
Simuloinnilla arvioitaviksi muutosehdotuksiksi valittiin luentosalin ilmanvaihtokoneen hyötysuhteen parantaminen, ilmanvaihtokoneiden aikataulu- ja CO₂-ohjaus ja valaisimien uusinta. Lisäksi tutkittiin myös poistopuhaltimien aikatauluohjausta. Luentosalin ilmanvaihtokoneen hyötysuhteeksi mitattiin energiakatselmoinnissa 20 %. Hyötysuhteen nostamisen normaalille tasolle eli noin 70 %:iin arvioitiin pudottavan energiankulutusta 24 MWh vuodessa. Ilmanvaihtokoneiden tehon pudottamisella 50 %:n tehotasolle maanantaisin ja tiistaisin arvioitiin säästettävän vuositasolla sähköä 6 300 kWh. Poistopuhaltimien aikatauluohjauksen ilmanvaihtokone 4:n mukaisesti arvioitiin säästävän sähköä vuodessa 5 100 kWh. CO₂-ohjauksesta ja valaistuksen uusimisesta saaduille säästöille ei ollut laskettu muilla menetelmillä vertailuarvoa.

2.3 MIKKELIN TUOMIOKIRKKO

Mikkelin tuomiokirkko oli valittu simulointikohteeksi projektin alkuvaiheessa. Kirkon ilmanvaihto on toteutettu koneellisesti yhdellä ilmanvaihtokoneella. Vertailukohteeksi oli suunniteltu Kotkan kirkkoa, joka on arkkitehtuuriltaan samanlainen, mutta pienempi. Kotkan kirkon energiankulutus oli lähtötietojen perusteella huomattavasti korkeampi kuin Mikkelin kirkon, joten simuloinnilla olisi voitu ehkä saada selville syy energiankulutuksen eroihin. IDA ICE ei kuitenkaan sovellu korkeiden huonetilojen mallintamiseen, koska ohjelma ei osaa laskea ilman kerrostumista. Kotkan kirkossa ei ole koneellista ilmanvaihtoa, ja kohteen lähtötiedot olivat niin puutteelliset, ettei kirkon mallintamisesta nähty olevan hyötyä. Mikkelin kirkko päätettiin mallintaa, vaikka ilman tiedettiin kerrostuvan kirkkosalissa koneellisesta ilmanvaihdosta huolimatta. Mikkelin tuomiokirkon animaatiokuvat on esitetty kuvissa 27 ja 28.



Kuva 27. Mikkelin tuomiokirkon animaatiokuva.

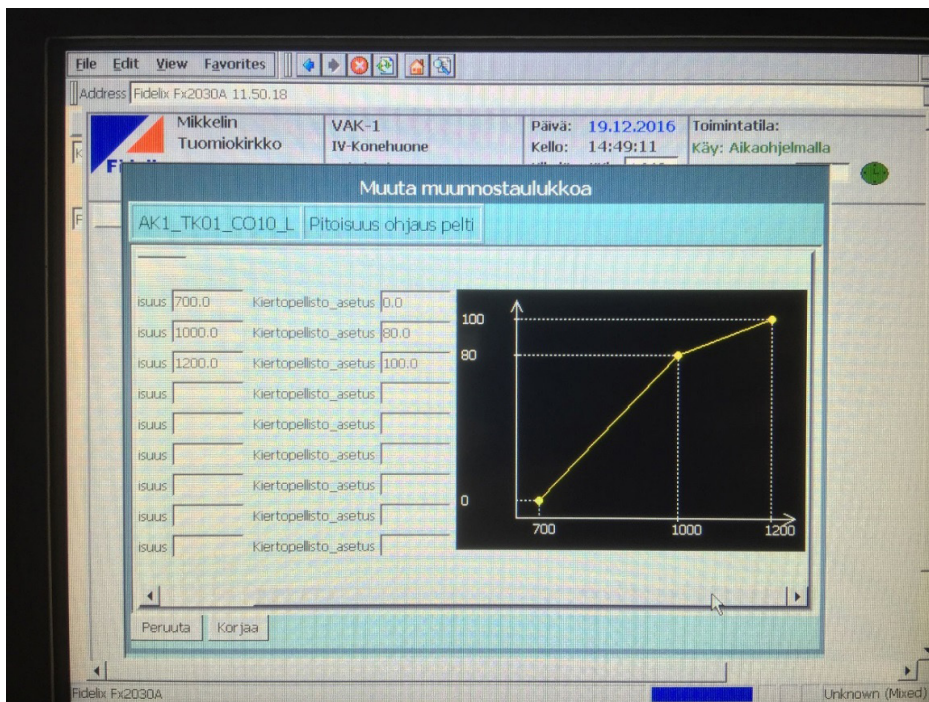


Kuva 28. Mikkelin tuomiokirkon animaatiokuva läpivalaistuna.

Kirkon ilmanvaihto on toteutettu koneellisesti yhdellä tuloilmanvaihtokoneella ja yhdellä poistokoneella. Ilmanvaihtokoneessa on lämmityspatteri, joka lämmitetään kaukolämmöllä. Kirkossa on lisäksi myös vesikiertoinen lämmitysverkko. Ilmanvaihtokanavina käytetään kirkon alla sijaitsevia kanavia. Poistokanavat lähtevät kirkon lattiasta ja päättyvät IV-konehuoneeseen. Poistokanaviin sijoitetuilla säätöpelleillä ohjataan poistoilmakanavan ilmvirtaa hiilidioksidimittauksen perusteella. IV-koneet ovat kaksinopeuskoneita, joiden ohjaus hoidetaan käsikytkimillä. Suintiot käyvät muuttamassa koneen käyntinopeuden kirkon käytön mukaan. Tuloilmakone on esitetty kuvassa 29. Kuvassa 30 on esitetty ilmanvaihtokoneen käyttöliittymä ja hiilidioksidiohjauksen parametritaulukko.



Kuva 29. Mikkelin tuomiokirkon ilmanvaihtokone.



Kuva 30. Mikkelin tuomiokirkon IV-koneen käyttöliittymä.

Mikkelin tuomiokirkon muutosehdotuksista päädyttiin vertailemaan sisäilman lämpötilan tavoitetason pudotusta ja lämpötilan asetusarvon ohjausta ulkolämpötilan mukaan. Kirkossa ollaan ulkovaatteet päällä, joten esimerkiksi kovalla pakkasella ei ole tarvetta nostaa sisälämpötilaa kovin korkealle. Sisäilman lämpötilaa ei nykytilanteessa ohjata ulkoilman lämpötilan mukaan. Nykyinen tavoitetaso sisäilman lämpötilalle on 20 °C, ja uudeksi tavoitetasoksi valittiin 18 °C. Sisälämpötilan asetusarvot suhteessa mitattuun ulkolämpötilaan on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Sisälämpötilan asetusarvo ulkolämpötilan mukaan.

Ulkolämpötila [°C]	Sisälämpötila [°C]
20	20
10	20
0	18
-20	16
-30	16

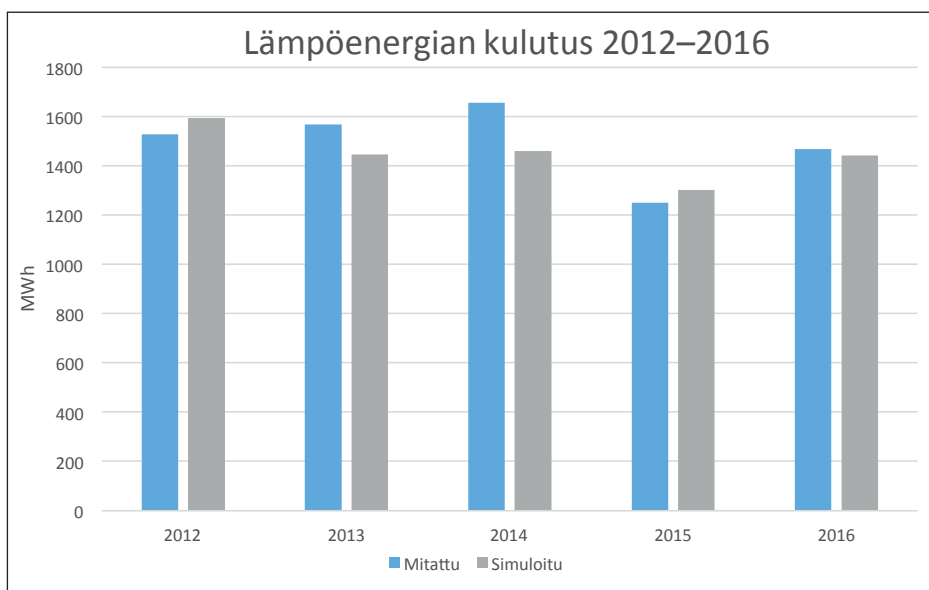
3 TULOSTEN VERTAILU MITTAUSTULOKSIIN

3.1 KAPYYSI

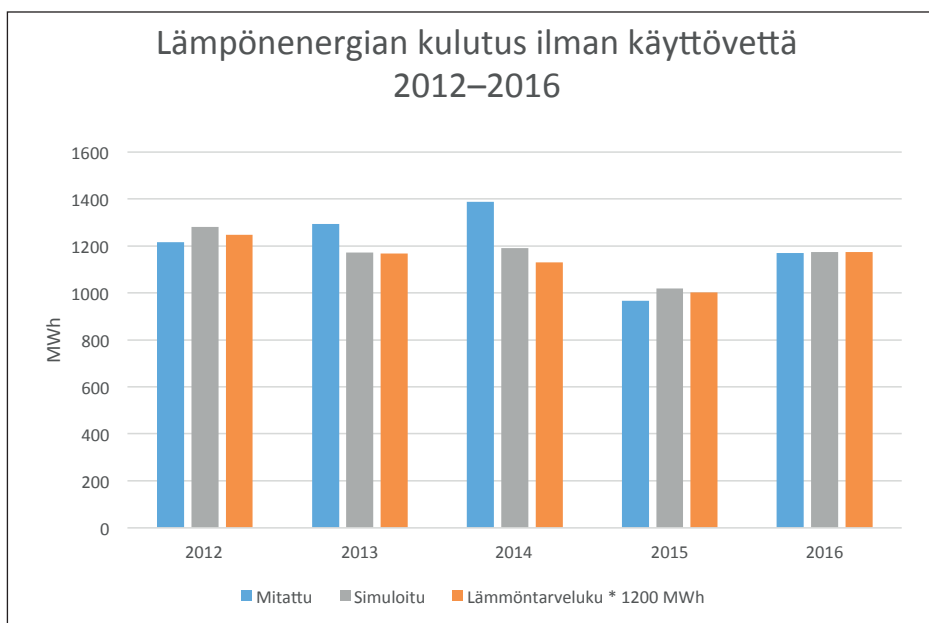
Kapyyisin lähtötietojen perusteella rakennetun simulointimallin kulutus vuosi- ja kuukausitasolla vastasi toteutunutta kulutusta riittäväällä tarkkuudella, jotta simulointimallia voitiin käyttää muutosehdotusten arviointiin. Rakennuksen sisäisien kuormien suuria muutoksia simulointimalli ei pysty ennustamaan. Useamman vuoden tarkastelujaksolla muutoksilla ei pitäisi kuitenkaan olla suurta vaikutusta energiansäästöpotentiaaliin. Simuloinnin avulla oli lähtökohtaisesti tarkoitus saada lisätietoa muutosehdotusten vaikutusten arviointiin ja myös paljastaa mahdollisia virheitä arvioinnin pohjaksi tehdyssä laskennassa.

3.1.1 Simuloidun ja mitatun lämpöenergian kulutuksen vertailu

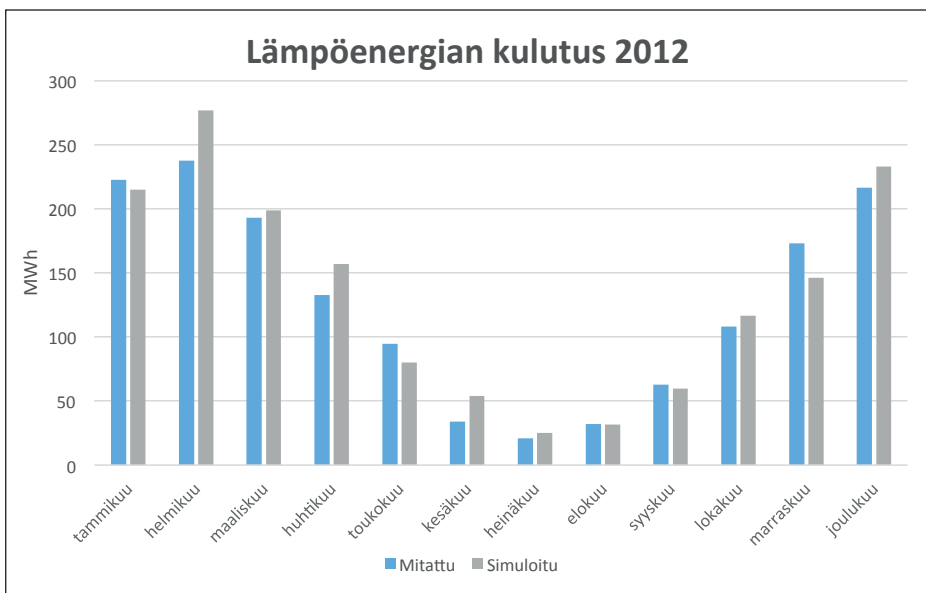
Energiakatselmoinnissa on käytetty lämmöntalteenottolaitteille huonompia hyötysuhteita kuin konetyypille on ilmoitettu. TK1–4-ilmanvaihtokoneille tyypillinen hyötysuhde on 56–60 %. Simuloinnissa on käytetty hyötysuhdetta 56 % ja energiakatselmoinnissa hyötysuhdetta 40–50 %. TK5–6-ilmanvaihtokoneille tyypillinen hyötysuhde on 66,8–88 %. Simuloinnissa on käytetty hyötysuhdetta 66,8 % ja energiakatselmoinnissa hyötysuhdetta 60–70 %. TK1–4-ilmanvaihtokoneen lämmönkulutus on noin 90 % kaikkien ilmanvaihtokoneiden kulutuksesta. Simuloinnissa on käytetty 40 % tehokkaampaa talteenottoa, minkä vuoksi energiasäästöt ovat suurempia. Simulointimallissa on käytetty sisäisenä kuormana valaistuksen osalta arvoa 300 MWh/a ja laitteiden osalta arvoa 695 MWh/a. Kuorma on jaettu tasaisesti joka päivälle. Sähkönkulutuksesta 848 MWh/a on sellaista, jonka vaikutusta lämmönkulutukseen ei tiedetä. Lämpimän veden osuutena on pelkkä arvio, koska mitattua kulutusta ei ole saatavilla. Ei myöskään tiedetä, kuinka paljon lämpimän veden osuudesta siirtyy sisätiloihin lämpöenergiana. Suurimmat erot simuloidun ja mitatun lämmönkulutuksen suhteen tulevat kuukausista, jolloin lämmitysenergian tarve poikkeaa merkittävästi pitkän aikavälin keskiarvosta. Erot johtuvat siitä, että simulointimalli käyttää samansuuruisia ja samalla lailla jakautuvaa sisäistä kuormaa ja kuormitus jakautuu tasaisesti joka kuukaudelle. Kapyyisin mitattu lämpöenergian kulutus ja simuloinnin tuloksena saatu lämpöenergian kulutus on esitetty vuositasolla kuvassa 31 ja 32 ja kuukausitasolla kuvissa 33–37.



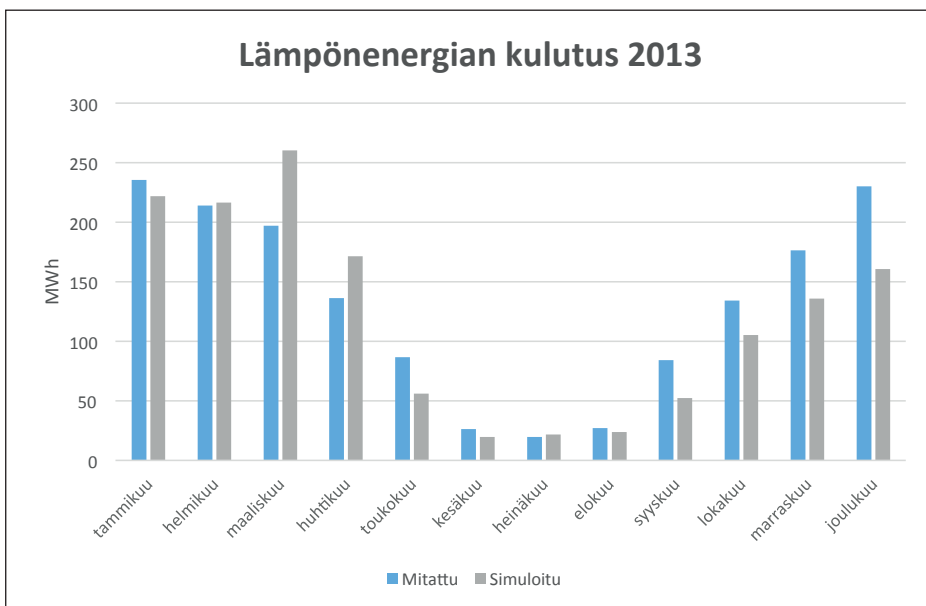
Kuva 31. Lämpöenergian kulutus vuosina 2012–2016.



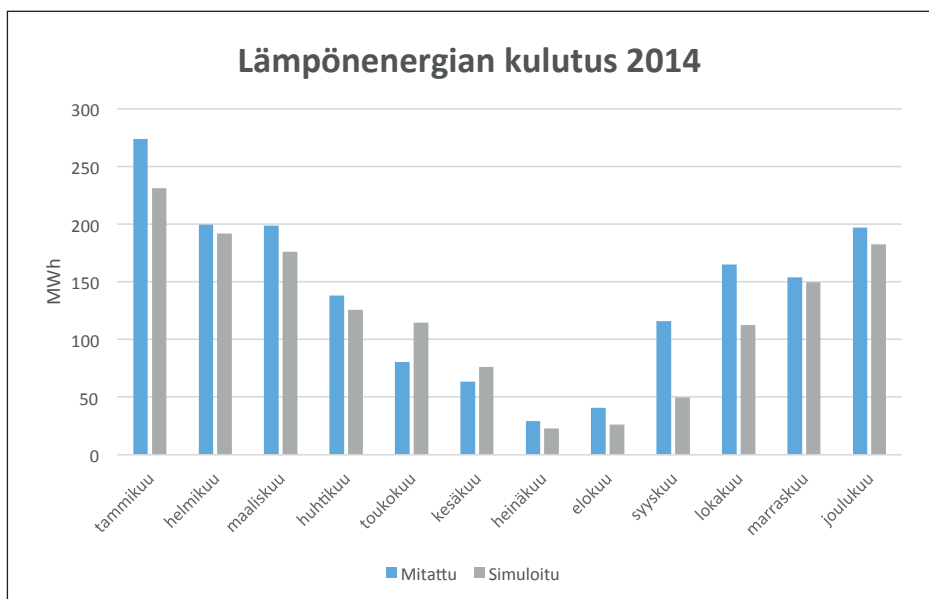
Kuva 32. Lämpöenergian kulutus ilman käyttövettä vuosina 2012–2016.



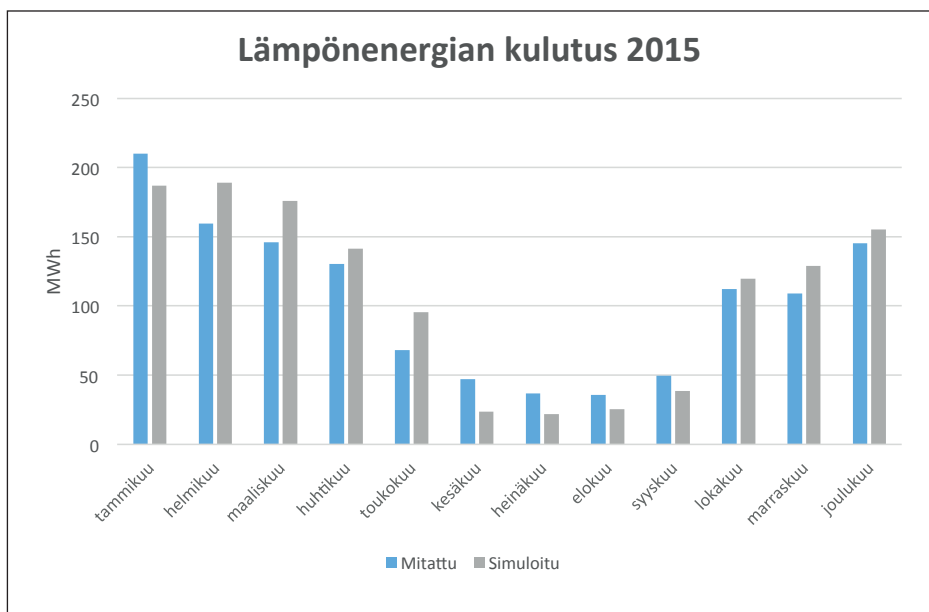
Kuva 33. Lämpöenergian kulutus vuonna 2012.



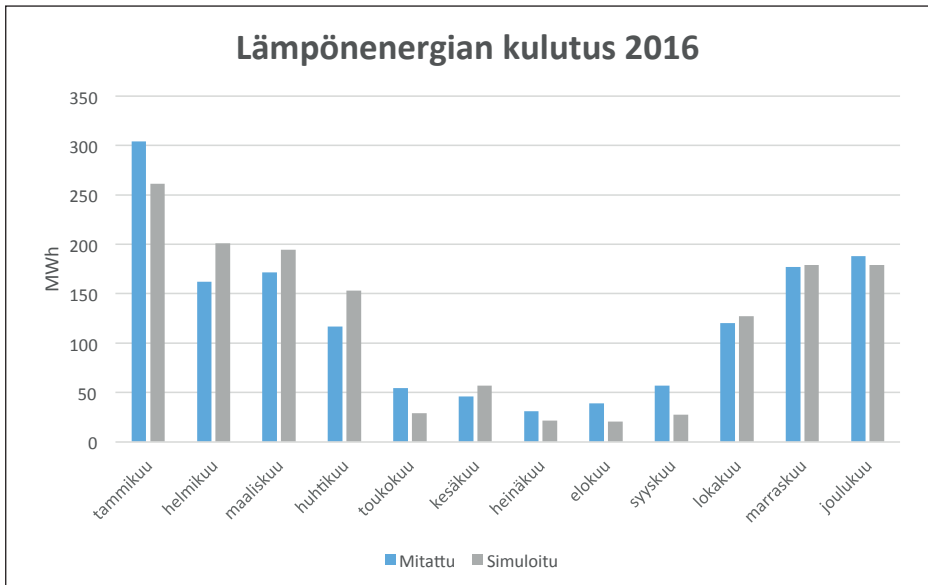
Kuva 34. Lämpöenergian kulutus vuonna 2013.



Kuva 35. Lämpöenergian kulutus vuonna 2014.



Kuva 36. Lämpöenergian kulutus vuonna 2015.



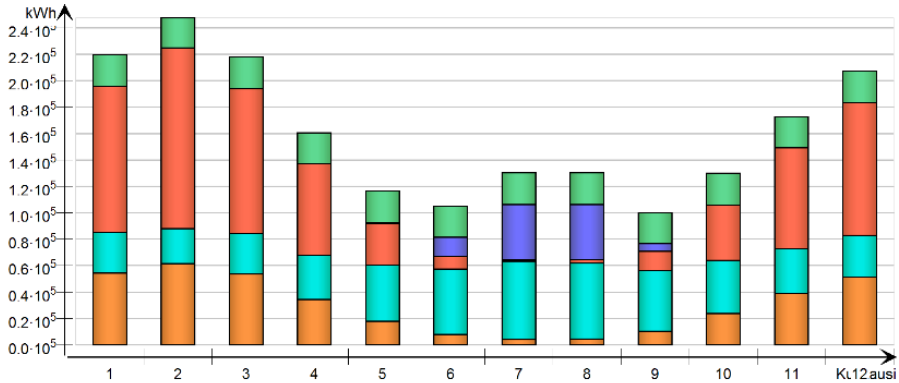
Kuva 37. Lämpöenergian kulutus vuonna 2016.

Energiankulutuksen jakautuminen pitkällä aikavälillä kuukausittain tilalämmityksen, tilajäähdytyksen, IV-koneella tapahtuvan lämmityksen, IV-koneella tapahtuvan jäähdytyksen ja käyttöveden lämmityksen osalta on esitetty kuvassa 38. Energiatase käsittää rakennuksen vaipan, kylmäsiltojen, sisäseinien, ikkunoiden, ilmanvaihdon, vuotoilman, sisäisten kuormien, paikallisten jäähdytys- ja lämmityslaitteiden ja jakeluhäviöiden kautta tapahtuvan lämmön siirtymisen. Energiatase pitkän aikavälin keskiarvolla kuukausittain on esitetty kuvassa 39. Ilmanvaihtokoneiden lämmitysenergian kulutus ja talteenotto, jäähdytysenergian kulutus ja talteenotto ja puhaltimien kuluttama sähköenergia vuositasolla on esitetty kuvassa 40 ja kuukausitasolla kuvassa 41. Kuvassa 40 on esitetty myös ilmanvaihtokoneiden tuloilman kostutukseen käytetty energia, mutta laskennassa on oletettu, ettei ilmaa kostuteta.

Energiankulutus

kWh (tuntuva ja sidottu)

Kuukausi	Tilalämmitys	Tilajäädytys	Lämmitys IV-koneella	Jäädytys IV-koneella	Lämmin käyttövesi
1	54387.0	30862.0	110306.0	0.0	24176.0
2	61638.0	26443.0	136845.0	0.0	22616.0
3	53513.0	30684.0	109685.0	0.0	24176.0
4	34544.0	33448.0	69527.0	3.2	23396.0
5	17881.0	42522.0	31181.0	553.4	24176.0
6	7781.0	49484.0	9698.0	14358.0	23396.0
7	4138.0	59003.0	1169.0	41881.0	24176.0
8	4397.0	57250.0	2660.0	41712.0	24176.0
9	10388.0	46188.0	14509.0	5964.0	23396.0
10	23670.0	40250.0	42003.0	0.0	24176.0
11	38979.0	34046.0	76220.0	0.0	23396.0
12	51275.0	31709.0	100485.0	0.0	24176.0
Yhteensä	362591.0	481889.0	704288.0	104471.6	285432.0

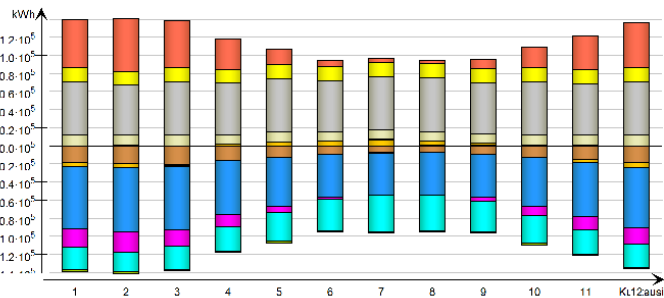


Kuva 38. Energiankulutus kuukausittain.

Energiatase Kaikki tilat

kWh (Vain tuntuva)

Kuukausi	Vaippa ja kylmäsiilat	Sisäseinät ja massat	Ikkunat & auringonsäteily	Kon. tuloilma	Vuotoilma & aukot	Ihmiset	Laitteet	Valaistus	Paikalliset lämmityslaitteet	Paikalliset jäädytyslaitteet	Jakeluhäviöt
1	-18580.8	183.6	-4801.7	-68756.0	-19306.8	11925.9	58867.9	15939.6	52195.8	-25440.7	-1987.6
2	-18333.8	319.7	-3864.1	-71663.0	-21678.1	11939.9	59069.3	14915.5	59152.6	-22156.3	-2154.3
3	-20149.3	-951.2	-1730.6	-69198.3	-18604.7	11899.6	58867.9	15944.1	51355.2	-25306.1	-1971.5
4	-15781.8	-514.2	1608.5	-59485.0	-13372.1	11017.7	56967.3	15427.4	33151.3	-27163.4	-1636.7
5	-12322.0	-594.3	3991.6	-53305.5	-7187.1	10875.7	58866.8	15941.9	17160.2	-32061.5	-1314.3
6	-9028.9	-699.2	5037.7	-47126.7	-1704.5	10078.9	56965.1	15429.6	7467.1	-23367.7	-874.0
7	-7605.6	-449.4	5873.7	-46529.1	1241.6	10055.1	58864.7	15939.6	3971.2	-40541.5	-798.7
8	-6977.1	584.1	4639.6	-46960.7	416.7	10066.2	58864.7	15944.1	4219.9	-39990.3	-855.8
9	-8945.9	381.2	2631.3	-47984.2	-4023.7	10263.7	56965.1	15429.6	9568.8	-33581.1	-1080.8
10	-12490.8	331.1	-304.1	-54124.9	-9962.7	11118.5	58866.8	15939.6	22716.1	-30675.4	-1395.9
11	-15252.1	243.3	-3173.0	-59468.2	-14772.3	11199.8	56967.3	15429.7	37407.7	-26933.4	-1642.5
12	-18669.5	-144.2	-4777.9	-66369.2	-18059.6	11834.9	58866.8	15941.7	49209.4	-25920.7	-1867.9
Yhteensä	-163067.6	-1309.7	5049.2	-690970.8	-127214.3	131876.0	694999.8	188222.3	347975.3	-365138.2	-17680.0
Lämmityksen aikainen (8784.0 h)	-106939.5	15425.0	-17769.4	-312303.6	-144767.8	42305.5	125693.7	66274.5	347825.7	0.0	-14565.7
Jäädytyksen aikainen (0.0 h)	-37044.3	1116.9	13451.0	-164325.0	35332.1	55996.8	378609.2	82931.5	0.0	-364960.4	-2203.7
Muuna aikana	-21083.8	-17851.6	9367.6	-214342.2	-17778.6	33573.7	190696.9	39016.3	149.6	-177.8	-910.6



Kuva 39. Energiatase kuukausittain.

Ilmanvaihtokoneet

IV-kone	Lämmitys, kWh	Jäähdytys, kWh	LTO, kWh	Jäähdytyksen ... kWh	Kostutus, kWh	Puhallimet, kWh
TK1 ja PK1	450931.0	20697.2	564064.0	1214.9	0.0	230381.0
TK2 ja PK2	42691.7	10008.7	22097.4	10727.3	0.0	6296.8
TK3 ja PK3	72035.3	37270.5	199718.7	1882.3	0.0	32207.0
TK4 ja PK4	56549.7	30521.6	163603.0	1233.8	0.0	44547.0
TK5 ja PK5	32579.7	3021.4	98294.0	20.13	0.0	19806.0
TK6 ja PK6	37874.8	2357.6	93667.0	403.9	0.0	19696.0
TK7 ja PK7	5862.3	299.4	5489.6	0.5864	0.0	457.5
TK8 ja PK8	5759.5	292.5	5538.3	2.566	0.0	435.6
Poistoilmapuhallin	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	59768.0
Yhteensä	704284.0	104468.9	1152472.0	15485...	0.0	413594.9

Kuva 40. Ilmanvaihtokoneet.

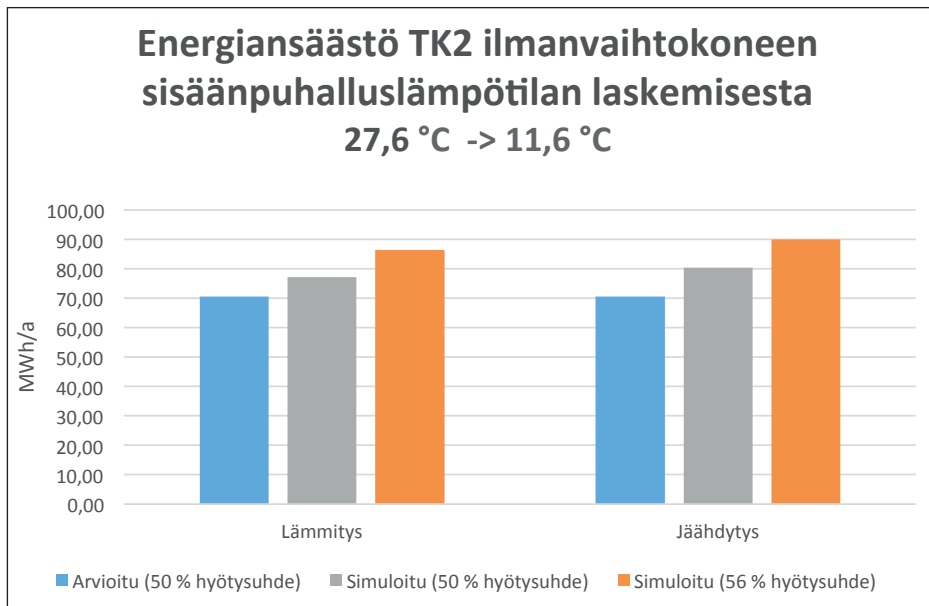
kWh (tuntuva ja sidottu)

Kuukausi	Lämmitys	Jäähdytys	LTO	Jäähdytyksen talteenotto	Kostutus	Puhallimet
1	6603.0	0.0	3997.0	0.0	0.0	516.8
2	8946.0	0.0	4531.0	0.0	0.0	496.8
3	6770.0	0.0	4054.0	0.0	0.0	538.3
4	4265.0	0.0	2308.0	8.1	0.0	509.8
5	1956.0	54.3	336.2	267.4	0.0	533.6
6	311.8	1350.0	0.1	1947.0	0.0	527.1
7	0.0	4077.0	0.0	3775.0	0.0	528.6
8	10.3	3732.0	0.0	3616.0	0.0	550.0
9	555.6	795.4	12.3	1063.0	0.0	525.6
10	2619.0	0.0	642.8	50.8	0.0	522.0
11	4715.0	0.0	2344.0	0.0	0.0	520.5
12	5940.0	0.0	3872.0	0.0	0.0	527.7
Yhteensä	42691.7	10008.7	22097.4	10727.3	0.0	6296.8

Kuva 41. Lämmönkulutuksen vertailu.

3.1.2 TK2-ilmanvaihtokoneen sisäänpuhalluslämpötilan pudotus

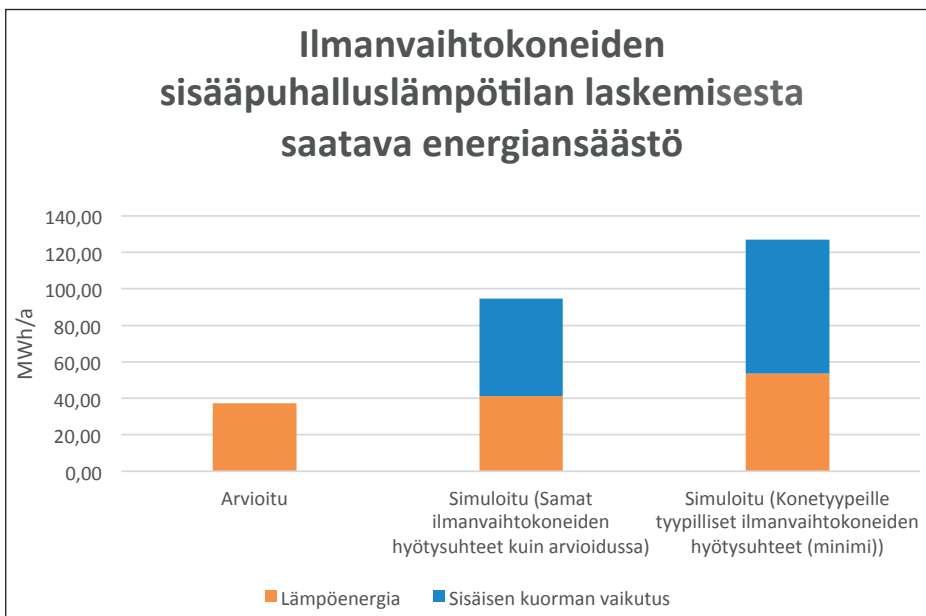
TK2-ilmanvaihtokoneen sisäänpuhalluslämpötilan havaittiin mittauksissa heiluvan paljon keskiarvon ollessa 27,6°C. Koneetta säädettiin, ja lämpötila asettui säädön jälkeen keskiarvoon 11,6°C. Tästä arvioitiin saatavan säästöjä lämmityksen osalta vuositasolla 70,6 MWh. Myös jäähdytyksen tarpeen arvioitiin laskevan 70,6 MWh/a. Simuloinnilla lämmityksen säästökseen saatiin keskimäärin 109,0 MWh/a, ja mittauksien kanssa vertailukelpoinen säästö vuodelle 2015 oli 86,5 MWh. Simuloinnilla jäähdytystarpeen muutokseksi saatiin keskimäärin 113,4 MWh/a, ja mittauksien kanssa vertailukelpoinen säästö vuodelle 2015 oli 90,0 MWh. Vertailukelpoisena tuloksena voidaan pitää arviota ja simuloinnin tulosta, jotka on molemmat tehty sillä oletuksella, että ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton hyötysuhde on 50 %. Ilmanvaihtokoneelle tyypillinen hyötysuhde on 56–60 %, minkä vuoksi simulointi suoritettiin myös hyötysuhteella 56 %. Tulokset lämmitys- ja jäähdytystarpeen muutoksista on esitetty kuvassa 42.



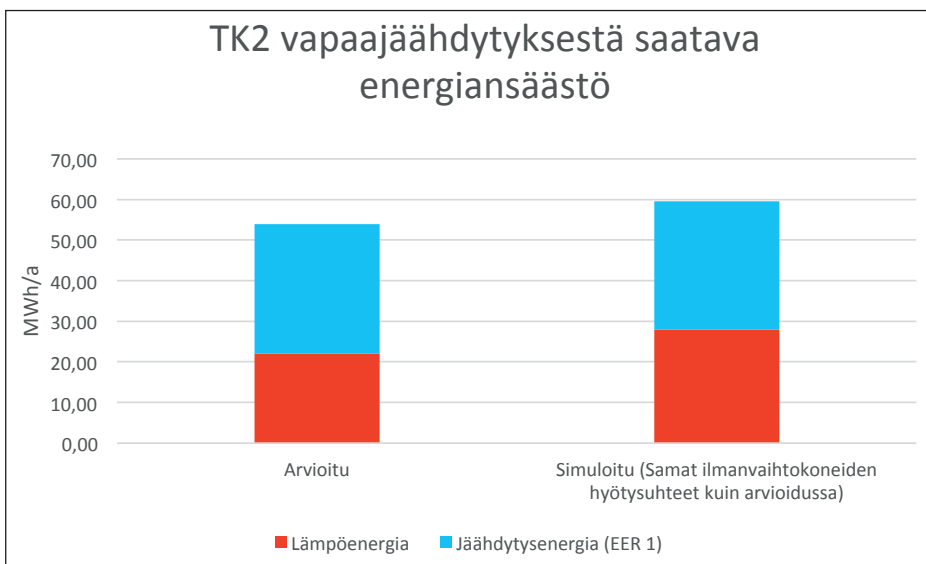
Kuva 42. TK2-ilmanvaihtokoneen sisäänpuhalluslämpötilan asetusravon laskeminen.

3.1.3 Ilmanvaihtokoneiden sisäänpuhalluslämpötilojen pudotus

Ilmanvaihtokoneiden sisäänpuhalluslämpötilojen pudottamisesta oli arvioitu energiakatselmoinnissa saatavan lämpöenergian säästöä 37,14 MWh/a. Simuloinnilla vertailukelpoinen keskimääräinen lämpöenergian säästö oli 101,6 MWh/a, kun ilmanvaihtokoneiden hyötysuhteena käytettiin arvioinnissa käytettyjä hyötysuhteita. Laskentamalli huomioi sisäisen kuorman vaikutuksen, jota ei ole huomioitu energiakatselmoinnissa. Jos sisäistä kuormaa ei huomioitaisi simuloinnissa, energiansäästö olisi 41,25 MWh. Kun laskennassa käytettiin konetyypeille huonointa tyypillistä hyötysuhdetta 56 % ja sisäistä kuormaa ei huomioitu simuloinnissa, energiansäästö oli 73,5 MWh. Sisäinen kuorma huomioiden energiansäästökseksi saatiin 127 MWh. Sisäisen kuorman kautta tapahtuva säästö tulee siitä, ettei tiloja lämmitetä yli tavoitelämpötilan. Jäähdytyskuorma pysyi simuloinnin perusteella alkuperäisellä tasolla. Ilmanvaihtokoneiden sisäänpuhalluslämpötilan pudotuksesta arvioidut ja simuloinnin perusteella tulokset saatavat energiansäästöt on esitetty kuvassa 43.



Kuva 43. Ilmanvaihtokoneiden sisäpuhalluslämpötilan laskemisesta saatava energiansäästö.



Kuva 44. TK2-ilmanvaihtokoneen vapaajähdytyksestä saatava energiansäästö.

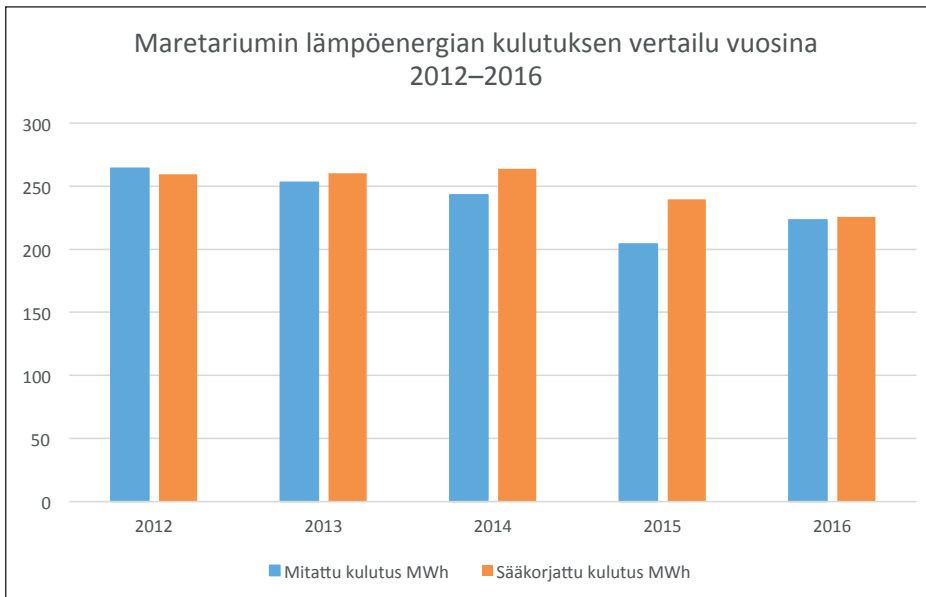
3.1.4 TK2-ilmanvaihtokoneen vapaajäähdytys

Energiakatselmoinnissa oli tuotu esille mahdollisuus käyttää vapaajäähdytystä TK2-ilmanvaihtokoneessa marraskuun alusta huhtikuun loppuun eli 181 vuorokauden ajan. Riittävän matalaksi sisäänpuhalluslämpötilaksi oli arvioitu 5°C, jolloin jäähdytystehoksi tulee 1,7 kW. Muutoksen oli arvioitu vähentävän lämpöenergian kulutusta 22 MWh/a. Simuloinnin perusteella lämpöenergian kulutus pienenesi 28 MWh/a. Muutoksen oli arvioitu vähentävän jäähdytyskompressorin sähkönkulutusta 31,94 MWh/a, kun arvioinnissa käytettiin kylmäkerrointa 1 (EER). Simuloinnin perusteella jäähdytyskompressorin sähkönkulutus laskee 15,8 MWh/a. Simuloinnissa kylmäkertoimena (EER) oli 2. Arvioidun sähkönkulutuksen 31,94 MWh/a kanssa vertailukelpoinen simulointitulokseksi on siis 31,6 MWh/a. Energiakatselmoinnissa arvioitu ja simuloinnin tuloksena vapaajäähdytyksestä saatava energiansäästö on esitetty kuvassa 44.

Mittausten perusteella kylmäkerroin on vähintään kaksi, joten energiakatselmoinnissa on arvioitu energiansäästöä liian pienellä kylmäkertoimella, jolloin energiansäästö on suurempi. Vapaajäähdytyksestä arvioitiin saatavan säästöjä 5 400 € ja simuloinnin perusteella 4 700 €. Simuloinnin perusteella jäähdytyksestä saatavat säästöt olivat 1 000 € pienemmät ja lämmityksestä saatavat säästöt noin 300 € suuremmat kuin energiakatselmoinnissa oli arvioitu. Lisäksi simuloitiin myös variaatio, jossa sisäänpuhalluslämpötilan asetusarvo oli 3°C. Muut lähtöarvot pysyivät ennallaan. Simuloinnin perusteella lämpöenergian kulutus pienenesi 4 MWh/a lisää eli yhteensä 32 MWh/a verrattuna nykytilaan. Simuloinnin perusteella jäähdytyskompressorin sähkönkulutus laskee 4,4 MWh/a lisää eli yhteensä 19,8 MWh/a verrattuna nykytilaan. Simuloinnin perusteella TK2-ilmanvaihtokoneen sisäänpuhalluslämpötilan laskeminen säästäisi rahaa vuodessa 5 250 €.

3.2 MARETARIUM

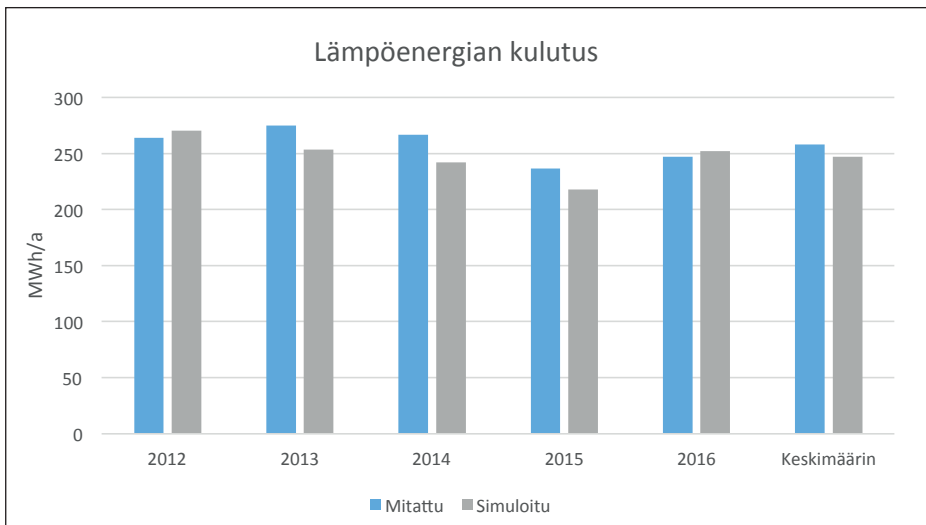
Maretariumin lähtötietojen perusteella rakennetun simulointimallin kulutus vuosi- ja kuukausitasolla vastasi toteutunutta kulutusta riittävällä tarkkuudella, jotta simulointimallia voitiin käyttää muutosehdotusten arviointiin. Rakennuksen sisäisten kuormien suuria muutoksia simulointimalli ei pysty ennustamaan. Useamman vuoden tarkastelujaksolla muutoksilla ei pitäisi kuitenkaan olla suurta vaikutusta energiansäästöpotentiaaliin. Simuloinnin avulla oli lähtökohtaisesti tarkoitus saada lisätietoa muutosehdotusten vaikutusten arviointiin ja myös paljastaa mahdollisia virheitä arvioinnin pohjaksi tehdyssä laskennassa. Simulointimallissa käytettiin uimahallien simulointiin suunniteltuja allasmoduuleita. Allasmoduulit laskevat altaista höyrystyvän veden vaikutuksen rakennuksen energiankulutukseen ja sisäilman kosteuteen. Maretariumin toteutunut energiankulutus sääkoryttuna on ollut pienimmillään 226 MWh ja suurimmallaan 264 MWh vuosina 2012–2016. Sääkoryttu energiankulutus on siis vaihdellut 38 MWh vuositasolla. Rakennuksen energiankulutus ei siis ole riippuvainen pelkästään sääolosuhteista. Mitattu ja sääkoryttu energiankulutus on esitetty kuvassa 45.



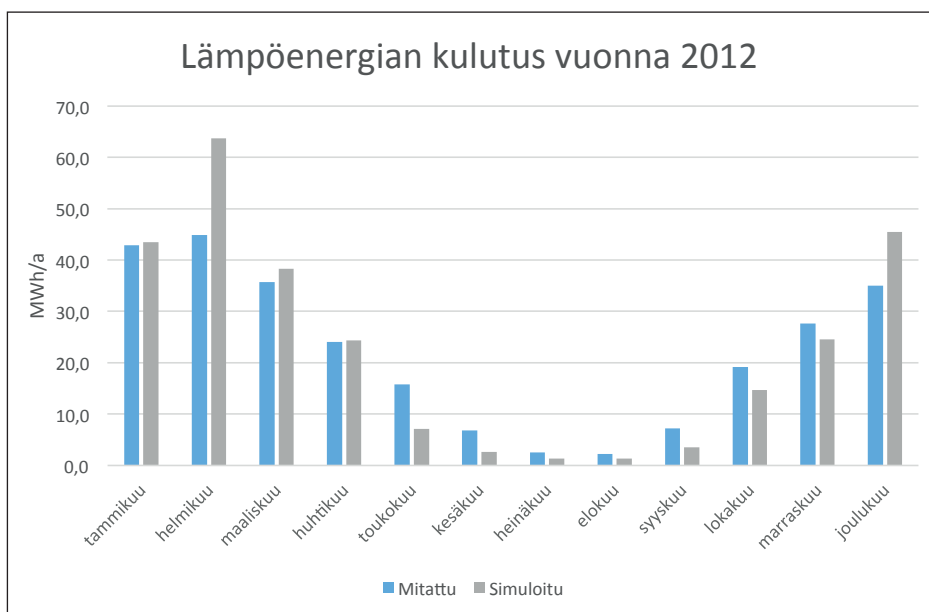
Kuva 45. Maretariumin lämpöenergian kulutuksen vertailu vuosina 2012–2016.

3.2.1 Simuloidun ja mitatun lämpöenergian kulutuksen vertailu

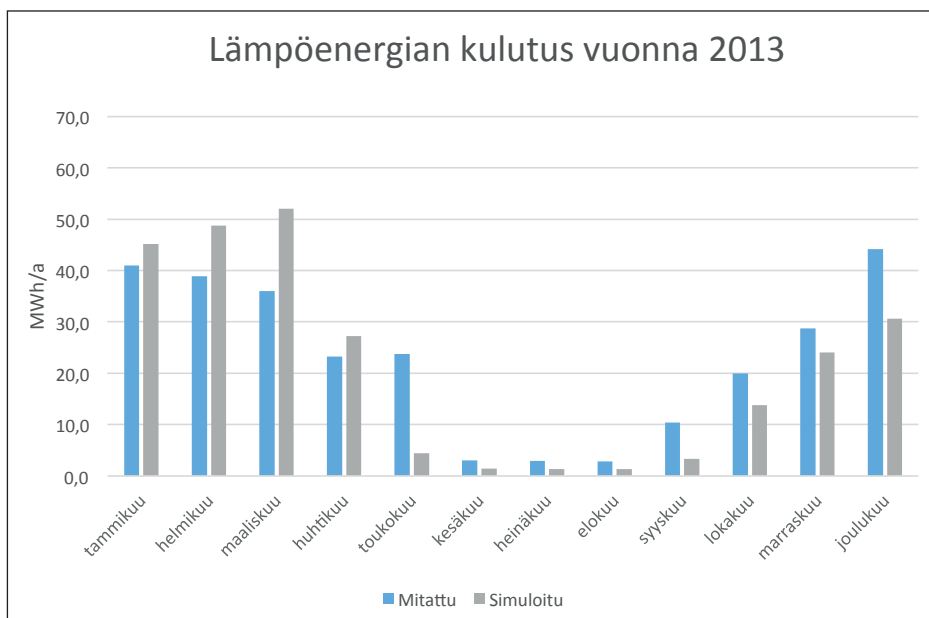
Maretariumin mitattu lämpöenergian kulutus ja simuloinnin tuloksena saatu lämpöenergian kulutus on esitetty vuositasolla kuvassa 46 ja kuukausitasolla kuvissa 47–51.



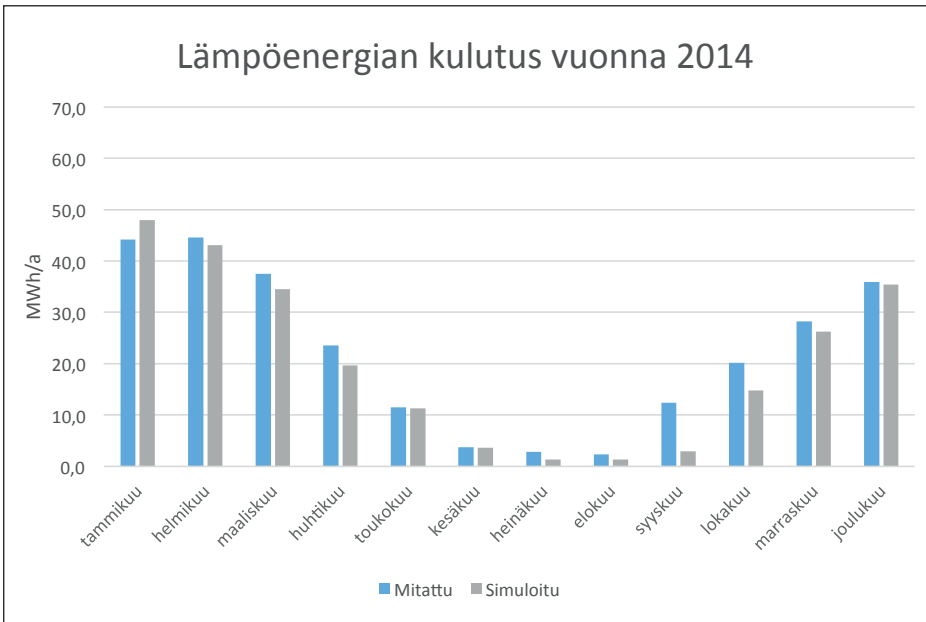
Kuva 46. Lämpöenergian kulutus.



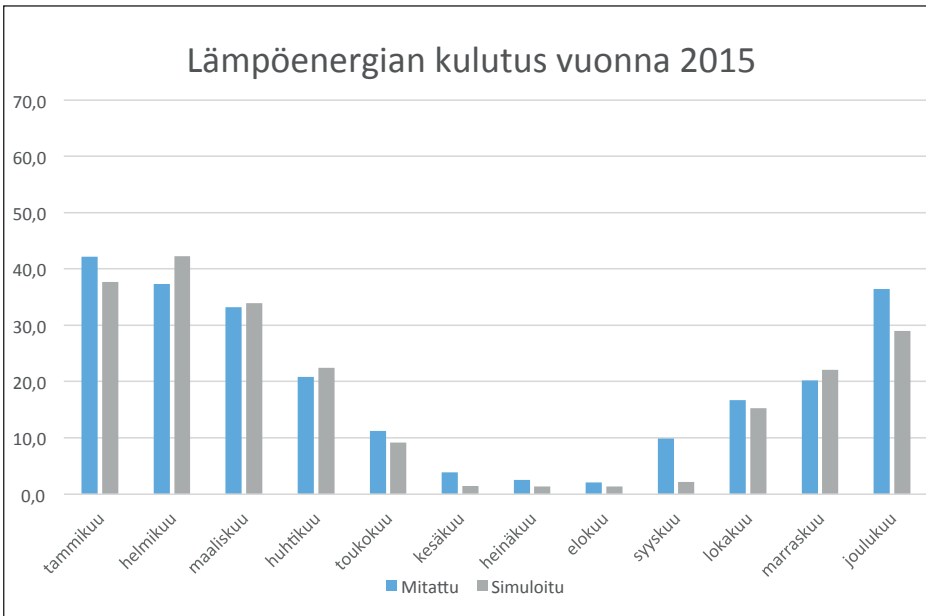
Kuva 47. Lämpöenergian kulutus vuonna 2012.



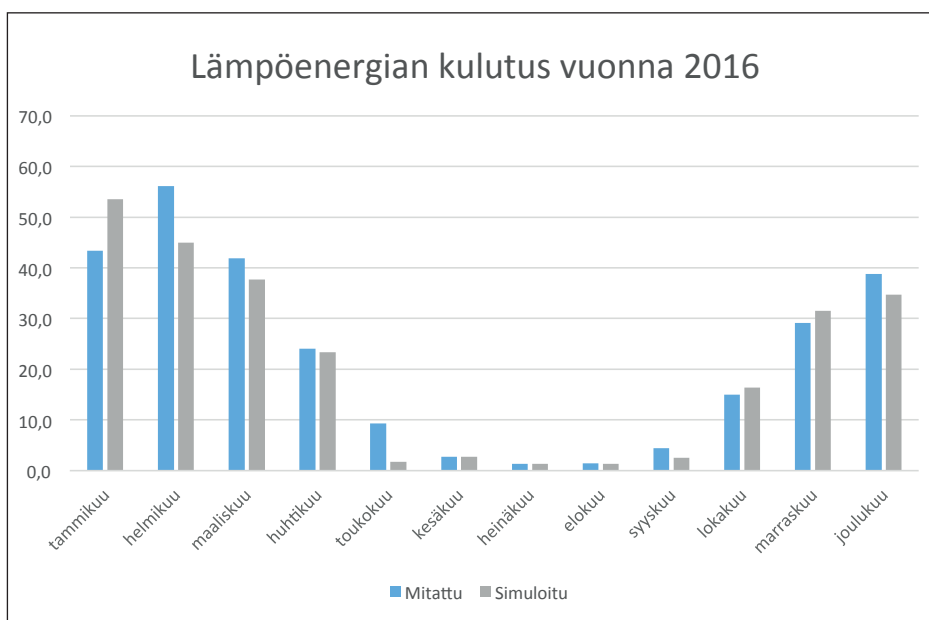
Kuva 48. Lämpöenergian kulutus vuonna 2013.



Kuva 49. Lämpöenergian kulutus vuonna 2014.



Kuva 50. Lämpöenergian kulutus vuonna 2015.



Kuva 51. Lämpöenergian kulutus vuonna 2016.

3.2.2 Luentosalin ilmanvaihtokoneen hyötysuhteen parantaminen

Luentosalin ilmanvaihtokoneen hyötysuhteeksi mitattiin energiakatselmuksissa 20 %. Hyötysuhteen nostamisen normaalille tasolle eli noin 70 %:iin arvioitiin pudottavan energiankulutusta 24 MWh vuodessa. Simuloinnilla tulokseksi saatiin 26,2 MWh vuodessa.

3.2.3 Ilmanvaihtokoneiden ja poistopuhaltimien aikatauluohjaus

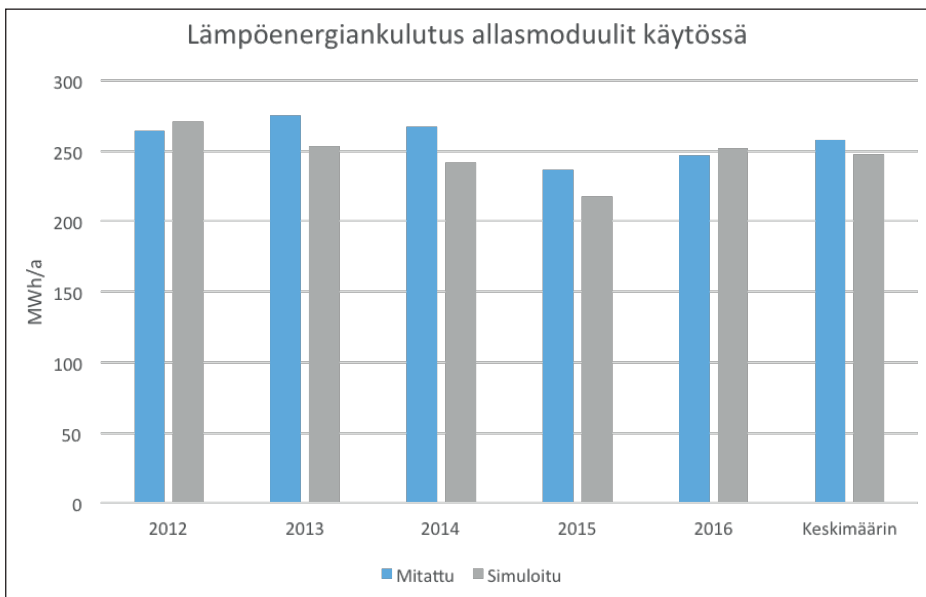
Ilmanvaihtokoneiden tehon pitämisen 50 %:n ilmanvaihtotasolla koko ajan maanantaisin ja tiistaisin arvioitiin pudottavan sähkönkulutusta 6 300 kWh vuodessa. Simuloinnilla tulokseksi saatiin 5 400 kWh, jonka lisäksi lämmitysenergian kulutus pieneni 4,6 MWh. Energiakatselmuksessa lämmitysenergian kulutuksen pienenemistä ei ollut huomioitu ollenkaan, joten simuloinnilla saatiin tuotettua lisäarvoa muutosehdotuksen arviointiin.

Poistopuhallinten pf4.2, pf5, pf6, pf7 ja pf8 käyntinopeuden pudottamisesta puolelle teholle ilmanvaihtokone TK4:n mukaan arvioitiin kertyvän sähköenergian säästöä vuodessa 5 100 kWh. Simuloinnilla tulokseksi saatiin sähkönsäästöksi 6 800 kWh/a, jonka lisäksi lämmityksen tarve pieneni 6,5 MWh/a. 6 800 kWh:n säästö sähköenergian kulutuksessa vuositasolla koostui 3 700 kWh:n säästöstä IV-koneissa TK1–4 ja 3 100 kWh:n säästöstä poistopuhaltimissa.

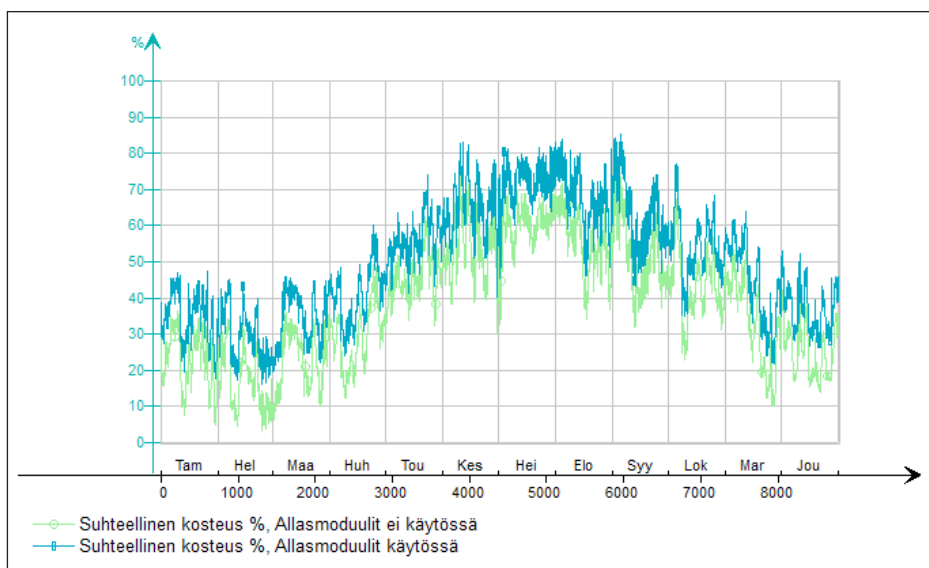
Poistopuhaltimien ja ilmanvaihtokoneiden sähkönsäästöksi saatiin simuloinnin perusteella siis yhteensä 12,2 MWh/a. Energiakatselmoinnissa vastaavaksi sähkönsäästöksi oli arvioitu 11,1 MWh/a, joka simuloinnin perusteella tulisi toteutumaan. Lisäksi kokonaissäästö poistopuhaltimien ja ilmanvaihtokoneiden aikatauluohjauksesta lämmitysenergiassa oli simuloinnin perusteella yhteensä 11,1 MWh/a. Lämmitysenergian säästöä ei ollut huomioitu energiakatselmoinnissa.

3.2.4 Allasmoduulien käyttö

Ilman allasmoduuleita Maretariumin kaukolämmönkulutus oli simuloinnin perusteella keskimäärin 214 MWh vuodessa. Laskutettu kaukolämmönkulutus on ollut keskimäärin 258 MWh/a. Ilman allasmoduulien käyttöä simuloitu kaukolämmönkulutus oli siis noin 44 MWh alempi kuin laskutettu kaukolämmönkulutus. Allasmoduulien kanssa Maretariumin kaukolämmönkulutus oli simuloinnin perusteella keskimäärin 248 MWh/a, eli altaiden vaikutus lämpöenergian kulutukseen oli noin 34 MWh/a. Lämpöenergian kulutus vuositasolla laskentamallissa, joka sisältää allasmoduulit, on esitetty kuvassa 52. Kala-altaista höyrystyvä vesi kasvattaa sisäilman suhteellista kosteutta. Allasmoduulien vaikutus Maretariumin sisäilman kosteuteen on esitetty kuvassa 53.



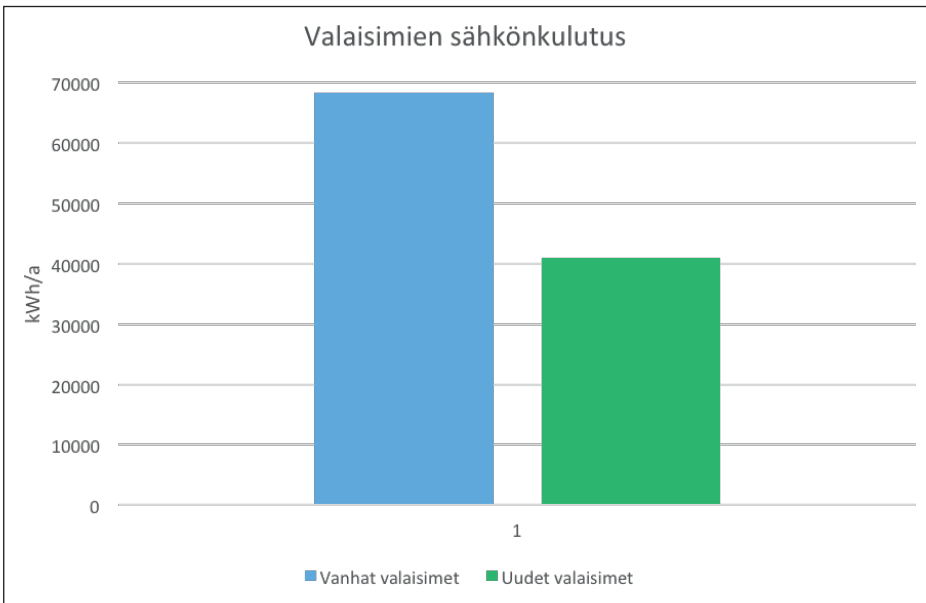
Kuva 52. Lämpöenergian kulutus, kun allasmoduulit ovat käytössä.



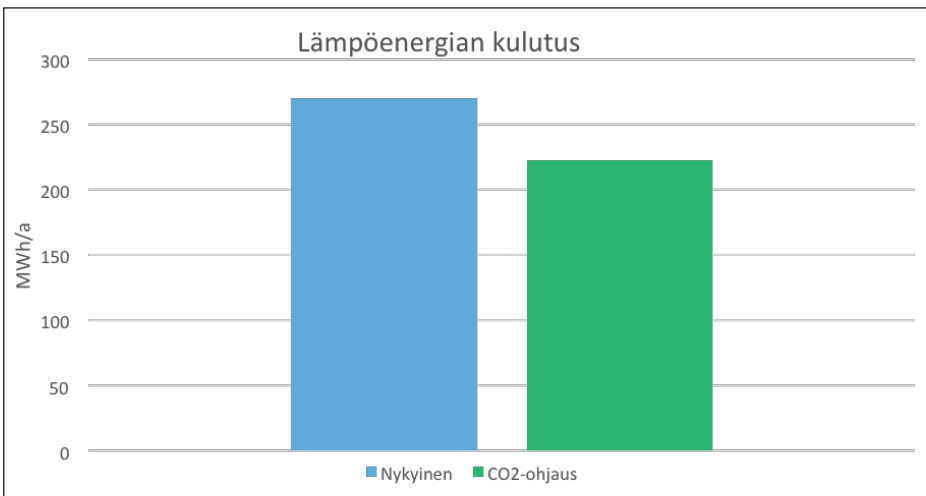
Kuva 53. Allasmoduulien vaikutus sisäilman kosteuteen.

3.2.5 Valaisimien uusiminen

Valaisimien uusimisen perusoletuksena oli, että loistevalaisimet korvataan ledivalaisimilla, joiden energiankulutus on 70 % alkuperäisten valaisimien energiankulutuksesta. Vastaavasti halogeenivalaisimet korvataan ledivalaisimilla, joiden energiankulutus on 50 % alkuperäisestä energiankulutuksesta. Valaisimien uusiminen pienentäisi rakennuksen energiankulutusta simuloinnin perustella 27 500 kWh vuodessa eli noin 40 %. Samalla jäähdystystarve pienenesi 300 kWh vuodessa. Valaisimien uusimisen vaikutus olisi rahallisesti noin 2 200 € sähköenergian osalta vuositasona. Valaisimien uusiminen kasvattaisi kuitenkin lämpöenergian kulutusta 14 700 kWh vuodessa, eli kaukolämpölasku kasvaisi noin 900 €. Kokonaissästäöksi tulisi näin ollen vuositasona 1 300 €. Valaisimien uusimisista aiheutuvat kustannukset eivät olleet vielä saatavilla simulointia tehdessä, joten investoinnin kannattavuutta ei voitu laskea. Valaisimien sähkönkulutus vanhoilla ja mahdollisilla uusilla valaisimilla on esitetty kuvassa 54.



Kuva 54. Valaisimien sähkönkulutus.

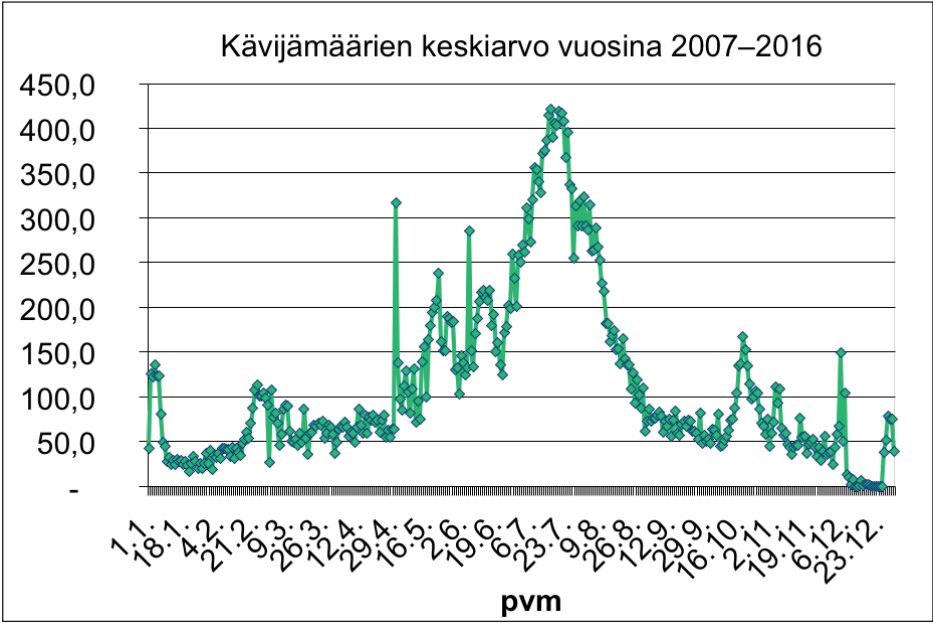


Kuva 55. Lämpöenergian kulutus.

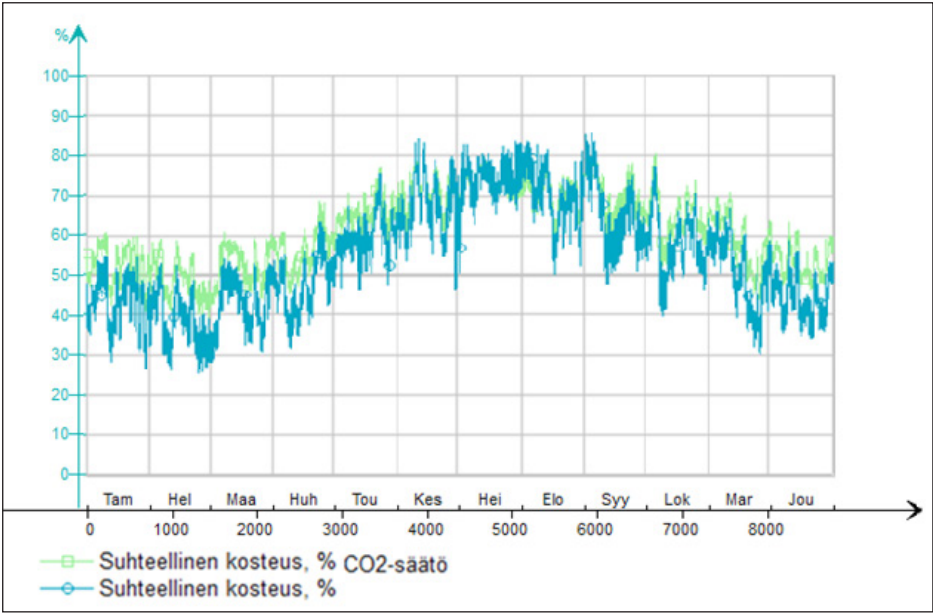
3.2.6 Sisäilman hiilidioksidipitoisuuden perustuva ilmanvaihdon ohjaus

Maretariumin ilmanvaihtoa ohjataan tällä hetkellä aikatauluohjauksella. Ilmanvaihtoa olisi mahdollista ohjata myös sisäilman hiilidioksidipitoisuuden perustuen. Simuloinnin avulla päätettiin kokeilla, miten paljon hiilidioksidiohjaus vaikuttaisi rakennuksen energiankulutukseen. Simuloinnin lähtötiedoiksi oli selvitettävä Maretariumin kävijämäärät. Perusoletuksina oli, että ilmanvaihtokoneet ovat normaalisti 25 %:n tehotasolla Maretariumissa, luentosalissa ja kahviossa ja että ilmanvaihtoa tehostetaan 26–100 %:n tehotasolle, kun ilman hiilidioksidipitoisuus on 700 ppm–1 100 ppm. Lämpöenergian kulutus pieneni simuloinnin perusteella 48 MWh/a ja sähkönkulutus noin 57 MWh/a. Jäähdytystarve pieneni 2,1 MWh/a, ja ilmanvaihtokoneiden sähkönkulutus pieneni 54,9 MWh/a eli noin 50 %. Lämpöenergian kulutuksen muutos hiilidioksidiohjausta käyttäen on esitetty kuvassa 55.

Sisäilman hiilidioksidipitoisuuden pohjautuva ilmanvaihto tehostuu selvästi vain, kun rakennuksessa olevien ihmisten lukumäärä on niin suuri, ettei 25 %:n tehotasolla oleva ilmanvaihto vaihda riittävästi ilmaa. Maretariumin kävijämäärät ovat suurimmillaan kesäkuukausina, jolloin lämmitystarve on matalin. Simulointimallilla voitiin tarkastella myös hiilidioksidiohjauksen vaikutuksia sisäilman kosteuteen. Talvella rakennuksen suhteellinen kosteus oli korkeampi, koska kävijämäärät ovat pienempiä ja ilmaa vaihdettiin vähemmän. Sisäilman kosteutta nostaa Maretariumissa erityisesti kala-altaista sisäilmaan höyrystyvä vesi. Sisäilman kosteus oli kuitenkin sallituissa rajoissa, ja sisäilmaa voidaan pitää ihmisten kannalta parempilaatuisena, koska osa ihmisistä saa talviaikaan oireita liian kuivasta sisäilmasta. Kesäaikaan kävijämäärien ollessa suurempia ilmaa vaihdettiin enemmän ja ilmankosteus oli täysin samaa tasoa. Kesäaikaan ulkoilma on kostea ja kala-altaista höyrystyvän veden vaikutus on vähäisempi. Hiilidioksidiohjauksesta ei simuloinnin perusteella ole haittaa sisäilman kosteuden kannalta. Lisäksi talviaikaan sisäilman voidaan nähdä olevan miellyttävämpää ihmisten kannalta. Maretariumin kävijämäärien keskiarvo vuosilta 2007–2016 on esitetty kuvassa 56 ja sisäilman suhteellinen kosteus kuvassa 57.



Kuva 56. Marettariumin kävijämäärien keskiarvo vuosina 2007–2016.



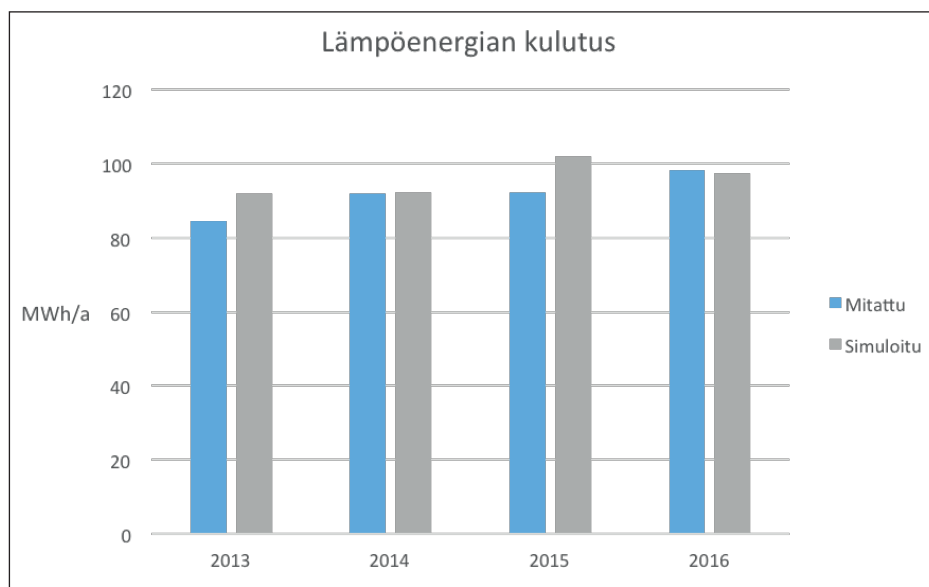
Kuva 57. Marettariumin sisäilman suhteellinen kosteus.

3.3 MIKKELIN TUOMIOKIRKKO

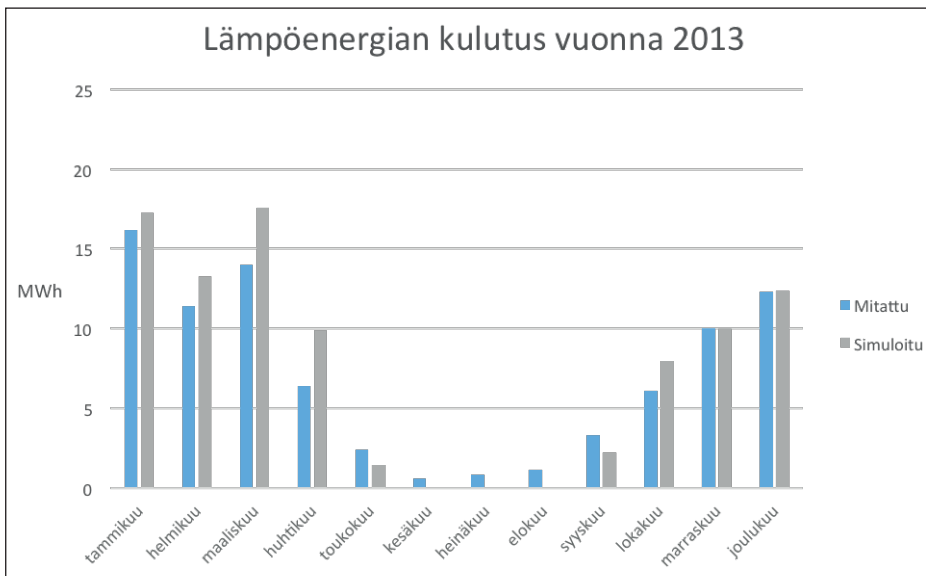
Mikkelin tuomiokirkon lähtötietojen perusteella rakennetun simulointimallin kulutus vuosi- ja kuukausitasolla vastasi toteutunutta kulutusta riittävällä tarkkuudella, jotta simulointimallia voitiin käyttää muutosehdotusten arviointiin. Rakennuksen korkeiden tilojen ilman kerrostumista ja siitä aiheutuvia muutoksia simulointimalli ei pysty kuitenkaan ennustamaan. Simuloinnin avulla oli lähtökohtaisesti tarkoitus saada lisätietoa muutosehdotusten vaikutusten arviointiin ja myös paljastaa mahdollisia virheitä arvioinnin pohjaksi tehdyssä laskennassa. Näin ollen simulointi päätettiin tehdä, vaikka ohjelma ei sovellu korkeiden tilojen laskentaan.

3.3.1 Simuloidun ja mitatun lämpöenergian kulutuksen vertailu

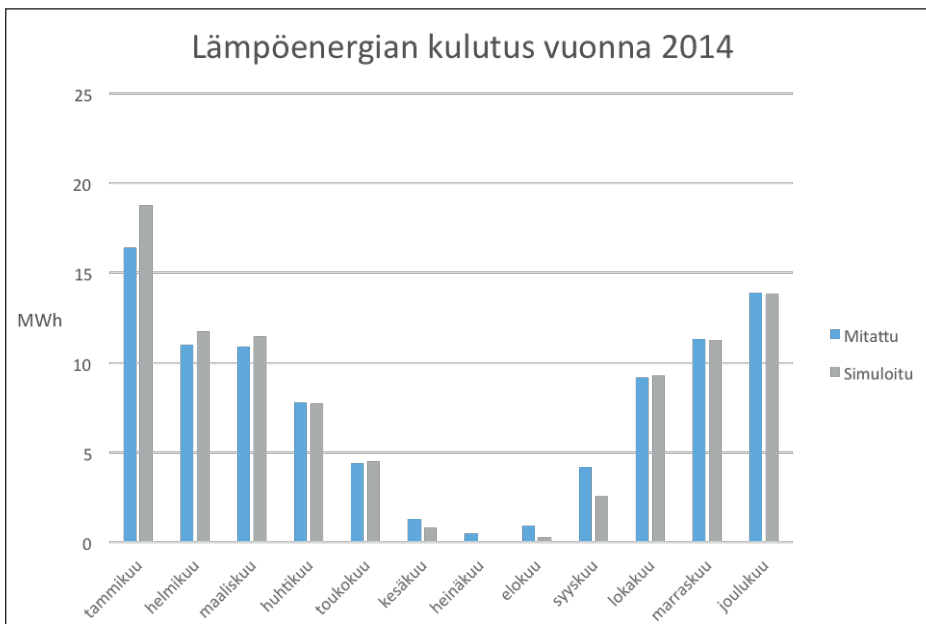
Mikkelin tuomiokirkon lämpöenergian kulutus on esitetty vuositasolla kuvassa 58 ja kuukausitasolla kuvissa 59–62.



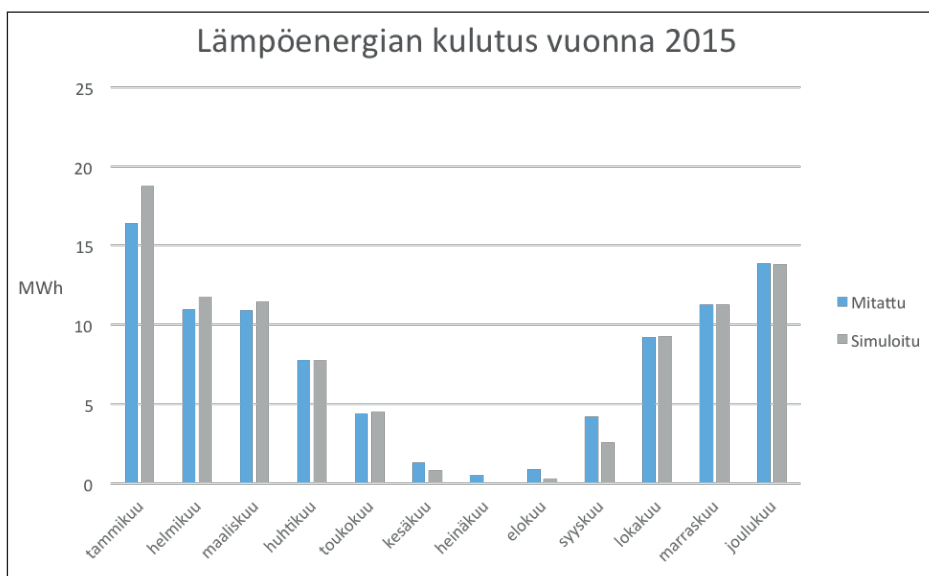
Kuva 58. Lämpöenergian kulutus.



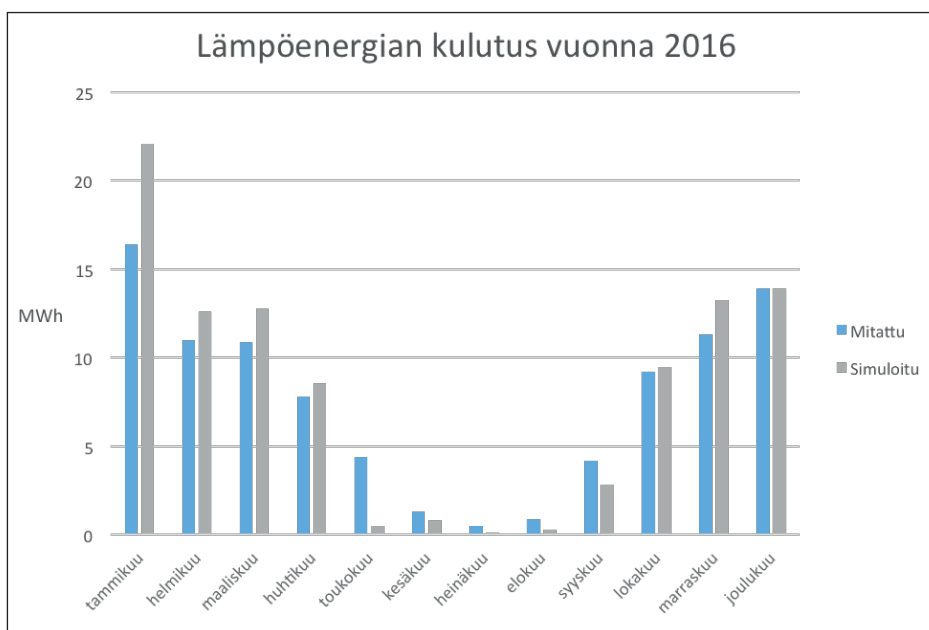
Kuva 59. Lämpöenergian kulutus vuonna 2013.



Kuva 60. Lämpöenergian kulutus vuonna 2014.



Kuva 61. Lämpöenergian kulutus vuonna 2015.



Kuva 62. Lämpöenergian kulutus vuonna 2016.

3.3.2 MUUTOSEHDOTUSTEN ARVIOINTI

Mikkelin tuomiokirkon muutosehdotuksista päädyttiin vertailemaan sisäilman lämpötilan tavoitetason pudotusta ja lämpötilan asetusarvon ohjausta ulkolämpötilan mukaan. Kirkossa ollaan ulkovaatteet päällä, joten esimerkiksi kovalla pakkasella ei ole tarvetta nostaa sisälämpötilaa kovin korkealle. Sisäilman lämpötilaa ei nykytilanteessa ohjata ulkoilman lämpötilan mukaan. Nykyinen tavoitetaso sisäilman lämpötilalle on 20°C, ja simuloitavaksi tavoitetasoksi valittiin 18°C. Toisessa simuloinnissa käytetyt sisälämpötilan asetusarvot suhteessa mitattuun ulkolämpötilaan on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Sisälämpötilan pudotus.

Ulkolämpötila	Sisälämpötila
20°C	20°C
10°C	20°C
0°C	18°C
-20°C	16°C
-30°C	16°C
Ulkolämpötila	Sisälämpötilan pudotus
20°C	-4°C
10°C	-4°C
0°C	-2°C
-20°C	0°C
-30°C	0°C

Simulointimallin perusteella energiankulutus putoaisi lämpötilan tavoitetason laskemisella noin 5,2 MWh vuoden aikana eli noin 5 % keskimääräisestä vuosikulutuksesta. Sisäilman lämpötilan asetusarvon pudotus ulkolämpötilan mukaan vähentäisi puolestaan energiankulutusta noin 13,9 MWh vuoden aikana eli noin 14 % keskimääräisestä vuosikulutuksesta.

YHTEENVETO

Laskentamallien rakentamisessa pystyttiin hyödyntämään mittauksien ja kokeellisen toiminnan perusteella saatuja lähtötietoja. Jos mallinnus olisi toteutettu pelkästään kohteiden suunnitteludokumenttien pohjalta, olisivat lähtötiedot ja laskentatulokset olleet huomattavasti epäluotettavampia. Laskentamallin rakentaminen ja saadut laskentatulokset herättivät mittauksista myös uusia ajatuksia, joiden perusteella mittauksia tehtiin lisää tai mittaustapaa muutettiin paremmin soveltuvaksi.

Simulointimallin suurimpana etuna toimenpiteiden vaikutusten arvioinnissa voidaan pitää simuloinnin kykyä ratkaista monimutkaisten muutosten vaikutusta nopeasti ja pienellä työpanoksella. Myös auringonsäteilyn vaikutuksen arviointi onnistuu simuloinnin avulla helposti, mutta on käsin laskennalla hyvin paljon työtä vaativaa. Simulointimallin suurimpana haittapuolena voidaan pitää lähtötietojen keräämisen ja laskentamallin suurta työmäärää, jonka vuoksi simulointia ei ole järkevä käyttää yksinkertaisten ongelmien ratkaisemisessa.

Mallinnuksen ja simuloinnin tavoitteena hankkeessa oli muodostaa laskennallinen malli erityiskohteiden energiatehokkuudesta. Mallinnettaviksi kohteiksi oli hankkeen alussa valittu Mikkelin tuomiokirkko, Kymijoen ravintopalvelut Oy:n keskuskeittiö Kapyysi ja Akvaariotalo Maretarium. Hankkeen tavoite saatiin täytettyä mallinnuksen ja simuloinnin osalta alkuperäisten suunnitelmien mukaan.

LÄHTEET

American Society of Heating, Refrigerating, and Air-conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE) 2007. ASHRAE handbook HVAC applications.

Kymijoen ravintopalvelut 2016. http://www.esitteemme.fi/kymijoen_ravintopalvelut/Mail-View/. Ladattu 31.10.2016

Maretarium 2016. <http://www.maretarium.fi/fi/kalat/>. Luettu 31.10.2016



XAMK
KEHITTÄÄ