

Mika Kuusela

MONITOIMIHALLIN
ENERGIATEHOKKUUDEN
VARMISTAMINEN

Opinnäytetyö
Ympäristötekniologia


Huhtikuu 2013




MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU

Mikkeli University of Applied Sciences

KUVAILULEHTI

 MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU Mikkeli University of Applied Sciences	Opinnäytetyön päivämäärä 26.4.2013				
Tekijä(t) Mika Kuusela	Koulutusohjelma ja suuntautuminen Ympäristötekniologia, Kestävä energiatalous				
Nimeke Monitoimihallin energiatehokkuuden varmistaminen					
Tiivistelmä <p>Työn tarkoituksena oli tutkia Mikkeliin mahdollisesti tulevana vuosina rakennettavan monitoimihallin energiatehokkuutta. Hankesuunnitelmassa määritellyn monitoimihallin rakenteiden ja muodon mukaan rakennukselle laskettiin simulointien avulla E-luku ja ostoenergiamäärät. Hankesuunnitelman mukaiseen toteutukseen tehtiin energiankulutusta alentavia muutoksia ja tutkittiin niiden vaikutusta E-lukuun sekä ostoenergiamäärään. Simuloinneissa käytettiin validoitua dynaamisen laskennan IDA-ICE-ohjelmistoa.</p> <p>Ennen monitoimihallin simulointeja tutkittiin kolmen eri lämmitystavan vaikutusta fiktiivisen rakennuksen lämmitys- ja LVI-laitteiden sähköenergiankulutukseen. Näistä kolmesta valittiin kaksi vähiten energiaa kuluttavaa lämmitystapaa varsinaisiin simulointeihin. Toisen valitun lämmitystavan ollessa säteilylämmitys perheydyttiin tarkemmin matalalämpötilaisen säteilylämmityksen mitoittamiseen.</p> <p>Tutkittujen energiankulutusta alentavien toimenpiteiden avulla monitoimihallin energiankulutusta ja E-lukua saatiin alennettua merkittävästi. Tutkimuksen avulla voidaan myös osoittaa pienten ja todennäköisesti edullisten toimenpiteiden suuri vaikutus energiankulutukseen.</p> <p>Tutkimuksessa asetetut tavoitteet saavutettiin ja tuloksia voidaan hyödyntää mahdollisessa rakentamishankkeessa. Tutkimuksessa annetaan suosituksia tulevaan rakennushankkeeseen, ja suositukset tulisi ottaa huomioon yleisesti kaikkien rakennushankkeiden hankesuunnitteluvaiheessa.</p>					
Asiasanat (avainsanat) Energiatehokkuus, monitoimihalli, E-luku, säteilylämmitys, simulointi					
Sivumäärä 58 + liitteet (7 kpl)	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;">Kieli</td> <td style="width: 33%;">URN</td> </tr> <tr> <td>Suomi</td> <td></td> </tr> </table>	Kieli	URN	Suomi	
Kieli	URN				
Suomi					
Huomautus (huomautukset liitteistä)					
Ohjaavan opettajan nimi Aki Valkeapää	Opinnäytetyön toimeksiantaja Mikkelin Ammattikorkeakoulu Oy				

DESCRIPTION

 <p>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU Mikkeli University of Applied Sciences</p>		Date of the master's thesis 26.4.2013	
Author(s) Mika Kuusela		Degree programme and option Environmental technology, sustainable energy	
Name of the master's thesis Energy efficiency of multifunctional hall			
Abstract The purpose was to ensure the energy efficiency for multifunctional hall. City of Mikkeli has planned to build a multifunctional hall in the future. In the project plan was defined the shape and the structures for the hall and calculation were performed according those definitions. The calculations of the E-values and the consumption of energy were done by simulations and using validated IDA ICE-software. Before the multifunctional hall simulations, a study case of comparing three different heating systems was done. Of these three, two were selected for the actual simulations. One of the selected heating systems was radiant heating and the low-temperature radiant heating was examined. Several measures for the building were researched with the simulations. Research shows how smalls and economic measures can have a huge respect for the energy consumption. The study objectives were achieved and the results can be used in a possible construction project. The study gives recommendations for the future building projects and the recommendations should be taken into account in general for all buildings project planning's.			
Subject headings, (keywords) Energy efficiency, multi-functional hall, E-value			
Pages 58 + annexes (7 pcs)	Language Finnish	URN	
Remarks, notes on appendices			
Tutor Aki Valkeapää		Master's thesis assigned by Mikkeli University of Applied Sciences	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	1
2	VAIHTOEHTOISET LÄMMITYSJÄRJESTELMÄT	2
2.1	Ilmalämmitys	2
2.2	Lattialämmitys	4
2.3	Säteilylämmitys	5
2.4	Lämmitystapojen vertailu	6
3	MATALALÄMPÖTILAINEN SÄTEILYLÄMMITYS	8
3.1	Lämpöolojen tavoitearvot	8
3.2	Säteilylämmitys	12
3.2.1	Keskimääräinen säteilylämpötila	12
3.2.2	Sallittu säteilyteho	16
3.2.3	Säteilijöiden keskimääräinen pintalämpötila	17
3.2.4	Esimerkki matalalämpötilaisen kattolämmityksen mitoittamisesta	17
4	MONITOIMIHALLIN LÄHTÖTIEDOT	22
4.1	Monitoimihallin päämitat ja muoto	22
4.2	Energialähteet ja –hinnat	24
4.3	Rakenteet	25
4.4	Rakennusvaipan tiiveys	26
4.5	Lämmitysjärjestelmä	26
4.6	Ilmanvaihto	27
4.7	Aurinkokeräimien pinta-ala	27
4.8	Valaistus	27
5	LASKENNAN LÄHTÖTIEDOT	28
5.1	Rakennusmääräyskokoelman osan D3 standardikäyttö	28
5.2	Säätiedot	29
5.3	Sisäilmasto	29
5.4	Rakennuksen standardikäyttö ja sisäiset lämpökuormat	29
5.5	Lämmin käyttövesi	30
6	DYNAAMISEN LASKENNAN VARIAATIOT	30
7	TULOKSET JA TULOSTEN ANALYSOINTI	33
7.1	Kokonaisenergiankulutus ja ominaiskulutus	34

7.1.1	Säteilylämmitysjärjestelmän mukaiset E-luvut ja ominaiskulutukset	34
7.1.2	Ilmalämmitysjärjestelmän mukaiset E-luvut ja ominaiskulutukset	37
7.2	Sähkö- ja lämmitysenergian kohdistuminen E-luvun laskennassa	40
7.2.1	Sähkö- ja lämmitysenergian jakaantuminen säteilylämmityksen E-luvun laskennassa	40
7.2.2	Sähkö- ja lämmitysenergian jakaantuminen ilmalämmityksen E-luvun laskennassa	41
7.3	Sähkö- ja lämmitysenergian kohdistuminen ominaiskulutuksen laskennassa	42
7.4	Energiakustannukset	45
7.5	Kesäajan lämpötilan hallinta	54
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	55
	LÄHTEET	58

LIITTEET

- 1 Vaatetuksen eristävyys ja toiminnantason arvoja
- 2 Fangerin viihtyisyyskäyriä
- 3 Istuvan henkilön näkyvyyskertoimia ympäröiviin pintoihin nähden
- 4 Tarkasteltavan pisteen näkyvyyskertoimia ympäröiviin pintoihin nähden

1 JOHDANTO

Mikkelin monitoimihallin energiatehokkuuden selvityksessä tutkitaan, millä tavoin erilaiset muutokset vaikuttavat hallin energiankulutukseen sekä millä keinoin rakennus alittaa sille Rakennusmääräyskokoelman osassa D3 asetetun vaatimuksen E-luvusta. Ennen tätä selvitystä rakennushankkeeseen on laadittu hankesuunnitelma, joka toimii perustana energiatehokkuuden selvitykselle. Selvityksen aikana monitoimihalli mallinnettiin hankeselvityksen laatijalta saatujen rakennuksen pohjapiirustuksien ja julkisivupiirustuksien mukaisesti. Mallinnuksen avulla lasketaan rakennuksen ostoenergiankulutus sekä energiamuotokertoimilla painotettu kokonaisenergiankulutus eli E-luku. Laskelmien yhteydessä tutkitaan myös kesäajan yllämpötilan hallintaa sekä lämmitystavan ja aurinkoenergian hyödyntämisen vaikutusta E-lukuun ja energiakustannuksiin. E-luvun laskennan lähtöarvoina käytetään Rakennusmääräyskokoelman 1.7.2012 voimaan tulleen osan D3 mukaisia standardikäytön arvoja liikuntahalleille. Selvityksessä myös arvioidaan simuloimalla halliosan lämpötilakäyttäytymistä, kun hallitilaa kuormitetaan 3000 henkilön konserttitilaisuudella.

Ennen tässä työssä käsiteltävän monitoimihallin energiakulutuksen simuloimista tutkittiin kolmea erilaista, nykyisin korkeissa tiloissa suosittua lämmitystapaa. Ilmalämmityksen ja säteilylämmityksen vertaaminen on itsestäänselvyys, koska rakennushankkeen hankesuunnitelman laatinut Pöyry Finland Oy on tuonut nämä lämmitystavat hankesuunnitelmassa esille (Pöyry Finland Oy 2012). Kolmantena lämmitystapana tutkitaan lattialämmityksen käyttämistä korkeassa rakennuksessa. Yhteistä näillä kaikilla lämmitystavoilla on energianlähde eli kaukolämmitys. Lämmitysjärjestelmien vertailun tarkoituksena on selvittää laskelmissa käytettävä sisäilman lämpötila eri lämmitystavoille, kun sisäilman operatiivinen lämpötila ja tyytymättömien käyttäjien osuus pidetään samana. Matalalämpötilainen säteilylämmitys luvussa perehdytään tarkemmin säteilylämmitykseen ja sen käyttämiseen rakennuksien lämmitystapana sekä esitetään esimerkki järjestelmän mitoittamisesta.

Tutkimuksessa käytettyjen energiaa säästävien toimenpiteiden avulla monitoimihallin vuotuista energian kulutusta sekä E-lukua saatiin alennettua huomattavasti lähtötilanteesta. Toimenpiteisiin ei välttämättä tarvitse investoida suurta määrää rahaa vaan toimenpiteet voivat liittyä myös hyvään ja huolelliseen rakennustapaan. Energianhintojen nousun jatkuessa tulisikin tulevaisuudessa kiinnittää enemmän huomiota tavoit-

teisiin ja asettaa tavoitteet jo rakennushankkeen hankesuunnitteluvaiheessa kokonais-
taloudellisesti ajateltuna hyvälle tasolle sekä tarkistella asetettuja tavoitteita rakennuk-
sen toteutus- ja käyttöaikana.

2 VAIHTOEHTOISET LÄMMITYSJÄRJESTELMÄT

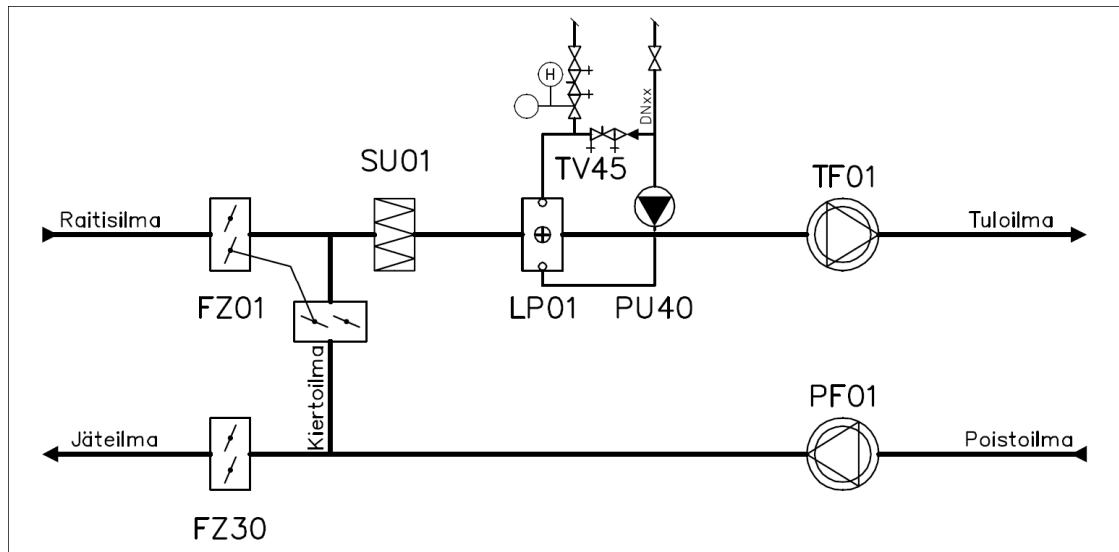
Lämmönsiirtyminen voi tapahtua kolmella eri tavalla: johtumalla, konvektiolla ja lämpösäteilemällä. Lämmönjohtuminen molekyylien keskinäistä törmäysten välityk-
sellä tapahtuvaa energian siirtoa ilman aineen siirtoa. Lämpö siirtyy aina korkeam-
masta lämpötilasta matalampaan lämpötilaan päin. Konvektiolla tarkoitetaan lämmön
siirtymistä aineen pinnalta ympäröivään kaasuun tai aineen pinnalle ympäröivästä
kaasusta luonnollisesti tai pakotettuna. Konvektiossa ympäröivä kaasu voi olla myös
nestettä. Luonnollisessa konvektiossa lämmönsiirtymisen saa aikaan lämpötilaerosta
aineen pinnalle aiheutuva kaasun tai nesteen liike ja pakotetussa konvektiossa kaasun
tai nesteen liikettä aineen pinnalla liikutetaan puhaltimen tai pumpun avulla. Läm-
pösäteily on sähkömagneettista aaltoliikettä eri lämpötilassa olevien pintojen välillä.
Säteilylämmönsiirron suuruus riippuu pintojen lämpötiloista, emissiiviteeteistä ja pin-
tojen välisistä näkyvyyskertoimista. Mikäli aineiden välillä ei ole lämpötilaeroa, ei
lämmönsiirtymistä säteilemällä voi tapahtua.

Ihmisille tarkoitetuissa korkeissa huonetiloissa on yleisimmin käytettyjä lämmön-
luovutusmuotoja perinteisesti ollut ilmalämmitys, lattialämmitys ja säteilylämmitys.
Työssä esitellään ilmalämmityksen kahden erilaisen toteutustavan, lattialämmityksen
ja säteilylämmityksen perusteita. Ilmalämmityksessä lämpö siirtyy pakotetun konvek-
tion avulla, lattialämmityksessä ja säteilylämmityksessä lämmönsiirtymistä tapahtuu
pääsääntöisesti lämpösäteilyn ja konvektion avulla. Säteilylämmitysosiossa perehdy-
tään tarkemmin säteilylämmityksen toimintaan ja mitoittamiseen.

2.1 Ilmalämmitys

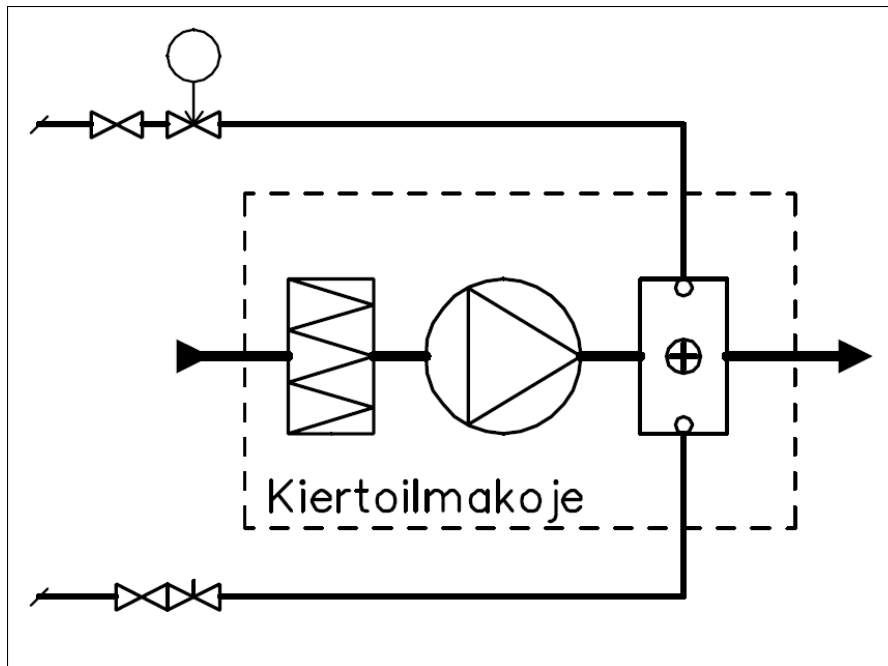
Ilmalämmityksellä on kaksi perustapaa, joiden avulla tiloja voidaan lämmittää. Mo-
lemmissa tavoissa voidaan lämmönlähteinä käyttää kaikkia yleisimpiä energiamuotoja
ja ominaista on suurehko puhallinsähköenergian kulutus. Ihmisten oleskelutiloissa

hyvin yleinen ilmalämmitystapa on toteutettu keskusilmanvaihtokoneen avulla. Keskusilmanvaihtokoneeseen on asennettu ainoastaan ilmanvaihtokäyttöön tarkoitettua laitetta tehokkaammat puhaltimet sekä lämmityspatteri. Puhaltimien ja lämmityspatterin avulla saadaan huonetilaan puhallettua huoneilmaa lämpimämpää tuloilmaa, jolloin huonetilan lämpöhäviöt saadaan kumottua ja huoneilman lämpötila pysyy halutussa. Kuvassa 1 on esimerkki keskusilmanvaihtokoneen kytkennästä, kun sen tuloilmaa käytetään huonetilojen lämmittämiseen.



KUVA 1. Ilmalämmitykseen käytetyn keskusilmanvaihtokoneen kytkentä-esimerkki

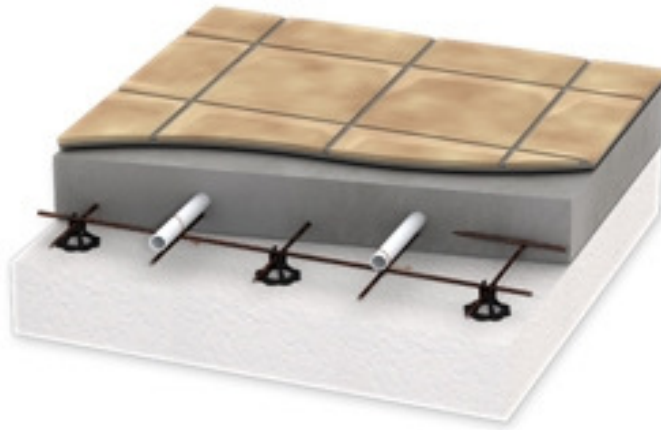
Ilmalämmitys voidaan toteuttaa myös käyttämällä kiertoilmapuhaltimia huonetiloissa. Tällöin kiertoilmapuhaltimissa olevien puhaltimien aiheuttama ääni saattaa nostaa huonetilassa vallitsevaa äänitasa liian korkeaksi viihtyvyyden kannalta. Lisäksi rakennukseen tulee rakentaa erillinen lämmitysjärjestelmä, jonka avulla voidaan kierrättää lämmintä nestettä kiertoilmapattereissa sijaitsevien lämmityspattereiden lävitse. Lämmin neste lämmittää patterin lävitse puhallettavan ilman ja huoneilma lämpiää. Kuvassa 2 on esitetty esimerkki kiertoilmapatterin kytkennästä.



KUVA 2. Esimerkki kiertoilmakojeen kytkennästä

2.2 Lattialämmitys

Lattialämmitys yleistyi huonetilojen lämmityksessä 1990-luvulla muoviputkien yleistyksen myötä. Nykyisin suurin osa pientaloista varustetaan vesikiertoisella lattialämmityksellä ja lattialämmitys on yleistynyt myös suuremmissa rakennuksissa. Lattialämmityksessä lämmitysputket asennetaan lattiarakenteen sisään ja lämpö siirtyy johtumalla putken sisällä virtaavasta lämpimästä aineesta putken lävitse putkea ympäröivään viileämpään kiinteään rakenneaineeseen lämmittäen samalla rakennetta. Rakenteesta lämpö siirtyy huoneen ilmatilaa kohti ainoastaan huoneilman lämpötilan ollessa alhaisempi kuin lattian pintarakenteen. Lattian pintarakenteesta lämpö siirtyy lämpösäteilyn ja konvektion avulla huoneilmaan pitäen huoneen ilman lämpötilan halutussa lämpötilassa. Lattialämmityksen avulla huonetilaan siirrettyä lämmitystehoa rajoittaa lattian pintamateriaalien lämmönkesto sekä lattian pintalämpötilan rajoittaminen oleskelijoiden viihtyisyyden mukaisesti, koska liian korkea lattian pintalämpötila aiheuttaa epäviihtyisyyttä oleskelijoissa. Kuvassa 3 on esitetty tyypillinen lattialämmitysrakenne, jossa betonin sisällä oleva lattialämmitysputki on asennettu betonia vahvistavaan metalliverkkoon ennen lattian valamista betonilla. Lattialämmitysputki voidaan asentaa myös niin kutsuttuun puurakenteiseen lattiarakenteeseen erillisten lämmön siirtymistä parantavien alumiinisten lämmönluovutuslevyjen kanssa, kuva 4.



KUVA 3. Lattialämmitysputki asennettuna betoniseen lattiarakenteeseen (Uponor Oy 2013)



KUVA 4. Lattialämmitysputki asennettuna puurakenteiseen lattiaan (Uponor Oy 2013)

2.3 Säteilylämmitys

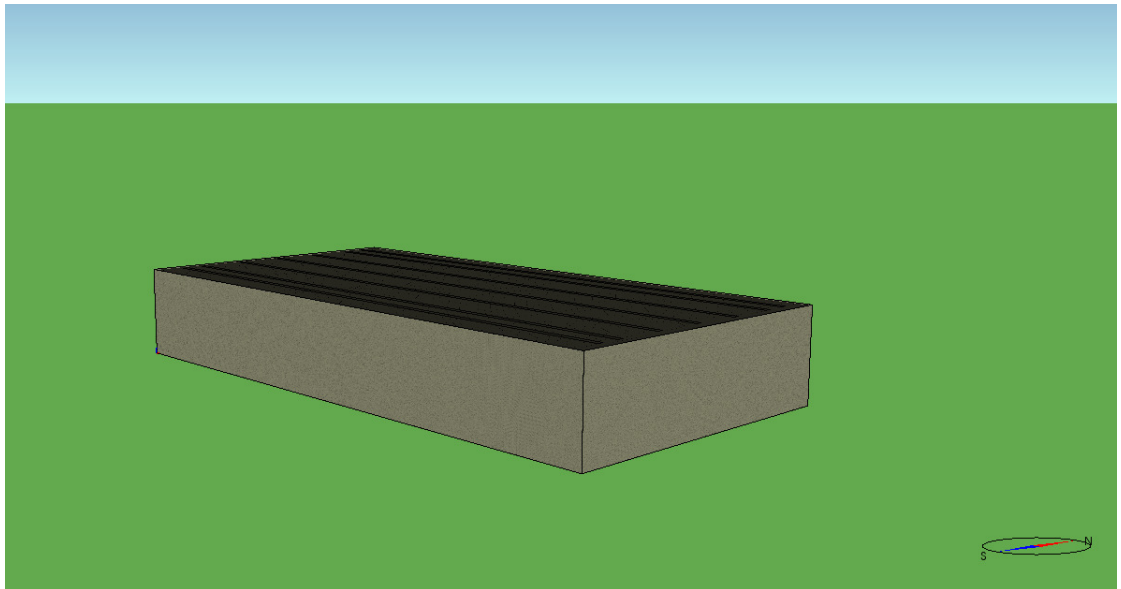
Säteilylämmitys yleistyi 1980-luvulla Suomeen rakennetuissa rakennuksissa. Säteilylämmityksen energialähteinä oli yleensä sähköenergia sekä maa- ja nestekaasu. Edellä mainittujen energialähteiden käytössä säteilylämmityksessä oli hyvin usein ominaista säteilylähteen korkea lämpötila sekä energialähteen energian toimittaminen suoraan säteilimeen. Maa- ja nestekaasulaitteissa energian polttaminen säteilimessä sekä sähkökäyttöisten säteilimien korkea lämpötila sähkövastuksissa aiheutti runsaasti epäpuhtauksia huonetilan sisäilmaan. Nykyisin rakennuksiin rakennettavien säteilylämmittimien energiana käytetään hyvin usein kaukolämmön avulla toimitettavaa energiaa. Tällöin energiaa siirretään veden avulla säteilimeen, ja kaukolämmityksen veden lämpötilasta johtuen säteilimien pintalämpötila on alle 100 °C. Aikaisempaa alhaisempi pintalämpötila aiheuttaa säteilimien pinta-alan suurentumisen ja näin ollen lämmitysmuodon investointikustannukset ovat nousseet. Tosin alhaisemman lämpötilan vuoksi

säteilylämmityksen käyttö on yleistynyt myös huonekorkeudeltaan matalammissa huonetiloissa, kuten toimistohuoneissa. Tulevaisuudessa voidaan olettaa säteilylämmityksen suosion nousevan myös asuntorakentamisen puolella alhaisemman lämmitystekohontanarpeen sekä säteilylämmityksen pienemmän energiankulutuksen myötä.

Rakennuksissa käytetyissä säteilylämmittimissä lämmönsiirtoa tapahtuu lämpösäteilyn lisäksi myös konvektiolla. Konvektion suuruus riippuu säteilylämmittimen pintalämpötilasta, geometriasta ja sitä ympäröivän ilman lämpötilasta ja liikkeestä. Säteilylämmityksissä säteilylämmön osuus on 50...70 % ja konvektion 30...50 % (Vuorelainen 1980). Nykyisin suosituiksi tulleissa vesikiertoisissa säteilylämmittimissä päästään säteilylämmön osalta jopa 81 % osuuksiin laitevalmistajan ilmoittaman tiedon mukaan (Frenger systemen BV).

2.4 Lämmitystapojen vertailu

Energiankulutuslaskelmat lämmitystapojen vertailuun tehtiin validoitulla IDA ICE 4.22 -ohjelmistolla, joka on dynaaminen laskentatyökalu. Laskelmissa käytettiin fiktiivistä rakennusta (kuva 5), jonka sisämitat olivat pituus 100 metriä, leveys 50 metriä ja korkeus 15 metriä. Rakennuksessa ei ollut ikkunoita eikä ovia. Rakennuksen teknii-kaksi määriteltiin Rakennusmääräyskokoelman osan D3 mukaisen standarditason asettamat vaatimukset. Ainoastaan ilmanvaihdon lämmöntalteenottolaitteen lämpötilasuhteena käytettiin 65 %, joka vastaa Etelä-Suomessa noin 60 % vuosihyötysuhdetta.



KUVA 5. Lämmitystapojen vertailussa käytetyn rakennuksen profiili ulkoapäin kuvattuna

Vertailulaskelmien avulla voitiin tutkia eri lämmitystavoilla tarvittavaa sisäilman lämpötilaa. Rakennukseen johdettua lämmitystehoa ohjattiin tilassa operatiivisen lämpötilan avulla. Operatiivinen lämpötilaohjaus asetettiin +18 °C asteeseen.

Laskelmien tulokset on esitetty taulukossa 1. Taulukossa on esitetty vain LVI-sähkön ja lämmityksen energiankulutukset. Valaistuksen ja lämpimän käyttöveden kuluttamat energiamäärät ovat kaikissa lämmitystavoissa samansuuruiset.

TAULUKKO 1. Lämmön ja sähkön kulutus eri lämmitystavoilla

Lämmitystapa	Lämmitys- energia kWh/a	LVI, sähkö kWh/a	Energiamuoto- kertoimilla paino- tettu kulutus kWh/m ² ,a	Sisäilman lämpötila °C
Säteilylämmitys	322486	132292	90,1	+15,8
Ilmalämmitys	331167	139593	93,9	+17,8
Lattialämmitys	357304	132269	95,0	+17,5

Lämmitystapojen vertailun energian kulutuksien perusteella varsinaiseen monitoimihallin tarkempiin laskelmiin päädyttiin vertailla säteily- ja ilmalämmitystä.

3 MATALALÄMPÖTILAINEN SÄTEILYLÄMMITYS

Säteilylämmitystä suunniteltaessa on huomioitava ennen kaikkea käytettävissä olevan energiamuodon käyttölämpötilat sekä huonetilojen käyttötarkoitus. Säteilimien korkea pintalämpötila saattaa aiheuttaa oleskeluvyöhykkeellä sijaitsevien ihmisten olon tunka-laksi. Säteilylämmityksen perustuessa kohtuullisen suureen lämpötilaeroon eivät maalämpöpumppujärjestelmät energialähteenä ole kovin käyttökelpoisia säteilylämmityksien kanssa, koska säteilimen pintalämpötilan tulee olla useita kymmeniä asteita korkeampi kuin huonetilan pintojen lämpötila. Perinteisesti säteilylämmitystä on käytetty lähinnä korkeissa huonetiloissa, kuten tuotantotiloissa, varastotiloissa ja liikuntahalleissa. Säteilylämmitys ei sovellu tiloihin, joissa säteilylämmittimien ja lämmitettävien pintojen välissä on paljon näkyvyysteitä, esimerkiksi valaisimia ja sähköjohdoille tarkoitettuja asennushyllyjä. Viimeisen kymmenen vuoden aikana on vesikiertoisten säteilylämmittimen käyttö yleistynyt ja moniin toimistorakennuksiin on asennettu säteilylämmittimet. Asennettuihin matalalämpötilaisiin säteilylämmittimiin on kytketty usein myös jäähdytysputkistot, jolloin säteilimiä on voitu hyödyntää myös huonetilojen jäähdytyksessä.

3.1 Lämpöolojen tavoitearvot

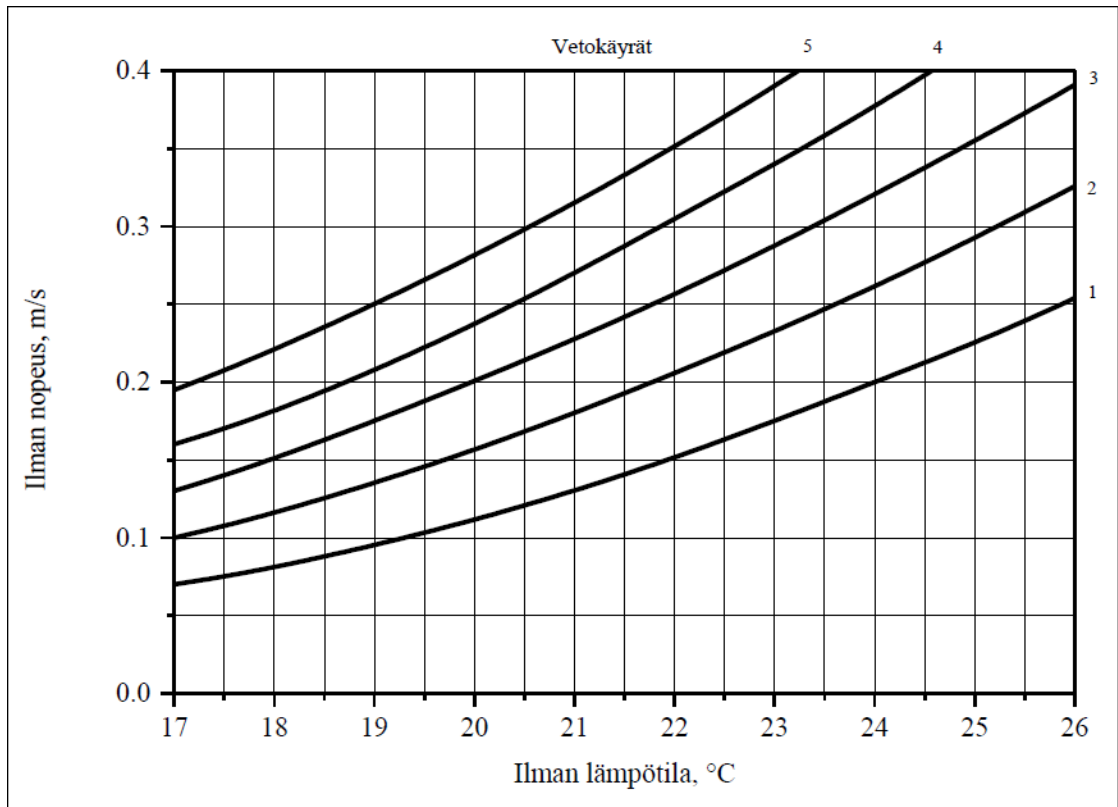
Rakennusmääräyskokoelma osassa D2 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto on määritelty uudet rakennukset suunniteltaviksi ja rakennettaviksi siten, että rakennuksen huonetilojen oleskeluvyöhykkeillä tulee saavuttaa viihtyisä lämpötila ilman tarpeettoman energian käyttämistä. Määräyksessä ei ole suoraan määrätty käytettäväksi tiettyjä huonelämpötiloja vaan määräyksen ohjeosiossa on annettu tyypillisiä ohjearvoja lämpötiloille. Liikuntahalleille on ohjearvoksi annettu oleskeluvyöhykkeellä +18 °C lämpötila. Rakennuksen käyttöajan enimmäisohjearvoksi on annettu +25 °C. Mikäli ulkoilman lämpötilan viiden tunnin enimmäisarvon keskiarvo on suurempi kuin +20 °C, voidaan huoneilman lämpötilan ohjearvo ylittää korkeintaan 5 °C eli liikuntahallin huonelämpötilan enimmäisarvo olisi oleskeluvyöhykkeellä +23 °C. (RakMK D2 2012.)

Rakennusmääräyskokoelma osassa D2 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto määräysosiossa määritellään, etteivät pintalämpötilat, ilman liike ja lämpösäteily saa aihe-

uttaa epäviihtyisyyttä käytön aikana rakennuksessa. Ilman liikkeelle määräyksessä annetaan ohjearvoja ja liikuntahalleille on ilman liikkeen ohjearvoksi oleskeluvyöhykkeellä annettu kesä- ja talviajalle 0,25 m/s. Lämpösäteilyn osalta ei määräyksessä ole annettu suoranaisia ohjearvoja, mutta määräyksessä ohjeistetaan tarkistamaan huonelämpötilat laskennallisesti operatiivisen lämpötilan avulla. Voimakkaan lämpösäteilyn aiheuttamaa epäviihtyisyyttä voi aiheuttavaa muun muassa suuret ikkunapinnat. (RakMK D2 2012.)

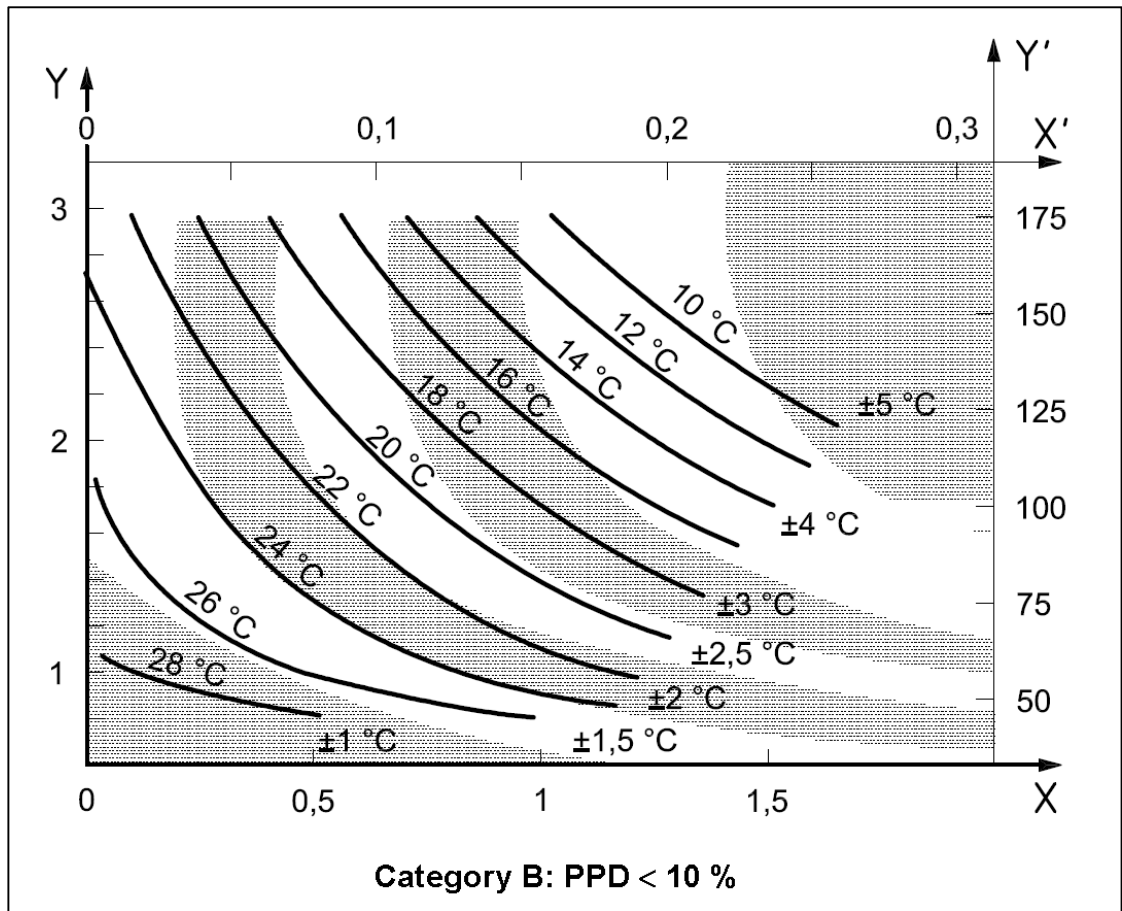
Sisäilman kosteus Rakennusmääräyskokoelma osassa D2 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto määrätään pitämään rakennuksissa sellaisella tasolla, ettei sisäilmassa oleva kosteus tiivisty rakenteisiin aiheuttaen samalla kosteusvaurioita, mikrobien tai pieneliöiden kasvua. Sisäilman kosteudelle on annettu ohjeraja-arvoksi 7 gH₂O/kg kuivaa ilmaa, joka vastaa +21 °C lämpötilassa olevassa sisäilmassa 45 % suhteellista kosteutta, kun ilmapaine on 101,3 kPa. (RakMK D2 2012.)

Operatiiviselle lämpötilalle ja viihtyvyydelle ei ole Rakennusmääräyskokoelma osassa D2 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto annettu numeerisia eikä muullakaan tavalla mitattavia kriteereitä. Kuvassa 6 on edellä mainitun määräyksen liitteessä 1 esitetty vetokäyrästä, jonka avulla viihtyisyyttä voidaan huonetiloissa arvioida.



KUVA 6. Rakennusmääräyskokoelman osan D2 liitteen 1 vetokäyrästä

Suomen Standardisoimisliitto SFS:n vahvistamassa standardissa SFS-EN ISO 7730 on esitetty, miten optimaalinen operatiivinen lämpötila voidaan määrittellä ihmisten aineenvaihdunnan tason (Y-akseli, met) sekä pukeutumisen (X-akseli, clo) funktiona (Suomen Standardisoimisliitto SFS 2006). Kuvassa 7 on esitetty standardissa esitetty kuva, jonka avulla optimaaliset operatiiviset lämpötilat eri käyttöalueille voidaan määrittellä, kun tavoitteeksi asetetaan alle 10 %:n tyytymättömien taso. PPD-luvulla eli tyytymättömien osuudella tarkoitetaan oleskelutilassa oleskelevien ihmisten tyytymättömien osuutta vallitseviin olosuhteisiin. (SFS-EN ISO 7730)



KUVA 7. Standardin SFS-EN ISO 7730 mukainen optimaalinen operatiivinen lämpötila ihmisen toimintatason (met, Y-akseli) ja pukeutumisen (clo, X-akseli) funktiona, kun tyytymättömien ihmisten osuus käyttäjistä (PPD-arvo) on alle 10 %.

Ihmisten vaatetuksen lämmönvastus I_{CL} ja aineenvaihdunnan taso voidaan määrittellä standardissa SFS-EN ISO 7730 annettujen arvojen mukaisesti (Suomen Standardoimisliitto SFS 2006). Vaatetustason yksikkönä käytetään arvoa clo. Clo-arvon ollessa pieni on ihmisten vaatetus hyvin kevyt ja vastaavasti clo-arvon ollessa suuri on vaatetuskerros paksu. Ihmisten toiminnallisuustasolla kuvataan ihmisten aktiiviteettia. Aktiiviteettitaso ollessa alhainen ihminen on lähellä lepotilaa. Toiminnallisuustason ollessa korkea on ihminen suorittamassa esimerkiksi liikuntasuoritusta. Liitteessä 1 on esitetty standardin SFS-EN ISO 7730 mukaiset erilaisten vaatetuksien eristävyysarvot sekä eri toiminnallisuustasot (Suomen Standardoimisliitto SFS 2006).

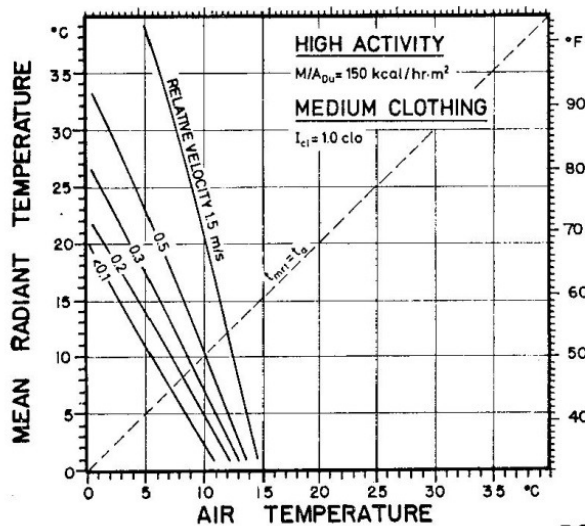
3.2 Säteilylämmitys

Säteilylämmityksen mitoittamiseen tarvitaan huonetilan käyttötarkoituksen mukaisesti määritelty oleskeluvyöhykkeen huonelämpötila, operatiivinen lämpötila, ilman nopeus sekä suhteellinen kosteus. Rakenteiden pintalämpötiloilla on oleellinen vaikutus säteilylämmityksen mitoittamiseen mikäli rakenteen pinnan ja tutkittavan pisteen välinen lämpötilaero on suuri. Jäljempänä esitetystä mitoituslanteesta rakenteiden pintalämpötilan ja tutkitun pisteen välinen lämpötilaero ei todellisuudessa ole kovinkaan suuri, jolloin rakenteiden pintalämpötiloilla ei ole oleellista vaikutusta tutkitussa pisteessä aistittuun operatiiviseen lämpötilaan. Esitetystä mitoitustavassa on rakenteiden pintalämpötilojen olevan samassa lämpötilassa huoneilman kanssa. Kohdassa 3.2.4. on esitetty esimerkki matalalämpötilaisen kattolämmityksen mitoituksesta liikuntahallissa, kun mitoitus tehdään katsojan viihtyisyyden kannalta. Huoneilman lämpötilana on esimerkissä käytetty katsojalle Rakennusmääräyskokoelman osan D2 ohjearvoa +18 °C (RakMK D2 2012).

3.2.1 Keskimääräinen säteilylämpötila

Keskimääräinen säteilylämpötila voidaan määritellä käyttämällä liitteen 2 käyrästäjä (Fanger 1970). Fangerin laatimat käyrästäjä on laadittu ihmisen toimintatason, vaate-tuksen sekä huoneilman lämpötilan ja virtausnopeuden mukaan. Käyrästäjä on laadittu huonetilan suhteellisen kosteuden ollessa 50 %.

Kun ihmisten vaatetusta, toiminnantasa, ilman suhteellista kosteutta eikä ilman virtausnopeutta muuteta, niin nostamalla keskimääräistä säteilylämpötilaa voidaan ilman lämpötilaa laskea, kuten kuvasta 8 voidaan todeta. Kattolämmityksellä varustetut tilat tulisikin määritellä eri käyttötarkoitusten mukaisesti, ennen kuin säteilylämmitystä voidaan ryhtyä suunnittelemaan. On hyvin todennäköistä, ettei samanlaisilla säteilylämmityksen mitoitusparametreilla saavuteta huonetiloissa kaikkien käyttäjien optimaalista viihtyvyyttä.



KUVA 8. Fangerin käyrästä (Fanger 1970)

Keskimääräisen säteilylämpötilan laskeminen matemaattisesti on hyvin monimutkainen, koska eri pintojen välillä tapahtuu säteilylämmönsiirtoa. Keskimääräinen säteilylämpötila voidaan kuitenkin laskea kaavan 1 mukaan, mikäli pintojen lämpötilat ovat alhaisia (Fanger 1970). Kaavaa 1 voidaan käyttää laskettaessa säteilylämpötilaa, mikäli tarkasteltavien pintojen lämpötilat ovat alle 150 °C (Hagner 1977).

$$t_{sät,ks} = F_{säteilijä} \times t_{p,säteilijä} + F_2 \times t_{p2} + \dots + F_n \times t_{pn} \quad (1)$$

missä

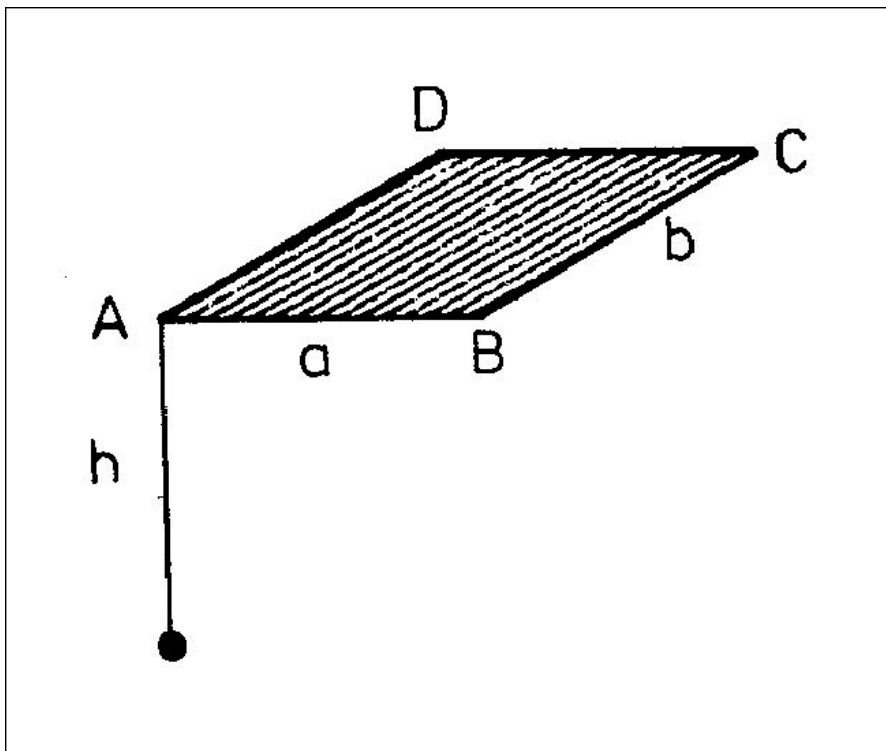
$t_{sät,ks}$	keskimääräinen säteilylämpötila, °C
F_n	pinnan n näkyvyyskerroin tarkasteltavaan pisteeseen, -
t_{pn}	tarkasteltavan pinnan lämpötila, °C
$t_{p,säteilijä}$	tarkasteltavan pinnan lämpötila, °C

Pintojen näkyvyyskerroimen avulla voidaan määrittellä tarkasteltavan pinnan näkyvyyttä tarkastelupisteeseen. Näkyvyyskerroimessa huomioidaan pintojen etäisyys tarkasteltavaan pisteeseen sekä suuntaus korkeuskulman β ja atsimuuttikulman α avulla. Liitteessä 3 on esitetty näkyvyyskerroimien määrittelemiseen laadittuja käyrästäjä istuvalle henkilölle (Fanger 1970). Seisovalle ihmiselle on laadittu omat graafiset käyrästäjä. Tarkastelupistettä ympäröivien seinien näkyvyyskerrointa arvioitaessa on seinä jaettava neljään eri osaan, jotta riittävän tarkka näkyvyyskerroin seinän pinnasta tarkastelupisteeseen saadaan arvioitua. Myös lattia- ja kattopintojen näkyvyyskerrointa arvioitaessa on pinnat jaettava neljään eri osaan.

Kattosäteilijät asennetaan yleensä sisäkaton alapuolelle riviasennuksena ja rivien väli toisistaan on ulkoseinien läheisyydessä pienempi kuin keskiosalla huonetilaa. Riviin asennettujen säteilmien näkyvyyskerroin voidaan laskea kaavan 2 avulla (Hagner 1977).

$$F_{\text{säteilijä}} = \frac{1}{8} - \frac{1}{4\pi} \arctan \frac{h \times \sqrt{a^2 + b^2 + h^2}}{a \times b} \quad (2)$$

Kaavassa 2 esiintyvät mitat a, b ja h on selvitetty kuvassa 9.



KUVA 9. Kaavaan 2 liittyvien mittojen havainnollistava kuva (Hagner 1977)

Säteilmien näkyvyyskerroin voidaan määritellä nopeammin likiarvomenetelmällä, jossa lasketaan säteilijöiden kokonaispinta-ala ja jaetaan se koko katon pinta-alalla, jonka jälkeen kerrotaan osamäärä katon kokonaisnäkyvyyskerroimella kaavan 3 mukaisesti. (Hagner 1977)

$$F_{\text{säteilimet}} = \frac{A_{\text{säteilijät}}}{A_{\text{katto}}} \times F_{\text{katto}} \quad (3)$$

missä

$F_{\text{säteilimet}}$	säteilimien kokonaisnäkyvyyskerroin, -
$A_{\text{säteilijät}}$	säteilijöiden pinta-ala, m^2
A_{katto}	katon pinta-ala, m^2
F_{katto}	katon näkyvyyskerroin tarkastelupisteeseen

Tarkasteltavan pinnan näkyvyyskerroimet voidaan myös laskea käyttämällä kaavaa 4 (SFS-EN ISO 7726).

$$F_{pn} = F_{max} \left(1 - e^{-\frac{(a/c)}{\tau}}\right) \left(1 - e^{-\frac{(b/c)}{\gamma}}\right) \quad (4)$$

missä

F_{pn}	tarkasteltavan pinnan näkyvyyskerroin
F_{max}	taulukon XX mukainen lukuarvo, -
a	tarkasteltavan pinnan mitta, m
b	tarkasteltavan pinnan mitta, m
c	tarkasteltavan pinnan ja kohdepisteen välinen etäisyys, m

τ ja γ saadaan laskettua kaavojen 5 ja 6 avulla.

$$\tau = A + B(a/c) \quad (5)$$

missä

A ja B	taulukon 2 mukainen kerroin, -
--------	--------------------------------

$$\gamma = C + D(b/c) + E(a/c) \quad (6)$$

missä

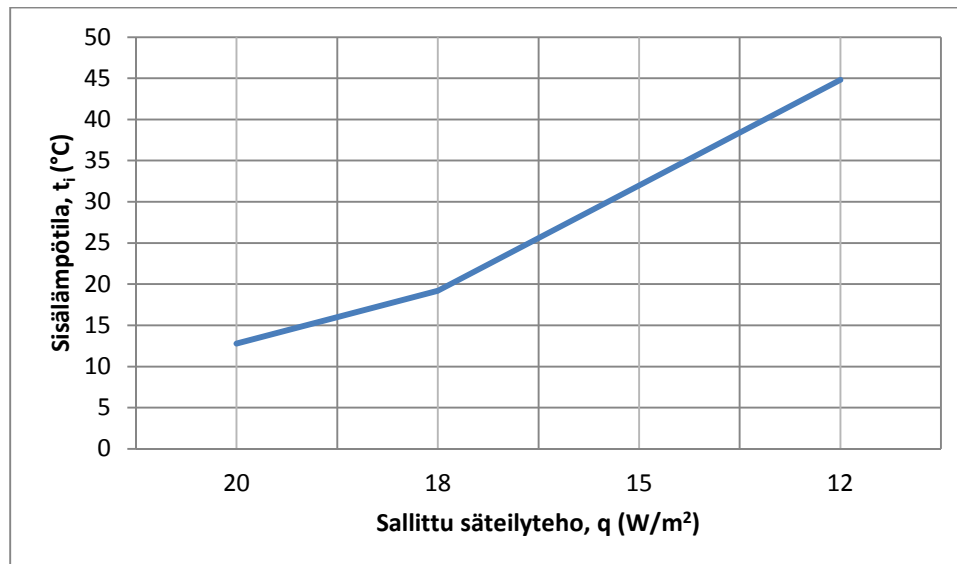
C, D ja E	taulukon 2 mukainen kerroin, -
-----------	--------------------------------

TAULUKKO 2. Näkyvyyskertoimen laskemisessa tarvittavia lukuarvoja (SFS-EN ISO 7726)

	F_{max}	A	B	C	D	E
Istuva henkilö Pystysuuntaiset pinnat (seinät, ikkunat)	0,118	1,216	0,169	0,717	0,087	0,052
Istuva henkilö Vaakasuuntaiset pinnat (lattia, katto)	0,116	1,396	0,130	0,951	0,080	0,055
Seisova henkilö Pystysuuntaiset pinnat (seinät, ikkunat)	0,120	1,242	0,167	0,616	0,082	0,051
Seisova henkilö Vaakasuuntaiset pinnat (lattia, katto)	0,116	1,595	0,128	1,226	0,046	0,044

3.2.2 Sallittu säteilyteho

Jotta ihminen tuntisi olonsa tyytyväiseksi huonetilassa, on ihmiseen kohdistettava samansuuruinen säteilylämpöteho kuin ihmisestä suuntautuu pois päin. Ihmiseen kohdistuva suurin sallittu säteilyteho ihmisen ja pinnan välillä on esitetty kuvassa 10 (Hagner 1977).



KUVA 10. Ihmiseen kohdistuva suurin sallittu säteilyteho sisälämpötilan funktiona (Hagner 1977)

3.2.3 Säteilijöiden keskimääräinen pintalämpötila

Aikaisemmin on esitetty laskentakaava säteilijöiden keskimääräisen säteilylämpötilan laskemiseksi.

$$t_{\text{sät,ks}} = F_{\text{säteilijä}} \times t_{p,\text{säteilijä}} + F_2 \times t_{p2} + \dots + F_n \times t_{pn} \quad (1)$$

Kun tarkastelupisteeseen vaikuttavien rakenteiden pintojen näkyvyyskerroimet ja keskimääräinen säteilylämpötila on saatu selvitettyksi sekä oletetaan tarkastelupistettä ympäröivien pintojen olevan sisäilman ja keskimääräisen säteilylämpötilan kanssa samassa lämpötilassa, voidaan kaavasta 1 ratkaista säteilmien keskimääräinen pintalämpötila. Kaikkien tarkastelupistettä ympäröivien pintojen näkyvyyskerroimien yhteissumma on yksi, jolloin kaavan 7 mukaan saadaan laskettua säteilijöiden keskimääräinen pintalämpötila.

$$t_{p,\text{säteilijät}} = \frac{t_{\text{sät,ks}} - (1 - F_{\text{säteilijät}}) \times t_i}{F_{\text{säteilijät}}} \quad (7)$$

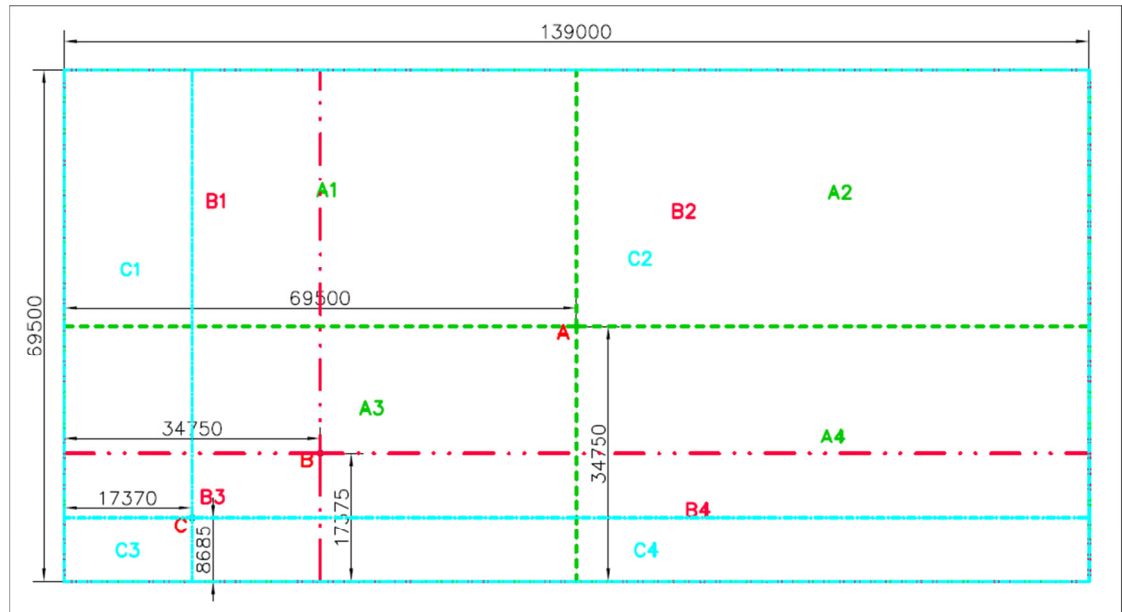
missä

$t_{p,\text{säteilijät}}$	säteilijöiden keskimääräinen säteilylämpötila, °C
$t_{\text{sät,ks}}$	keskimääräinen säteilylämpötila, °C
$F_{\text{säteilijät}}$	säteilijöiden näkyvyyskerroin tarkastelupisteeseen, -
t_i	huoneilman lämpötila, °C

3.2.4 Esimerkki matalalämpötilaisen kattolämmityksen mitoittamisesta

Mitoitus esimerkissä sisätilan suhteellisen kosteuden on oletettu olevan 50 % ja rakenteiden pintojen oletetaan olevan samassa lämpötilassa huoneilman kanssa. Huoneilman lämpötilaksi oletetaan määräyksessä annettu ohjearvo +18 °C. Huonetilan fyysiset mitat on esitetty kuvassa 11, ja huonetilan korkeus on 20 metriä. Säteilijöiden asennuskorkeuden oletetaan olevan lattian pinnasta 16 metrin korkeudessa, jolloin säteilmien etäisyys istuvasta katsojasta on noin 15 metriä. Huonetilan lämmön tehotarpeen oletetaan olevan noin 21 W/m² ja lämmön tarpeen jakautuvan tasaisesti huoneti-

lan pinta-alaa kohti. Mitoitus määritellään kolmeen eri sijaintipisteeseen A, B ja C, joiden fyysinen sijainti huonetilassa on esitetty kuvassa 11.



KUVA 11. Sijaintipisteiden sijoitus huonetilassa

Ensimmäiseksi tulee määrittellä henkilön käyttöprofiili, jonka mukaan mitoitusta ryhdytään tekemään. Tässä mitoitus esimerkissä mitoitetaan katsojan käyttöprofiilin mukaisesti talvikaudelle. Käyttäjaprofiilin valinnan jälkeen voidaan määrittellä katsojan toiminnallisuustaso ja vaatetus liitteen 1 taulukoista. Toiminnallisuustason ja vaatetuksen arvot ovat esitetty taulukossa 3.

Optimaalinen operatiivinen lämpötila voidaan katsoa kuvasta 7. Taulukossa 3 on esitetty kuvasta 7 arvioidun optimaalisen operatiivisen lämpötilan arvo. Optimaalisen operatiivisen lämpötilan arvosta voidaan päätellä, ettei kaikille liikuntahallin käyttäjille sovellu saman huoneilman operatiivisen lämpötilan käyttäminen haettaessa optimaalista viihtyisyyttä liikuntahallin käyttäjille. Esimerkiksi urheilijoille tulee olla huomattavasti alhaisempi optimaalinen operatiivinen lämpötila. Keskimääräinen säteilylämpötila katsojalle talvikaudella saadaan katsottua liitteen 2 taulukosta. Keskimääräisen säteilylämpötilan arvo on esitetty taulukossa 3.

TAULUKKO 3. Liikuntahallin katsojan met- ja clo-arvot, lämmöntuotto, optimaalinen operatiivinen lämpötila sekä keskimääräinen säteilylämpötila Fangerin viihtyisyyskäyrästä mukaisesti

Käyttäjä	Toiminnallisuustaso	Vaatetus	Lämmöntuotto	Optimaalinen operatiivinen lämpötila, t_o °C	Keskimääräinen säteilylämpötila, t_{ks} °C
	met	clo	W/m ²		
Katsoja	1,0	1,2 (talvi)	58	+22 ±2 (talvi)	+24 (talvi)

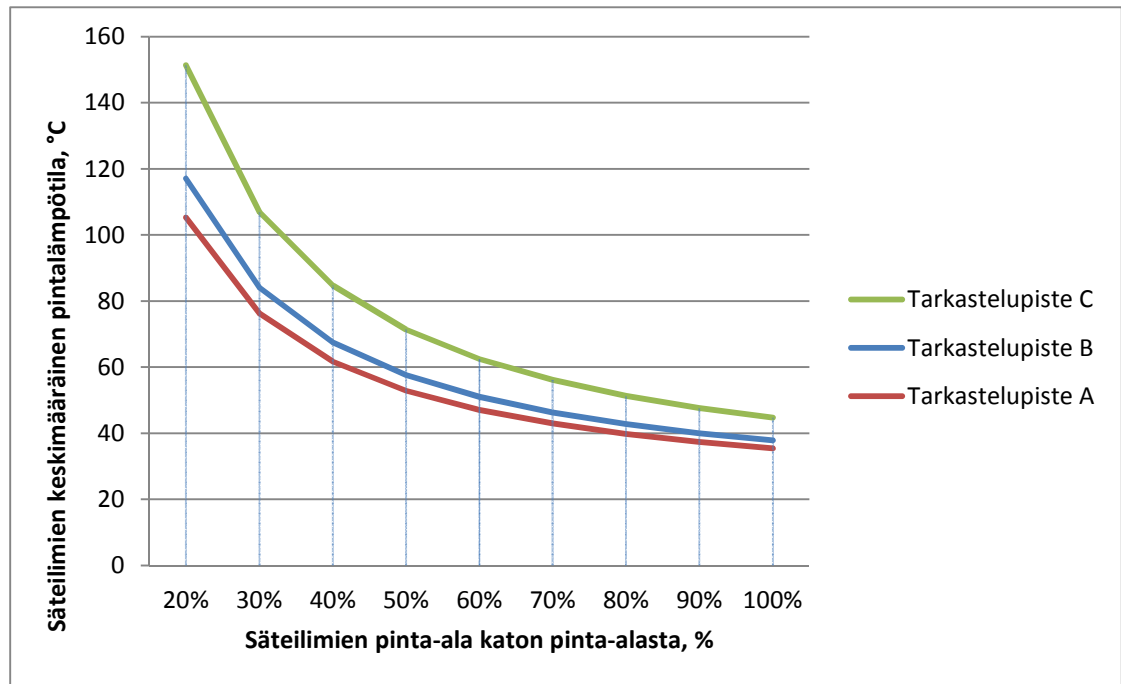
Laskettaessa näkyvyyskertoimia liikuntahallissa olevalle katsojalle kolmessa eri tarkastelupisteessä kuvan 11 mukaisesti saadaan taulukon 4 mukaiset arvot. Laskelmissa liikuntahallin oletetaan olevan suorakaiteenmuotoinen tila, jonka mitat vastaavat tutkitun monitoimihallin liikuntatilan sisämittoja. Katsojan tarkastelupisteet on merkitty kirjaimilla A, B ja C. Taulukossa 4 lasketut näkyvyyskertoimet ovat laskettu käyttäen hyväksi Fangerin laatimia käyrästäjä liitteestä 4.

TAULUKKO 4. Tarkastelupisteiden näkyvyyskertoimet

Tarkastelupiste	Säteilimien ja katsojan välinen etäisyys (m) h	Kattopinta, mitat (m)		a/h	b/h	Näkyvyyskerroin
		a	b			
A						
Kattopinta A1	15	34,8	69,5	2,3	4,6	0,086
Kattopinta A2	15	34,8	69,5	2,3	4,6	0,086
Kattopinta A3	15	34,8	69,5	2,3	4,6	0,086
Kattopinta A4	15	34,8	69,5	2,3	4,6	0,086
					Σ=	0,344
B						
Kattopinta B1	15	34,8	52,1	2,3	3,5	0,083
Kattopinta B2	15	52,1	104,3	3,5	7,0	0,098
Kattopinta B3	15	17,4	34,8	1,2	2,3	0,061
Kattopinta B4	15	17,4	104,3	1,2	7,0	0,066
					Σ=	0,308
C						
Kattopinta C1	15	17,38	60,81	1,2	4,1	0,063
Kattopinta C2	15	60,81	121,63	4,1	8,1	0,103
Kattopinta C3	15	8,69	17,38	0,6	1,2	0,032
Kattopinta C4	15	8,69	121,63	0,6	8,1	0,042
					Σ=	0,24

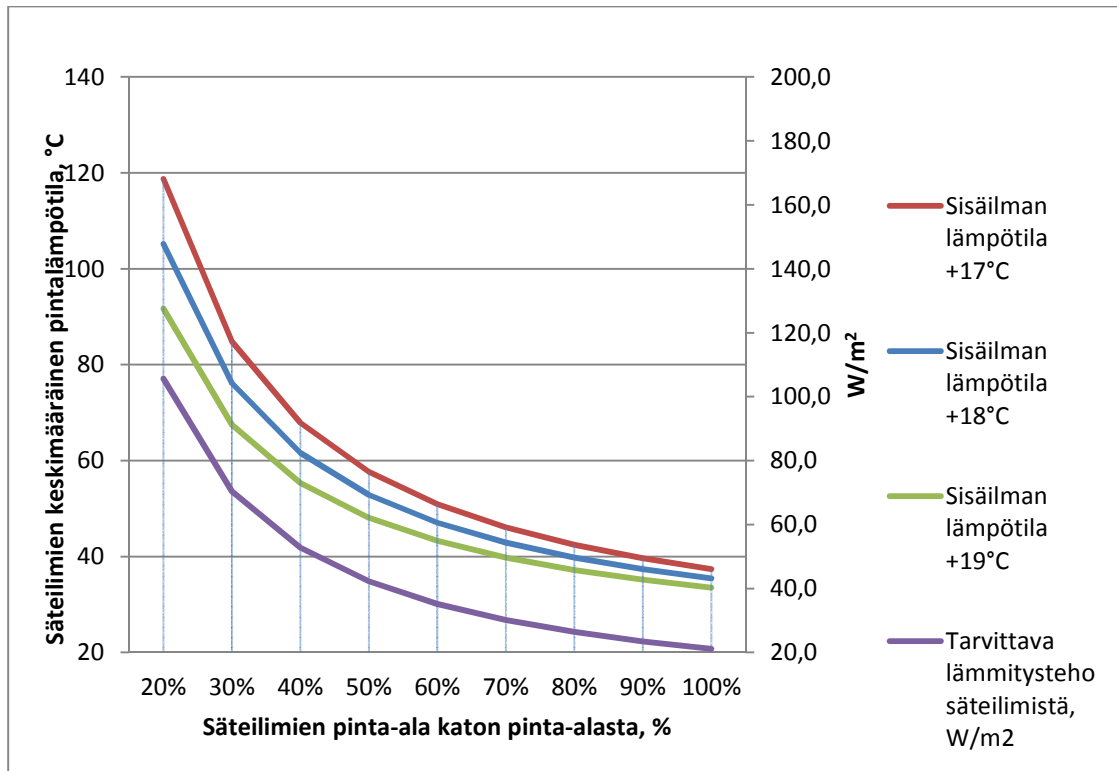
Näkyvyyskertoimien laskemisen jälkeen voidaan laskea kaavan 7 avulla säteilimien keskimääräiset pintalämpötilat. Kuvasta 12 voidaan tarkastella säteilimien keskimää-

räisiä pintalämpötiloja säteilmien pinta-alan funktiona eri tarkastelupisteille. Tarkastelupisteen C vaatima korkeampi keskimääräinen pintalämpötila aiheutuu pienemmän näkyvyyskertoimen johdosta.

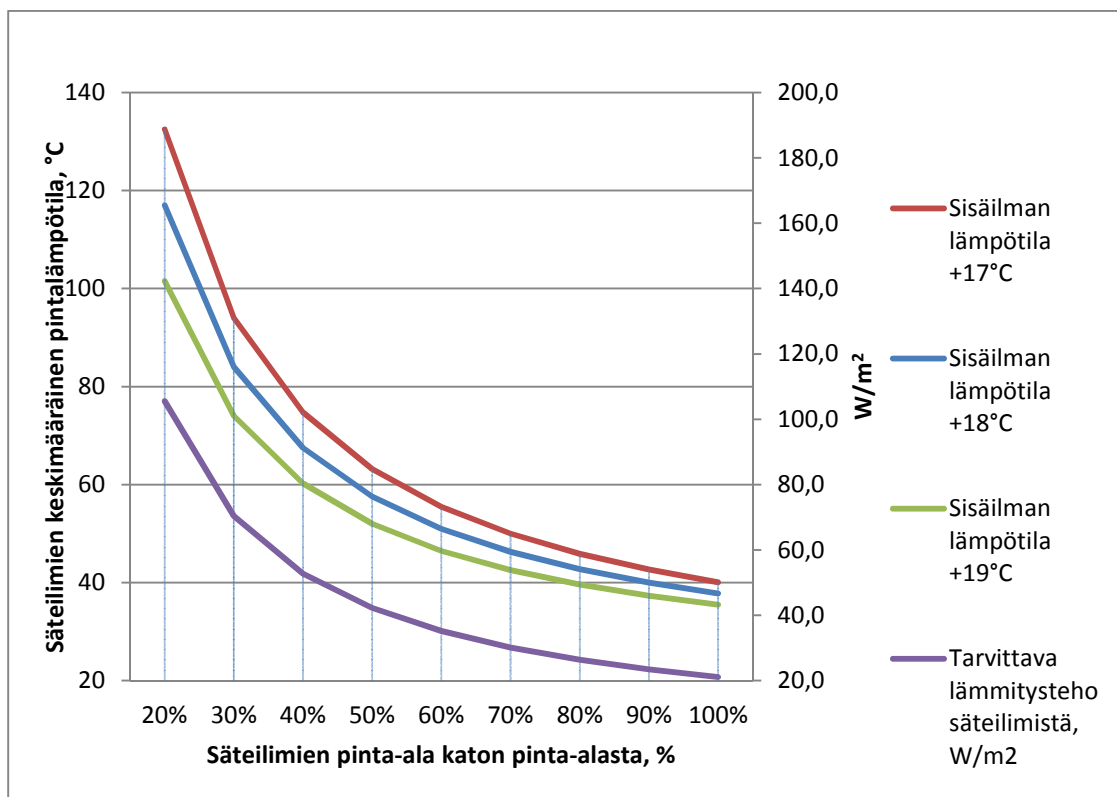


KUVA 12. Säteilmien keskimääräinen lämpötila säteilmien pinta-alan funktiona eri tarkastelupisteissä ($t_{\text{sät,ks}} = +24^{\circ}\text{C}$, $t_i = +18^{\circ}\text{C}$)

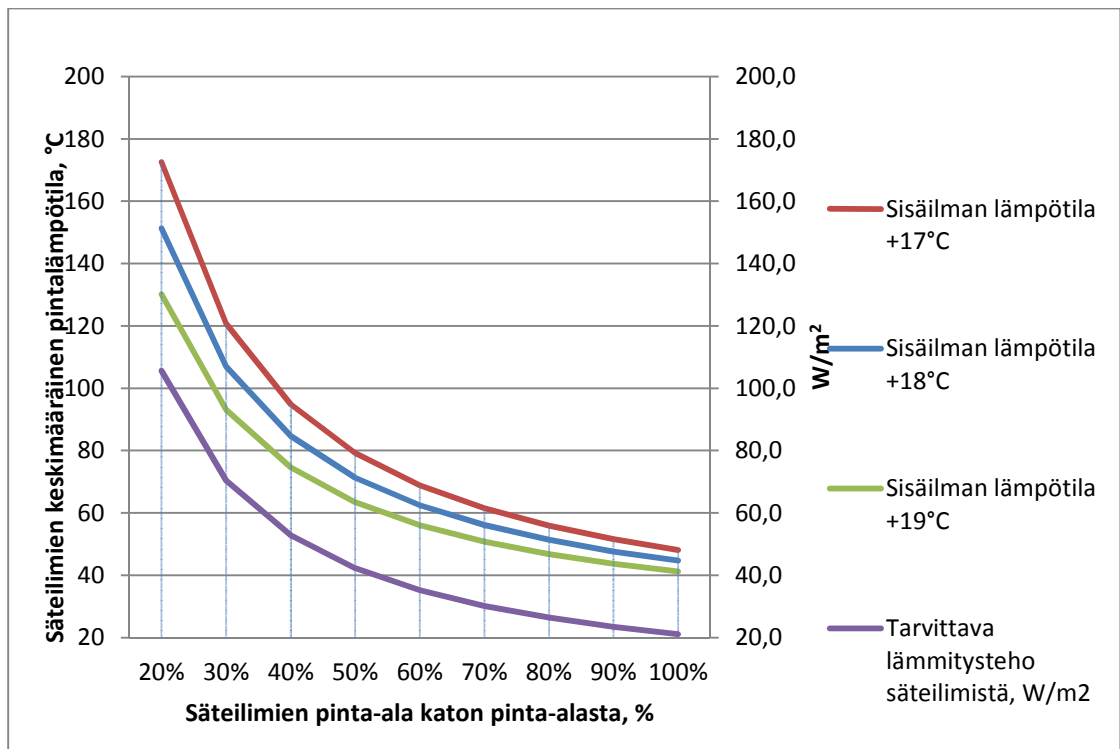
Kuvissa 8, 9 ja 10 on esitetty eri tarkastelupisteiden säteilmien keskimääräinen pintalämpötila ja tarvittava lämmitysteho säteilmistä kolmella eri sisäilman lämpötilalla. Huonelämpötilaa laskettaessa on säteilmien keskimääräistä pintalämpötilaa nostettava, jotta katsojan viihtyisyys pysyy vakiona. Kuvista voidaan myös lukea tarvittava lämmitysteho säteilmien pinta-alaa kohti.



Kuva 13. Säteilimien keskimääräinen lämpötila säteilimien pinta-alan ja sisäilman lämpötilan funktiona tarkastelupisteessä A ($t_{\text{sät,ks}} = +24^{\circ}\text{C}$)



Kuva 14. Säteilimien keskimääräinen lämpötila säteilimien pinta-alan ja sisäilman lämpötilan funktiona tarkastelupisteessä B ($t_{\text{sät,ks}} = +24^{\circ}\text{C}$)



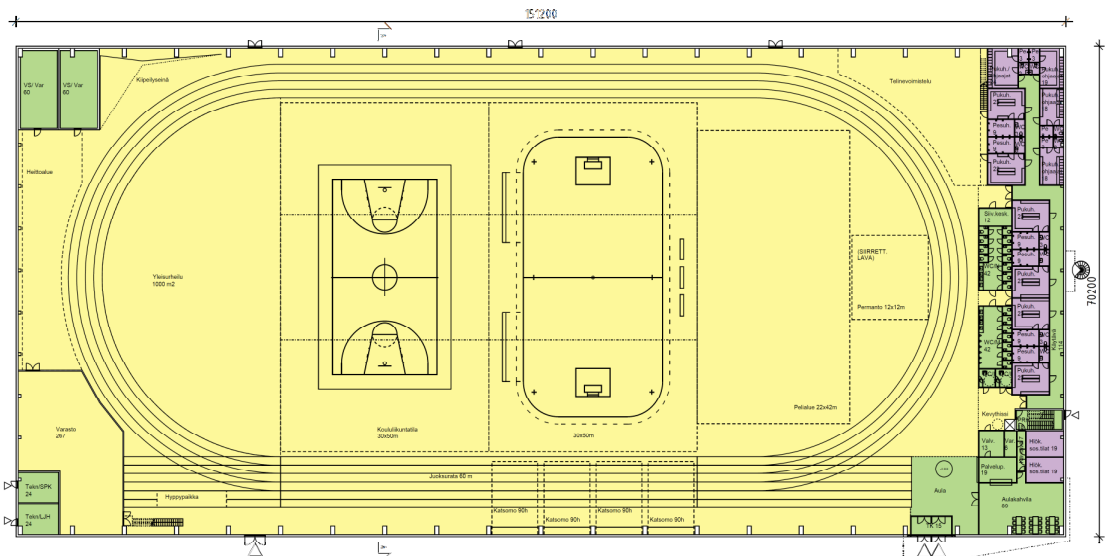
Kuva 15. Säteilimien keskimääräinen lämpötila säteilimien pinta-alan ja sisäilman lämpötilan funktiona tarkastelupisteessä C ($t_{\text{sät,ks}} = +24^{\circ}\text{C}$)

4 MONITOIMIHALLIN LÄHTÖTIEDOT

Tässä luvussa esitetään tutkitun hallirakennuksen geometria sekä energiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä.

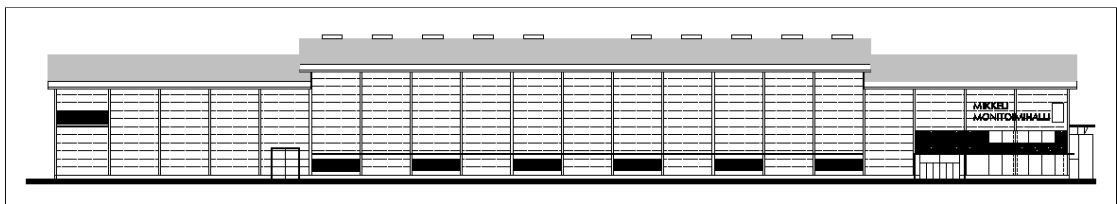
4.1 Monitoimihallin päämitat ja muoto

Monitoimihallin fyysiset mitat sekä visuaalinen ulkonäkö mallinnuksessa vastaavat hankesuunnitelmassa määritellyt mittoja ja muotoja. Hankesuunnitelman on laatinut Pöyry Finland Oy. Kuvassa 16 on hankesuunnitelman mukaisen monitoimihallin 1. kerroksen pohjapiirustus. 1. kerroksen kerrospinta-ala on 10590 m^2 ja 2. kerroksen 660 m^2 . Kokonaiskerrosala hallirakennuksessa on 11250 m^2 . Rakennuksen pituus on 151,2 metriä ja leveys 70,2 metriä. Rakennuksen bruttotilavuus hankesuunnitelman mukaan on $129\,104 \text{ m}^3$.



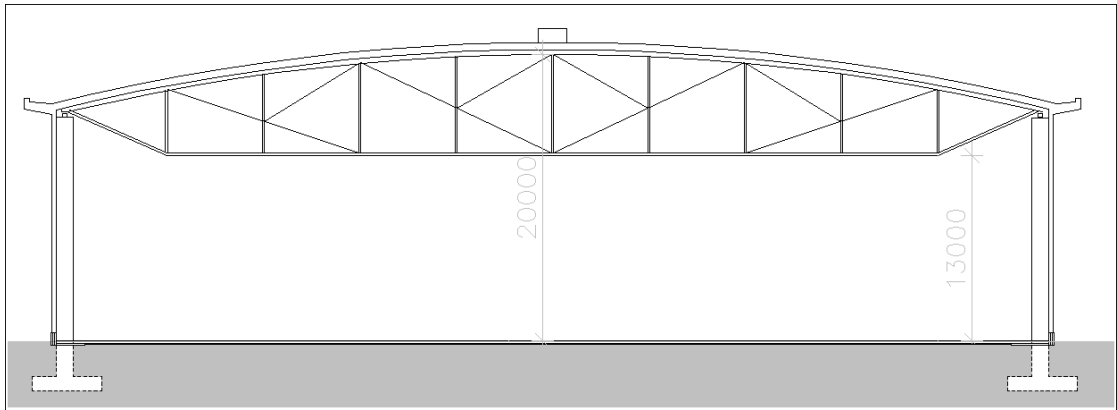
KUVA 16. Monitoimihallin 1. kerroksen pohjapiirustus (Pöyry Finland Oy 2012)

Kuvassa 17 on monitoimihallin julkisivupiirustus esitettynä itään päin. Monitoimihallin yleisurheilutilan on ajateltu olevan keskiosaltaan korkeampaa huonetilaa, koska siellä sijaitsee palloilulajeille (esimerkiksi lentopallo ja koripallo) tarkoitettut alueet.

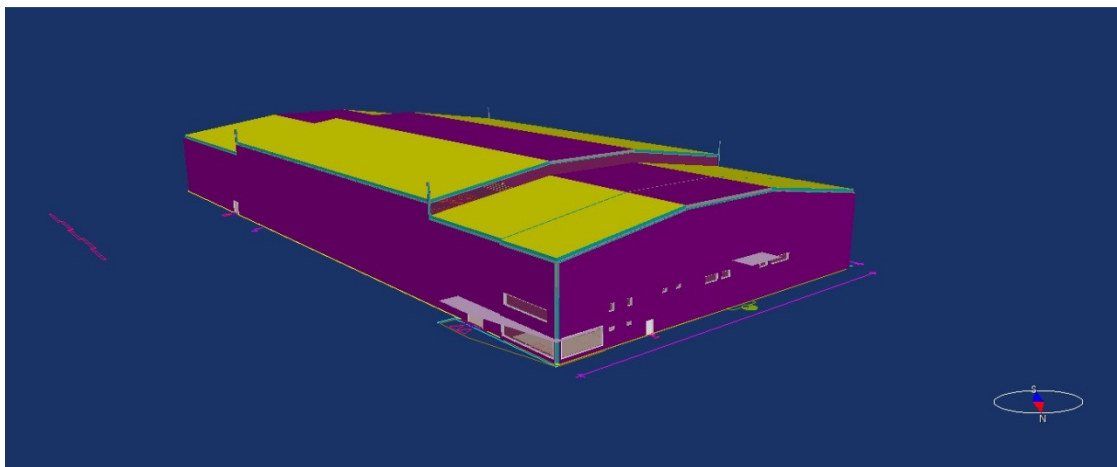


KUVA 17. Monitoimihallin julkisivupiirustus itään (Pöyry Finland Oy 2012)

Kuvassa 18 on esitetty monitoimihallin leikkaus yleisurheiluhallin keskiosalta eli korkeimmalta kohdalla. Huonekorkeus korkeimmalla kohdalla on 20 metriä ja ulkoseini- en vieressä 16 metriä. Leikkauskuvassa olevien teräksestä valmistettävien kattorakenteiden alapinta lattiasta sijaitsee 13 metrin korkeudella. Kuvassa 19 on mallinnettu hankesuunnitelmassa kuvailtu vaihtoehto 3 kuvattuna pohjoisesta.



KUVA 18. Monitoimihallin leikkaus hallin korkeimmasta kohdasta (Pöyry Finland Oy 2012)



KUVA 19. Monitoimihallin VE3 dynaaminen malli kuvattuna pohjoisesta

4.2 Energialähteet ja -hinnat

Kokonaisenergiankulutuksen laskennassa on käytetty lämmönlähteenä kaukolämpöä, jonka energiamuotokerroin on 0,7. Lämmitysenergian hintana laskelmissa on käytetty Etelä-Savon Energia Oy:n verkkosivuilla ilmoittamaa energian hintaa 48,71 €/MWh (Etelä-Savon Energia Oy 2012). Energianhinta ei sisällä kaukolämpöliittymän vuosimaksua. Vuoden 2013 alusta energianhinta nousee ja hinta on 55,04 €/MWh (Etelä-Savon Energia Oy 2012).

Aurinkoenergian käyttöä tutkittiin ainoastaan lämpimän käyttöveden tuotannossa. Selvityksessä arvioitiin aurinkoenergian tuottamaksi energiamääräksi 40 % lämpimän käyttöveden kulutusta vastaavasta energiamäärästä. Aurinkoenergiakeräimien tarvit-

semaa pinta-alaa, edellä mainitulle energiamäärälle, arvioitiin käytettäessä tasokeräimiä sekä tyhjiöputkikeräimiä.

Sähköenergian energiamuotokertoimena on laskelmissa käytetty kerrointa 1,7. Sähkön hintana laskelmissa on käytetty Etelä-Savon Energia Oy:n yleisten hintojen mukaan 11,34 €/kWh (Etelä-Savon Energia Oy 2012). Vuoden 2013 alusta lähtien sähköenergian hinta on 11,91 €/kWh (Etelä-Savon Energia Oy 2012). Laskelmien sähköliittymän tyyppinä käytettiin yleistariffia.

4.3 Rakenteet

Taulukossa 5 on esitetty simuloinneissa käytettyjen rakenneosien materiaalit ja U-arvot sekä muut tarvittavat arvot kokonaisenergiakulutusta laskettaessa. Rakenneosien materiaalit ovat hankesuunnitelman mukaisia rakenteita. (Pöyry Finland Oy 2012)

TAULUKKO 5. Rakenneosat

Rakenneosa	Materiaali	U-arvo, W/m ² K
Ulkoseinät ¹	Paroc-elementti	0,16
Ikkunat ²	Lämpölas	1,0
Ovet	Puu, metalli	1,0
Yläpohja	Liittolevy, mineraalivillaeriste n.500mm	0,09
Alapohja	Betoni, eriste 250mm	0,16
Väliseinät	Muurattu tiiliseinä	
Välipohjat	Betoni, eriste, pinta- tavalu	
Kantavat rakenteet (ei kattorakenteet)	Betoni	

¹ Ulkoseinän kokonaispaksuus on 243mm ja rakenteen U-arvo 0,16 W/m²K valmistajan ilmoituksen mukaisesti. (Paroc Oy 2012)

² Ikkunoiden G-arvo 0,555.

Hankeselvityksessä on liikuntahallin kantavissa rakenteissa suunniteltu käytettäväksi betonisia rakenteita. Betonisia rakenteita on tarkoitus käyttää kantavissa pilareissa, jotka on sijoitettu hallin ulkoseinien viereen. Betonimassa huonetilassa vaikuttaa läm-

pötilapysyvyyteen ja tasaa lämpötilavaihteluita varsinkin kesäaikaan. Kantavien rakenteiden mitat arvioitiin pohjapiirustuksista ja kokonaisbetonimassa asetettiin simuloinneissa huonetilan sisäiseen massaun. Betonin kokonaismassana käytettiin yleisesti käytössä olevaa betonin ominaismassaa 2400 kg/m^3 .

4.4 Rakennusvaipan tiiveys

Rakennusvaipan tiiveyttä kuvaavan ilmanvuotoluvun suunnittelussa käytettävän q_{50} ilmanvuotoluvun suunnitteluarvon tulee määräyksen D3 mukaan olla $4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$. Mikäli ilmanvuotolukuarvona käytetään pienempää arvoa kuin $4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, on rakennuksen vaipan tiiveys mitattava. Ilmanvuotoluvun q_{50} vertailuarvona tasauslaskennassa tulee käyttää ilmanvuotolukua $2 \text{ m}^3/\text{hm}^2$. (RakMK D3 2012)

Kokonaisenergiakulutuksen alkutilanteessa laskennassa on käytetty ilmanvuotolukuarvona $4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$. Paroc-elementtejä valmistavan Paroc Oy:n teknisen tuen mukaan Paroc-elementeistä rakennetuissa rakennuksissa on päästy q_{50} ilmanvuotoluvussa $1 \dots 3 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ mukaisiin lukuarvoihin. (Paroc Oy 2012)

4.5 Lämmitysjärjestelmä

Lämmitysjärjestelminä selvityksessä käytettiin liikuntahallin osalla säteilylämmitystä sekä vaihtoehtona perinteisempää ilmalämmitystä. Muissa tiloissa kuin liikuntahallissa tilojen lämmitysmuotona käytettiin kosteiden tilojen osalla vesikiertoista lattialämmitystä ja muissa tiloissa radiaattorilämmitystä. Säteilylämmitystä käytettäessä voidaan huoneilman lämpötilaa laskea, koska säteilylämmitys saa oleskeluvyöhykkeellä oleskelevan tuntemaan huoneilman lämpöisempänä kuin mitä se todellisuudessa on. Säteilylämmityksessä liikuntahallin sisäilman lämpötila asetettiin $+16,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Tämän tutkimuksen kohdassa 2.4. tutkittiin erilaisten lämmitystapojen energiankulutusta ja käytettävää sisälämpötilaa, kun oleskelijoiden viihtyisyys pysyttelee noin 10 % PPD-arvossa. Säteilylämmityksessä sisäilman lämpötilaksi saatiin $15,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Monitoimihallin simuloinneissa käytettiin kuitenkin korkeampaa lämpötilaa $+16,5 \text{ }^\circ\text{C}$, koska hallissa oleskelevien ihmisten aktiviteettitaso vaihtelee eikä sama sisälämpötila ole optimaalinen kaikille oleskelijoille.

4.6 Ilmanvaihto

Esiselvityksessä on ilmanvaihtokoneiden tuloilman lämpötilasuhteena käytetty liikuntahallin osalla 65 % ja muiden tilojen osalla 60 %. Kyseisillä tuloilman lämpötilasuhteilla saavutetaan Mikkelissä määräyksen D3 vaatima suunnittelussa käytettävä vähintään 45 %:n vuosihyötysuhde. Tarkkaa vuosihyötysuhdetta ei ilmanvaihtokoneille pystytä vielä määrittelemään, koska lopullisia ilmavirtoja ei tiedetä.

Lämmöntalteenottotapana hallin osalla on käytetty niin kutsuttua pyörivää regeneratiivista lämmöntalteenottolaitetta, joka siirtää myös kosteutta. Muiden tilojen osalla on lämmöntalteenottolaitteena ollut levylämmönsiirrin.

4.7 Aurinkokeräimien pinta-ala

Selvityksessä arvioitiin aurinkoenergialla pystyttävän tuottamaan noin 40 % lämpimän käyttöveden tarvitsemasta lämmitysenergiämäärästä. Aurinkoenergian keräimien tarvitsema pinta-ala laskettiin Aurinko-opas 2012:n (Heimonen 2011) mukaisesti ja laskentamallina käytettiin yksityiskohtaisempaa laskentatapaa. Standardikäytön mukainen lämpimän käyttöveden kulutuksen tarvitsema kokonaislämmitysenergiämäärä on noin 270 000 kWh, josta aurinkokeräimillä arvioitiin saatavan tuotettua 40 % eli noin 108 000 kWh. Aurinkoenergiakeräinpinta-alat laskettiin kahden erilaisen, tasokeräin ja tyhjiöputkikeräin, keräintekniikan mukaisesti. Tasokeräimien pinta-alaksi saatiin noin 300 m² ja tyhjiöputkikeräimien pinta-alaksi noin 200 m². Molemmissa keräinmalleissa oletettiin keräimien sijainniksi monitoimihallin etelän puoleinen pääty, jolloin keräimien suuntaus on paras mahdollinen eli etelä.

4.8 Valaistus

Selvityksen alkutilanteessa on valaistuksen ottotehona käytetty määräyksen D3 mukaista arvoa 12 W/m². Valaistustapana on laskelmissa käytetty hankesuunnitelman mukaista valaistustapaa, jossa halliosalle tulee roikkuvat monimetallivalaisimet.

Selvityksen viimeisessä energiankulutusta alentavana toimenpiteenä käytettiin valaistuksen ottaman ottotehon alentamista arvoon 8 W/m^2 . Kyseinen ottoteho vaatii todennäköisesti valaistustavan ainakin osittaisen muuttamisen LED-valaistukselle.

5 LASKENNAN LÄHTÖTIEDOT

Monitoimihalliin liittyviä laskelmia tehtiin koskien kokonaisenergiankulutusta (E-luku), ostoenergian kulutusta, kesäajan lämpötilaa sekä monitoimihallin käyttämistä konserttitilana.

Monitoimihallin kokonaisenergiankulutus eli E-luku on laskettu Rakennusmääräyskoelman osan D3 mukaisesti standardikäytöllä. E-luvun vaatimus liikuntahalleille on alle 170 kWh/m^2 vuodessa (SRakMK D3 2012). Standardikäytön kuormituksista kerrotaan jäljempänä.

Ostoenergian kulutukset on laskettu hyödyntäen E-luvun laskelmia. Ostoenergiankulutuksen laskemisessa ei energiankulutuksissa käytetä energianmuotokertoimia, vaan kulutus lasketaan laskennallisesti kulutetun energiamäärän mukaan. Ostoenergiankulutuslukemien perusteella on voitu laskea energiamäärien kulutuksien aiheuttamat rahalliset kustannukset vuositasolla.

Kesäajan yllälämpenemisen hallinta on laskettu RakMK osan D3 mukaisesti. Ensimmäisenä huonetilana käytettiin 1. kerroksessa sijaitsevaa aulakahvilaa, koska tilassa on suuret ikkunapinta-alat ja niiden suuntaus on koilliseen. Toisena huonetilana käytettiin 2. kerroksen koulutustilaa, jonka ikkunapinnat ovat myös suunnattuna itään. Monitoimihallin sisälämpötilan muutosta on arvioitu standardikäytön mukaisesti sekä konserttitilaisuuden aikana, jolloin hallissa on noin 3000 henkilöä.

5.1 Rakennusmääräyskoelman osan D3 standardikäyttö

RakMK osa D3/2012 tuli lainvoimaiseksi 1.7.2012. Uudistunut määräys asettaa uusille rakennuksille tavoitearvot kokonaisenergiankulutukselle. Määräyksessä on määriteltä standardikäyttö yhdeksälle erilaiselle rakennuksen käyttötarkoitukselle. Liikun-

tahallien käyttötarkoitukselle on oma luokka 7, johon eivät kuulu uima- ja jäähallit. (SRakMK osa D3 2012.)

5.2 Säätiiedot

E-luku on laskettu D3:n säävyöhykkeen I mukaisesti, ja säätiетoina on käytetty uutta niin kutsuttua TRY2012-säädataa. TRY2012 testivuosi korvaa aiemmin käytössä olleen testivuosi 1979 (Jylhä ym. 2011). Simulointiohjelmassa käytetty säädata vastaa määräyksen D3 liitteissä olevaa säätiетoa.

5.3 Sisäilmasto

Liikuntahallien sisäilmastolle on määritelty laskelmissa käytettäviksi taulukossa 6 esitetyt arvot (SRakMK D3 2012).

TAULUKKO 6. Energialaskennassa käytettävät huonelämpötilan asetusarvot ja käyttöajan ilmanvaihtomäärät. Ilmavirrat on annettu lämmitettyä nettoalaa kohti

Käyttötarkoitukseluokka	Ulkoilmavirta l/s m ²	Lämmitysraja °C	Jäähdytysraja °C
Liikuntahalli	2	18	25

Liikuntahallin ilmanvaihdon ulkoilmavirta tulee olla käyttöajan ulkopuolella vähintään 0,15 l/s m². Selvityksen alkutilanteessa ilmanvaihtokoneen ohjauksessa ei ole ollut tarpeenmukaista ohjausta, ainoastaan toiminta-aikaohjaus.

5.4 Rakennuksen standardikäyttö ja sisäiset lämpökuormat

E-luvun laskennassa käytetyt käyttöajat sekä sisäiset lämpökuormat olivat D3 standardikäytön mukaisia. Käyttöajat ja sisäiset lämpökuormat on esitetty taulukossa 7. (SRakMK D3 2012.)

TAULUKKO 7. Standardikäyttöajat sekä sisäiset lämpökuormat

Käyttötarkoi- tus-luokka	Kellonaika	Käyttöaika		Käyttö- aste	Valais- tus W/m ²	Ihmiset W/m ²
		h/vrk	pv/vko			
Liikuntahalli	8.00–22.00	14	7	0,5	12	5

Kuluttajalaitteille ei liikuntahallien standardikäytössä ole lämpökuormaa eikä niille lasketa energiankulutusta. Valaistuksen ohjauksessa ei ole huomioitu tarpeenmukaista ohjausta vaan valaistusta ohjataan käyttöaikojen mukaisesti. Ihmisten henkilötiheytenä on käytetty D3:n mukaista tiheyttä 1/17 henkilöä neliometriä kohti. Yhden ihmisen lämpökuormana on käytetty 125 W. Ilmanvaihtokoneet käynnistyvät täydelle teholle 1 tunti ennen rakennuksen käyttöajan alkua ja pienentyvät 1 tunti käyttöajan päättymisen jälkeen käyttöajan ulkopuoliselle tehokkuudelle. Käyttöajan ulkopuolella ilmanvaihtokoneet ovat tehokkuudeltaan vastaamassa ilmavirtaa 0,15 l/s, m². (SRakMK D3 2012)

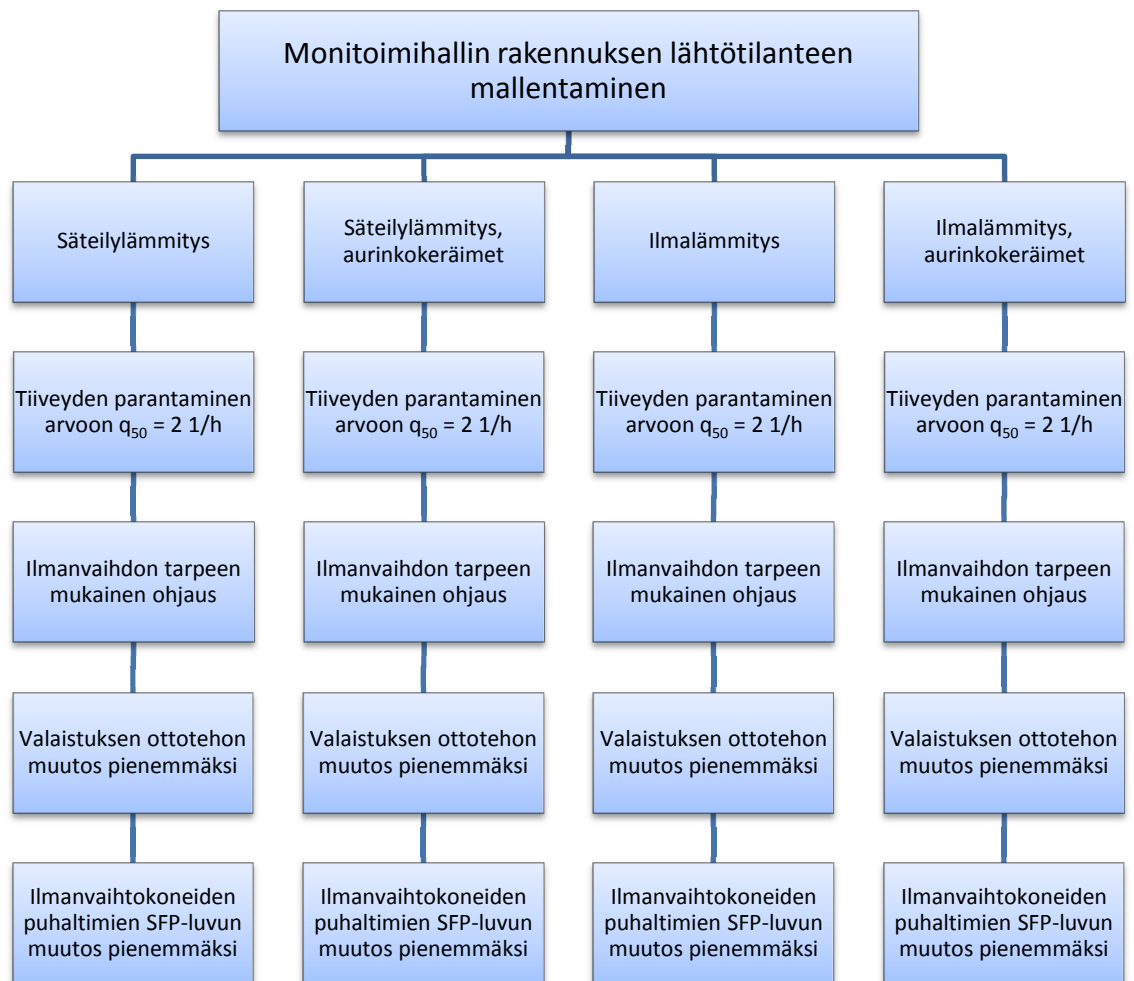
5.5 Lämmin käyttövesi

Lämpimän käyttöveden ominaiskulutus on laskettu D3:n taulukon 5 mukaisesti. Liikuntahallin lämpimän veden ominaiskulutus on 343 litraa/m² vuodessa (SRakMK D3 2012). Laskelmissa on huomioitu lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviöt.

6 DYNAAMISEN LASKENNAN VARIAATIOT

Monitoimihallin ominaisenergiankulutusta sekä E-lukua laskettiin usealla eri vaihtoehdolla. Yhteistä kaikilla vaihtoehdoilla oli lämmitysenergian lähde (kaukolämpö) sekä rakennuksen rakenteet (ulkoseinät, ikkunat, ovet, alapohja ja yläpohja). Vaihtoehdot jaettiin kahteen päävaihtoehtoon, jotka määriteltiin lämmönjakotavan mukaisesti säteilylämmitykseen ja ilmalämmitykseen. Molempiin päävaihtoehtoihin tehtiin täsmälleen samanlaiset muutokset ja laskelmat eri tiiveys- ja tekniikkavaihtoehdoilla. Energiankulutuksen pienentämiseen valitut toimenpiteet valittiin niiden helposti toteuttamisen sekä alhaisten rakentamiskustannuksien kannalta. Koska valittujen toimenpiteiden avulla saavutettiin alhainen energiankulutustaso, ei lisätoimenpiteiden

käyttämisen tutkimiselle nähty riittäviä perusteita. Kuvassa 20 on esitetty eri variaatioiden hierarkiajärjestys simuloinneissa ja laskelmissa.



KUVA 20. Simuloinneissa ja laskelmissa käytetty hierarkia

Kuvan 20 mukaisesti simuloinneissa ja laskelmissa käytettyjen energian kulutusta pienentävät toimenpiteet lisättiin edelliseen tilanteeseen, joten viimeisien simulointien jälkeen saaduissa energiankulutuksissa on huomioitu kaikkien toimenpiteiden yhteisvaikutus. Molemmissa päävaihtoehdoissa (säteily- ja ilmalämmitys) tutkittiin ensimmäiseksi rakenteiden tiiveyden vaikutusta ominaisenergiankulutukseen ja E-lukuun. Alkutilanteessa rakenteiden tiiveytenä käytettiin laskelmissa vuotoilmalukua q_{50} 4 1/h:ssa, joka vastaa määräyksissä vaadittua vähimmäisarvoa. Ensimmäisenä, energiankulutusta pienentävänä, muutoksena käytettiin rakenteiden tiiveyden arvon muuttamista siten, että ilmanvuotoluvuksi annettiin arvo q_{50} 2 1/h:ssa. Tämä tosin aiheuttaa tiiveyden mittauksen tulevan pakolliseksi rakennusaikana, kun ilmanvuotoluvun arvona käytetään lukuarvoa alle 4 1/h.

Tiiveyden muutoksen jälkeen tutkittiin ilmanvaihdon tarpeenmukaisen ohjauksen vaikutusta ominaisenergian kulutukseen ja E-lukuun. Huonetiloihin aseteltiin hiilidioksidiraja-arvot (CO_2), joiden mukaan ilmavirtaa säädetään huonetilaan. Hiilidioksidiraja-arvoiksi aseteltiin alarajaksi 850 ppm ja ylärajaksi 1200 ppm. Jotta laskentaohjelma säätäisi ilmavirtaa hiilidioksidipitoisuuden mukaan huonetilassa, oli säädettävä myös ilmavirralla alaraja-arvo. Alaraja-arvoksi aseteltiin $0,5 \text{ l/s, m}^2$, joka vastaa 25 %:a määräyksen D3 mukaisesta standardikäyttöilmavirrasta. Laskentaohjelman laskiessa huonetilojen energiankulutusta, käyttää se aseteltua alaraja-arvoa, mikäli huonetilan sisäilman hiilidioksidipitoisuus ei ylitä maksimiraja-arvoa (1200 ppm).

Ilmanvaihdon tarpeenmukaisen ohjauksen jälkeen tutkittiin valaistuksen vaikutusta ominaisenergiakulutukseen ja E-lukuun. Alkutilanteessa valaistuksen ottamaksi ottotehoksi määriteltiin määräyksen D3 mukaisen standardikäytön arvoa 12 W/m^2 (SRakMK D3 2012). Valaistuksen tarvitsemaa ottotehoa pienennettiin ottotehoon 8 W/m^2 vain liikuntahallin osalta eikä muiden tilojen valaistuksen ottamaa sähkötehoa pienennetty. Määräyksen D3 standardikäytön mukaista arvoa voidaan pienentää, mikäli valaistusvoimakkuus oleskeluvyöhykkeillä säilyy ja muutoksesta annetaan erilliselvytys. Määräys D3 viittaa ohjeistuksessaan standardiin SFS-EN 12464-1, jossa on määritelty työkohteiden valaistusta ja monitoimihallin liikuntasalin valaistus voidaan rinnastaa julkisiin kokoontumistiloihin sekä opetustiloihin. Mikäli liikuntasali rinnastetaan julkisten kokoontumistilojen messu- ja näyttelyhalleihin on yleisvalaistuksen valaistusvoimakkuus oltava 300 lux (SFS-EN 12464-1 taulukko 5.31). Liikuntasali rinnastettaessa opetustilojen urheiluhalliin on valaistusvoimakkuus oltava myös 300 lux (SFS-EN 12464-1 taulukko 5.36).

Standardissa SFS-EN 12193 Light and lighting, Sports lighting on määritelty erilaisen urheilutilojen valaistusvoimakkuuksia ja luokitustasoja. Valaistukset voidaan standardin mukaan luokitella kolmeen eri kategoriaan, joista paras taso 1 on tarkoitettu kansainvälisen huippu-urheilulle. Tällöin tarvitaan hyvä yleisvalaistus, koska tilaisuuksia televisoidaan usein. Luokan 2 valaistustaso on tarkoitettu kansallisen tason urheilulle, jota voidaan televisoida ja kolmas taso, luokka 3, on tarkoitettu lähinnä koulutuksen ja harjoittelun käyttöön. Suunnitellun liikuntahallin sisätiloissa tapahtuvalle aktiviteeteille on annettu taulukon 8 mukaiset valaistusvoimakkuudet. (SFS-EN 12193)

TAULUKKO 8. Valaistusvoimakkuuksia standardin SFS-EN 12193 mukaisesti

Alueen käyttötarkoitus	Valaistusvoimakkuus, lux		
	Luokka 1	Luokka 2	Luokka 3
Koripallo	750	500	200
Salibandy	750	500	200
Käsipallo	750	500	200
Taistelulajit	750	500	200
Yleisurheilu	500	300	200
Tennis	750	500	300
Nyrkkeily	2000	1000	500

Valaistusvoimakkuuksia tarkasteltaessa tulee ottaa huomioon, ettei kyseistä aktiviteettia harrastettaessa tarvitse koko salia valaista standardin mukaiseen valaistusvoimakkuuteen. Katsomoalueiden valaistusvoimakkuudeksi riittänee standardissa SFS-EN 12464-1 taulukossa 5.30 Julkiset kokoontumistilat esitetty valaistusvoimakkuus 200 lux (SFS-EN 12464-1).

Valaistusvoimakkuuden muutoksen jälkeen tehtiin vielä yksi muutos teknisiin laitteisiin, jossa muutettiin ilmanvaihtokoneiden puhaltimien sähkötehokkuusluku SFP määräyksen (SRakMK D3 2012) maksimiarvosta $2,0 \text{ kW/m}^3/\text{s}$ hyvään sähkötehokkuuslukuarvoon $1,5 \text{ kW/m}^3/\text{s}$ ja ilmalämmityslaskelmien kiertoilmapuhaltimien sähkötehokkuusluku arvosta $1,0 \text{ kW/m}^3/\text{s}$ arvoon $0,8 \text{ kW/m}^3/\text{s}$.

Dynaamisella laskentatyökalulla tehtyjen simulointien jälkeen molempien päävaihtoehtojen lämpimän käyttöveden tuotantoon lisättiin aurinkoenergiakeräimet ja tutkittiin keräimien vaikutusta ominaisenergian kulutukseen sekä E-lukuun.

7 TULOKSET JA TULOSTEN ANALYSOINTI

Monitoimihallin kokonaisenergiakulutuksen laskemiseen on käytetty IDA ICE 4.22 dynaamista laskentatyökalua. Tuloksissa on esitetty edellä mainittujen lähtötietojen perusteella laskettu ominaisenergiankulutus ja kokonaisenergiankulutus E-luku sekä parempaan energiatehokkuuteen tähtäävien muutoksien aiheuttama muutos lukuarvoi-

hin. Ostoenergian määrä saadaan laskettua, kun ominaisenergiakulutus kerrotaan rakennuksen pinta-alalla. Ostoenergian määrän perusteella on laskettu energiakustannukset yhdelle vuodelle sekä 15 vuoden pituiselle jaksolle oletetulla energiahintojen hinnan nousulla.

Kokonaisenergiakulutusta kuvaavaa E-lukua laskettaessa sähkö- ja lämmitysenergiakulutukset jaetaan viiteen eri osaan. Energiat jaetaan sähkönkulutuksen osalta kiinteistön valaistuksen, jäähdytyksen ja LVI-laitteiden kuluttamien määrien mukaan. Lämmityksen osalta energiamäärät jaetaan kiinteistön lämmittämiseen ja lämpimän käyttöveden (LKV) tarvitseman energiamäärän mukaisesti. Energioiden jakaantuminen on esitetty kohdassa 7.2.

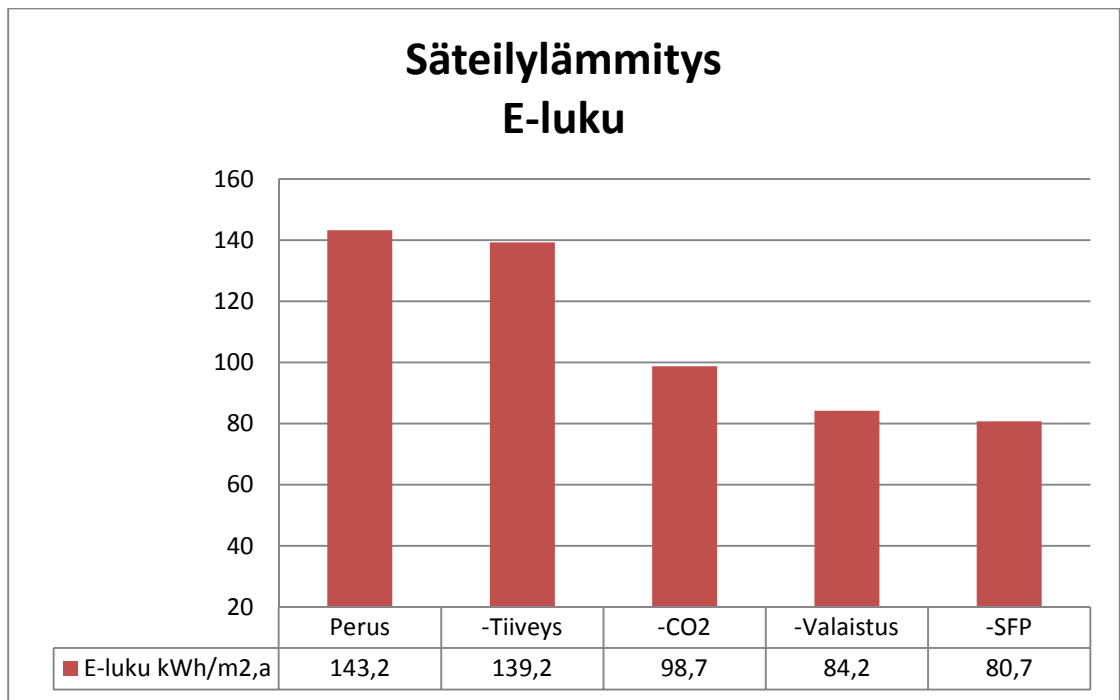
Tuloksissa on esitetty myös kesäajan lämpötilan hallinta kolmessa eri huonetilassa sekä konserttikäytöstä aiheutuva halliosan sisälämpötilan muutos.

7.1 Kokonaisenergiankulutus ja ominaiskulutus

Kokonaisenergian kulutus laskettiin kahdella eri liikuntahallin lämmitystavalla ja Monitoimihallin rakenteisiin ja tekniikkaan tehtiin samanlaiset energiansäästöön tähtäävät muutokset. Kyseiset muutokset on kuvattu aiemmin luvussa 4.

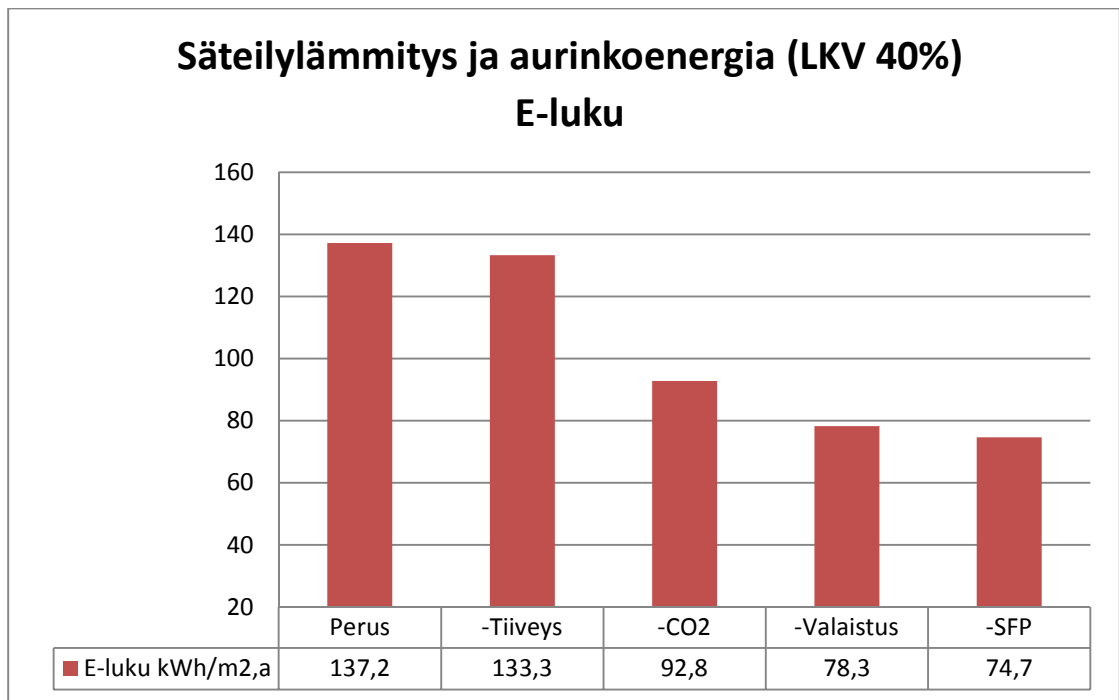
7.1.1 Säteilylämmitysjärjestelmän mukaiset E-luvut ja ominaiskulutukset

Kuvassa 21 on esitetty monitoimihallille lasketut E-luvut, kun lämmitysjärjestelmänä liikuntahallissa on säteilylämmitys. Lähtötilanteen E-luvun mukaan monitoimihalli alittaisi ilman muutoksia määräyksessä D3 vaaditun raja-arvon $170 \text{ kWh/m}^2, \text{ a}$. E-lukua esittävien pylväiden korkeudesta voidaan helposti havaita ilmanvaihdon tarpeenmukaisen ohjauksen olevan erittäin tehokas tapa saada E-lukua alennettua. Kyseinen toimenpide on myös erittäin helppo ja edullinen toimenpide toteuttaa.



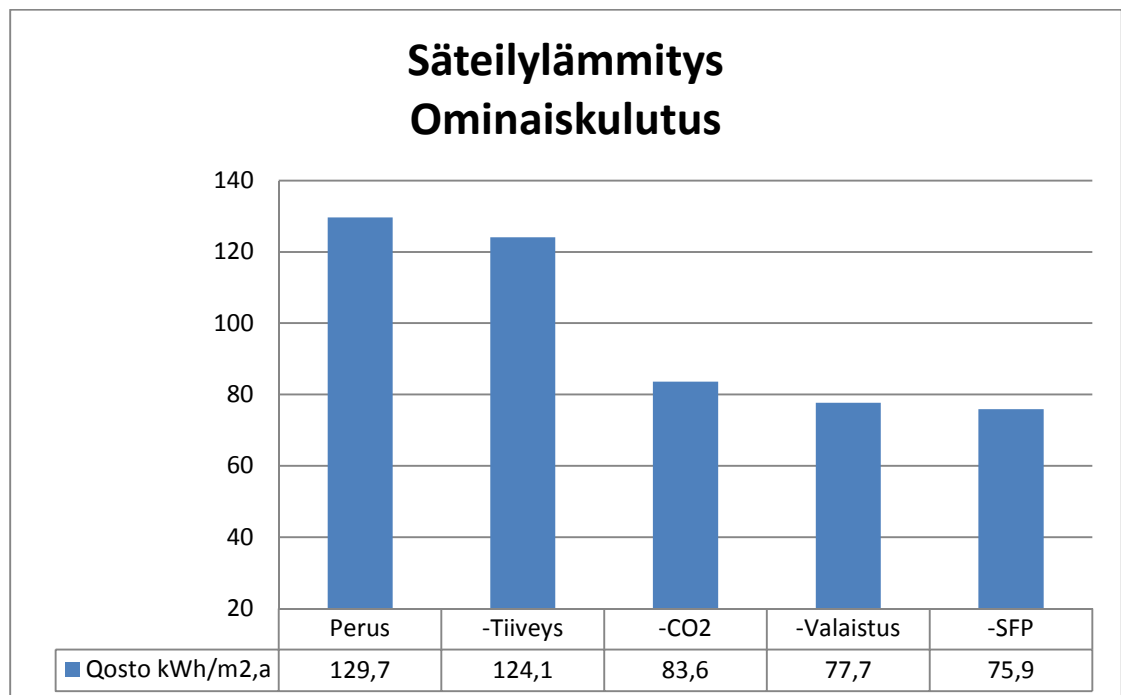
KUVA 21. E-luvut säteilylämmityksellä

Kuvan 22 E-luvun arvot on saatu, kun liikuntahallin säteilylämmityksen rinnalle on monitoimihallin tekniikkaan lisätty lämpimän käyttöveden tuotantoon aurinkoenergiakeräimiä siten, että niillä saadaan tuotettua 40 % lämpimän käyttöveden tarvitsemasta kokonaisenergiamäärästä. Lähtötilanteen E-luku alittaa määräyksessä asetetun raja-arvon. Myös tästä kuvasta voidaan helposti havainnoida ilmanvaihdon tarpeenmukaisen ohjauksen tehokkuus E-luvun pienentämisessä.



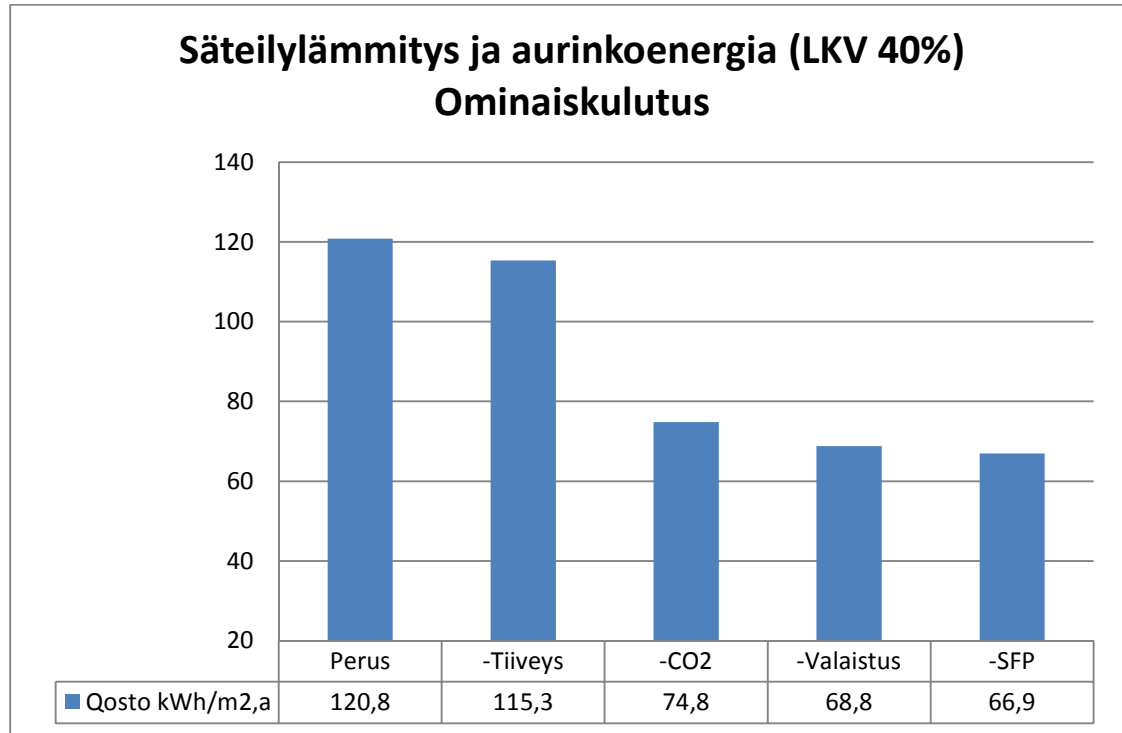
KUVA 22. E-luvut säteilylämmityksellä ja aurinkoenergiakeräimillä

Kuvassa 23 on esitetty monitoimihallin energiatarpeen ominaiskulutus, kun liikunta-hallin lämmitysmuotona on säteilylämmitys. Ominaiskulutuksen laskemisessa ei käytetä energiamuotokertoimia. Ilmanvaihdon tarpeenmukaisella ohjauksella on myös ominaiskulutuksia tutkittaessa suurin säästövaikutus energiankulutuksiin.



KUVA 23. Ominaiskulutukset ilmalämmityksellä

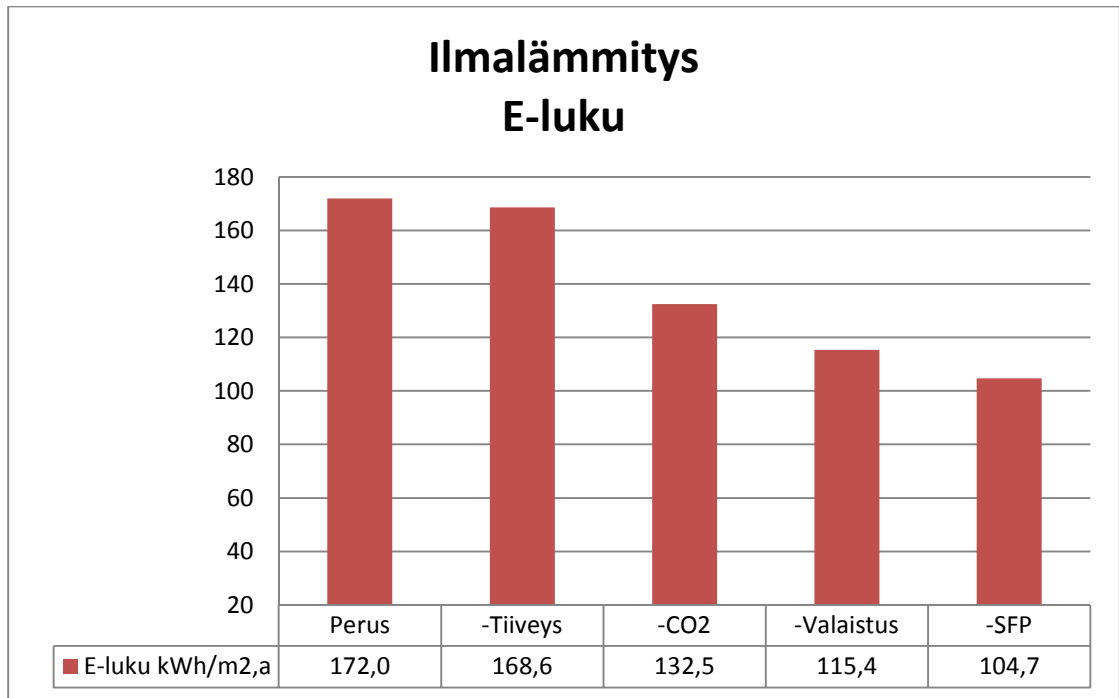
Kuvassa 24 on esitetty ominaiskulutus, kun liikuntahalli on varustettu säteilylämmityksellä ja monitoimihallin lämpimän käyttöveden lämmittämiseen lisätään aurinkoenergiakeräimiä siten, että lämpimän käyttöveden lämmittämiseen tarvittavasta energiamäärästä on aurinkoenergialla tuotettu 40 %. Suurin muutos ominaiskulutusluokemaan saadaan ilmanvaihdon tarpeen mukaisella ohjauksella.



KUVA 24. Ominaiskulutukset ilmalämmityksellä ja aurinkoenergiakeräimillä

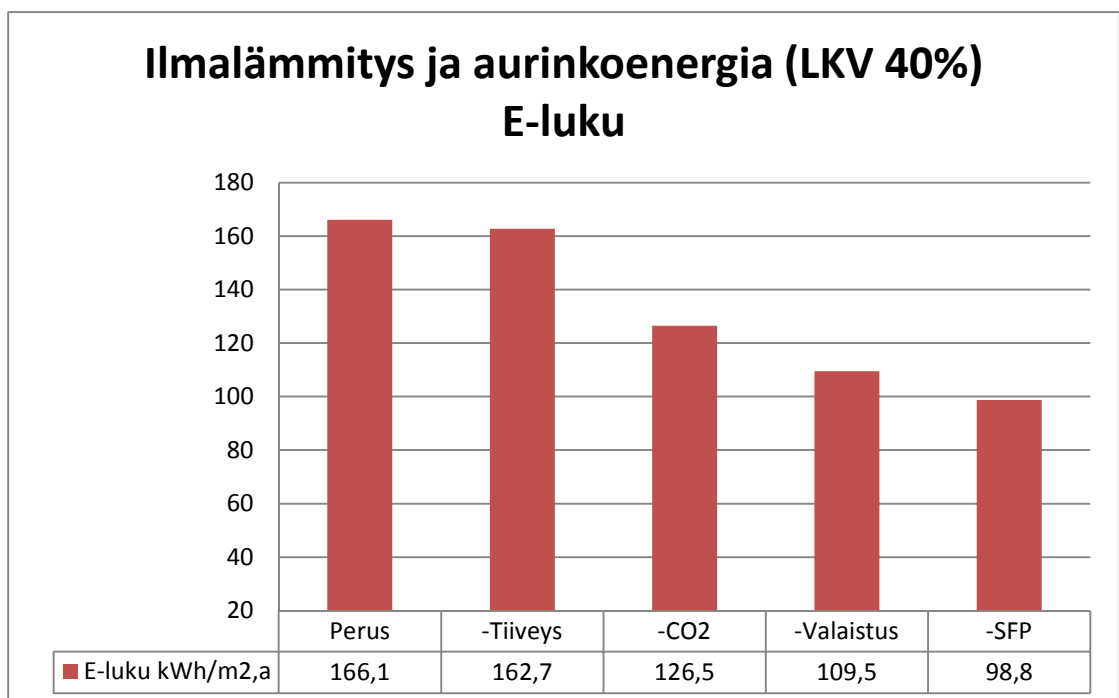
7.1.2 Ilmalämmitysjärjestelmän mukaiset E-luvut ja ominaiskulutukset

Kuvan 25 E-luvut on saatu, kun liikuntahallin lämmitysmuodoksi on valittu ilmalämmitys. Määräyksessä D3 vaadittu E-luvun maksimi raja-arvo ylitetään, joten rakennus ei täytä sille määräyksissä asetettua vaatimusta. Kaikilla tässä raportissa esitetyillä E-lukua pienentävillä toimenpiteillä saadaan riittävästi pienennettyä E-lukua, jotta rakennuksen E-luku alittaisi vaaditun arvon 170 kWh/m²,a. Kuvasta 25 voidaan havaita, että suurin yksittäinen pienennys E-lukuun saadaan ilmanvaihdon tarpeenmukaisen ohjauksen avulla.



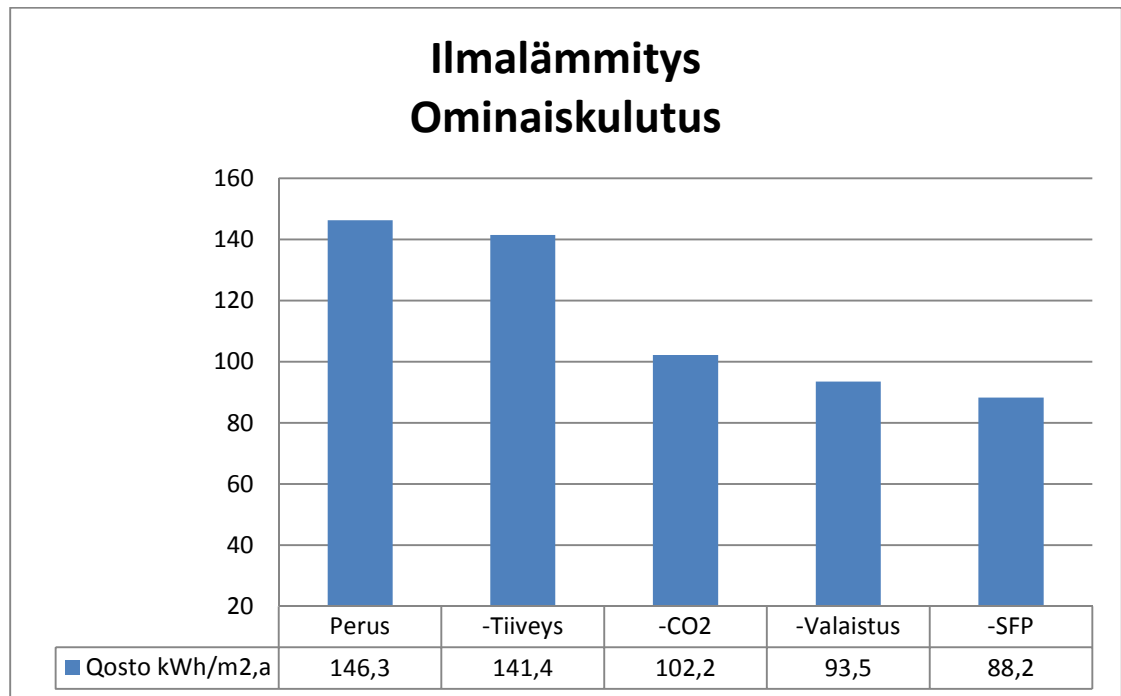
KUVA 25. E-luvut ilmalämmityksellä

Kuvassa 26 on esitetty E-luvut, kun liikuntahalli on varustettu ilmalämmityksellä ja monitoimihallin lämpimän käyttöveden lämmittämiseen lisätään aurinkoenergiakeräimiä siten, että lämpimän käyttöveden lämmittämiseen tarvittavasta energiamäärästä on aurinkoenergialla tuotettu 40 %. Kuvan 26 mukaisten E-lukuarvojen mukaan rakennus alittaisi vaaditun raja-arvon ilman esitettyjä muutoksia.



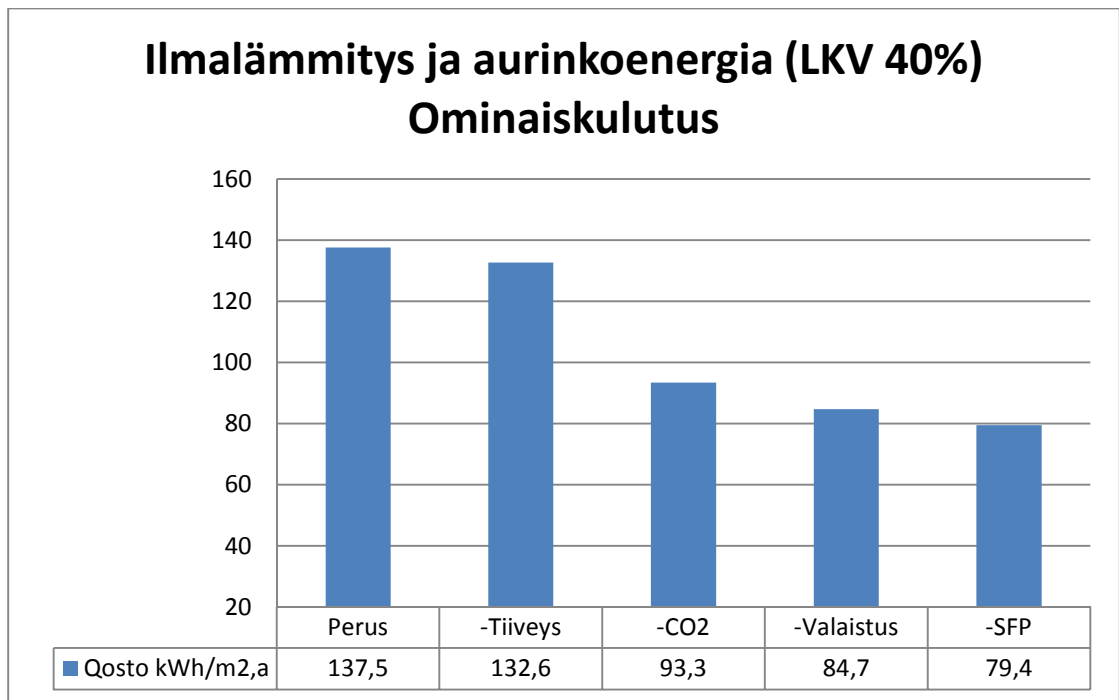
KUVA 26. E-luvut ilmalämmityksellä ja aurinkoenergiakeräimillä

Kuvassa 27 on esitetty Monitoimihallin energiatarpeen ominaiskulutus, kun liikuntahallin lämmitysmuotona on ilmalämmitys. Ominaiskulutuksen laskemisessa ei käytetä energiamuotokertoimia. Ilmanvaihdon tarpeenmukaisella ohjauksella on myös ominaiskulutuksia tutkittaessa suurin säästövaikutus energiankulutuksiin.



KUVA 27. Ominaiskulutukset ilmalämmityksellä

Kuvassa 28 on esitetty ominaiskulutus, kun liikuntahalli on varustettu ilmalämmityksellä ja Monitoimihallin lämpimän käyttöveden lämmittämiseen lisätään aurinkoenergiakeräimiä siten, että lämpimän käyttöveden lämmittämiseen tarvittavasta energiämäärästä on aurinkoenergialla tuotettu 40 %.



KUVA 28. Ominaiskulutukset ilmalämmityksellä ja aurinkoenergiakeräimillä

7.2 Sähkö- ja lämmitysenergian kohdistuminen E-luvun laskennassa

Koska kokonaisenergiäluvun (E-luku) ja ominaiskulutuslukemien perusteella ei pystytä arvioimaan sähkö- ja lämmitysenergiavirtojen jakaantumista rakennuksen sisällä, tehtiin energiavirtojen jakaantumisesta tarkemmat laskelmat, joita käsitellään tässä kohdassa.

7.2.1 Sähkö- ja lämmitysenergian jakaantuminen säteilylämmityksen E-luvun laskennassa

Taulukossa 9 on esitetty energiavirtojen jakaantuminen monitoimihallissa, kun liikuntahallin lämmitystapana on säteilylämmitys. Taulukosta voidaan havaita valaistuksen suuri osuus kokonaisenergiäluvussa E ennen ja jälkeen muutoksien. Ilmanvaihdon tarpeen mukaisen ohjauksen lisäämisellä saadaan kuitenkin suurin muutos E-lukuun.

TAULUKKO 9. Sähkö- ja lämmitysenergian jakaantuminen säteilylämmityksellä E-luvun laskennassa

Muutos	Valaistus, kiinteistö kWh/m ³	Jäähdytys kWh/m ³	LVI, sähkö kWh/m ³	Lämmitys kWh/m ³	LKV kWh/m ³	E-luku kWh/m ³
Perustilanne	48,9	0,0	40,1	38,2	16,0	143,2
Tiiveys q ₅₀ = 2 l/h	48,9	0,0	40,1	34,3	16,0	139,2
CO ₂ -ohjaus 850ppm	48,9	0,0	19,4	14,5	16,0	98,7
Valaistus 8W/m ²	32,6	0,0	18,1	17,5	16,0	84,2
SFP 1,5 kW/m ³ /s	32,6	0,0	14,4	17,8	16,0	80,7

Taulukossa 10 on esitetty, kuinka paljon saadaan aurinkokeräimien avulla pienennettyä E-lukua, kun liikuntahallin lämmitystapana on säteilylämmitys. E-luvun muutokset vaikuttavat LVI, sähkö- ja LKV-arvoihin sekä kokonaisenergiatarvoon.

TAULUKKO 10. Sähkö- ja lämmitysenergian jakaantuminen säteilylämmityksellä ja aurinkoenergiakeräimillä E-luvun laskennassa

Muutos	Valaistus, kiinteistö kWh/m ³	Jäähdytys kWh/m ³	LVI, sähkö kWh/m ³	Lämmitys kWh/m ³	LKV kWh/m ³	E-luku kWh/m ³
Perustilanne	48,9	0,0	40,5	38,2	9,6	137,2
Tiiveys q ₅₀ = 2 l/h	48,9	0,0	40,5	34,3	9,6	133,3
CO ₂ -ohjaus 850ppm	48,9	0,0	19,8	14,5	9,6	92,8
Valaistus 8W/m ²	32,6	0,0	18,6	17,5	9,6	78,3
SFP 1,5 kW/m ³ /s	32,6	0,0	14,7	17,8	9,6	74,7

7.2.2 Sähkö- ja lämmitysenergian jakaantuminen ilmalämmityksen E-luvun laskennassa

Liikuntahallin lämmitystavan ollessa ilmalämmitys voidaan taulukosta 11 todeta LVI, sähkönsuuden olevan suurin yksittäinen lukuarvo E-luvussa. Valaistuksen ja lämmityksen osuudet eivät ole oleellisesti muuttuneet liikuntahallin lämmitystapaa muutettaessa. Ilmanvaihdon tarpeen mukaisen lisäyksen jälkeen voidaan huomata lämmitysenergian kulutuksen muutoksen suurempaan päin. Tämä johtuu ilmanvaihtokoneiden käyntiaikojen lyhenemisestä ja näin ollen puhaltimien sähkömoottorien aiheuttama lämpökuorma pienenee liikuntahallissa.

TAULUKKO 11. Sähkö- ja lämmitysenergian jakaantuminen ilmalämmityksellä E-luvun laskennassa

Muutos	Valaistus, kiinteistö kWh/m ³	Jäähdytys kWh/m ³	LVI, sähkö kWh/m ³	Lämmitys kWh/m ³	LKV kWh/m ³	E-luku kWh/m ³
Perustilanne	48,9	0,0	69,5	37,7	16,0	172,0
Tiiveys $q_{50} = 2$ l/h	48,9	0,0	69,5	34,3	16,0	168,6
CO ₂ -ohjaus 850ppm	48,9	0,0	54,8	12,9	16,0	132,5
Valaistus 8W/m ²	32,6	0,0	52,4	14,5	16,0	115,4
SFP 1,5 kW/m ³ /s	32,6	0,0	40,4	15,7	16,0	104,7

Taulukon 12 lukuarvot ovat hyvin samansuuntaisia kuin säteilylämmityksessä, kun lämpimän käyttöveden tarvitsemasta energiamäärästä 40 % tuotetaan aurinkoenergiakeräimillä.

TAULUKKO 12. Sähkö- ja lämmitysenergian jakaantuminen ilmalämmityksellä ja aurinkoenergiakeräimillä E-luvun laskennassa

Muutos	Valaistus, kiinteistö kWh/m ³	Jäähdytys kWh/m ³	LVI, sähkö kWh/m ³	Lämmitys kWh/m ³	LKV kWh/m ³	E-luku kWh/m ³
Perustilanne	48,9	0,0	70,0	37,7	9,6	166,1
Tiiveys $q_{50} = 2$ l/h	48,9	0,0	70,0	34,3	9,6	162,7
CO ₂ -ohjaus 850ppm	48,9	0,0	55,2	12,9	9,6	126,5
Valaistus 8W/m ²	32,6	0,0	52,8	14,5	9,6	109,5
SFP 1,5 kW/m ³ /s	32,6	0,0	40,9	15,7	9,6	98,8

7.3 Sähkö- ja lämmitysenergian kohdistuminen ominaiskulutuksen laskennassa

Energioiden kulutuksia on hyvä tutkia myös ominaisenergiankulutuksien avulla, koska niiden perusteella voidaan laskea rakennuksessa käytettävistä energiamääristä aiheutuvat kustannukset rahallisesti. Ominaiskulutuksen lukemia tarkasteltaessa täytyy muistaa, ettei niiden lukuarvoja määriteltäessä käytetä energiamuotokertoimia.

7.3.1 Sähkö- ja lämmitysenergian jakaantuminen säteilylämmityksen ominaiskulutuksen laskennassa

Taulukon 13 avulla voidaan todeta lämmitysenergiamäärän olevan suurin yksittäinen energiankuluttaja. Tosin rakenteiden tiiveyden parantamisen ja ilmanvaihdon tarpeen mukaisen ohjauksen lisäämisen jälkeen valaistus on suurin yksittäinen energian kuluttaja. Parannustoimenpiteiden jälkeen lämpimän käyttöveden (LKV) tarvitsema energiamäärä on lähes samansuuruinen lämmitysenergiamäärän kanssa ja suurempi kuin valaistuksen tarvitsema energiamäärä. Tehdyt toimenpiteet pienentävät LVI-laitteiden kuluttaman sähköenergiamäärän lähes kolmasosaan alkuperäisestä kulutuslukemasta.

TAULUKKO 13. Sähkö- ja lämmitysenergian jakaantuminen säteilylämmityksellä ominaiskulutuksen laskennassa

Muutos	Valaistus, kiinteistö kWh/m ³	Jäähdytys kWh/m ³	LVI, sähkö kWh/m ³	Lämmitys kWh/m ³	LKV kWh/m ³	E-luku kWh/m ³
Perustilanne	28,8	0,0	23,6	54,5	22,8	129,7
Tiiveys $q_{50} = 2$ l/h	28,8	0,0	23,6	49,0	22,8	124,1
CO ₂ -ohjaus 850ppm	28,8	0,0	11,4	20,7	22,8	83,6
Valaistus 8W/m ²	19,2	0,0	10,7	25,0	22,8	77,7
SFP 1,5 kW/m ³ /s	19,2	0,0	8,4	25,4	22,8	75,9

Kun lämpimän käyttöveden lämmitysjärjestelmään lisätään aurinkokeräimiä esitetty määrä, saadaan lämpimän käyttöveden lämmittämiseen tarvittu energiamäärä lähes puolitettua, kuten taulukossa 14 on esitetty.

TAULUKKO 14. Sähkö- ja lämmitysenergian jakaantuminen säteilylämmityksellä ja aurinkoenergiakeräimillä ominaiskulutuksen laskennassa

Muutos	Valaistus, kiinteistö kWh/m ³	Jäähdytys kWh/m ³	LVI, sähkö kWh/m ³	Lämmitys kWh/m ³	LKV kWh/m ³	E-luku kWh/m ³
Perustilanne	28,8	0,0	23,8	54,5	13,7	120,8
Tiiveys $q_{50} = 2$ l/h	28,8	0,0	23,8	49,0	13,7	115,3
CO ₂ -ohjaus 850ppm	28,8	0,0	11,6	20,7	13,7	74,8
Valaistus 8W/m ²	19,2	0,0	10,9	25,0	13,7	68,8
SFP 1,5 kW/m ³ /s	19,2	0,0	8,6	25,4	13,7	66,9

7.3.2 Sähkö- ja lämmitysenergian jakaantuminen ilmalämmityksen ominaiskulutuksen laskennassa

Taulukossa 15 on esitetty ominaiskulutuksien jakaantuminen, kun liikuntahallin lämmitystapana on säteilylämmitys. Lähtötilanteessa eniten energiaa kuluttaa rakennuksen lämmitys, mutta toimenpiteiden jälkeen suurin kuluttaja on LVI-laitteiden sähköenergian kulutus, tosin rakennuksen ja lämpimän käyttöveden lämmittämiseen menee lähes saman verran lämmitysenergiaa.

TAULUKKO 15. Sähkö- ja lämmitysenergian jakaantuminen ilmalämmityksellä ominaiskulutuksen laskennassa

Muutos	Valaistus, kiinteistö kWh/m ³	Jäähdytys kWh/m ³	LVI, sähkö kWh/m ³	Lämmitys kWh/m ³	LKV kWh/m ³	E-luku kWh/m ³
Perustilanne	28,8	0,0	40,9	53,9	22,8	146,3
Tiiveys q ₅₀ = 2 l/h	28,8	0,0	40,9	49,0	22,8	141,4
CO ₂ -ohjaus 850ppm	28,8	0,0	32,2	18,4	22,8	102,2
Valaistus 8W/m ²	19,2	0,0	30,8	20,8	22,8	93,5
SFP 1,5 kW/m ³ /s	19,2	0,0	23,8	22,5	22,8	88,2

Kun liikuntahallin ilmalämmitysmalliin lisätään lämpimän käyttöveden tuotantoon aurinkoenergiakeräimet, saadaan taulukon 16 mukaiset ominaiskulutukset. Nyt LVI-laitteiden kuluttama sähköenergiamäärä ja rakennuksen tarvitsema lämmitysenergiamäärä ovat lähes samansuuruiset ollen suurimmat energiankuluttajat.

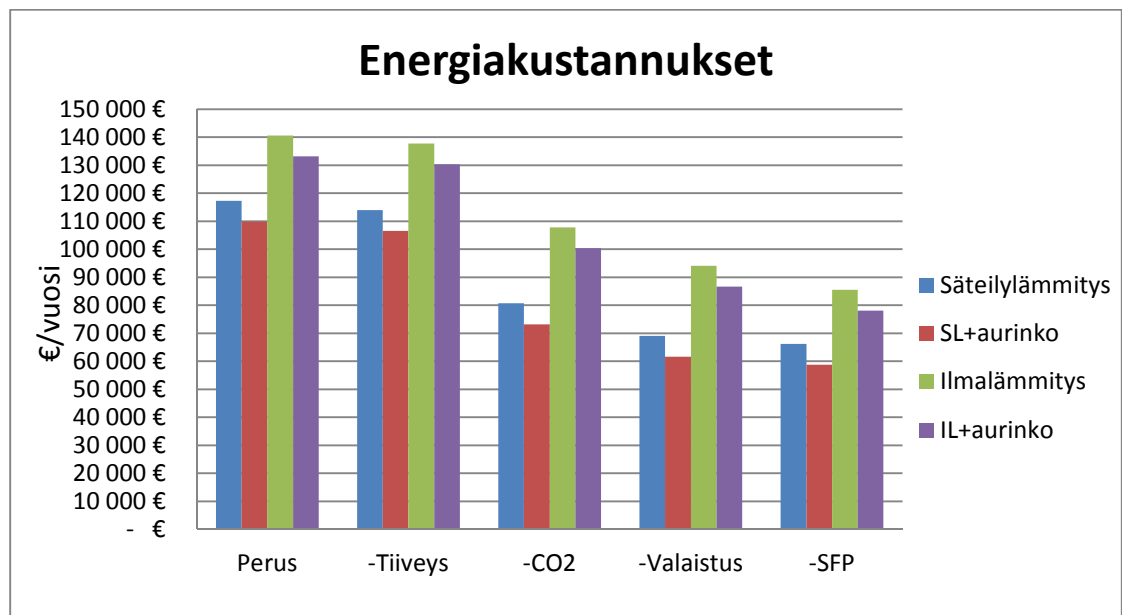
TAULUKKO 16. Sähkö- ja lämmitysenergian jakaantuminen ilmalämmityksellä ja aurinkoenergiakeräimillä ominaiskulutuksen laskennassa

Muutos	Valaistus, kiinteistö kWh/m ³	Jäähdytys kWh/m ³	LVI, sähkö kWh/m ³	Lämmitys kWh/m ³	LKV kWh/m ³	E-luku kWh/m ³
Perustilanne	28,8	0,0	41,1	53,9	13,7	146,3
Tiiveys q ₅₀ = 2 l/h	28,8	0,0	41,1	49,0	13,7	141,4
CO ₂ -ohjaus 850ppm	28,8	0,0	32,4	18,4	13,7	102,2
Valaistus 8W/m ²	19,2	0,0	31,0	20,8	13,7	93,5
SFP 1,5 kW/m ³ /s	19,2	0,0	24,0	22,5	13,7	88,2

7.4 Energiakustannukset

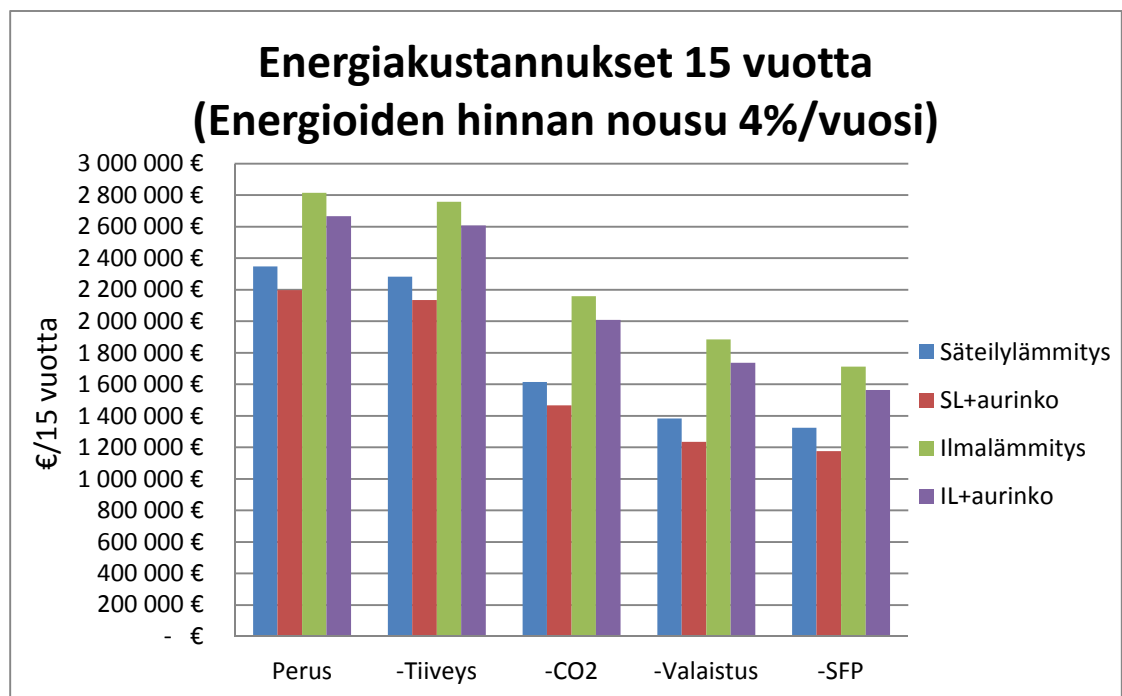
Jotta rakennuksen sekä mahdollisten muutoksien aikaan saamaa vaikutusta ostoenergiakustannuksiin voitaisiin vertailla konkreettisesti rahan avulla, selvityksessä laskettiin energiakustannukset ensimmäiselle käyttövuodelle sekä 15 vuoden käyttöaikajaksole. Kustannuksissa tarkasteltiin ainoastaan sähkö- ja energiakustannuksia eikä kiinnitetty huomiota käyttö- ja huoltokustannuksiin. Sähköenergian hintana laskelmissa käytettiin 0,11 €/kWh sisältäen energia- ja siirtomaksun sekä sähköveron. Hinta saatiin Mikkelin kaupungin omistaman Etelä-Savon Energia Oy:n verkkosivuilta yksityisasiakkaiden yleistariffihinnastosta. Lämpöenergian hintana laskelmissa käytettiin niin ikään Etelä-Savon Energia Oy:n verkkosivuilta saatua hintaa 48,71 €/MWh.

Kuvassa 29 on esitetty kaikkien vertailtujen mallien sekä parannusmuutoksien aikaansaatavat muutokset energiakustannuksissa ensimmäiselle käyttövuodelle. Grafiikan avulla on helppo todeta säteilylämmitysmuotojen edullisemmat energiakustannukset verrattaessa ilmalämmitykseen. Alkutilanteessa sekä parannustoimenpiteiden jälkeen säteilylämmitysversion ero ilmalämmitysversion ilman aurinkokeräimiä ovat noin 20 000 euroa vuodessa. Aurinkokeräinversioiden kustannuserot ovat lähes samansuuriset, kun tarkastellaan energiakustannuksia.



KUVA 29. Vuotuiset energiakustannukset eri lämmitystavoilla ja parannustoimenpiteiden jälkeen

Kun aikajakso pidennetään 15 vuoteen ja tarkastellaan liikuntahallin lämmitystavan eroja kuvasta 30, huomataan säteilylämmityksen tuovan alkutilanteen versiolla yli 400 000 euron säästöt ja parannustoimenpiteiden jälkeen samansuuruisen säästön energiakustannuksiin. Sähkö- ja lämpöenergian hinnoille on oletettu 4 %:n vuotuinen hinnan nousu. Sähköenergian hinnan nousu on viime 10 vuoden aikana ollut sähkön hinnan kehitys 1.8.2011 tilaston mukaan juuri tuon keskimääräisen 4 %:n vuotuisen hinnan nousun mukainen (Energiamarkkinavirasto 2012). Kaukolämmön energiainnkat ovat nousseet viimeisen 10 vuoden aikana enemmän kuin laskelmissa käytetty 4 %:n vuotuinen hinnan nousu, kun kaukolämpöenergian kehitystä tarkastellaan Energiategollisuuden laatimaa tilastoa kaukolämmön hinnan kehityksestä 13.9.2012 (Energiategollisuus ry 2012).

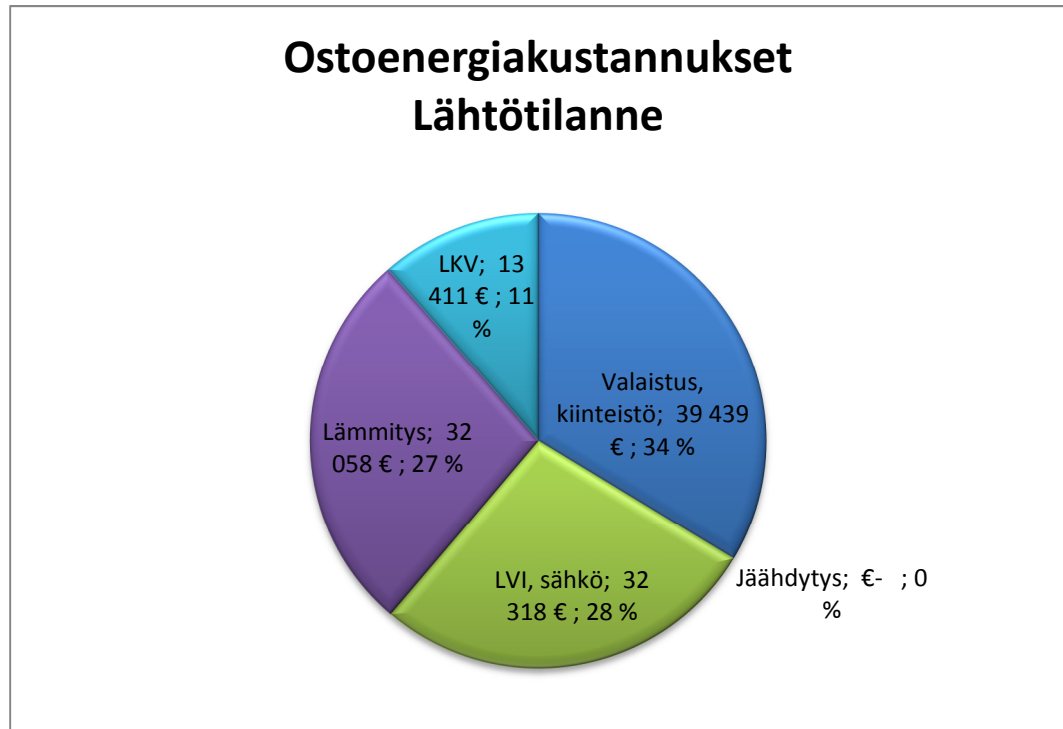


KUVA 30. Energiakustannukset eri lämmitystavoilla ja parannustoimenpiteiden jälkeen 15 vuoden käyttöjaksolle

7.4.1 Säteilylämmityksen ostoenergiakustannusten kohdistuminen

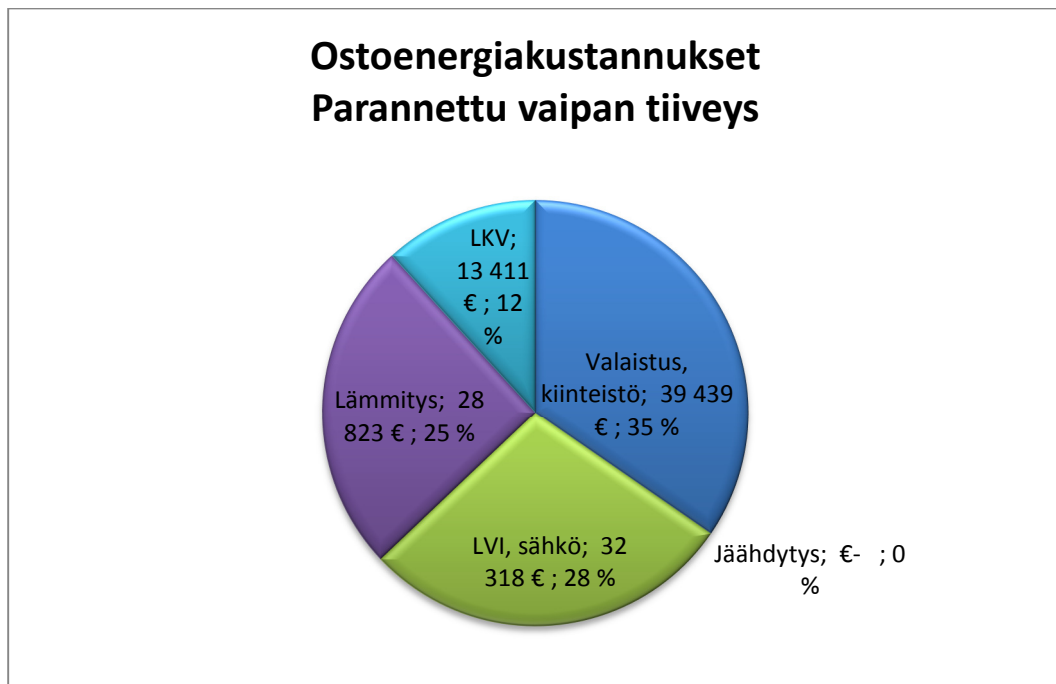
Kuvissa 31...35 on esitetty sähkö- ja lämmitysenergioiden jakaantuminen lähtötilanteesta aina viimeisimmän muutoksen aikaansaamaan tilanteeseen. Lähtötilanteen kuvasta 31 voidaan todeta valaistukseen kulutetun energiainnan olevan suurin kuluerä energiainnoissa. Lämmitysenergiaan sekä LVI-laitteiden kuluttamaan energiaan me-

nee lähes samansuuruinen rahamäärä vuodessa ja lämpimän käyttöveden lämmittämisestä aiheutuva kustannus on pienin. Jäähdyttämiseen ei mene lainkaan energiaa, koska laskennassa oletettiin, ettei rakennusta varusteta jäähdytyslaitteilla.



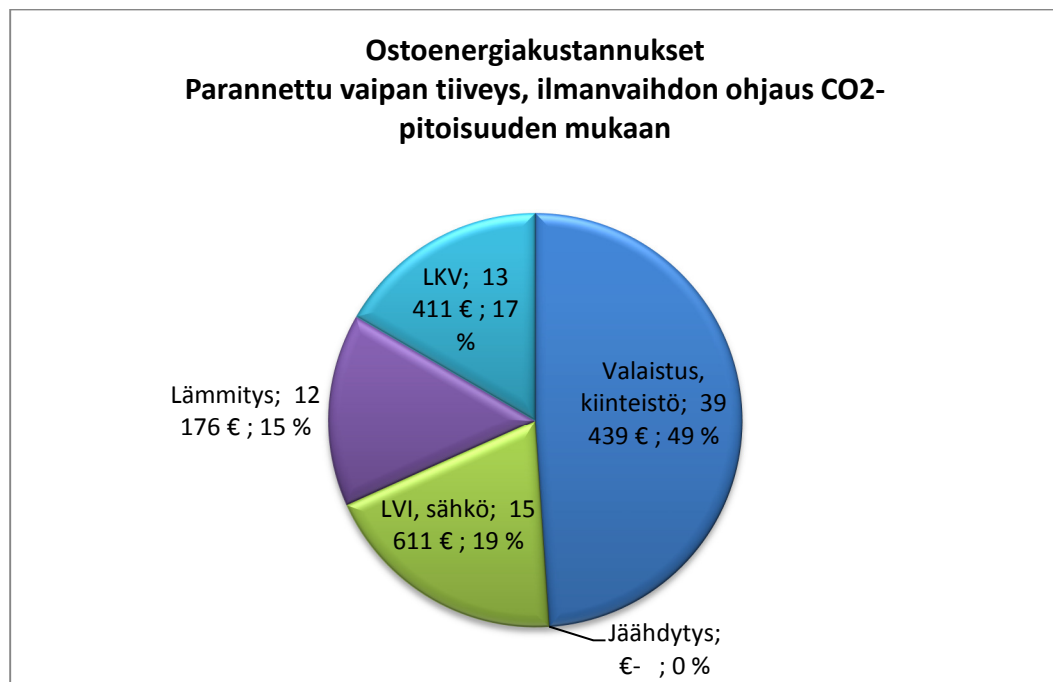
KUVA 31. Energioiden jakaantuminen säteilylämmitystavalla lähtötilanteessa

Kun rakennuksen vaipan tiiveyttä parannetaan, pienenee lämmitysenergiasta aiheutuneet kustannukset, kuten kuvasta 32 voidaan havaita.



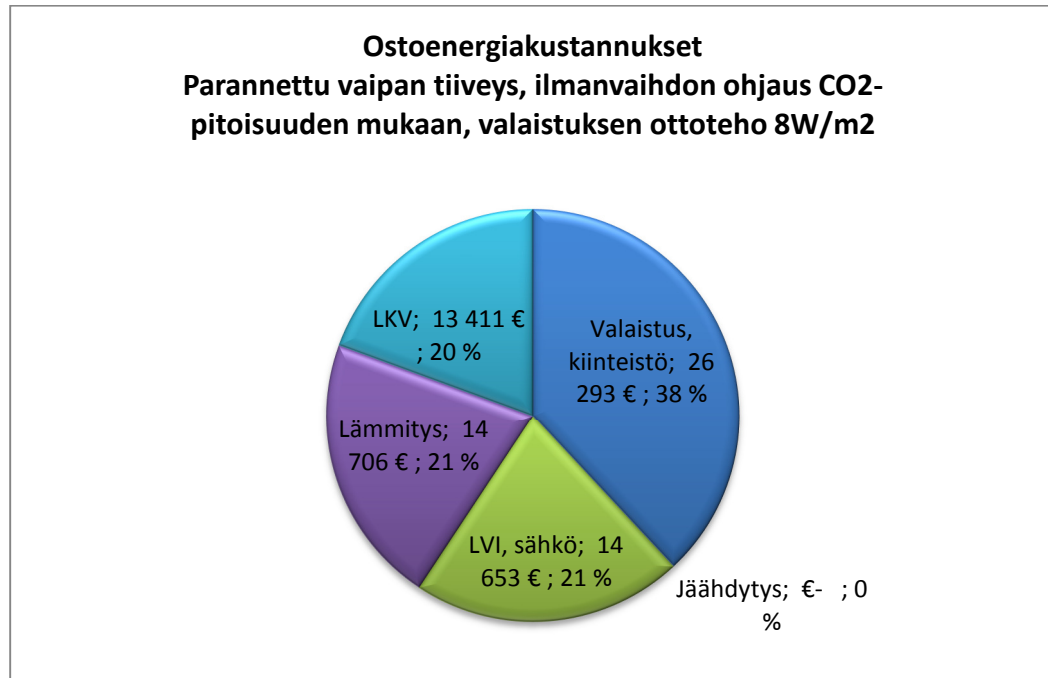
KUVA 32. Energioiden jakaantuminen säteilylämmitystavalla parannetun vaipan tiiveyden jälkeen

Kun ilmanvaihtoon lisätään tarpeenmukainen ohjaus, voidaan ohjauksen vaikutus todeta helposti kuvasta 33. Lämmitysenergiakustannukset sekä LVI-laitteiden käyttämisestä aiheutuva sähköenergiakustannukset puoliintuvat.



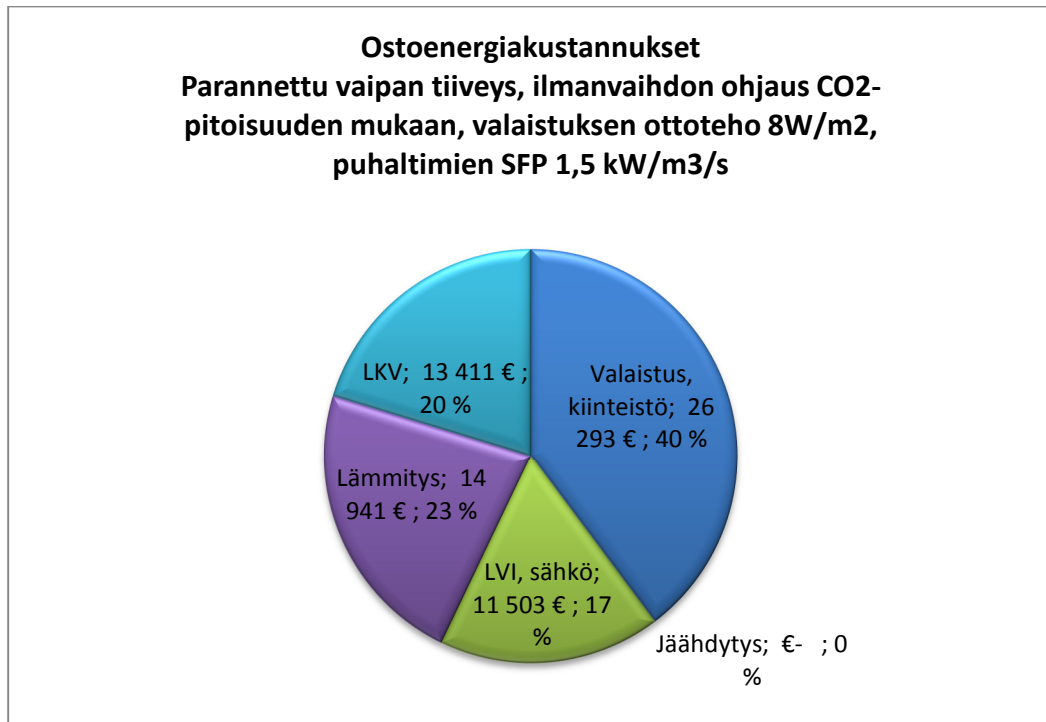
KUVA 33. Energioiden jakaantuminen säteilylämmitystavalla ilmanvaihdon tarpeenmukaisen ohjauksen jälkeen

Valaistuksen aiheuttama energiakustannus oli jo lähtötilanteessa suurin energiakustannusten aiheuttaja. Kun liikuntahallin valaistuksen tarvitsemaa tehoa pienennetään noin 35 %, pienenee valaistuksesta aiheutuva energiakustannus myös noin 35 %. Rahallisesti vuositason säästö on noin 13 000 euroa. Kuvassa 34 on esitetty energiakustannuksien jakaantuminen valaistustehon muutoksen jälkeen.



KUVA 34. Energioiden jakaantuminen säteilylämmitystavalla valaistustehon pienentämisen jälkeen

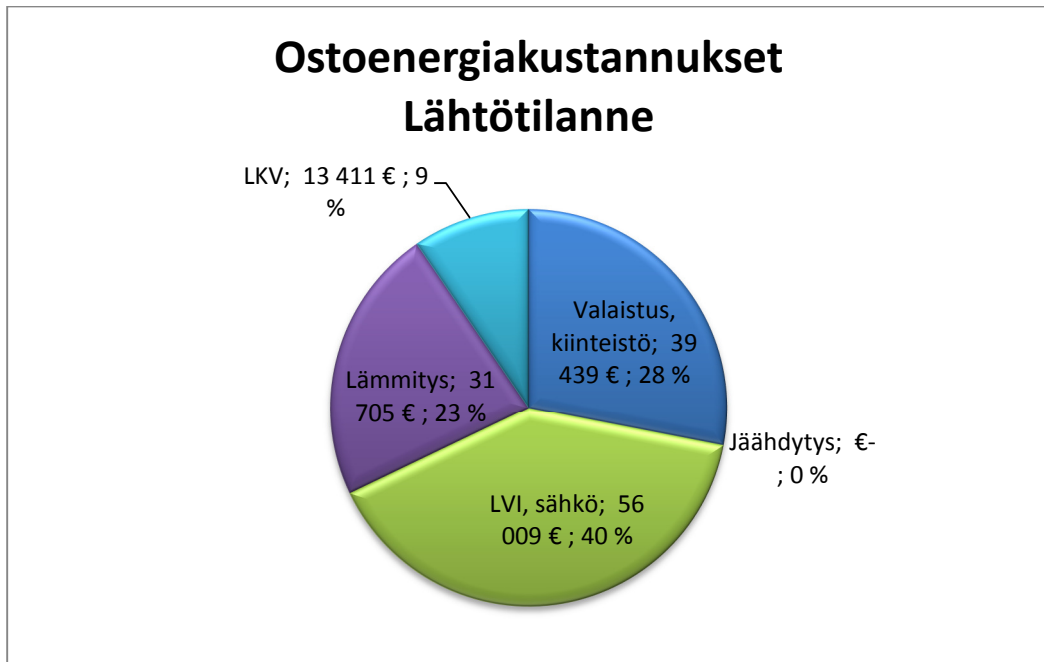
Laskelmissa viimeisenä tehdyn puhaltimien sähkötehokkuuden parantamisen vaikutus energiakustannuksiin voidaan todeta kuvasta 35. SFP-luvun pienentäminen alentaa LVI-laitteiden energiakustannuksia noin 3000 euroa vuodessa.



KUVA 35. Energioiden jakaantuminen säteilylämmitystavalla puhaltimien sähkötehokkuuden parantamisen jälkeen

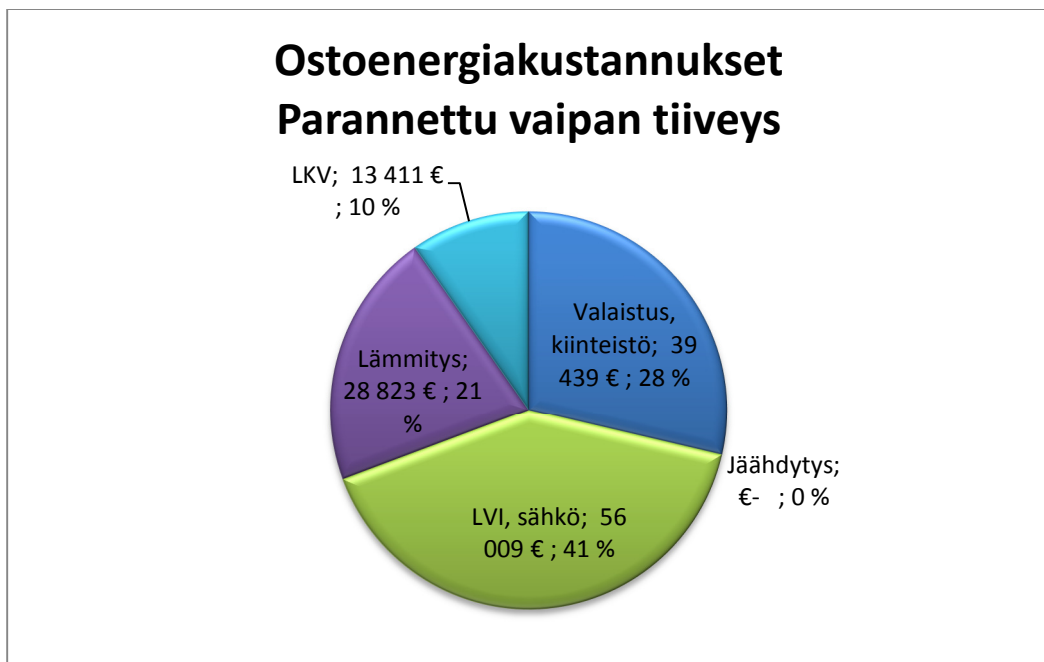
7.4.2 Ilmalämmityksen ostoenergiakustannusten kohdistuminen

Ilmalämmityksen energiakustannuksien jakaantumista on esitetty kuvissa 36...40. Kuva 36 esittää energioiden jakaantumista laskennan lähtötilanteessa, kun liikuntahallin lämmitystavana on ilmalämmitys. Kuvasta voidaan todeta LVI-laitteiden aiheuttama suuri osuus energiakustannuksista mikä aiheutuu lämmitystavasta, joka käyttää puhaltimia ja ilmaa jakamaan lämpöä huonetilaan.



KUVA 36. Energioiden jakaantuminen ilmalämmitystavalla lähtötilanteessa

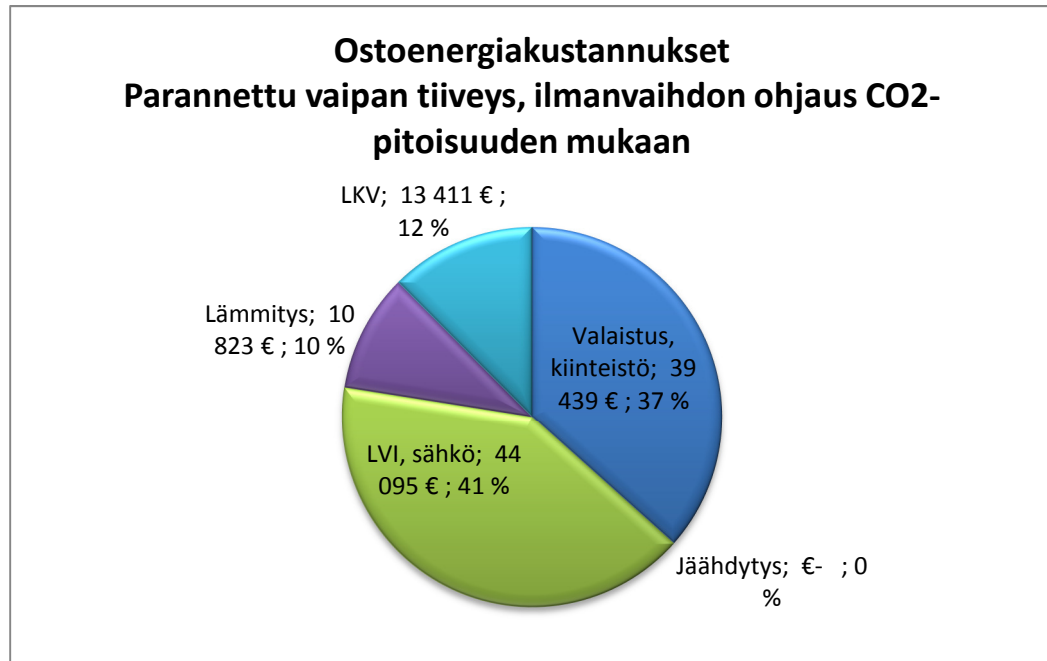
Rakennuksen vaipan tiiveyden parantamisen vaikutus nähdään kuvasta 37. Kustannussäästö vuositasolla on samansuuruinen kuin säteilylämmitystavalla.



KUVA 37. Energioiden jakaantuminen ilmalämmitystavalla rakennuksen vaipan tiiveydenmuutoksen jälkeen

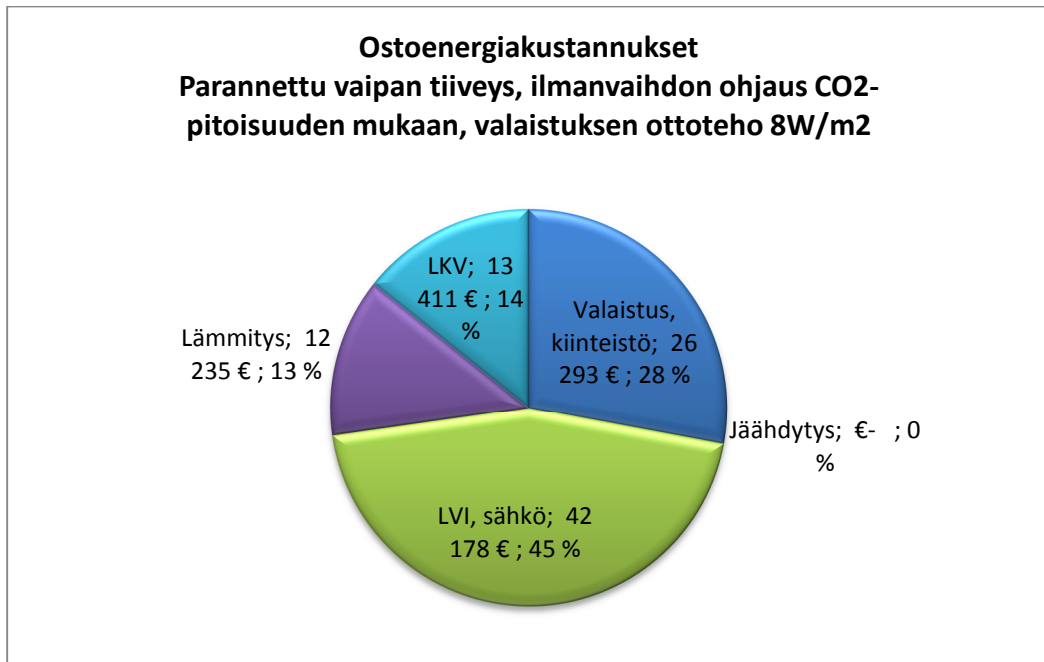
Ilmanvaihdon tarpeenmukaisen ohjauksen lisäämisen avulla saadaan ilmalämmitystavassa huomattavat säästöt, kuten kuvasta 38 voidaan huomata. Lämmitysenergiakus-

tannukset tippuvat noin kolmasosaan ja sähköenergian kulutuksessa aiheutuva kustannus pienenee yli viidenneksellä.



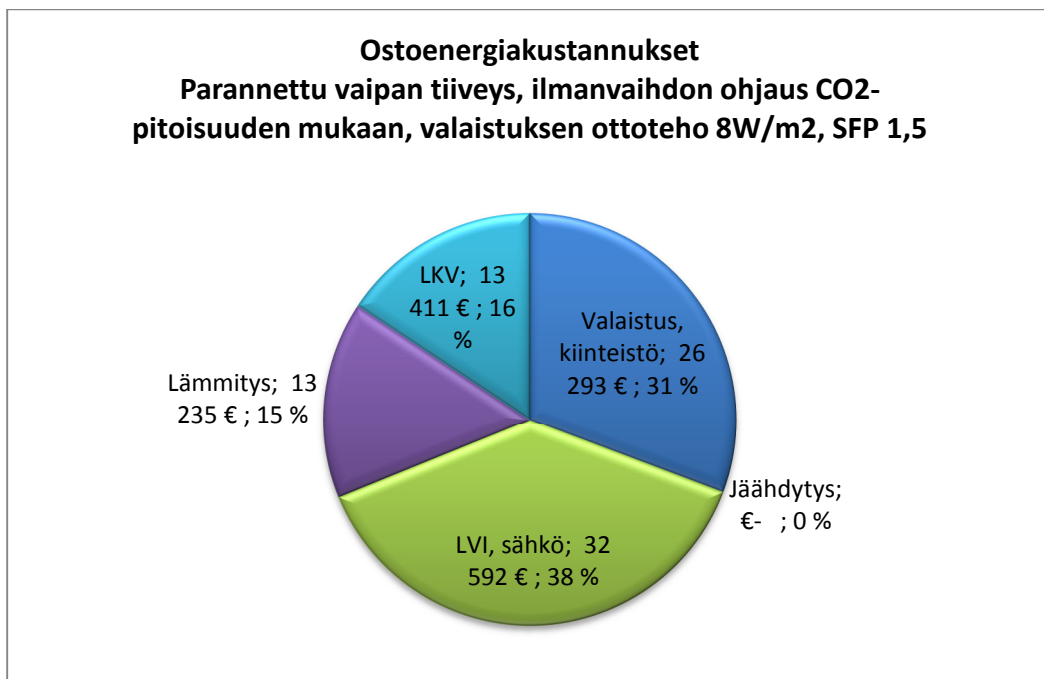
KUVA 38. Energioiden jakaantuminen ilmalämmitystavalla ilmanvaihdon ohjausmuutoksen jälkeen

Valaistustavan muutoksella saadaan aikaan yli 30 %:n kustannussäästö valaistuksen aiheuttamaan energiakustannukseen. Samalla kuitenkin voidaan kuvasta 39 huomata lämmitysenergiakustannuksien nousu 1400 eurolla. Nousu aiheutuu pienemmästä valaistuksen lämpökuormasta huonetilaan.



KUVA 39. Energioiden jakaantuminen ilmalämmitystavalla valaistustehon muutoksen jälkeen

Kun ilmalämmitystavan puhaltimien energiatehokkuutta parannetaan liikuntasalin osalta, saadaan LVI-laitteiden sähköenergiakustannuksiin 10 000 euron säästö kuten kuvasta 40 voidaan todeta. Kuitenkin lämmitysenergiakustannukset lisääntyvät 1000 eurolla, koska puhaltimista aiheutuva lämpökuorma ilmanvaihtoon on pienempi.



KUVA 40. Energioiden jakaantuminen puhaltimien sähkötehokkuuden parantamisen jälkeen

7.5 Kesäajan lämpötilan hallinta

Määräyksen D3 mukainen kesäajan lämpötilan hallinta laskettiin kolmeen eri huoneeseen, aulakahvilaan, 2. kerroksen koulutustilaan sekä liikuntahalliin. Laskenta tehtiin määräyksen D3 mukaisesti ajanjaksolle 1.6. – 31.8. Aulakahvilan lämpötilan hallintaa simuloitiin kahdella eri laskelmalla, koska ensimmäisellä laskelmalla huomattiin kesäajan lämpötilan nousevan korkeaksi ja pysyvän kesäkuukausina raja-arvon +25 °C yli 150 astetunnin ajan. Liikuntahallin lämpötila laskettiin kahdella eri tavalla. Ensimmäisellä kerralla tilan käyttötarkoituksena oli liikuntasali ja toisella kerralla konserttitilanne, jonka aikana tilassa on 3000 ihmistä. Tilojen ilmavirtoina on käytetty arvioituja todellisia ilmavirtoja tiloihin.

Aulakahvilan kesäajan yllämpötila

Kesäajan lämpötilalle määräyksessä D3 asetettu vaatimus ylitetään. Simuloinnin avulla saadaan aikajaksoksi 828 astetuntia, jonka aikana +25 °C lämpötila ylitetään. Tilaan sijoitettiin 1200 W tehoinen jäähdytyslaite ja laskelmat uusittiin. Uusi laskelma osoitti yli +25 °C ylitykseksi 132 astetuntia, joka täyttää määräyksen D3 vaatimuksen.

2. kerroksen 75 m²:n koulutustilan kesäajan yllämpötila

2. kerroksen koulutustilassa ei laskelmissa havaittu yli +25 °C lämpötilaa lainkaan, joten tila täyttää määräyksen D3 asettamat vaatimukset.

Liikuntasalin kesäajan yllämpötila

Liikuntasalia käytettäessä liikuntakäytössä ei tilassa laskelmien mukaan ole lainkaan aikajaksoa, jonka aikana määräyksen D3 vaatimuksena olevaa lämpötilaa +25 °C ylitettäisiin.

Konserttikäytössä simuloinnin mukaan tilassa ylitetään vaadittu lämpötila 68 astetunnin verran. On kuitenkin huomioitava, että tilassa vaadittu lämpötila todennäköisesti ylitetään paikallisesti kauemmin, koska esiintymislavojen läheisyydessä on tehokkaita valaisimia, joista aiheutuu huomattava lämpökuorma paikallisesti. Henkilökuormakin todennäköisesti jakaantuu hyvin epätasaisesti salissa aiheuttaen epätasaisen lämpökuorman. Hiilidioksidipitoisuuden maksimiarvoksi simulointiohjelmasta saadaan 735 ppm, joten voidaan olettaa hankesuunnitelmassa esitetyn ilmavirran olevan riittävä kyseiseen tilaan konserttikäytössä.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tehdyn tutkimuksen tulosten perusteella hankesuunnitelmassa esitetyn monitoimihallin rakentaminen uusien rakennusmääräyskokoelman määräysten mukaisesti on mahdollista. 1.7.2012 voimaan tulleessa uusitussa määräyksessä D3 on annettu E-luvulle raja-arvo 170 kWh/m^2 vuodessa, jota ei saa ylittää. Tutkimuksessa tutkittujen kahden erilaisen liikuntasalin lämmitystavan lähes kaikilla variaatioilla määräyksen D3 vaatimustaso voidaan alittaa. Ainoa tilanne, jolloin vaadittu raja-arvo ylitettiin, oli ilmalämmitystavan ns. lähtötilanne, jossa ei ollut vielä huomioitu minkäänlaisia energian säästötoimenpiteitä. Tässäkin tapauksessa vaatimustaso saavutettiin parantamalla rakennuksen vaipan tiiveyttä.

Tulosten mukaan energiatehokkain ratkaisu saavutettiin liikuntasalin säteilylämmitystavalla, kaikilla säästötoimenpiteillä sekä aurinkoenergian hyödyntämisellä lämpimän käyttöveden lämmityksessä. Kuitenkin aurinkoenergian hyödyntämistä tulee tutkia vielä tarkemmin, onko sen lisääminen taloudellisesti kannattavaa. Tulosten perusteella voidaan myös selkeästi osoittaa laskelmissa käytettyjen energiatehokkuutta parantavien toimenpiteiden vaikutukset niin E-lukuarvossa kuin energiakustannuksissa. Monitoimihalli on tulosten perusteella mahdollista rakentaa energiatehokkaaksi hyvinkin pienillä toimenpiteillä, kuten lämmönjakotavan valinnan ja ilmanvaihdon tarpeenmukaisen ohjauksen avulla.

Jäähdytys on lisättävä simulointitulosten mukaan ainakin alakerran kahviotilaan. Kahvion lämpötila nousee liian korkeaksi kesäaikaan. Ikkunoiden lävitse tulevaa auringon lämpösäteilyn aiheuttamaa lämpökuormaa voidaan pienentää kahviossa verhojen tai sälekaihtimien avulla. Auringon aiheuttama lämpökuorma tulee huonetilaan koillisesta ja tällöin auringon asema rakennukseen nähden on hyvin alhainen. Tästä johtuen ulkopuolisilla suojauksilla on vaikea estää auringon säteilylämmön vaikutusta kahvion lämpötilaan.

Tutkimuksen yhteydessä tehtyjä laskelmia energiakustannuksista ei voida verrata suoraan muiden monitoimihallien toteutuneisiin energiakulutuksiin, koska laskennassa on käytetty standardikäyttöön tarkoitettuja arvoja. Jokaisen rakennuksen energiankulutus on yksilöllistä johtuen erilaisista käyttötavoista. Tulosten avulla voidaan kuitenkin arvioida eri muutosten aikaansaamaa energiankulutuksen pienenemistä kulutusluke-

missä sekä energiakustannuksissa. Rahallisista säästöistä vuositasolla voidaan puhua kymmenien tuhansien euron säästöistä ja 15 vuoden elinkaaressa jopa satojen tuhansien eurojen säästöistä.

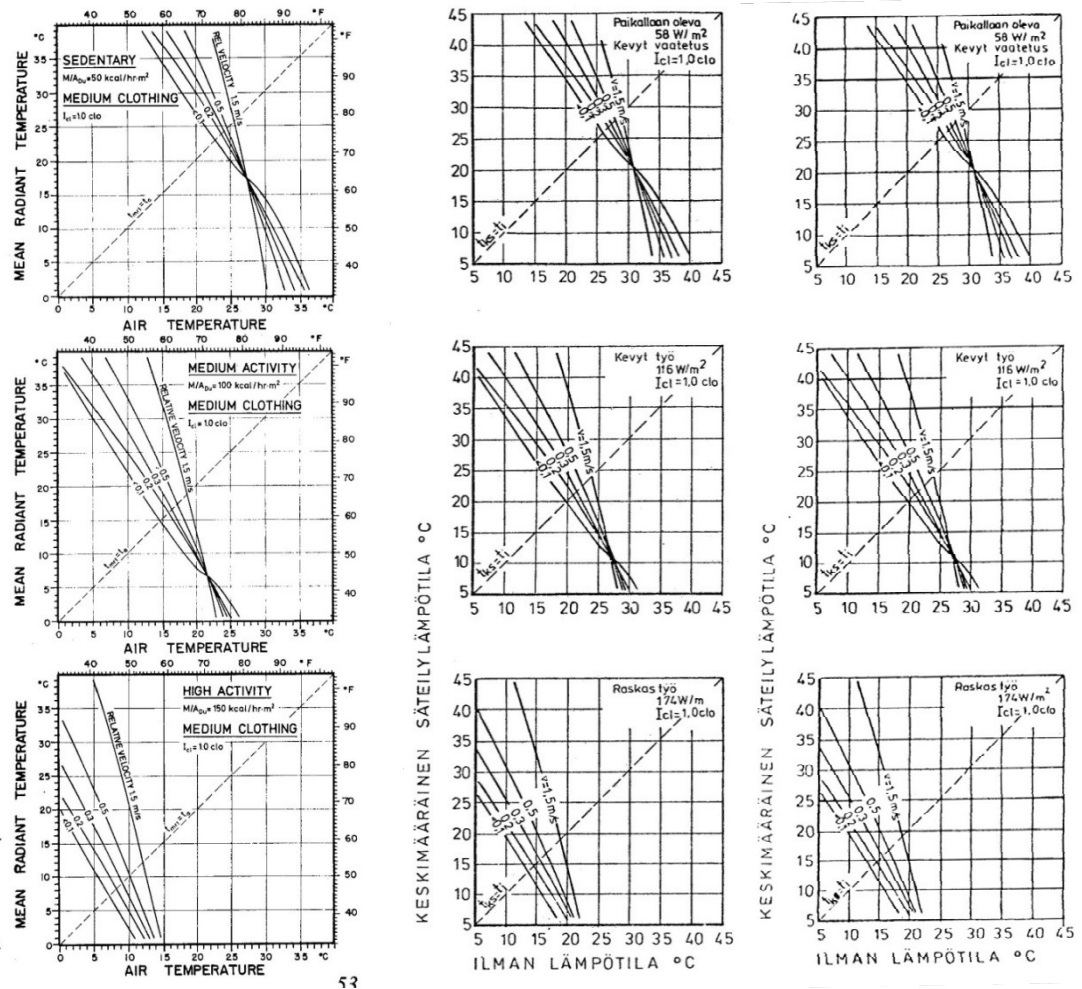
Monitoimihallin suunnitteluvaiheessa tai rakentamisen tapahtuessa KVR-hankkeen mukaisesti on energiankulutukselle asetettava määräyksen D3 vaatimustasoa alhaisempi energiataso. Tutkimuksessa tehtyjen laskelmien mukaan on energiatehokkaampi taso saavutettavissa hyvinkin pienillä muutoksilla. 1.6.2013 astuu voimaan uusi asetus energiatodistuksesta, joka perustuu määräyksen D3 mukaiseen E-lukuun. Energiatodistusasetuksessa on annettu E-luvun perusteella energiatehokkuusluokka, joita on kaikkiaan seitsemän parhaimman luokituksen ollessa A ja heikoimman G. Monitoimihallin rakentamisen kilpailutukseen sekä suunnitteluun voitaisiin asettaa esimerkiksi uuden energiatodistusasetusehdotuksen mukainen energiatehokkuusluokka. Ehdotuksen mukainen luokitus on esitetty kuvassa 41. Ehdotuksesta voidaan huomata määräyksen D3 mukaisen kokonaisenergiäluvun luokiteltavan energiatehokkuusluokkaan C. Monitoimihallin energiatehokkuudelle tulisikin asettaa energiatehokkuusluokan A mukainen energiatehokkuusluku.

Energiatehokkuusluokka	Energiatehokkuusluku (E-luku, kWh/m ² /vuosi)
A	E-luku ≤ 90
B	$91 \leq \text{E-luku} \leq 130$
C	$131 \leq \text{E-luku} \leq 170$
D	$171 \leq \text{E-luku} \leq 190$
E	$191 \leq \text{E-luku} \leq 240$
F	$241 \leq \text{E-luku} \leq 280$
G	E-luku ≥ 281

KUVA 41. Energiatodistusasetuksen ehdotettu energiatehokkuusluokitus monitoimihalleille (Ympäristöministeriö 2012)

Säteilylämmitystä tutkittaessa havaittiin lähdeaineistossa virheellisyyksiä. Vuonna 1977 Sitran julkaisemassa Börje Hagnerin kirjoittamassa suomenkielisessä julkaisussa on käytetty alkuperäisestä englanninkielisestä lähdeaineistosta vääriä käyrästöjä, jotka oli käännetty suomen kielelle. Kyseinen suomenkielinen julkaisu on toiminut jälkeensä lähdeaineistona muun muassa Nesteen laatimissa suunnitteluoppaissa, joten virhe

on todennäköisesti päässyt vuosien saatossa aiheuttamaan ylimitoittamista säteilylämmityksissä, joiden suunnittelussa on käytetty edellä mainittujen julkaisujen mitoituskäyrästäjä. Alla olevassa kuvasta vasemman laitimmaisena on Fangerin laatimat käyrästä, keskimmäisenä on Sitran julkaisun käyrästä ja oikean puolimmaisena on Nesteen mitoitukseen B2 käyrästä. (Fanger 1970; Hagner 1977; Neste 1987).



KUVA 42. Fangerin, Hagnerin ja Nesteen suunnitteluoppaan viihtyisyyskäyrästä (Fanger 1970; Hagner 1977; Neste 1987)

LÄHTEET

Frenger Systemen BV. Radiant Heating & Cooling Panels, Eco Evo Plus -myyntiesite.

Energiamarkkinavirasto, 2012. Sähkön hinnan kehitys 1.8.2011. Saatavissa <http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/Kehitys1108.pdf>. Päivitetty 16.8.2011. Luettu 3.11.2012

Energiateollisuus ry, 2012. Diaesitys kaukolämmön hinnan kehityksestä. Saatavissa http://energia.fi/sites/default/files/liite2_kl-hinta_010113_0.ppt. Päivitetty 22.3.2013. Luettu 3.11.2012

Etelä-Savon Energia Oy, 2012. Kaukolämpöhinnasto 1.1.2012. Saatavissa <http://www.es.fi/documents/key20130413101008/Hinnastot/Kaukol%20E4mp%20F6hinnasto%201.1.2012.pdf>. Päivitetty 21.12.2011. Luettu 8.11.2012.

Etelä-Savon Energia Oy, 2012. Kaukolämpöhinnasto 1.1.2013. Saatavissa <http://www.es.fi/documents/key20130309180838/Hinnastot/kaukol%20E4mp%20F6hinnasto%2001012013.pdf>. Päivitetty 12.11.2012. Luettu 8.11.2012.

Etelä-Savon Energia Oy, 2010. Sähkön myyntihinnat Mikkelin kaupungin alueella 1.7.2010. Saatavissa <http://www.es.fi/documents/key20130309180838/Hinnastot/S%20E4hk%20F6n%20myyntihinnat%20Mikkelin%20kaupungin%20alueella%201.7.2010.pdf>. Päivitetty 21.12.2011. Luettu 8.11.2012.

Etelä-Savon Energia Oy, 2012. Sähkön myyntihinnat Mikkelin kaupungin alueella 1.1.2013. Saatavissa <http://www.es.fi/documents/key20130309180838/Hinnastot/s%20E4hk%20F6nmyyntihinnat%201.1.2013.pdf>. Päivitetty 28.1.2013. Luettu 8.11.2012.

Fanger, P.O. 1970. Thermal Comfort. Analysis and applications in environmental engineering. United States: McGraw-Hill Book Company.

Hagner, Börje 1977. Teollisuustilojen säteilylämmitys. Helsinki: Kyriiri Oy.

Heimonen, Ismo 2011. Aurinko-opas 2012. Aurinkolämmön ja –sähkön energiatuoton laskennan opas. Saatavissa <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=135654&lan=fi>. Päivitetty 4.4.2012. Luettu 26.5.2012.

Jylhä, Kirsti ym., 2011. Rakennusten energialaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastomuutoksen vaikutuksista. Helsinki: Ilmatieteenlaitos. Saatavissa http://ilmatieteenlaitos.fi/c/document_library/get_file?uuid=827685fa-942d-4727-abb3-ae2877e55a99&groupId=30106. Päivitetty 18.4.2012. Luettu 3.11.2012

Neste, 1987. Teollisuushallin lämmityksen ja ilmastoinnin suunnittelutietoa. Helsinki: Valtion painatuskeskus.

Paroc Oy, 2012. Tekninen tuki. Suullinen tiedoksianto. Toukokuu 2012.

Paroc Panel System Oy, 2012. Paroc-elementit. Tuoteominaisuudet. Saatavissa <http://www.paroc.fi/~media/Files/Brochures/Finland/Product-Properties-Paroc-Panels-FI.ashx>. Päivitetty 28.12.2012. Luettu 6.6.2012

Pöyry Finland Oy 2012. Mikkelin kaupunki. Monitoimihalli. Hankeselvitys.

Seppänen, Olli 1996. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Helsinki: Kirjapaino Kiitorata Oy.

Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2003. SFS-EN 12464-1, Valo ja valaistus. Työkohteiden valaistus. Osa1: Sisätilojen työkohteiden valaistus.

Suomen Standardisoimisliitto SFS 2006. SFS-EN ISO 7730. Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.

Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2008. SFS-EN 12193:en Light and lighting. Sports lighting.

Suomen Ympäristöministeriö, 2012. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatodistuksesta. Saatavissa <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=135933>. Päivitetty 18.4.2012. Luettu 9.3.2013

Suomen Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto 2012. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Määräykset ja ohjeet 2012. Osa D2. Helsinki.

Suomen Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto 2012. Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012. Osa D3. Helsinki.

Uponor Oy, 2013. Betonilattiaratkaisut. Saatavissa <http://www.uponor.fi/ratkaisut/talotekniikka/lattialammitys/lattiarakenteet/betonilattia.aspx>. Päivitetty 16.4.2013. Luettu 16.4.2013.

Uponor Oy, 2013. Puulattiaratkaisut. Saatavissa <http://www.uponor.fi/ratkaisut/talotekniikka/lattialammitys/lattiarakenteet/puulattia.aspx>. Päivitetty 16.4.2013. Luettu 16.4.2013.

Vuorelainen, Olavi 1980. LVI-Tekniikka. Lämmönjakelu. Espoo: Otapaino.

Standardin SFS-EN ISO 7730 mukaiset vaatteiden eristävyys ja toiminnallisuuden tasot.

Table C.1 — Thermal insulation for typical combinations of garments

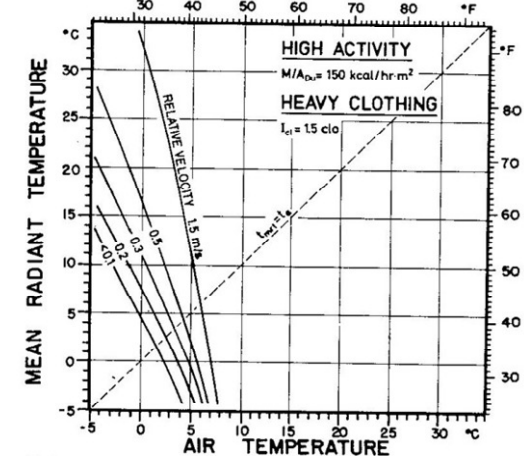
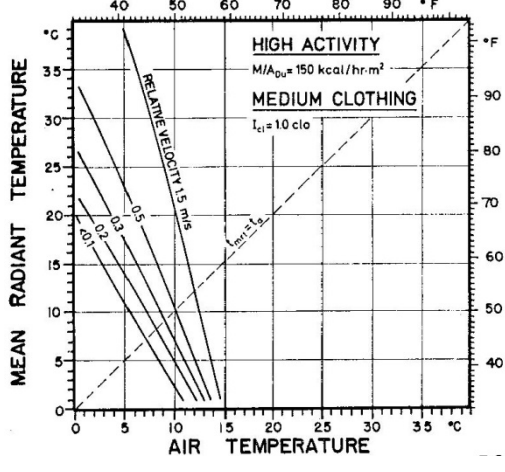
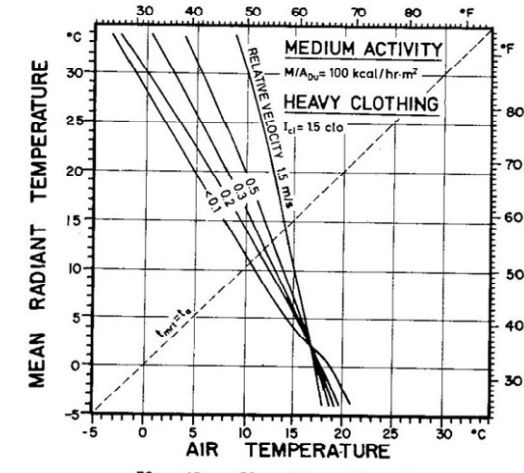
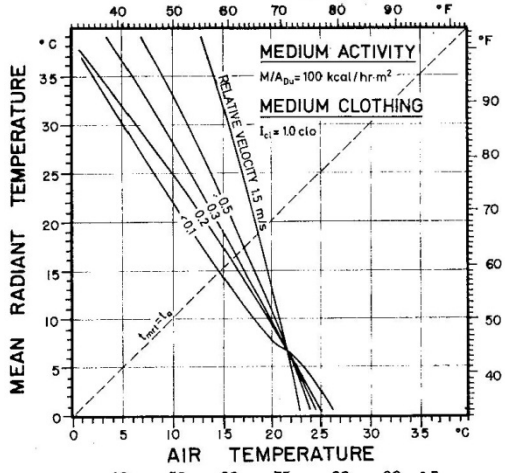
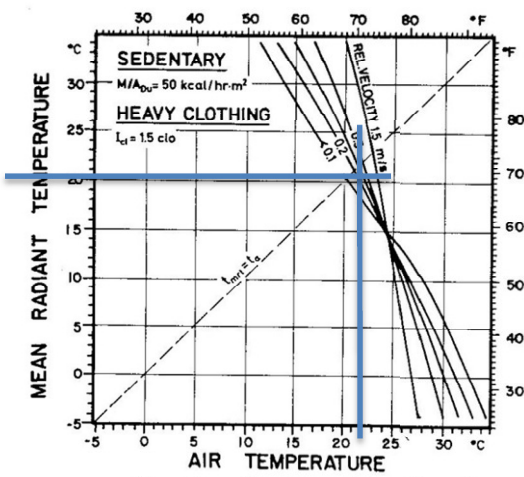
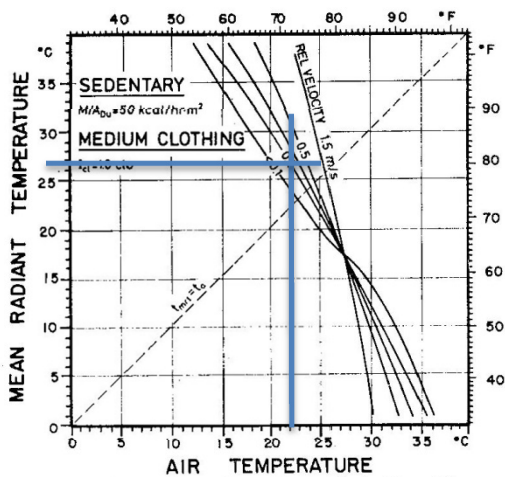
Work clothing	I_{cl}		Daily wear clothing	I_{cl}	
	clo	$m^2 \cdot KW$		clo	$m^2 \cdot KW$
Underpants, boiler suit, socks, shoes	0,70	0,110	Panties, T-shirt, shorts, light socks, sandals	0,30	0,050
Underpants, shirt, boiler suit, socks, shoes	0,80	0,125	Underpants, shirt with short sleeves, light trousers, light socks, shoes	0,50	0,080
Underpants, shirt, trousers, smock, socks, shoes	0,90	0,140	Panties, petticoat, stockings, dress, shoes	0,70	0,105
Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, jacket, socks, shoes	1,00	0,155	Underwear, shirt, trousers, socks, shoes	0,70	0,110
Underwear with long legs and sleeves, thermo-jacket, socks, shoes	1,20	0,185	Panties, shirt, trousers, jacket, socks, shoes	1,00	0,155
Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, jacket, heavy quilted outer jacket and overalls, socks, shoes, cap, gloves	1,40	0,220	Panties, stockings, blouse, long skirt, jacket, shoes	1,10	0,170
Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, jacket, heavy quilted outer jacket and overalls, socks, shoes	2,00	0,310	Underwear with long sleeves and legs, shirt, trousers, V-neck sweater, jacket, socks, shoes	1,30	0,200
Underwear with long sleeves and legs, thermo-jacket and trousers, Parka with heavy quilting, overalls with heavy quilting, socks, shoes, cap, gloves	2,55	0,395	Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, vest, jacket, coat, socks, shoes	1,50	0,230

SFS-EN ISO 7730 mukainen vaatteiden eristävyys

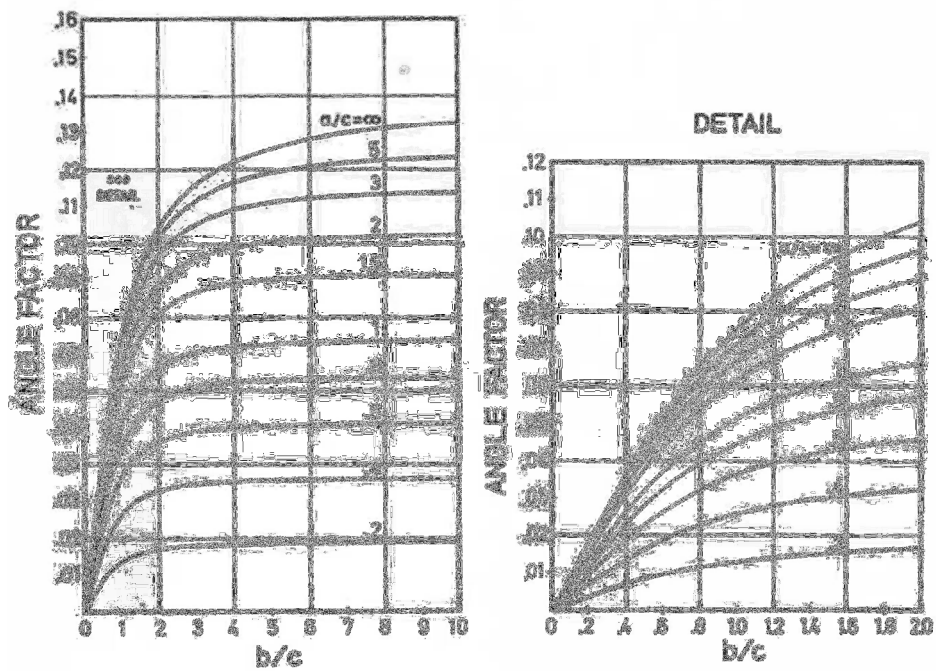
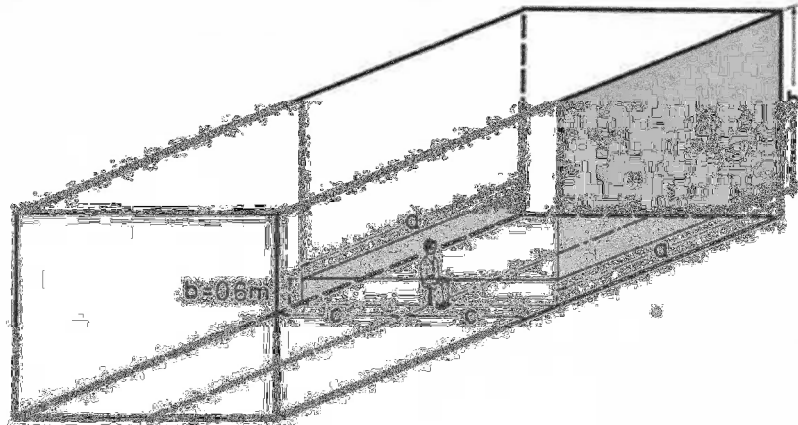
Table B.1 — Metabolic rates

Activity	Metabolic rate	
	W/m^2	met
Reclining	46	0,8
Seated, relaxed	58	1,0
Sedentary activity (office, dwelling, school, laboratory)	70	1,2
Standing, light activity (shopping, laboratory, light industry)	93	1,6
Standing, medium activity (shop assistant, domestic work, machine work)	116	2,0
Walking on level ground:		
2 km/h	110	1,9
3 km/h	140	2,4
4 km/h	165	2,8
5 km/h	200	3,4

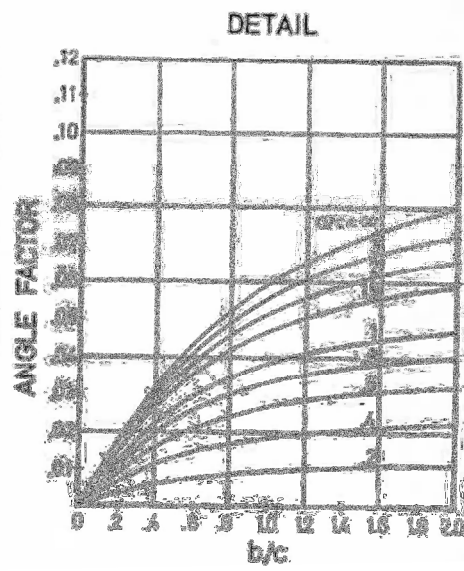
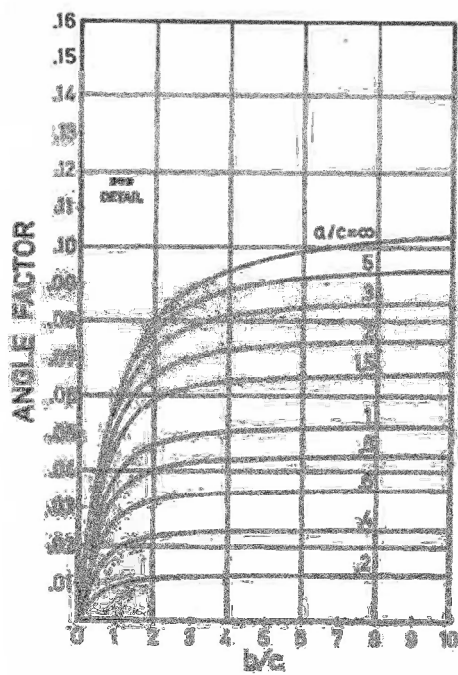
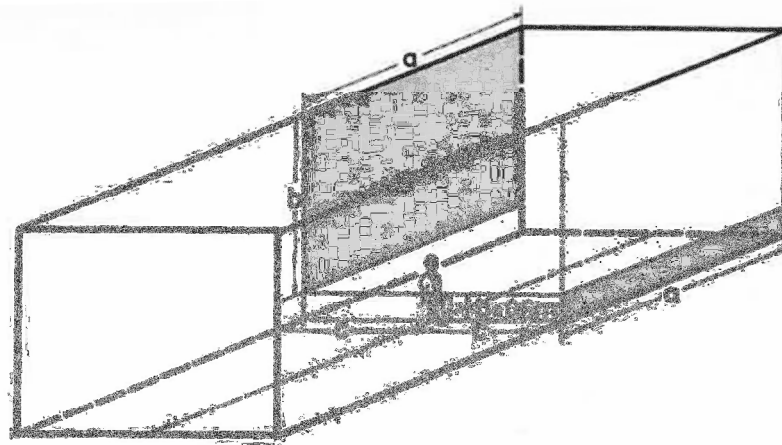
SFS-EN ISO 7730 mukainen toiminnallisuuden tasot



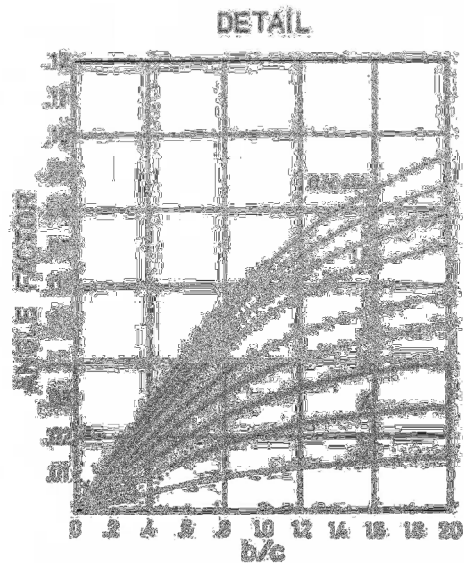
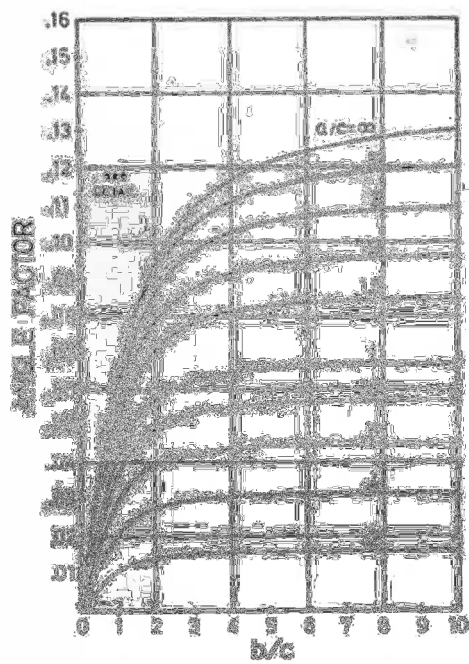
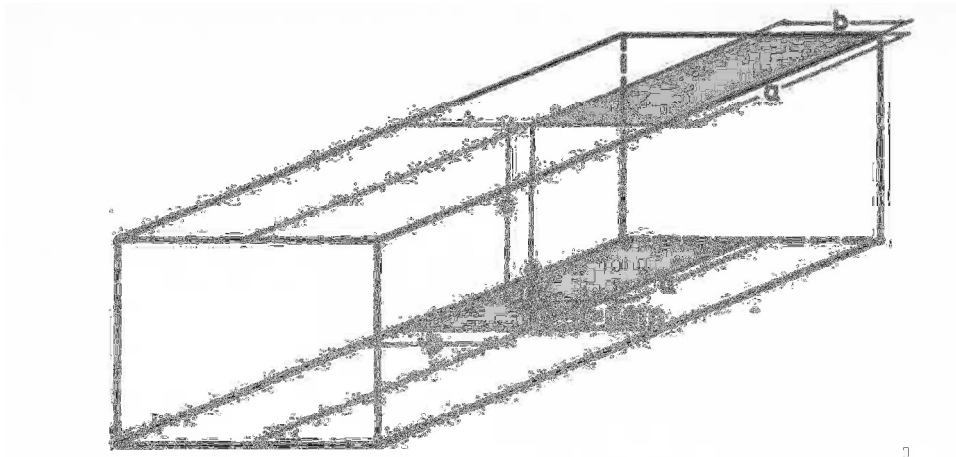
Näkyvyyskertoimia istuvalle henkilölle Fangerin mukaan



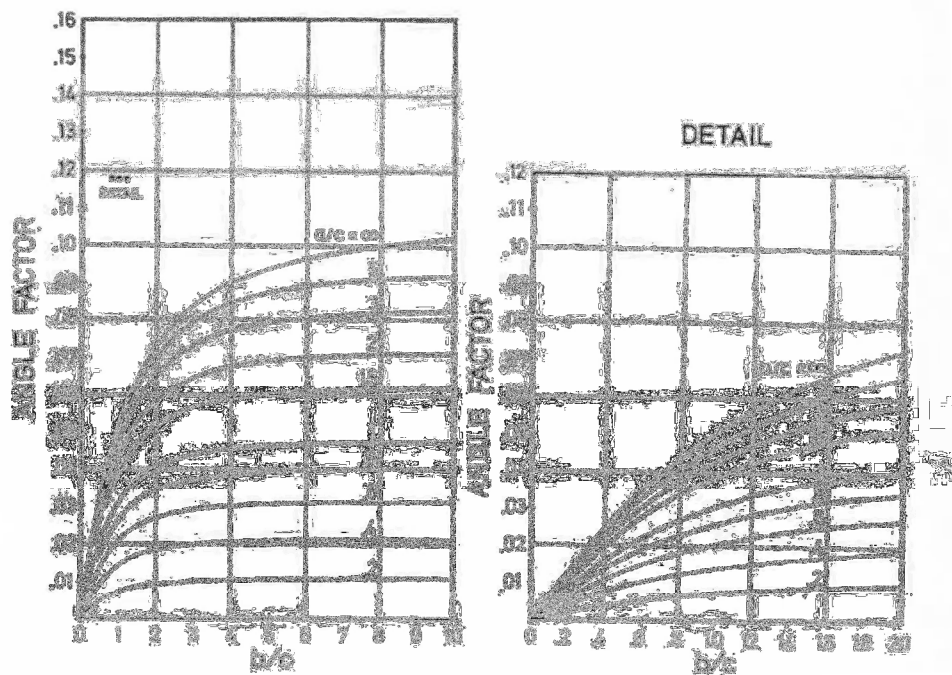
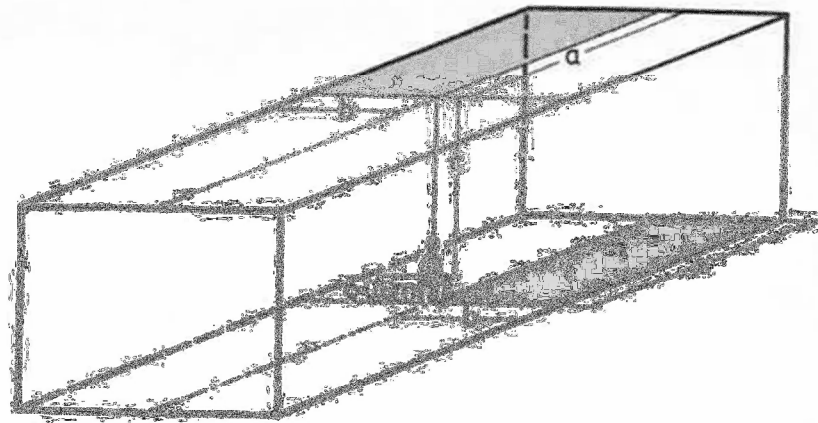
Näkyvyyskertoimia istuvalle henkilölle Fangerin mukaan.



Näkyvyyskertoimia istuvalle henkilölle Fangerin mukaan.



Näkyvyykskertoimia istuvalle henkilölle Fangerin mukaan.



Näkyvyyskertoimia istuvalle henkilölle Fangerin mukaan.

Näkyvyyskertoimia Fangerin mukaan

