

Ossi Ruth

Lattialämmitys- ja -viilennysjärjestelmän vertailu radiaattorilämmitys- ja puhallinkon- vektoriviilennysjärjestelmään

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri

Talotekniikka

Insinöörityö

29.1.2017

Tekijä Otsikko	Ossi Ruth Lattialämmitys- ja -viilennysjärjestelmän vertailu radiaattori- lämmitys- ja puhallinkonvektoriviilennysjärjestelmään
Sivumäärä Aika	60 sivua 29.1.2017
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	LVI-suunnittelu
Ohjaajat	lehtori Hanna Stammeier tekniikan tohtori Petko Velev diplomi-insinööri Sami Tjurin
<p>Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan lattialämmityksen ja lattiaviilennyksen eroja radiaattorilämmitykseen ja puhallinkonvektoriviilennykseen. Vertailu suoritetaan dynaamisesti simuloimalla IDA-ICE-simulointiohjelmalla mallinnettua, nykymääräysten mukaisesti rakennettua asuinkerrostaloa. Tarkasteltavina ominaisuuksina ovat lämpöviihtyvyys, energiatehokkuus ja rakentamiskustannukset.</p> <p>Vertailu toteutetaan käyttämällä simulaatioista saatua tuntikohtaista dataa. Eroja viihtyvyydessä havainnollistetaan pysyvyysskäyrien avulla.</p> <p>Lattialämmitys ja -viilennys pystyvät ylläpitämään hyvän lämpöviihtyvyyden paremmin ja pienemmällä energiamäärällä kuin radiaattorilämmitys ja puhallinkonvektoriviilennys. Lattiaviilennys saadaan toteutettua edullisemmin kuin puhallinkonvektoriviilennys.</p>	
Avainsanat	lattialämmitys, lattiaviilennys, puhallinkonvektori, radiaattori, PMV, PPD, lämpöviihtyvyys, lämpömukavuus, ylälämpeneminen, ISO 7730

Author Title	Ossi Ruth The comparison of underfloor heated and cooled system to a radiator heated and fan coil cooled system.
Number of Pages Date	60 pages 29 January 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Specialisation option	HVAC Designing
Instructors	Hanna Stammeier, Lecturer Sami Tjurin, M.Sc Petko Velev, Ph.D
<p>This thesis was conducted in order to compare the differences of an underfloor heated and cooled building to a radiator heated and fan coil cooled building. The comparison was executed with IDA-ICE by dynamically simulating the indoor climate of several apartments of a fictional high-rise building. The examined properties of the simulation were thermal comfort, energy efficiency and the building costs.</p> <p>The comparison uses hourly data from the simulation to evaluate the thermal comfort. The differences in comfort are visually demonstrated with use of thermal comfort duration curve.</p> <p>Underfloor heating and cooling are able to maintain a good indoor thermal comfort better and with less energy, than radiator heating and fan coil cooling. Underfloor cooling can be constructed with less overall costs, than a fan coil –based cooling system.</p>	
Keywords	underfloor heating, underfloor cooling, fan coil, radiator, PMV, PPD, thermal comfort, overheating, ISO 7730

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Tutkitut järjestelmät	1
2.1	Lattialämmitys ja -viilennys	1
2.2	Radiaattorilämmitys	2
2.3	Puhallinkonvektoriviilennys	2
3	Tutkimuksen esittely	3
3.1	Lämpömukavuus	3
3.1.1	Operatiivinen lämpötila	3
3.1.2	Ulkolämpötila	4
3.1.3	Ilman kosteus	4
3.1.4	Ikä	4
3.1.5	Lämpöolojen muutokset	5
3.2	SFS-EN ISO 7730	5
3.2.1	PMV	5
3.2.2	PPD	7
3.2.3	Säteilylämmön epätasapaino	8
3.3	Simulaation esittely	8
3.3.1	Simulointiajanjakso	8
3.3.2	Rakenteet	9
3.3.3	Laitteet	13
3.3.4	Oletusarvot	14
4	Lämpöviihtyvyyssvertailu - Tulokset	17
4.1	Lämmityskausi	17
4.1.1	Viihtyvyys olohuoneissa	18
4.1.2	Viihtyvyys makuuhuoneissa	23
4.1.3	Yhteenveto viihtyvyydestä lämmityskaudella	27
4.2	Viilennyskausi	28
4.2.1	Viihtyvyys olohuoneissa	29
4.2.2	Viihtyvyys makuuhuoneissa	34
4.2.3	Yhteenveto viihtyvyydestä viilennyskaudella	42

5	Energiätehokkuusvertailu	44
5.1	Lämmityksen energiankulutus	44
5.2	Viilennyksen energiankulutus	46
6	Kustannusvertailu	49
6.1	Rakentamiskustannukset	49
6.2	Energian kustannukset	51
6.2.1	Kaukolämpö ja -kylmä	51
6.2.2	Maalämpö	55
7	Yhteenveto	59
	Lähteet	61

1 Johdanto

Tässä raportissa tiivistetään syksyn 2015 ja alkuvuoden 2016 aikana tehdyn järjestelmävertailun tutkimustulokset. Vertailussa tutkittiin vesikiertoisen lattialämmitys- ja viilennysjärjestelmän eroja radiaattorilämmitteiseen ja puhallinkonvektoriviilennettyyn (tästä eteenpäin PKV) järjestelmään. Järjestelmien eroavaisuuksia tutkittiin lähinnä lämpökäyvyyden, mutta myös energiantehokkuuden ja rakennuskustannusten kautta. Työ on tehty lisäämään tietoa lattiaviilennyksestä ja sen vaikutuksista viihtyvyyteen ja energiankulutukseen. Asuntojen yllämpenemisen ollessa nykyrakentamisessa entistä isompi ongelma nousee tarve monipuolisemmille vaihtoehdoille viilennyksen suhteen. Lattiaviilennyksellä voidaan mahdollisesti hoitaa asunnon yllämpenemisongelmat hyvinkin tehokkaasti. Tässä opinnäytetyössä haluttiin selvittää kyseiset edut tarkastelemalla järjestelmien sekä lämmitys- että viilennysosioita.

2 Tutkitut järjestelmät

2.1 Lattialämmitys ja -viilennys

Vesikiertoisessa lattialämmityksessä lämpöjohdot asennetaan lattiarakenteen sisälle. Yleisimmät ratkaisut koostuvat 17- tai 20-millisistä muoviputkista, jotka kiinnitetään tasavälein rauditusverkkoon ja valetaan lattiavalun sisälle. Muoviputket voidaan myös kiinnittää suoraan eristeeseen kiinnitysväkäsillä tai asentaa lämmönluovutuslevyihin. Lämmönluovutuslevyjä käytetään lähinnä puurakenteisissa lattioissa, joissa ei ole valumas-
san tuomaa lämmön tasaista jakautuvuutta. Lattialämmityspiirit jaetaan huonekohtaisesti ja piirejä ohjataan huonetermostaateilla. Kosteiden tilojen piirit jätetään usein käsisäätöiksi, että piireissä kiertää vesi myös kesäaikaan, jolloin oleskelutiloja ei lämmitetä. Lattialämmitys toimii suuren lämmönluovutus-
pinta-alansa ansiosta pienemmällä lämpötila-alueella kuin patterilämmitys.

Lattialämmityspotkistoa on mahdollista hyödyntää myös lattiaviilennyksessä. Tällöin kosteat tilat tulee asentaa täysin omalle jakotukille ja runkoputkistolle, jotta aiemmin mainittu mukavuuslämmitys saadaan ylläpidettyä aikana, kun muita tiloja viilennetään. Lattiaviilennyksessä laaja viileä pinta-ala laskee tehokkaasti henkilöihin kohdistuvaa säteilylämpötilaa. Lattia myös imee itseensä tehokkaasti auringosta suoraan tulevaa säteilyä,

jolloin hetkellinen ja paikallinen viilennysteho voi moninkertaistua verrattuna mitoitettuun viilennystehoon. Lattiaviilennys on lattialämmityksen tavoin vedoton, näkymätön ja äänetön järjestelmä, joka mahdollistaa isompien ikkunoiden käytön, kun radiaattoreille ei tarvitse jättää tilaa.

2.2 Radiaattorilämmitys

Vesikiertoisessa radiaattorilämmityksessä yleensä teräksiset lämmityspatterit asennetaan ikkunoiden alle estämään ikkunoista tulevaa kylmävuotoa. Radiaattorilämmityksen runkoputkisto on lattialämmityksen runkoputkistoa hajautetumpi johtuen pattereiden sijoitteluperiaatteesta. Tällöin päällekkäisille pattereille on usein omat pystynousut. Lämmityspattereissa on usein termostaattinen patteriventtiili estämässä ylikämpenemistä. Radiaattorilämmitys reagoi lämmöntarpeen muutoksiin lattialämmitystä nopeammin.

2.3 Puhallinkonvektoriviilennys

Puhallinkonvektorit perustuvat pakotettuun konvektioon, jossa lämmintä sisäilmaa puhalletaan viilennetyn patterin läpi. Lämmin ilma luovuttaa lämpöänsä patterissa kiertävään viilennysnesteeseen. Asuinhuoneistoon puhallettu, viilennetty ilma mahdollistaa nopean reagoinnin ylikämpenemisen tapahtuessa, mutta puhallinkonvektorit voivat aiheuttaa huomattavaa paikallista vedontunnetta, mikäli puhallinsuihku on suunnattu huonosti. Puhallinkonvektoreita asennetaan yleensä vain yksi asuntoa kohden, jolloin viilennysjärjestelmästä tulee keskitetty ja se vaikuttaa parhaiten siinä tilassa, johon se on asennettu. Muut tilat saavat vain sekundaarista viilennystä.

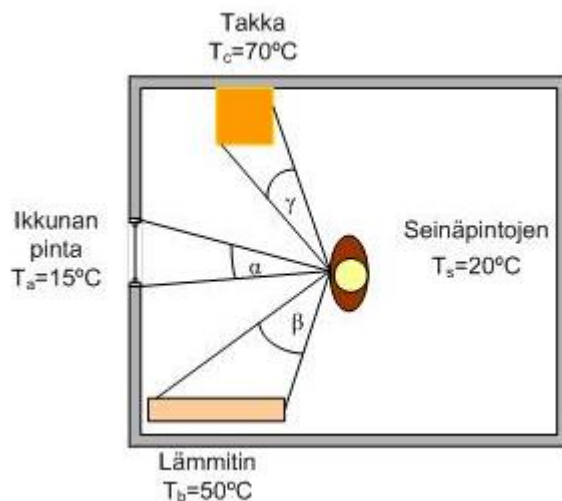
3 Tutkimuksen esittely

3.1 Lämpömukavuus

Ihmisen tuntema lämpömukavuus kehon perustuu aineenvaihdunnan tuottaman lämmön ja kehon luovuttamaan lämmön väliseen tasapainoon. Ihmiskehon tuottama, sekä luovuttama, lämpö on monista asioista riippuvainen, kuten vaatetuksen tai aktiviteetin tasosta, ympäröivien pintojen lämpötiloista sekä ilman kosteudesta. Lämpömukavuus on aina yksilöllinen tuntemus, mutta yleisesti asuintiloissa ihmiset ovat lämpötilaan tyytyväisiä operatiivisen lämpötilan ollessa 20–21 °C. Oikealla lämpömukavuudella voidaan viihtyvyyden parantamisen lisäksi parantaa henkilöiden työtehoa sekä mm. vähentää sairauksiin viittaavien oireiden määrää ja pienentää ilman kuivuuden tunnetta talvisai-kaan. [2].

3.1.1 Operatiivinen lämpötila

Operatiivinen lämpötila kuvastaa ihmisen lämpötuntemusta, joka on usein poikkeava varsinaisesta ilman lämpötilasta. Operatiivinen lämpötila koostuu ympäröivien pintojen säteilylämpötilan (kuva 1 ja kaava 1) ja ympäröivän ilman lämpötilasta (kaava 2). [2]



Kuva 1. Operatiivisen lämpötilan säteilylämpötilan t_r muodostuminen [2]

$$\alpha = 22^\circ, \beta = 30^\circ, \gamma = 15^\circ$$

$$t_r = \frac{30^\circ \cdot 50^\circ\text{C} + 22^\circ \cdot 15^\circ\text{C} + 15^\circ \cdot 70^\circ\text{C} + (360^\circ - (22^\circ + 30^\circ + 15^\circ)) \cdot 20^\circ\text{C}}{360^\circ} = 24^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$t_0 = \frac{(h_r t_r + h_c t_a)}{h_r + h_c} \quad (2) [3]$$

jossa

t_0 on operatiivinen lämpötila	°C
h_c on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	W/(m ² ·K)
h_r on säteilyn lämmönsiirtokerroin	W/(m ² ·K)
t_a on ilman lämpötila (kuiva)	°C
t_r on keskimääräinen säteilylämpötila	°C

3.1.2 Ulkolämpötila

Ulkolämpötila vaikuttaa ihmisen pukeutumiseen. Talvella vaatetus on eristävydeltään moninkertainen verrattuna kesätilanteeseen, ja useimmiten vain päällisvaatteet ovat riittävissä, mikä heikentää ihmisen omia mahdollisuuksia vaikuttaa lämpötuntemukseensa. Tätä voidaan kompensoida tavoittelemalla alhaisempaa operatiivista lämpötilaa talvisaikaan. Lisäksi naisten vaatetuksen on usein todettu olevan lämmöneristävydeltään miesten vaatetusta heikompi, mikä selittää ainakin osittain naisten mieltymyksen korkeampaan lämpötilaan. [1, 2]

3.1.3 Ilman kosteus

Alhainen ilman suhteellinen kosteus lisää ihmisen iholta haihtuvan kosteuden määrää, joka puolestaan viilentää lämpötuntemusta. Talvella, jolloin ulkoilman absoluuttinen kosteus on pienempi, on optimaalinen sisälämpötila jopa yli 22 °C. Vastaavasti, esimerkiksi kesäaikaan, kosteuden ollessa korkeampi, optimaalinen lämpötila laskee, kun iholta haihtuvan hien määrä vähenee. [1, 2]

3.1.4 Ikä

Ihmisen vanhetessa hänen aineenvaihduntansa heikkenee, jolloin myös kehonsisäinen lämmöntuotanto pienenee. Kuten aiemmin todettiin, riippuu henkilön kokemaa lämpöviihtyvyys ihmiskehon ja ympäristön lämpötasapainosta; kun sisäinen lämmöntuotto laskee, nousee lämpöhukka ympäristöön usein lämmöntuottoa korkeammaksi, jolloin vanhemmat ihmiset suosivat korkeampia sisälämpötiloja. [1, 2]

3.1.5 Lämpöolojen muutokset

Nopeasti muuttuva lämpötila koetaan epämukavaksi, vaikka vaihteluiden keskiarvo olisi optimaalilämpötilassa. Lämpötilan ei tulisi muuttua nopeasti enempää kuin 1 °C, eikä muutosnopeuden tulisi ylittää 2 °C/h. Myös siirtyminen erilaisen lämpötilan huoneesta toiseen vaikuttaa viihtyvyyteen. Mikäli siirrytään korkeamman lämpötilan huoneesta viileämpään, koetaan tila usein kylmemmäksi tai epäviihtyisämmäksi, kuin jos henkilö siirtyy viileästä tilasta lämpimämpään. [1, 2]

3.2 SFS-EN ISO 7730

Standardi SFS-EN ISO 7730:2005 Lämpöolojen ergonomia [1] määrittelee menetelmän lämpömukavuuden analyttiseen määrittämiseen ja tulkintaan käyttämällä laskettuja PMV- ja PPD-indeksejä sekä paikallista lämpömukavuutta.

3.2.1 PMV

PMV-arvo, eli Predicted Mean Vote (= ennustettu keskimääräinen mielipide), kertoo samoissa lämpöolosuhteissa olevan ison ihmisjoukon keskimääräisen lämpötuntemuksen seitsenportaisella asteikolla (taulukko 1). Arvo perustuu ihmiskehon lämpötasapainoon ympäristönsä kanssa. PMV saa arvon 0, kun ihmiskehon sisäisesti tuottama lämpökuorma on yhtä suuri kehon ympäristöön häviävän lämmön kanssa. Ihmiskeho pyrkii automaattisesti ihon lämpötilaa ja hikoilun määrää säätelemällä ylläpitämään lämpötasapainoa.

Taulukko 1. Seitsenportainen lämpöaistumusportaikko

PMV	Lämpötuntemus
+ 3	Kuuma
+ 2	Lämmin
+ 1	Lämpimähkö
0	Neutraali
- 1	Viileähkö
- 2	Viileä
- 3	Kylmä

PMV-arvo voidaan laskea kaavoilla 3-6. Tässä tutkimuksessa käytetty simulointiohjelma IDA-ICE laskee PMV-arvot kyseistä kaavaa käyttämällä. [1]

$$PMV = [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot \left\{ \begin{aligned} & (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5\,733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] \\ & - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5\,867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\ & - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \left\{ 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \right\} \quad (4)$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} & \text{for } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{for } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (5)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 I_{cl} & \text{for } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \\ 1,05 + 0,645 I_{cl} & \text{for } I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \end{cases} \quad (6)$$

jossa

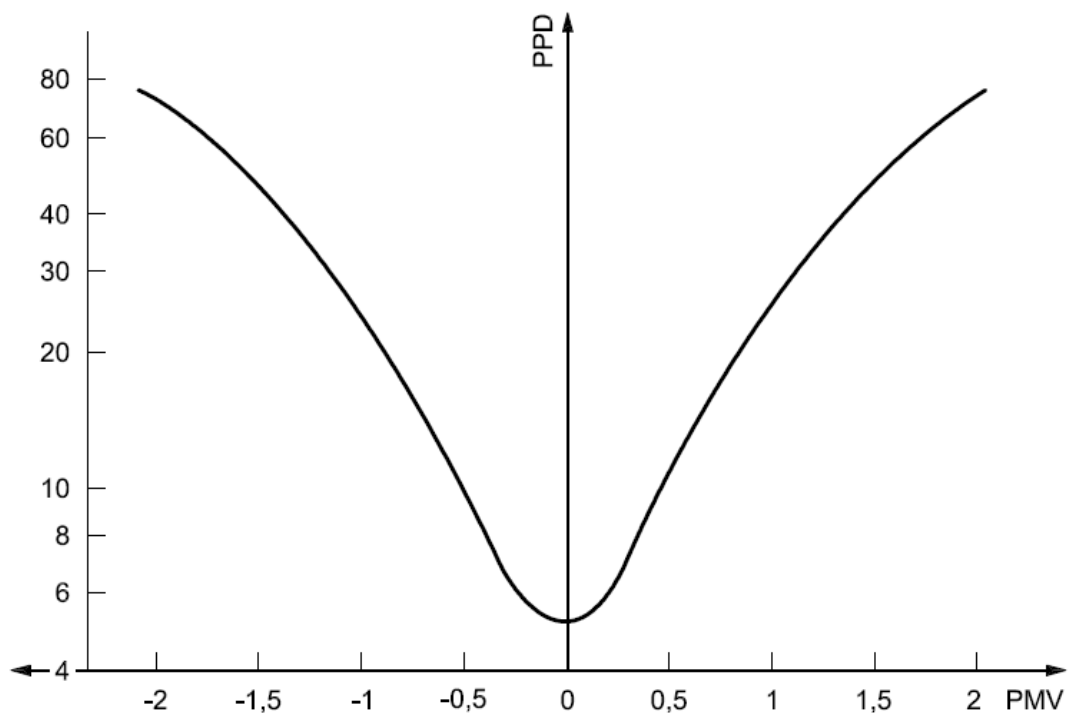
M on aineenvaihdunnan taso	W/m ²
W on työskentelytehon taso	W/m ²
I _{cl} on vaatetuksen eristävyys	m ² ·K/W
f _{cl} on vaatetuksen pinta-alan kerroin	
t _a on ympäröivän ilman lämpötila	°C
t _r on ympäröivien pintojen keskimääräinen säteilylämpötila	°C
v _{ar} on suhteellinen ilmannoisuus	m/s
p _a on vesihöyryn osapaine	Pa
h _c on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	W/(m ² ·K)
t _{cl} on vaatetuksen pintalämpötila	°C

PMV-arvot voidaan laskea hyväksyttävästi ylläolevia kaavoja käyttämällä, kun arvot eivät mene alle -2 tai yli +2 ja seuraavat ehdot toteutuvat:

$M = 46 \dots 232 \text{ W/m}^2$
 $I_{cl} = 0 \dots 0,310 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
 $t_a = 10 \dots 30 \text{ }^\circ\text{C}$
 $t_r = 10 \dots 40 \text{ }^\circ\text{C}$
 $v_{ar} = 0 \dots 1 \text{ m/s}$
 $p_a = 0 \dots 2700 \text{ Pa}$

3.2.2 PPD

PPD, eli Predicted Percentage Dissatisfied (= ennustettu prosenttiosuus tyytymättömiä), kertoo ihmisjoukon prosentuaalisen tyytymättömien osuuden ympäröiviin lämpöolosuhteisiin (kuvio 1). PMV- ja PPD-arvojen riippuvuus perustuu 1 300 ihmisellä tehtyihin kokeisiin. [1]



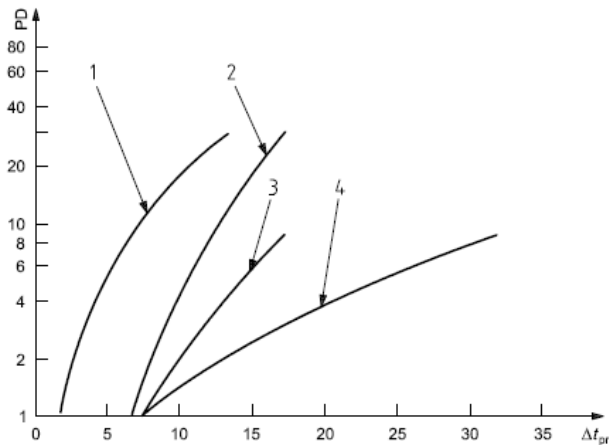
Kuvio 1. PPD- ja PMV-arvojen välinen riippuvuus. Taulukosta nähdään, että kaikkein optimaalisimmassakin tilanteessa noin 5 % ihmisistä ei ole tyytyväisiä lämpöoloihin.

PPD-arvo voidaan johtaa PMV:stä kaavalla 7. [1]

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,033\,53 \cdot PMV^4 - 0,217\,9 \cdot PMV^2) \quad (7)$$

3.2.3 Säteilylämmön epätasapaino

Epäsymmetrinen säteilylämpötila voi vaikuttaa negatiivisesti henkilön kokemaan viihtyvyyteen. Kuviosta 2 nähdään, että esimerkiksi selkeästi muita pintoja lämpimämpi katto aiheuttaa isoimman yksittäisen epämukavuustekijän. Tämä korostuu kuumina kesäpäivinä, kun aurinko pääsee lämmittämään ylimmän kerroksen katon.



Kuvio 2. Epäsymmetrisen säteilylämmön vaikutus paikalliseen lämpöepämukavuuteen
1 = lämmin katto, 2 = kylmä seinäpinta, 3 = kylmä katto ja 4 = lämmin seinä [1]

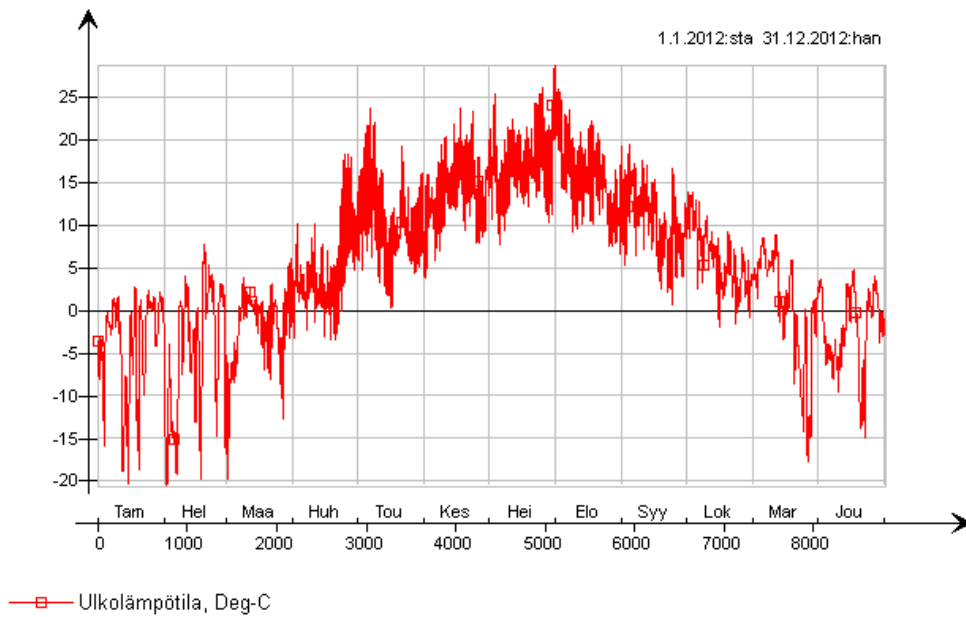
PD on prosenttiosuus tyytymättömiä %

Δt_{pr} on säteilylämmön epäsymmetria °C

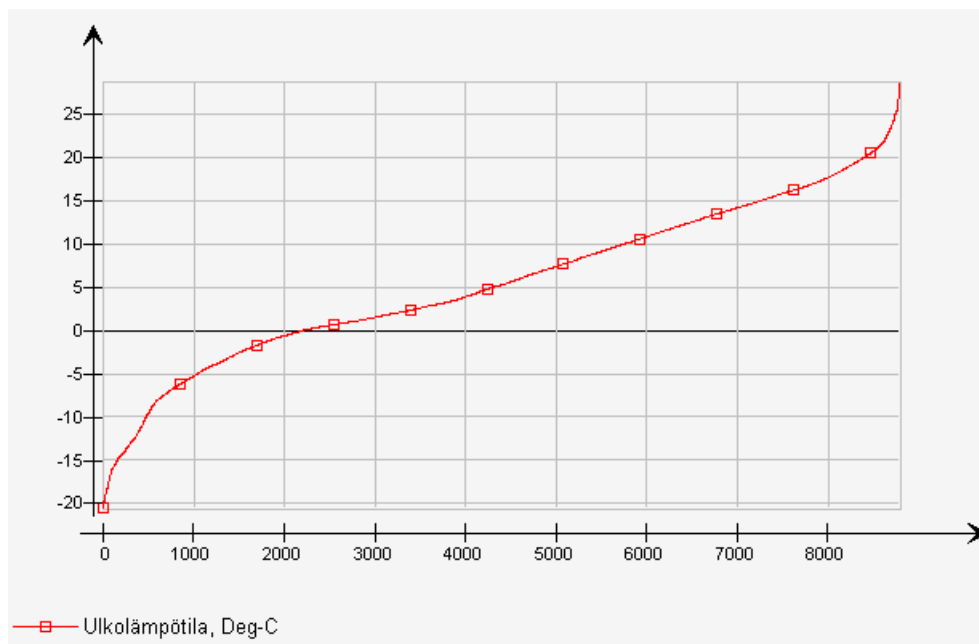
3.3 Simulaation esittely

3.3.1 Simulointiajanjakso

Simuloinnissa on käytetty vuoden 2012 säädataa. Vuoden lämpötilavaihtelut on esitetty kuvioissa 3 ja 4.



Kuvio 3. Simulaation ulkolämpötila koko simulointijakson aikana (testivuosi 2012)

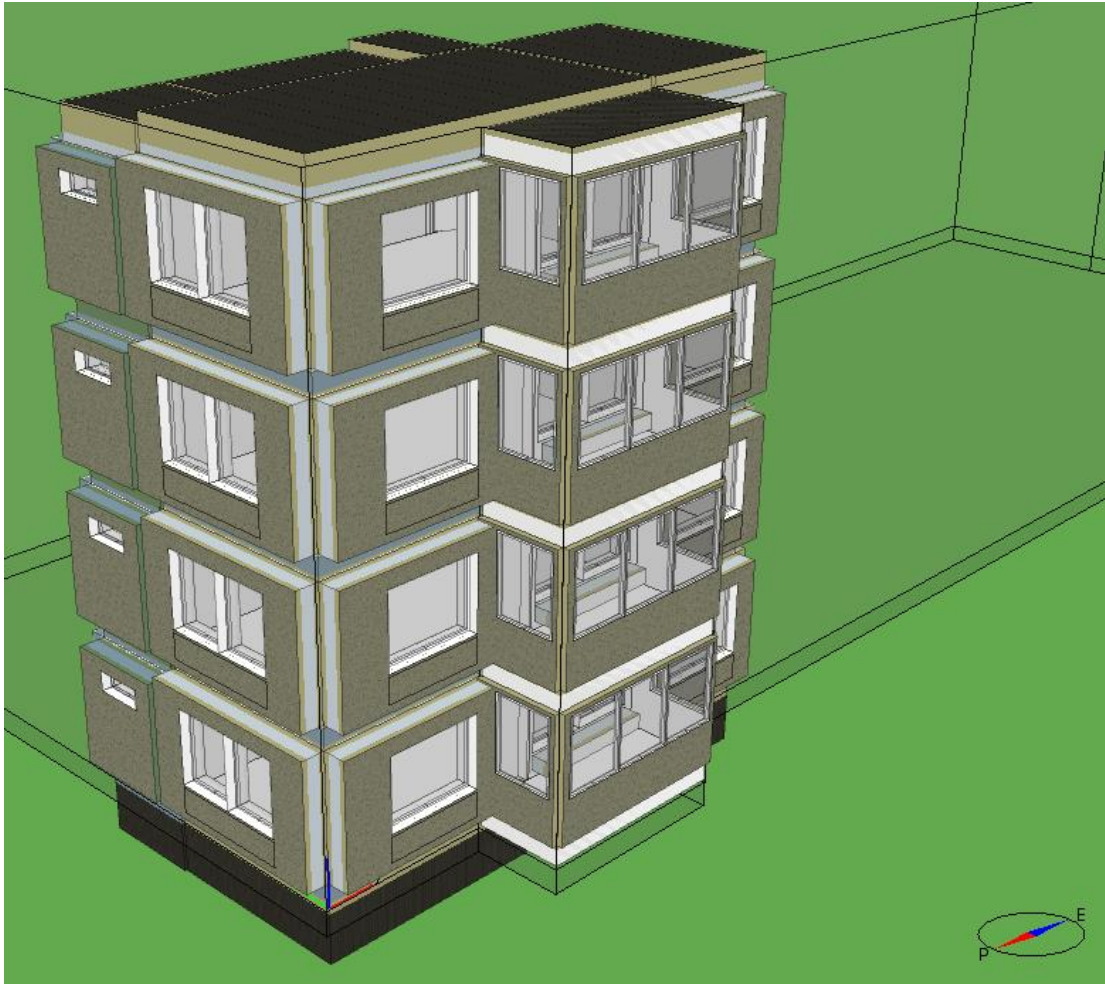


Kuvio 4. Ukolämpötilan pysyvyyskäyrä simulointijaksolla

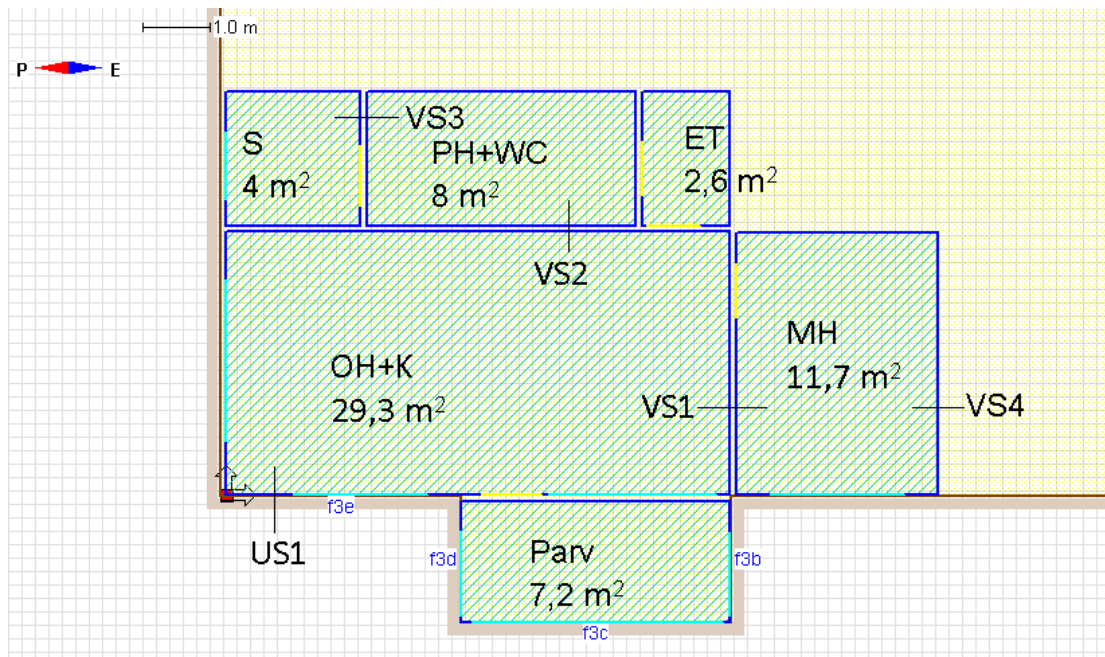
3.3.2 Rakenteet

Simulaatiota varten mallinnettiin nelikerroksisen kerrostalon kulmahuoneistot (kuva 2), jotka koostuivat yksinkertaisista kaksioista lasitetulla parvekkeella (kuva 3). Parvekkeet oli suunnattu länteen. Huoneistojen bruttopinta-ala oli 61,2 m² ja nettopinta-ala 55,5 m².

Simulaatioiden tuloksissa tarkastellaan vain olohuoneita ja makuuhuoneita, ja simulaatioin yksinkertaistamiseksi ainoastaan näihin tiloihin mallinnettiin todennukaiset lämmitys- ja viilennysjärjestelmät. Muihin tiloihin jätettiin ideaaliset lämmittimet. Ideaalinen lämmitin on teoreettinen lämmitin, joka huolehtii huoneen lämmöntarpeesta yleisellä tasolla ilman häviöitä tai ylimääräisiä vaikutuksia ympäristöön.



Kuva 2. Mallinnuksen 3D-näkymä



Kuva 3. Mallinnetun huoneiston pohjakuva

3.3.2.1 Rakenteiden tiedot

Seuraavassa osiossa esitellään simulaatiossa käytetyt seinä- ja lattiarakenteet sekä näiden U-arvot.

US1	- rappauslaasti	10 mm
	- betoni	100 mm
	- mineraalivilla	252 mm
	- betoni	100 mm
	- rappauslaasti	10 mm
U-arvo:		0,1698 W/(m ² · K)
VS1	- kipsilevy	13 mm
	- mineraalivilla	95 mm
	- kipsilevy	13 mm
	U-arvo:	

VS2	- klinkkeri	10 mm
	- laasti	13 mm
	- kipsilevy	13 mm
	- mineraalivilla	66 mm
	- kipsilevy	13 mm
	U-arvo:	0,5607 W/(m ² · K)
VS3	- klinkkeri	13 mm
	- laasti	5 mm
	- kipsilevy	13 mm
	- ilmväli	22 mm
	- mineraalivilla	70 mm
	- alumiinipaperi	
	- ilmväli	22 mm
	- puupanelointi	22 mm
U-arvo:	0,4741 W/(m ² · K)	
VP	- parketti	14 mm
	- alusmatto	
	- valu	40 mm
	- Uponor Tacker-eriste	30 mm
	- ontelolaatta 320 mm	
	- ilmväli	50 mm
	- kipsilevy	20 mm
U-arvo:	0,599 W/(m ² · K)	
AP	- parketti	14 mm
	- alusmatto	
	- valu	40 mm
	- Uponor Tacker-eriste	30 mm
	- ontelolaatta 320 mm	
	- eriste	220 mm
	U-arvo:	0,1587 W/(m ² · K)

YP	- bitumikermi	10 mm
	- mineraalivilla	486 mm
	- betoni	150 mm
	- Laasti	10 mm
	U-arvo:	0,09 W/(m ² · K)

3.3.2.2 Ikkunat ja ovet

Kaikkien ikkunoiden U-arvo on 1,0 W/(m²·K). Ikkunoidenulko- ja sisäpuolinen emissiivisyys on 0,9. Ikkunoissa on 20 cm:n ulkopuolinen syvennys, ja niihin on integroitu sälekaihtimet uloimpien lasien välille. Sälekaihtimet suljetaan, kun auringonsäteilyn määrä lasituksen sisäpuolella ylittää 100 W/m² tai kun auringonsäteilyn osamakulma alittaa 90°. Makuuhuoneissa ikkunapinta-alaa on 3 m² ja olohuoneissa 11,1 m². Parveke on kulmapalkkeja ja lasien välisiä karmeja lukuun ottamatta täysin lasitettu ja koostuu 1-lasisista ikkunoista. Yksi parvekkeen ikkunoista on avattava, ja sille määriteltiin aikataulu pysyä auki toukokuusta elokuuhun. Makuuhuoneen ja olohuoneen välinen ovi on auki kesäkuusta elokuuhun, jotta simulaatio täyttää Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D3 [6] astetuntivaatimuksen myös olohuoneeseen asennetulla PKV:llä. Lämmityskaudella väliovea pidetään kiinni, jotta saadaan tarkempaa huonekohtaista olosuhdetietoa. Muut ovet saunan ja parvekkeen ovea lukuunottamatta ovat simulaation aikana auki.

3.3.3 Laitteet

3.3.3.1 Lämmitys- ja viilennystehontarve

Lämmitys tehot mitoitettiin simuloimalla mallinnettua huoneistoa ideaalisilla lämmitysjärjestelmillä mitoituspakkasilla. Näin saadut ideaalisten laitteiden tehot siirrettiin varsinaisten järjestelmien tehoiksi. Olohuoneiden lämmityspattereiden teho jaettiin kolmelle patterille näiden pinta-alojen suhteina.

Viilennystehoa järjestelmille annettiin 1 039 W, joka on lattiaviilennyksessä jaettu olohuoneeseen ja makuuhuoneeseen. Puhallinkonvektorit hoitavat yksin koko viilennystarpeen. 1 039 W pohjautuu lattiaviilennyksen neliöperusteiseen mitoitustehoon, ja järjestelmillä haluttiin olevan samat asennustehot. Laitteiden huonekohtaiset tehot on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Perusjärjestelmien lämmitys- ja viilennystehot

Kerros	Lämmitys			Viilennys		
	Huone	Teho		Huone	Teho	
1	MH	281	W	MH	296	W
	OH+K	969	W	OH+K	743	W
	TOTAL	1250	W	TOTAL	1039	W
2	MH	211	W	MH	296	W
	OH+K	763	W	OH+K	743	W
	TOTAL	974	W	TOTAL	1039	W
3	MH	211	W	MH	296	W
	OH+K	763	W	OH+K	743	W
	TOTAL	974	W	TOTAL	1039	W
4	MH	316	W	MH	296	W
	OH+K	1116	W	OH+K	743	W
	TOTAL	1432	W	TOTAL	1039	W

Patterijärjestelmät simuloitiin useammalla lämmitysteholla viihtyvyyden ja energiankulutuksen analysoimiseksi. Perustapauksen lisäksi patteritehoja nostettiin ensin 50 W/patteri ja myöhemmin 100 W/patteri. Pelkkä lämmityksen asetusarvon nostaminen ei antanut tuloksille muutosta, koska pattereista saatava teho oli jo saavuttanut maksiminsa mitoitustehoilla.

3.3.4 Oletusarvot

3.3.4.1 Aktiviteettitaso

Simulaation henkilöiden aktiviteettitasona pidettiin 1,2 met (metabolic unit). 1 met vastaa lämpötehoa 58,2 W/m², jolloin yhden henkilön aineenvaihdunnan lämmöntuotto on noin 70 W/m². Aktiviteettitaso 1,2 met vastaa pienimuotoista toimintaa, kuten toimistotyöskentelyä, yleistä oleskelua, koulutyöskentelyä yms. [1, Taulukko B.1]

3.3.4.2 Vaatetus

Simulaatiossa käytettiin vaatetusta 0,6-1,1 clo. Arvo vaihtelee tällä välillä parhaan lämpöviihtyvyyden saavuttamiseksi. 1 clo vastaa eristävyyttä 0,155 m²·K/W. Täten vaatetuksen eristävyys simulaatioaikana vaihtelee välillä 0,093-0,1705 m²·K/W. Miehillä 0,70 clo tarkoittaa konkreettisenä vaatetuksena alusvaatteita, paitaa, kevyitä housuja, sukkia ja

kenkiä. Vastaavasti naisilla 1,1 clo vastaa alusvaatteita, sukkahousuja, paitapuseroa, pitkää hametta, päällistakkia ja kenkiä. [1, Taulukko C.1]

3.3.4.3 Lämpökuormat

Lämpökuormien on oletettu vastaavan RakMK D3:n taulukon 3 arvoja asuinkerrostoille. [6]

3.3.4.4 Ilman nopeus oleskeluvyöhykkeellä

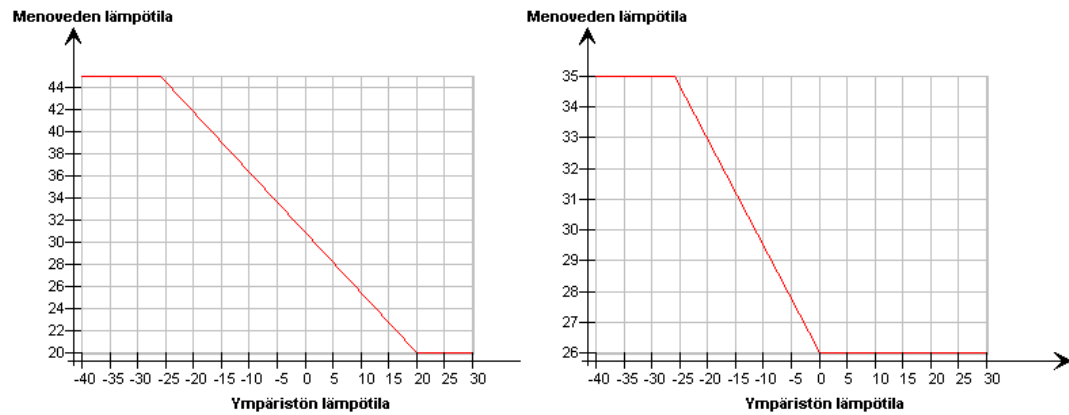
Tutkimuksessa käytetty IDA-ICE 4.6.2 ei sisällä CFD-analysointityökaluja. Täten esimerkiksi puhallinkonvektorin aiheuttamaa ilmavirtausta ja sen lisäämää vetoisuuden tunnetta ei pystytty mallintamaan, eikä sitä näin ollen ole otettu huomioon lämpöviihtyvyyttä arvioitaessa. CFD-mallinnuksen on tarkoitus sisältyä IDA:n myöhempiin versioihin, jolloin simulaatiot voidaan laatia uudelleen ottaen nämä vetoisuustekijät huomioon. Tässä simulaatiossa ilman nopeus oleskeluvyöhykkeellä on vakio, 0,1 m/s.

3.3.4.5 Lämpötila-anturi

Lämmityksen säätölaitteet ovat operatiivista lämpötilaa mittaavia PI-säätimiä. Säätimet mittaavat operatiivista lämpötilaa minimoidakseen ilman lämpötilanmittauksesta aiheutuvat erot varsinaiseen lämpömukavuuteen. Operatiivista lämpötilaa mittaamalla voidaan säätimien ajatella olevan alueella oleskelevien ihmisten termostaattiin tekemiä korjauksia parhaan säteilylämpötuntemuksen aikaansaamiseksi. Puhallinkonvektorin mallinnuksessa ei ollut mahdollisuutta operatiivisen lämpötilan mittaukselle, vaan säätö tapahtuu ilman lämpötilaa mittaamalla. PKV:lle tehtiin tämän johdosta useampia simulointeja eri lämpötilan asetusarvoilla, jotta voidaan kompensoida puuttuvan operatiivisen lämpötilanmittauksen aiheuttama mittavirhe. Molempien järjestelmien säätimet asetettiin pitämään operatiivinen lämpötila lämmityskaudella lämpötilassa 21 °C ja viilennyskaudella 26,5 °C. Lisäksi puhallinkonvektori simuloitiin myös asetusarvoilla 26 °C ja 25,5 °C.

3.3.4.6 Järjestelmien lämpötilat

Radiaattorilämmitysjärjestelmän mitoituslämpötiloiksi valittiin nykymääräysten mukaiset 45/30 °C ja lattialämmitykselle 35/30 °C. Menoveden lämpötiloja säädettiin ulkolämpötilojen mukaan kuvion 5 mukaisesti.



Kuvio 5. Lämmityksen menovesien säätökäyrät, vasemmalla radiaattorilämmitys ja oikealla lattialämmitys

PKV:n menoveden lämpötilana käytettiin 18 °C:ta. Tällöin RakMK D5:n taulukon 8.2 mukaan jäähdytykselle ei tarvitse erikseen laskea häviökertoimia [7, Taulukko 8.2. Jäähdytyksen häviökertoimen ohjearvoja]. Konvektorin paluueden lämpötila oli 23 °C. Lattiaviilennyksen menoveden lämpötila oli 16 °C ja paluueden 19 °C.

4 Lämpöviihtyvyyssvertailu - Tulokset

4.1 Lämmityskausi

Tutkimuksessa simuloitiin koko vuosi 2012, mutta lämmityskausivertailuun otettiin mukaan vain 1.1.2012–31.4.2012 ja 1.9.2012–31.12.2012. Muuna aikana simulaatioiden lämmitysjärjestelmät eivät tuottaneet lämpöä riittävän ulkolämpötilan johdosta, joten ne jätettiin pois vertailusta. Lisäksi huhtikuun 2012 loppupuolella tapahtunut normaalia lämpimämpi ajanjakso olisi vääristänyt lämpöviihtyvyyssarvoja viilennysten ollessa vielä pois päältä.

Mitattuja datapisteitä ajalle kertyi yhteensä 5 833, yksi jokaista tuntia kohden. Simulaatioista kerätty data siirrettiin excel-tiedostoihin ja järjestettiin pienimmästä suurimpaan. Täten muodostuneet, alempana esitetyt, lämpöviihtyvyyden pysyvyysskäyrät ovat lähes suoraan verrannollisia simulointiperiodin ulkolämpötilan pysyvyysskäyrään. Seuraavassa esitellyt taulukot 4–30 ja 36–38 havainnollistavat erot PMV-arvoissa järjestelmien välillä. Pysyvyysskäyrien avulla on myös selvitetty, kuinka paljon enemmän radiaattorilämmittäminen tarvitsee tehoa saavuttaakseen saman koetun lämpöviihtyvyyden, kuin lattialämmitys.

Piirakkadiagrammeissa valitut asteikot perustuvat osittain SFS-EN ISO 7730:n [1] taulukkoon A.1 (alla), joka määrittelee kolme kategoriaa halutuille lämpöolosuhteille.

Taulukko 3. Lämpöolosuhteiden kategoriat [1, taulukko A.1]

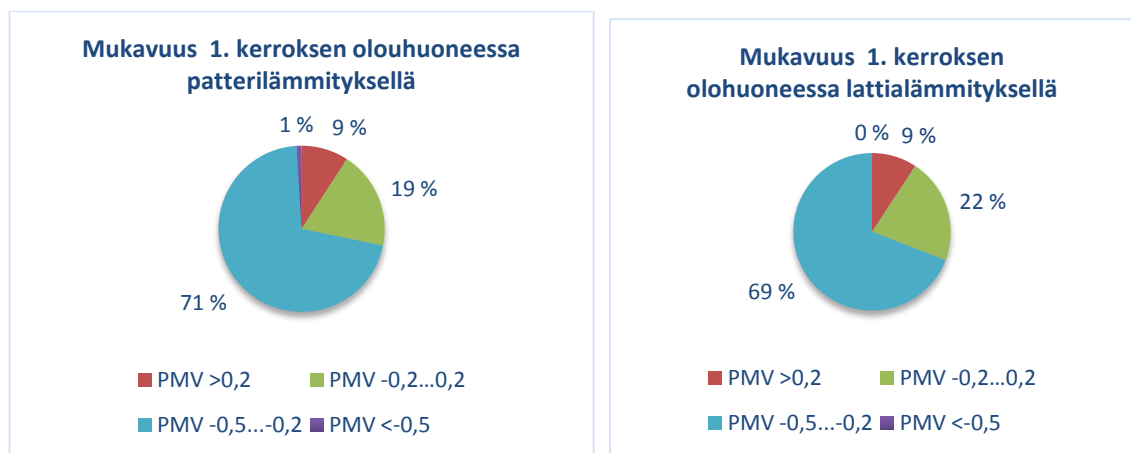
Category	Thermal state of the body as a whole			Local discomfort		
	PPD %	PMV	DR %	PD %		
				vertical air temperature difference	warm or cool floor	radiant asymmetry
A	< 6	$-0,2 < PMV < +0,2$	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	$-0,5 < PMV < +0,5$	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	$-0,7 < PMV < +0,7$	< 30	< 10	< 15	< 10

Itse vertailumetodi perustuu standardissa 7730 kuvattuihin pitkäaikaisen yleisen lämpöviihtyvyyden arviointitapaan A [1, Annex H]. Vertailussa laskettiin prosenttiosuudet tunneista, kun PMV-arvot ylittivät tai alittavat valitut arvot.

4.1.1 Viihtyvyysohjelmissä

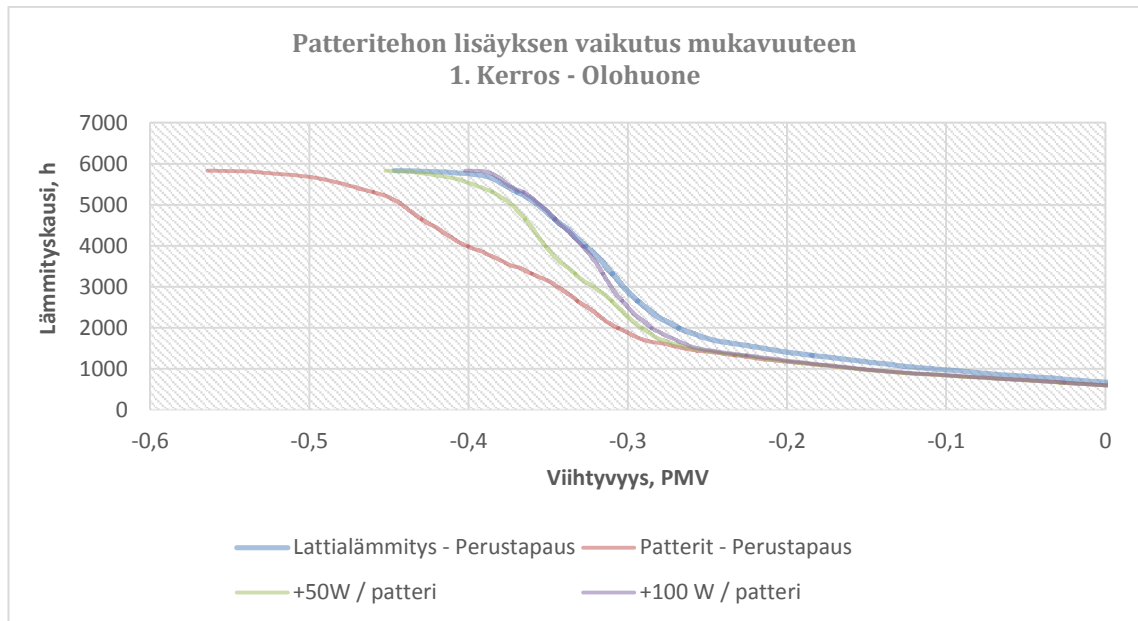
4.1.1.1 1. kerros

Ensimmäisiä kerroksia vertailtaessa huomataan, että valituilla PMV-skaaloilla diagrammit ovat keskenään hyvin samankaltaiset (kuva 4). Radiaattorilämmittämisen sopivan lämpötilan alue on kolme prosenttiyksikköä pienempi, ja aika on jakautunut viileämpien arvojen asteikoille niin, että alueella $-0,5...-0,2$ ajanhetkiä on kaksi prosenttiyksikköä enemmän, mutta myös alueelle $<-0,5$, joita lattialämmityksellä ei esiinny ollenkaan.



Kuva 4. Ihmisen kokeman lämpöviihtyvyyden jakautuminen lämmityskaudella järjestelmien välillä

Järjestelmien todelliset erot huomataan lämpöviihtyvyyden pysyvyyssäyrästä (kuvio 6). Käyrästä nähdään, että viihtyvyys patterilämmityksellä alkaa poiketa lattialämmityksen viihtyvyydestä jo hyvin aikaisessa vaiheessa, käyrien voidaan nähdä erkanevan toisistaan PMV-arvon noin $-0,1$ kohdalla. Erot kasvavat sitä suuremmiksi, mitä alhaisemmaksi ulkolämpötila laskee, patterilämmityksen laskiessa alhaisimmillaan arvoon $-0,57$ lattialämmityksen jäädessä arvoon $-0,45$. Näissä tilanteissa patterilämmityksellä on noin 11,8 % lämpöoloihin tyytymättömiä, kun lattialämmityksellä tyytymättömien määrä on noin 9,2 %.

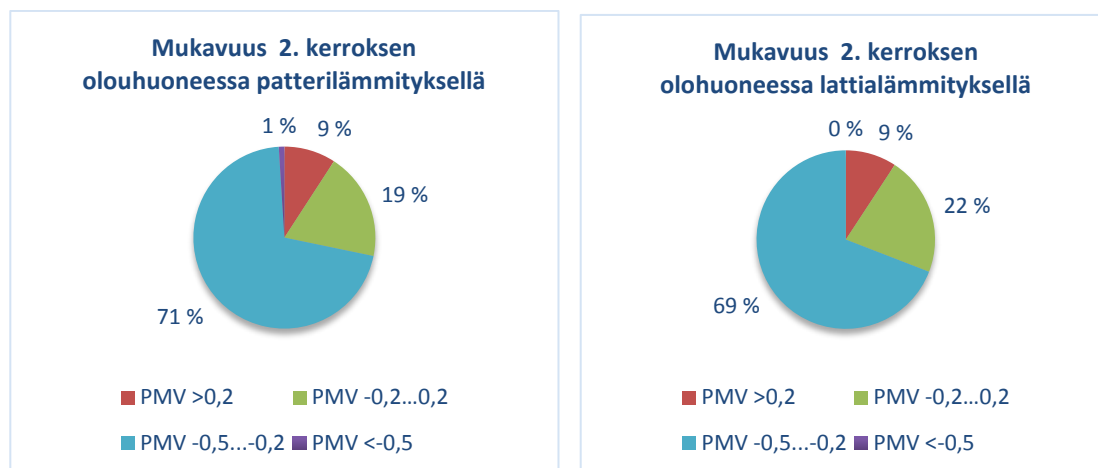


Kuvio 6. Lämpöviihtyvyys olohuoneissa lämmityskaudella eri järjestelmillä.

Kuviosta huomataan lisäksi, lattialämmityksen käyrä seuraa tehostetuimman patterilämmityksen käyrää aina kaikkein kylmimpiä päiviä lukuun ottamatta, ja saavuttaa minimaalisen viihtyvyytensä lähes samassa pisteessä, kuin kevyemmän patteritehonlisäyksen käyrä. Täten keskimäärin noin 75 watin lisäys patteria kohden saavuttaisi käytännössä samankaltaisen lämpöviihtyvyyden simuloidussa tilassa. Kolmella lämmityspatterilla tämä tarkoittaa 225 W korkeampaa lämmitystehoa. Asennusteholla 969 W tämä tarkoittaa jopa 23 %:n tehonlisäystä. Lisäteholla järjestelmä on pyrkinyt kompensoimaan maanvaraisen alapohjan aiheuttamaa viileämmän lattian osuutta säätimen tuntemassa säteilylämmössä.

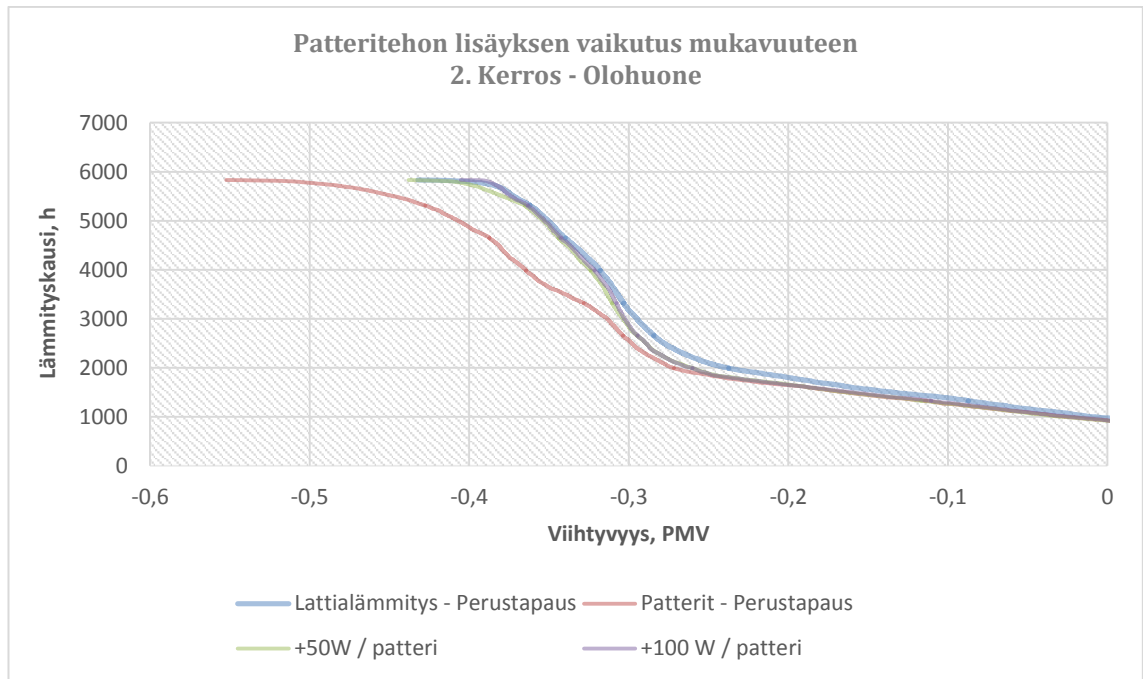
4.1.1.2 2. kerros

Toisessa kerroksessa erot lämpötuntien prosentuaalisessa jakautumisessa samat, kuin ensimmäisessä (kuva 5), mutta pysyvyyskäyrät (kuvio 7) ovat erilaiset.



Kuva 5. Toisen kerroksen olohuoneen viihtyvyyden jakautuminen lämmityskaudella

Lämpöviihtyvyyssä nähdään, että perustapauksissa lattialämmitys on jälleen selkeästi miellyttävämpi kuin patterilämmitys, mutta 50 W:n tehonlisäyksellä lämmityspatteria kohden saavutetaan lähes yhtä hyvä mukavuus kuin lattialämmityksellä. Pieni ero on havaittavissa alueella $-0,32 \dots -0,18$, jolloin lattialämmityksen käyrä on patterilämmitteisiä loivempi. Huomataan myös, että patteritehon lisäys ei nosta viihtyvyyttä enää kuin kaikkein kylmimpänä aikoina. Keskikerroksissa katon lisäksi myös lattia pysyy lämpimämpänä kuin ensimmäisessä kerroksessa, jolloin lisäteholla ei useimpina ajanhetkinä enää saavuteta parempaa lämpöviihtyvyyttä.

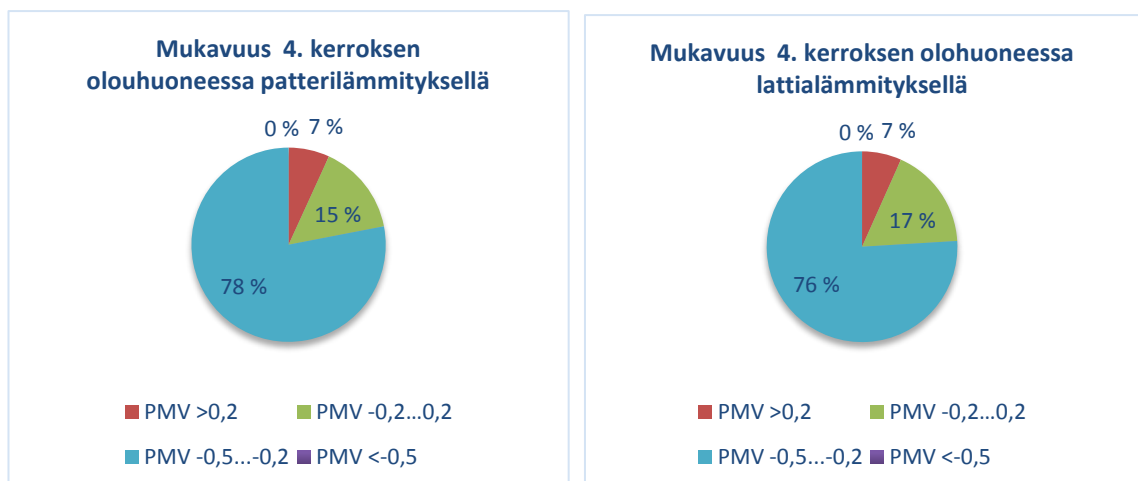


Kuvio 7. Toisen kerroksen olohuoneen lämpöviihtyvyyden pysyvyysskäyrät.

Toisen ja kolmannen kerroksen erot lämpöviihtyvyydessä lämmityskaudella olivat käytännössä mitättömät, joten kolmatta kerrosta ei tarkastella erikseen.

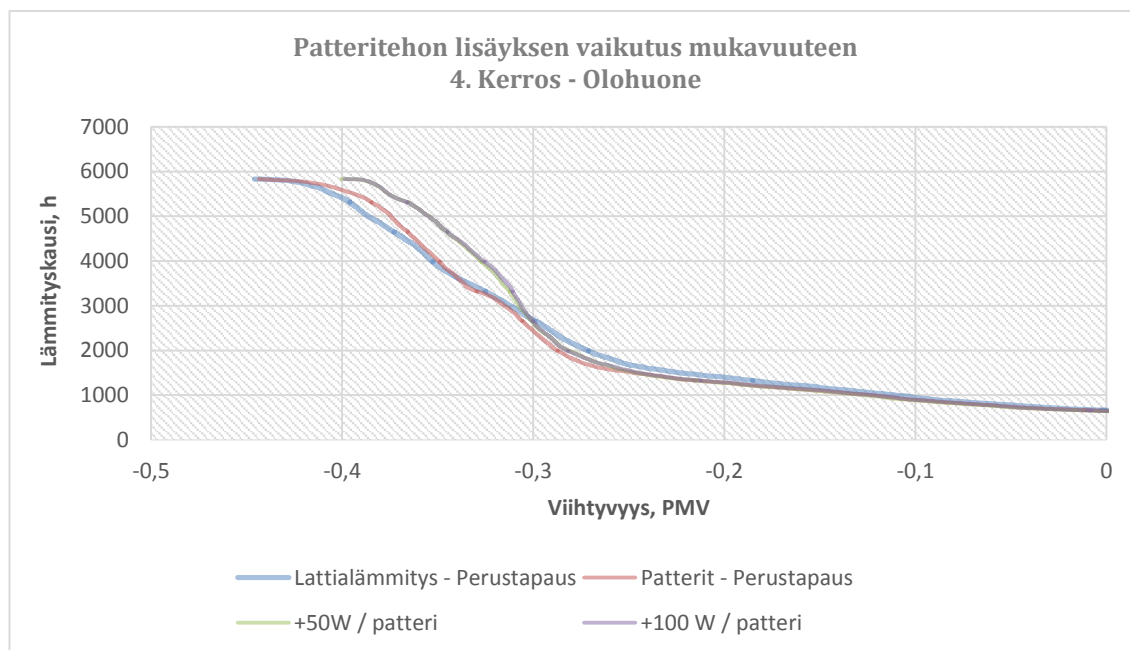
4.1.1.3 4. kerros

Neljännessä kerroksessa erot ovat alempia kerroksia pienemmät (kuva 6).



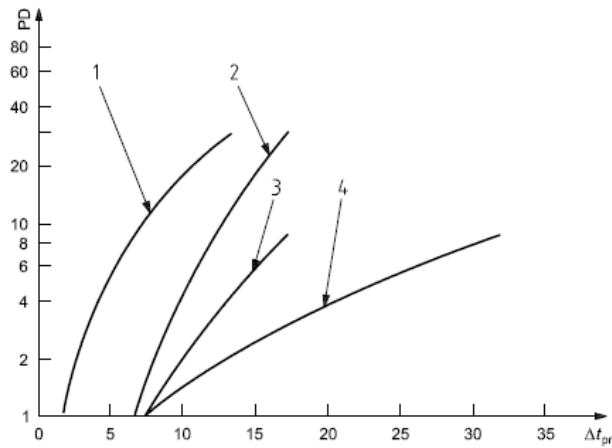
Kuva 6. Viihtyvyyt ylimmän kerroksen olohuoneissa

Mielenkiintoinen havainto tehdään tutkimalla pysyvyyskäyrää (kuvio 8). Lattialämmitys on muista kerroksista poiketen samantasoinen radiaattorilämmityksen kanssa, ja patteritehoa nostamalla voidaan saavuttaa lattialämmitystä parempi lämpöviihtyvyys. Patteritehon nostaminen edelleen ei kuitenkaan lisää viihtyvyyttä.



Kuvio 8. Neljännen kerroksen olohuoneen lämpöviihtyvyyden pysyvyyskäyrät

Lattialämmityksen lämpömukavuutta arvioidaan heikentävän säteilylämpötilojen epäsymmetria lämpimämmän lattian ja muiden pintojen, erityisesti katon välillä (kuvio 9). Patterilämmityksellä epäsymmetria on pienempi, koska lattian pintalämpötila ei ylitä huoneilman lämpötilaa lämmitystilanteessa. Myös osa 4. kerroksen lattialämmityksen asennustehosta valuu 3. kerrokseen, eikä katosta tule tätä menetettyä lämpötehoa vastaavaa lämpöosuutta, toisin kuin kaikissa alemmissa kerroksissa.



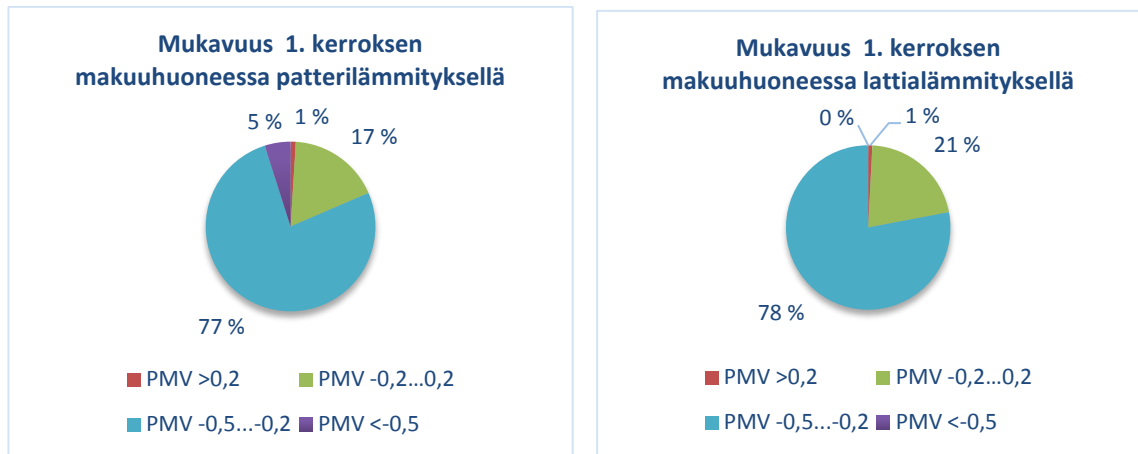
Kuvio 9. Epäsymmetrisen säteilylämmön vaikutus paikalliseen lämpöpämukavuuteen.
1 = lämmin katto, 2 = kylmä seinäpinta, 3 = kylmä katto ja 4 = lämmin seinä [1]

PD on prosenttiosuus tyytymättömiä %
 Δt_{pr} on säteilylämmön epäsymmetria °C

4.1.2 Viihtyvyyden makuuhuoneissa

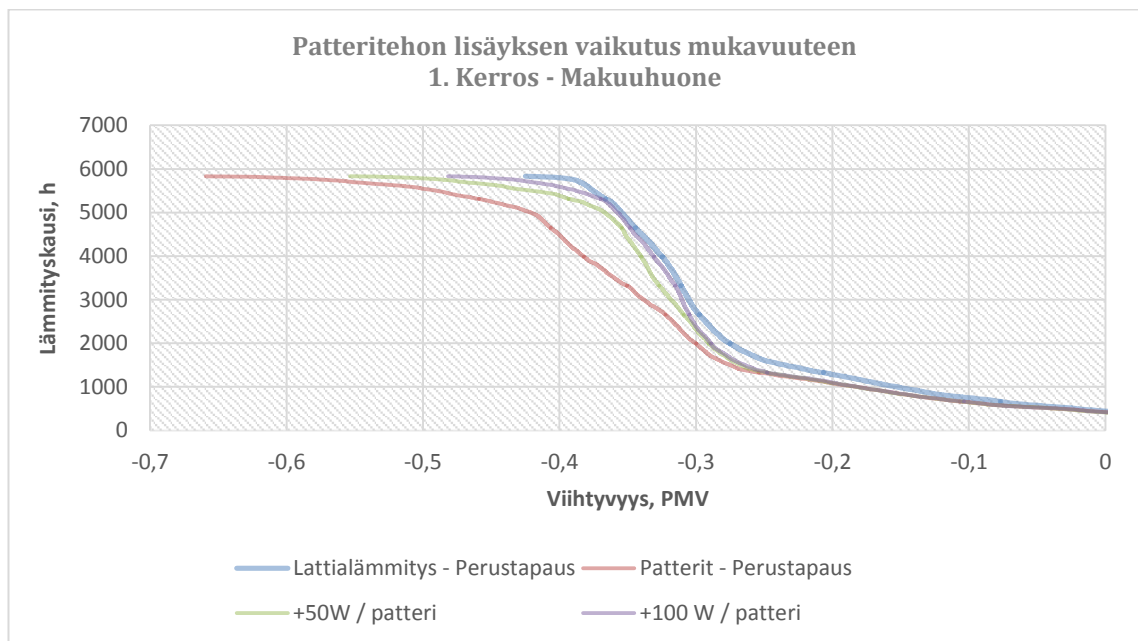
4.1.2.1 1. kerros

Makuuhuoneissa havaittiin selkeämpiä eroja, kuin olohuoneissa, lämmityskauden aikana, erityisesti ensimmäisessä kerroksessa. Maanvaraisen alapohjan viileys laskee viihtyvyyttä erityisesti kylmimpinä aikoina (kuva 7 ja kuvio 10).



Kuva 7. 1. kerroksen makuuhuoneiden lämpöviihtyvyydet

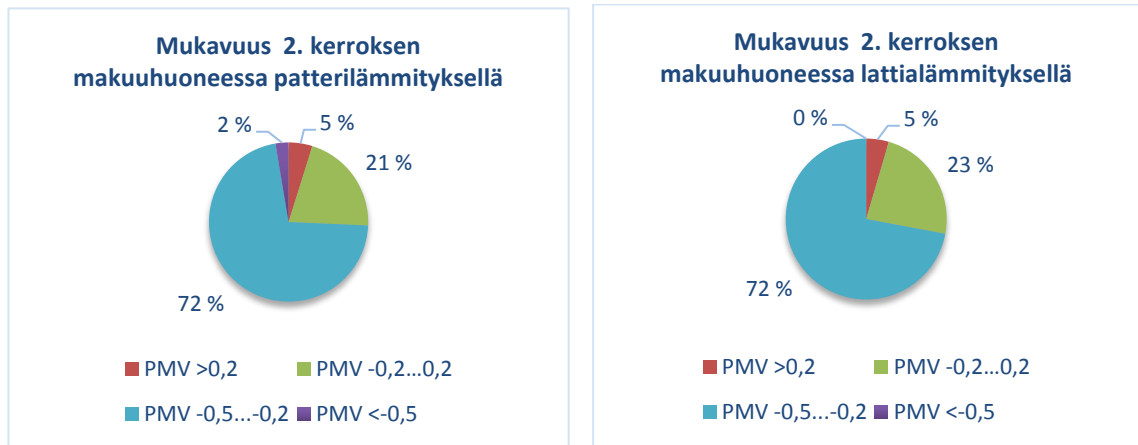
Pysyvyyskäyrät (kuvio 10) kertovat lattialämmityksen korvaavan pattereiden tuoman lisätehon tiloissa, jossa lattia toimii lämpöhukan lähteenä. Edes sadan watin lisäteho pienen tilan patterissa ei nosta viihtyvyyttä lattialämmityksen tasolle. Lattialämmityksen tilanteessa ainoastaan ikkuna ja ulkoseinä ovat viileitä pintoja, kun taas patterilämmityksellä näiden lisäksi lattia kohdistaa ihmiseen epämukavuutta aiheuttavan lämpöaistimuksen.



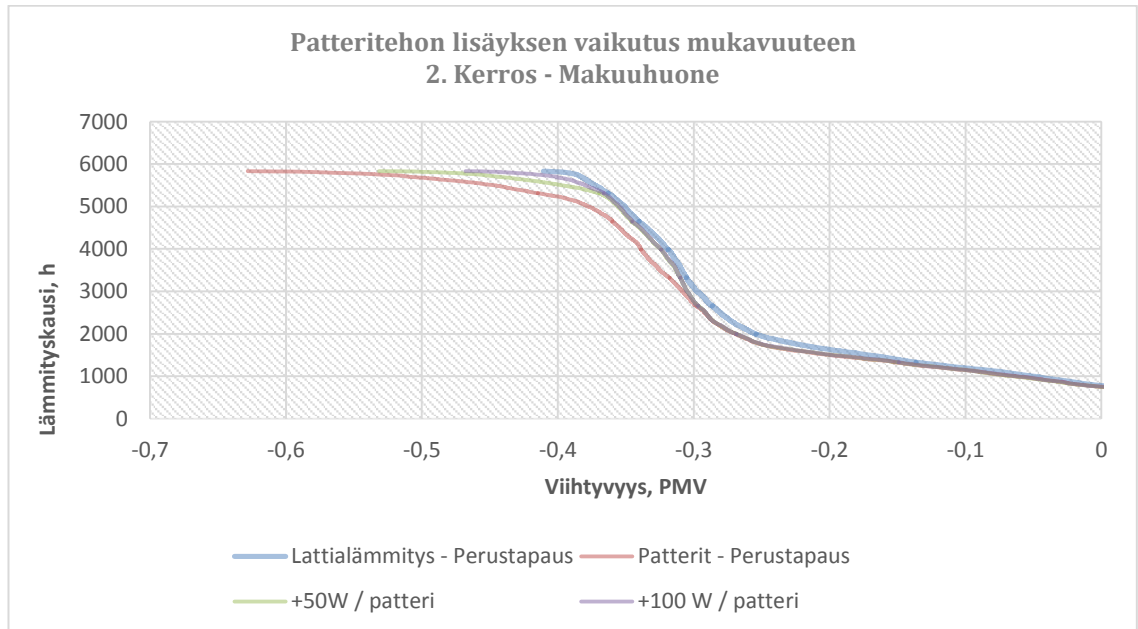
Kuvio 10. 1. kerroksen lämpöviihtyvyyksien pysyvyyskäyrät makuuhuoneessa

4.1.2.2 2. kerros

Erot toisessa kerroksessa ovat samanlaiset olohuoneiden eroihin verrattaessa (kuva 8). Lattialämmityksellä ei alle PMV-arvon $-0,5$ tunteja ilmene ollenkaan simulointiajanjakson aikana, mitä taas ilmenee sekä patterilämmityksen perustapauksessa että tehonlisäyksellä 50 W/patteri . $+100 \text{ W/patteri}$ -skenaariossa viihtyvyys on lähellä lattialämmitystä, mutta ulkolämpötilan laskiessa viihtyvyys laskee huomattavasti nopeammin, kuin lattialämmityksellä (kuvio 11).



Kuva 8. 2. kerroksen makuuhuoneiden lämpöviihtyvyydet

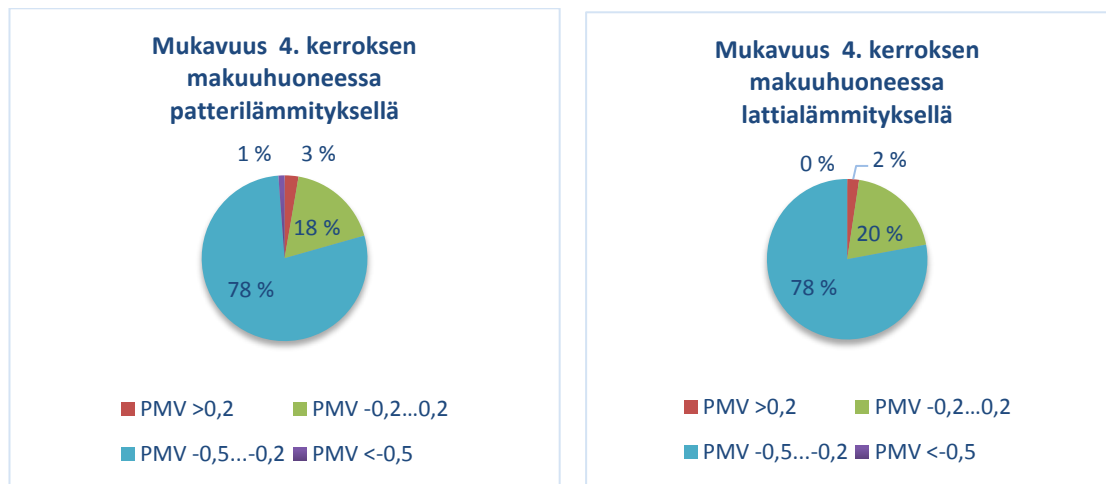


Kuvio 11. 2. kerroksen lämpöviihtyvyyksien pysyvyyskäyrät makuuhuoneessa

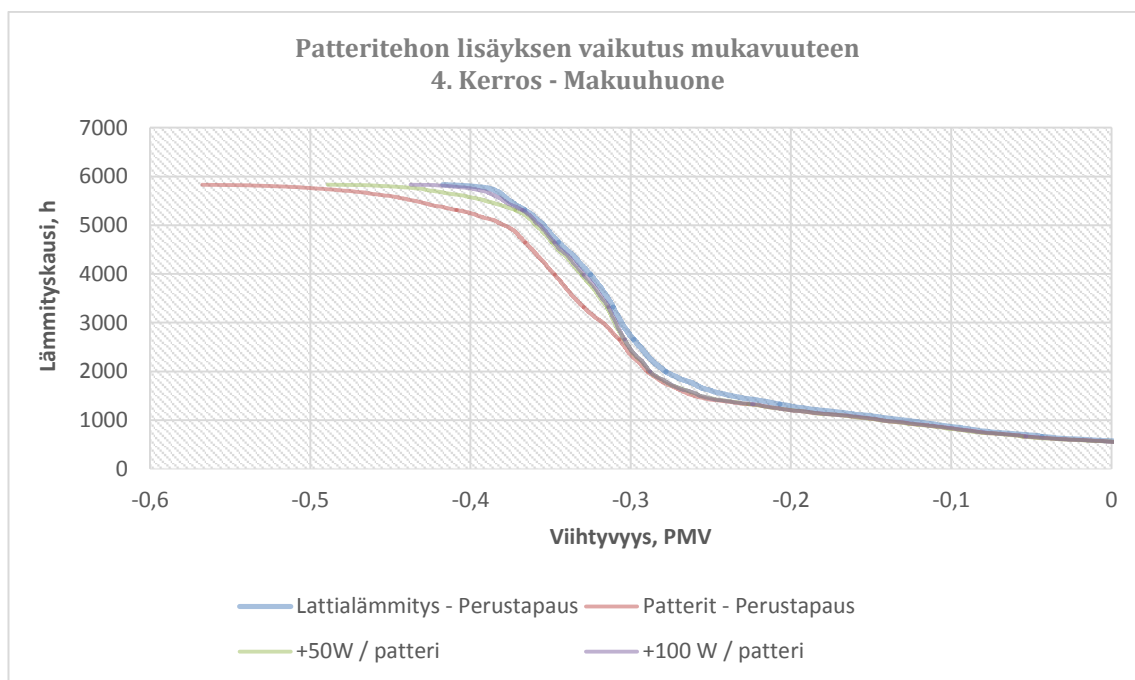
Samoin kuin olohuoneissa, oli kolmannen kerroksen makuuhuone viihtyvyydeltään identtinen toisen kerroksen kanssa, joten kolmatta kerrosta ei tässä raportissa lämmityskaudella käsitellä erikseen.

4.1.2.3 4. kerros

Toisin kuin olohuoneessa, 4. kerroksen makuuhuoneessa ei ole havaittavissa säteilylämmön epäsymmetrian vaikutusta lattialämmityksen mukavuuteen vaikuttavana tekijänä (kuva 9 ja kuvio 12). Olohuoneen säteilylämpö koostu useammasta kylmästä pinnasta, kuin makuuhuoneen, koska ulkoseinä ulottuu kahdelle seinustalle yhden sijasta.



Kuva 9. 4. kerroksen makuuhuoneiden lämpövihtyvyydet



Kuvio 12. 4. kerroksen lämpöviihtyvyyksien pysyvyysskäyrät makuuhuoneessa

4.1.3 Yhteenvedo viihtyvyydestä lämmityskaudella

Aiemmistä taulukoista huomattiin, kuinka lattialämmityksellä on hieman parempi lämpöviihtyvyyden, kuin radiaattorilämmityksellä. Radiaattorilämmitteisen asunnon lämpöviihtyvyyden voi heikentyä hyvinkin jyrkästi ulkolämpötilan laskiessa tarpeeksi alas, kun taas lattialämmityksen viihtyvyysskäyrä päättyy jo ennen isoimman tehonlisäyksen radiaattorikäyrää. Radiaattorirakennuksen useat kylmät pinnat laskevat asukkaiden tuntemaa lämpömukavuutta. Asuntojen koko lämmityskauden keskimääräiset PPD-arvot on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Asuntojen huonekohtaiset keskimääräiset PPD-arvot lämmityskaudelta

Kerros	Huone	Keskimääräinen PPD			
		LL	Patterit	Patterit +50W/patteri	Patterit +100W/patteri
1	OH	6,74	7,52	7,00	6,82
	MH	6,71	7,43	6,98	6,85
2	OH	6,82	7,30	6,92	6,90
	MH	6,64	6,99	6,79	6,75
3	OH	6,83	7,28	6,95	6,93
	MH	6,64	6,97	6,80	6,76
4	OH	7,02	7,04	6,88	6,87
	MH	6,74	7,05	6,85	6,81

Tarkastelemalla taulukon 4 arvoja nähdään, että 4. kerroksen olohuoneessa saatiin patterilämmityksellä samalla asennusteholla niukasti parempi keskimääräinen viihtyvyys kuin lattialämmityksellä. Kaikissa muissa huoneissa edes +100 W/patteri ei nostonut koko lämmityskauden keskiarvoa lattialämmityksen tasolle. Mielenkiintoista on huomata, että lattialämmityksellä viihtyvyys olohuoneissa heikkenee kerroskorkeuden kasvaessa, mutta radiaattorilämmityksellä päinvastoin viihtyvyys paranee, kuitenkin saavuttamatta lattialämmityksen 1. kerroksen viihtyvyyttä. Makuuhuoneiden viihtyvyyksissä kerrosten välillä ei ole suuria eroja, paitsi patterilämmityksen ensimmäisessä kerroksessa, jossa viihtyvyys on hieman muita huonompi.

Jos halutaan arvioida järjestelmien konkreettisempi ero viihtyvyydessä, voidaan laskea kaavoja 3–6 käyttäen esimerkiksi 1. kerroksen olohuoneiden keskimääräisten viihtyvyyksien vaatetukset. Kun oletetaan aineenvaihdunnan tasoksi $58,2 \text{ W/m}^2$, sisä- ja säteilylämpötiloiksi $21 \text{ }^\circ\text{C}$ ja vesihöyryn osapaineeksi 500 Pa , saadaan lattialämmityksen vastaavan viihtyvyyden vaatetusarvoksi noin $0,389 \text{ clo}$ ja patterilämmitykselle $0,377 \text{ clo}$. Viihtyvyysero $0,012 \text{ clo}$ vastaa ISO 7730:n mukaan vajaata sukkaparia. Samalla tavalla laskemalla voidaan arvioida myös ääritilanteen viihtyvyysero. Isoin ero oli 1. kerroksessa, jossa samalla asennusteholla lattialämmityksellä alhaisin mukavuus oli $\text{PMV} = -0,41$ ja radiaattoreilla $-0,65$. Pattereilla lämpöviihtyvyyttä vastaa tällöin $0,323 \text{ clo}$ ja vastaavasti lattialämmityksellä $0,366 \text{ clo}$. Erotus $0,042 \text{ clo}$ vastaa paksupohjaisia, mutta muuten kevyitä kenkiä. [1, taulukko C.2]

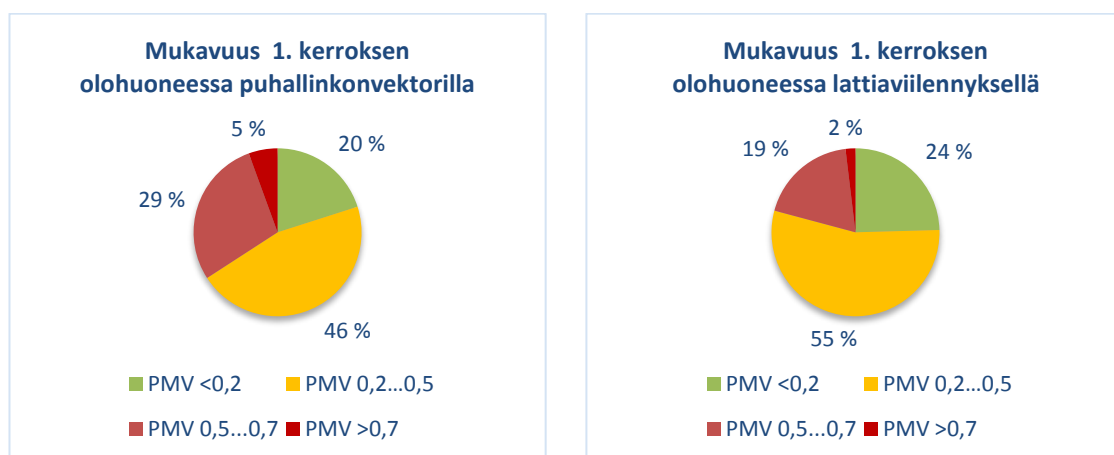
4.2 Viilennyskausi

Viilennyskauden vertailuun otettiin välin 1.6.2012–31.8.2012 aika, yhteensä 2 208 tuntia. Kyseinen aikaväli vastaa samaa aikaa, jolloin kesäaikaisten huonelämpötilojen täytyy alittaa $27 \text{ }^\circ\text{C}$. RakMK D3:n kohdan 2.2.1.1 mukaan kesäajan huonelämpötila ei saa nousta yli $150 \text{ }^\circ\text{Ch}$ yli $27 \text{ }^\circ\text{C}$:n täyttääkseen nyky määräykset. Viilennysvertailussa havaittiin huomattavasti lämmitysvertailua selkeämpiä eroja lämpömukavuuksissa.

4.2.1 Viihtyvyysohjelmissä

4.2.1.1 1. kerros

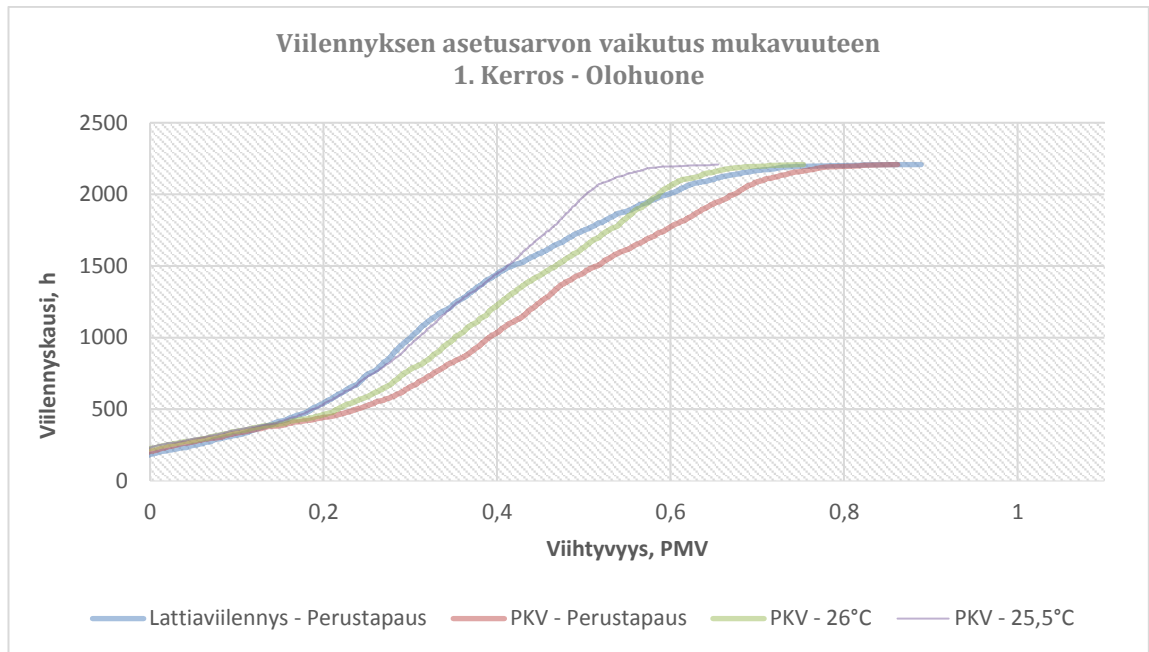
Lämpömukavuuden prosentuaalisissa eroissa nähdään lattiaviilennyksen keskimääräinen paremmuus tarkastelujakson aikana (kuva 10). Lattiaviilennys pystyy pitämään olohuoneen mukavuuden alle 0,5 PMV:n 79 %:ia viilennyskaudesta, kun puhallinkonvektorilla vastaava mukavuus säilyy samana aikana vain 66 % kokonaisuudesta.



Kuva 10. Lämpömukavuus viilennyskaudella 1. kerroksen olohuoneissa

Tarkastelemalla viilennysten pysyvyyssäyriä (kuvio 13) huomataan lattiaviilennyksen ja puhallinkonvektorin perustapauksen erot piirakatarkastelua paremmin. Viihtyvyysohjelmissä PKV:llä on käytännössä koko viilennettävän kauden ajan korkeamman epämukavuuden alueella, lukuun ottamatta aivan käyrän loppua, jossa lattiaviilennyksen lämpömukavuus häviää PKV:lle. Tämän uskotaan johtuvan lattiaviilennyksen hitaammasta vaikutuskyvystä sisäilman nousevaan lämpötilaan sekä kaikkein lämpimimpinä hetkinä tapahtuvasta säteilylämpöjen epätasapainosta.

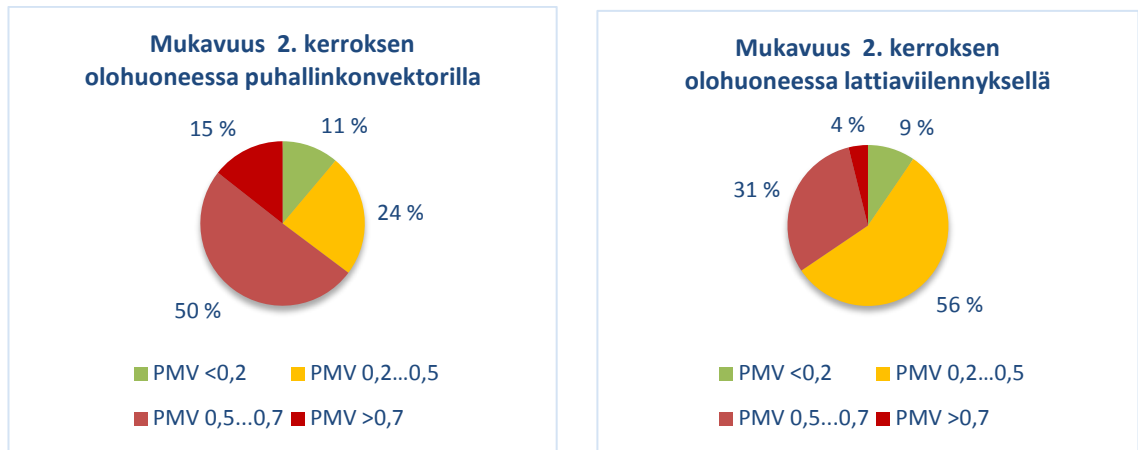
Lattiaviilennys on 1 500 tunnin ajan samantasoinen asetusravon 25,5 °C PKV:n kanssa, sekä lähes 2 000 tuntiin asti parempi kuin 26 °C asetusravon viilennys puhallinkonvektorilla.



Kuvio 13. 1. kerroksen lämpöviihtyvyyksien pysyvyyskäyrät olohuoneessa viilennyskauteina

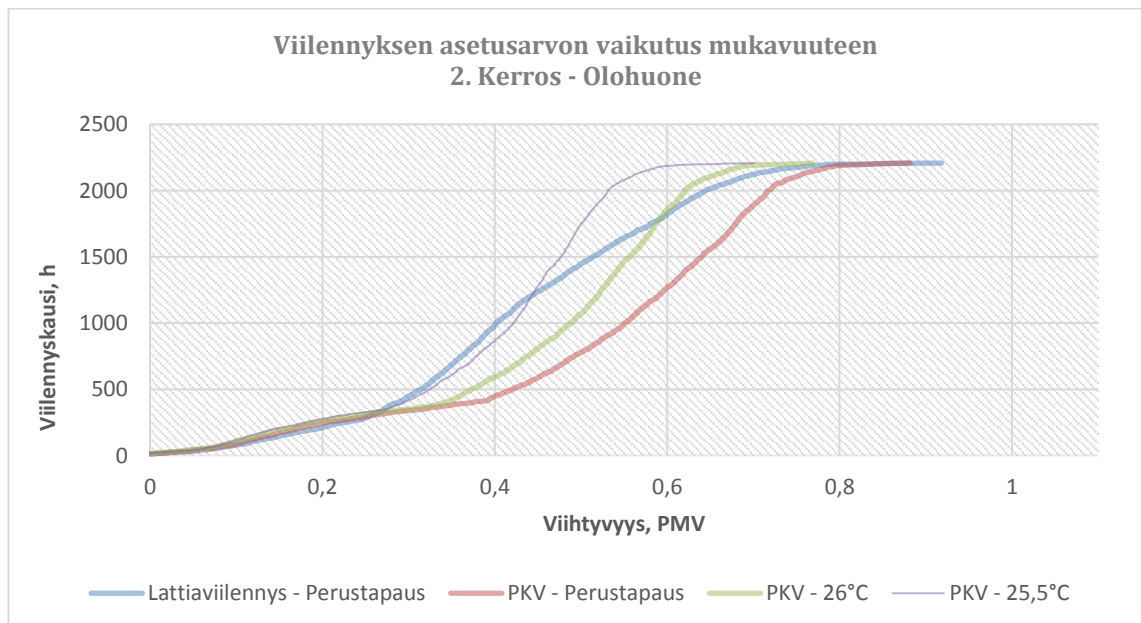
4.2.1.2 2. kerros

Toisessa kerroksessa havaitaan korkeuden kasvamisen vaikutus viihtyvyyteen. Aurin-gonsäteilystä tuleva lämpömäärä on isompi kuin ensimmäisessä, ja tämän vaikutukset nähdään vertaamalla ensimmäisen ja toisen kerroksen prosenttiosuustaulukoita (kuvat 10 ja 12). Puhallinkonvektorilla korkeimman epämukavuuden lohko, $PMV > 0,7$, on kasvanut kolminkertaiseksi viidestä prosentista 15 prosenttiin. Samalla lattiaviilennyksen korkein epämukavuus on vain kaksinkertaistunut kahdesta prosentista neljään prosenttiin. 11 prosentin ero tarkoittaa 2 208 tunnin tarkastelujaksolla 242,9 tuntia, eli yli 10 päivää, jona aikana lattiaviilennys ei ylitä PMV-indeksiä 0,7.



Kuva 12. Lämpömukavuus viilennyskaudella 2. kerroksen olohuoneessa

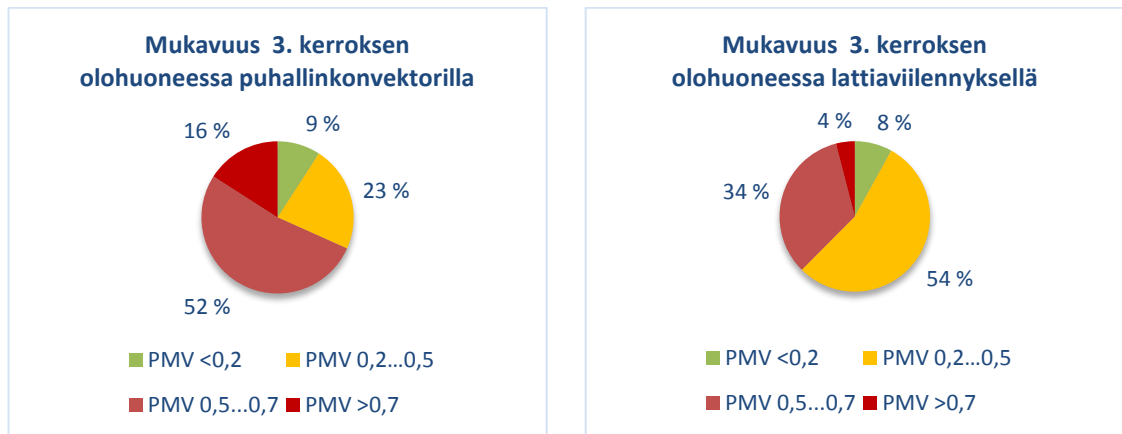
Pysyvyyskäyristä (kuvio 14) huomataan, että mukavuuskäyrien kulmakertoimet ovat jyrkemmät kuin ensimmäisessä kerroksessa. Lattiaviilennyksen käyrä on jälleen loivempi kuin muut käyrät ja on itseasiassa jopa hieman 25,5 °C:n käyrää paremmalla mukavuuden alueella, kunnes noin 1 250 tunnin kohdalla PKV 25,5 °C ohittaa lattiaviilennyksen. Lopun ajasta lattiaviilennys on keskimäärin yhtä mukava kuin 26 °C:n konvektoriviilennys, mutta jälleen huomataan lattiaviilennyksellä olevan kaikkein isoimmat epämukavuudet. Näiden osuus kokonaismukavuudesta on kuitenkin hyvin pieni, 4 % koko viilennyskaudesta vastaa vajaata neljää päivää.



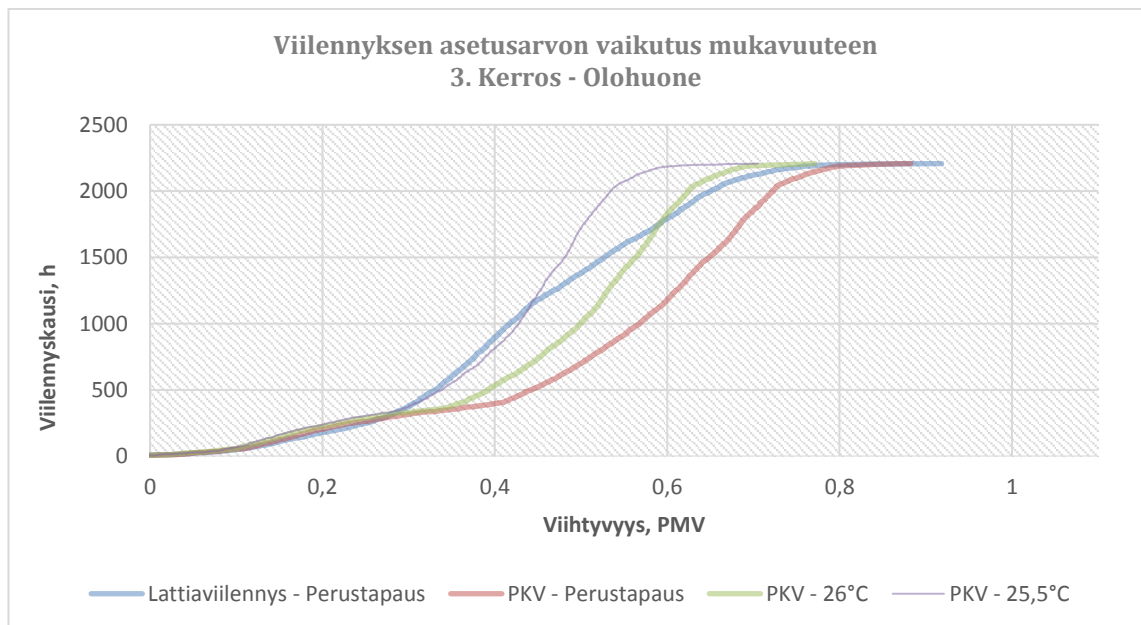
Kuvio 14. 2. kerroksen lämpöviihtyvyyksien pysyvyyskäyrät olohuoneessa viilennyskautena

4.2.1.3 Kolmas kerros

Kolmas kerros on samankaltainen toisen kerroksen kanssa. Lattiaviilennyksellä isoimman epämukavuuden osuus ei kasva kerroskorkeuden kanssa, mutta konvektoriviilennyksellä osuus kasvaa yhden prosenttiyksikön verran (kuva 13). Muiden osuuksien muutokset ovat samanlaiset järjestelmien välillä, eikä pysyvyyskäyrissä (kuvio 15) nähdä eroja toiseen kerrokseen verrattaessa.



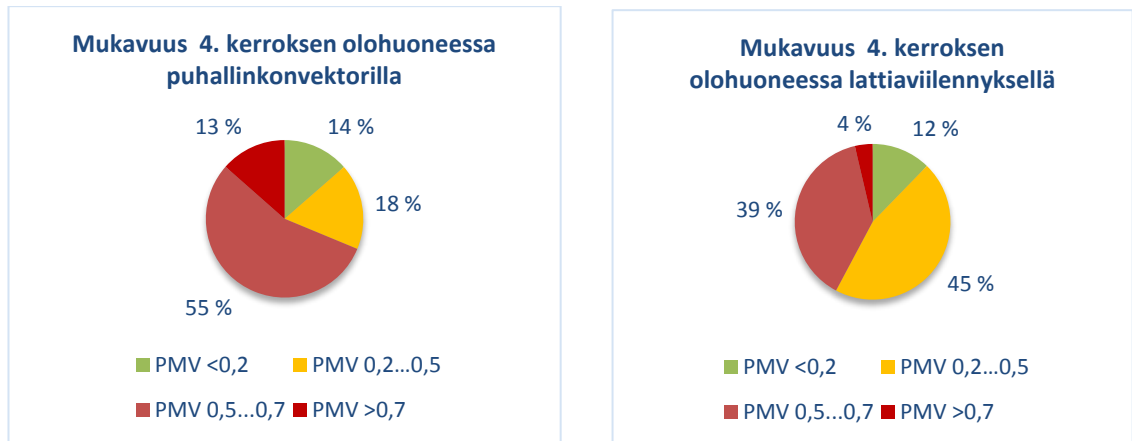
Kuva 13. Lämpömukavuus viilennyskaudella 3. kerroksen olohuoneessa



Kuvio 15. 3. kerroksen lämpöviihtyvyyksien pysyvyyskäyrät olohuoneessa viilennyskautena

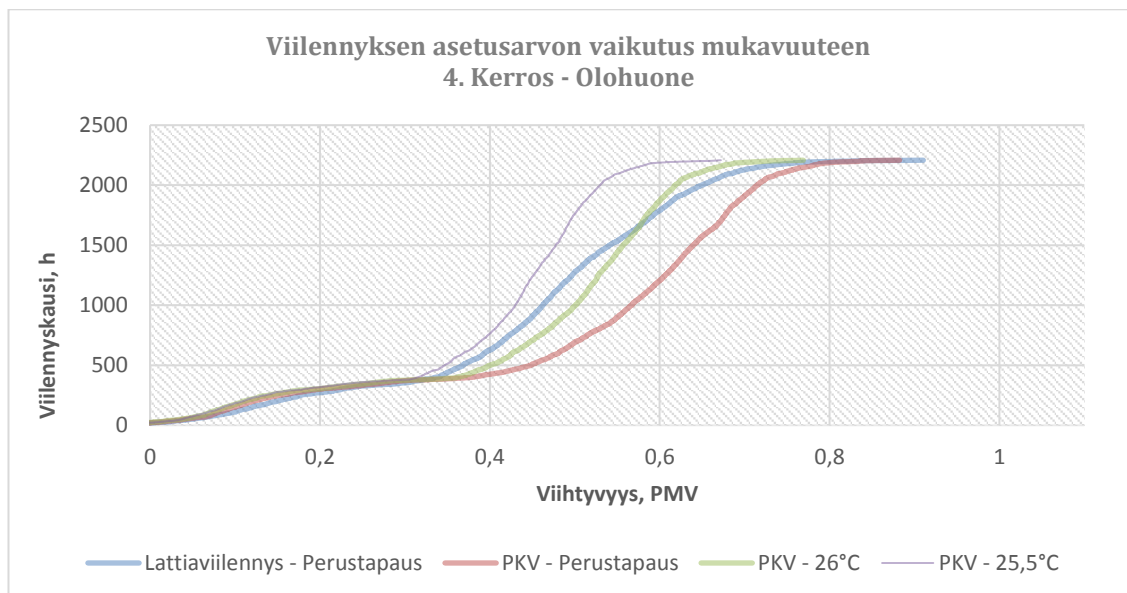
4.2.1.4 4. kerros

Neljännessä kerroksessa lattiviilennys on jälleen PKV:tä viihtyisämpi lähes koko viilennyskauden ajan (kuvio 16). Lattiviilennyksellä säilytään 57 %, eli yli puolet viilennyskaudesta, alle PMV-indeksin 0,5 lämpömukavuudessa, kun taas puhallinkonvektorilla vastaava arvo on alle kolmasosa, 32 % (kuva 14).



Kuva 14. Lämpömukavuus viilennyskaudella 4. kerroksen olohuoneessa

Poiketen toisen ja kolmannen kerroksen pysyvyykäyristä, ei lattiviilennys alussa seuraa "PKV 25,5 °C" -käyrää, vaan on keskimäärin lähempänä "PKV 26 °C" -käyrää.



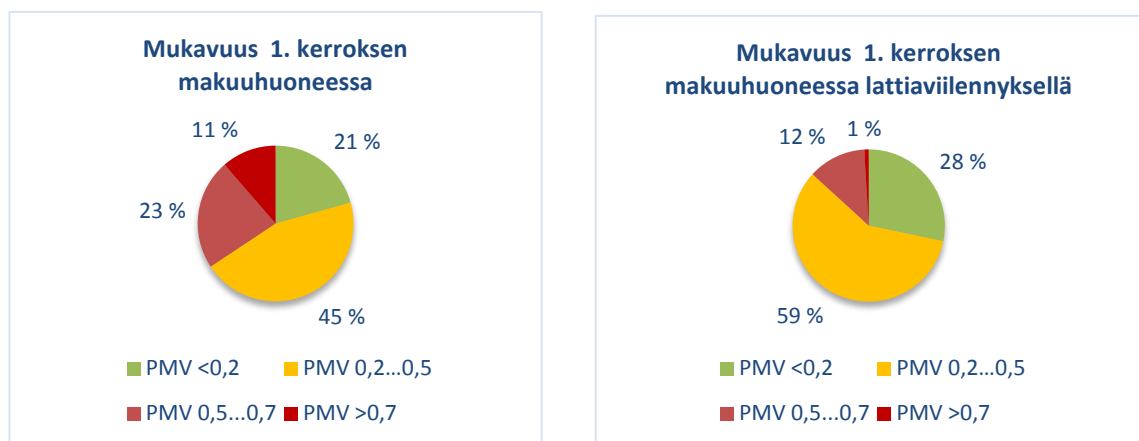
Kuvio 16. 4. kerroksen lämpöviihtyvyyksien pysyvyykäyrät olohuoneessa viilennyskautena

4.2.2 Viihtyvyyden makuuhuoneissa

Makuuhuoneita vertailemalla nähdään selkein ero järjestelmien välisissä viihtyvyyksissä. Lattiaviilennys on automaattisesti tilakohtainen viilennysjärjestelmä, kun taas asuinhuoneistojen PKV on lähes aina keskitetty huoneiston isoimpaan tilaan, tässä tapauksessa olohuoneeseen. Makuuhuoneiden viilennysteho tulee avoimaisen välioiven kautta, jolloin käytännössä korkeimmilla ulkolämpötiloilla ei asunnoissa voida nauttia edes kohtalaisesta yksityisyydestä, mikäli viilennys on keskitetty olohuoneeseen, tai esimerkiksi solu-asunnoissa keskikäytävälle.

4.2.2.1 1. kerros

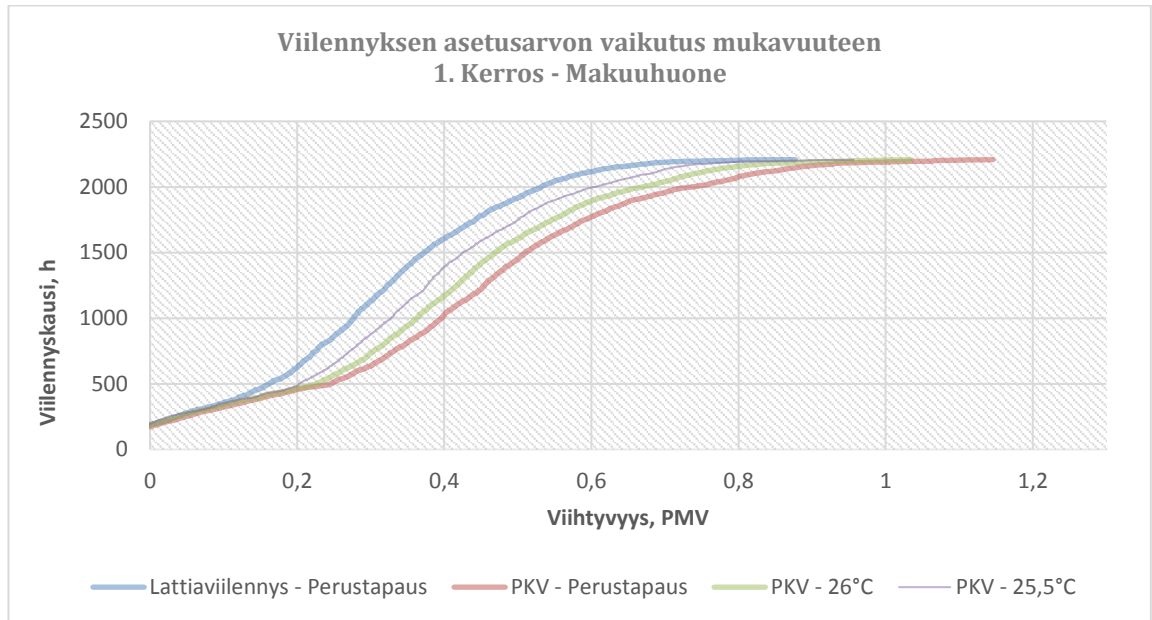
Heti ensimmäisessä kerroksessa nähdään selkeä ero järjestelmien välisessä viihtyvyydessä. Huomattavin ero on kaikkein isointa epämukavuutta kuvaavissa ”PMV >0,7” -osuuksissa, joka on PKV:llä yli 10-kertainen lattiaviilennykseen verrattuna (kuva 15).



Kuva 15. Lämpömukavuus viilennyskaudella 1. kerroksen makuuhuoneessa

Pysyvyykäyrät (kuvio 17) kertovat lattiaviilennyksen olevan selkeästi parempi, kuin PKV. Aikaisemmista taulukoista poiketen lattiaviilennys erkanelee muista käyristä jo ennen 500. tuntia, ja pysyy lopun ajasta selkeästi jopa ”PKV 25,5 °C” -käyrän viihtyisämällä puolella. Perustapauksissa suurimmat epämukavuuden erot ovat selkeät; lattiaviilennyksellä on huonoimmillaan noin 21 % ihmisistä tyytymättömiä lämpöoloihin, kun taas puhallinkonvektorilla tyytymättömyys nousee aina 33 %:iin asti. Tarkastelemalla puhallinkonvektorilla tyytymättömyys nousee aina 33 %:iin asti. Tarkastelemalla puhallinkonvektorilla tyytymättömyys nousee aina 33 %:iin asti.

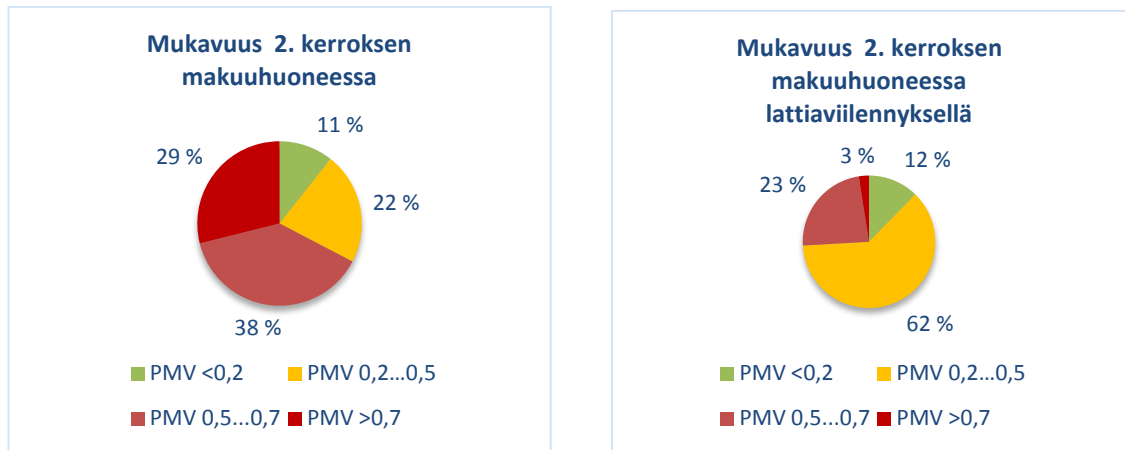
linkonvektorien eri säätöarvojen käyrien sijainteja voidaan arvioida välioiven kautta tulevan viilennyksen saavuttavan lattiviilennyksen aikaansaaman mukavuuden vasta, kun olohuoneen viilennyslaitteen asetusarvo on laskettu noin 24,7 °C:seen.



Kuvio 17. 1. kerroksen lämpöviihtyvyyksien pysyvyyskäyrät makuuhuoneessa viilennyskautena

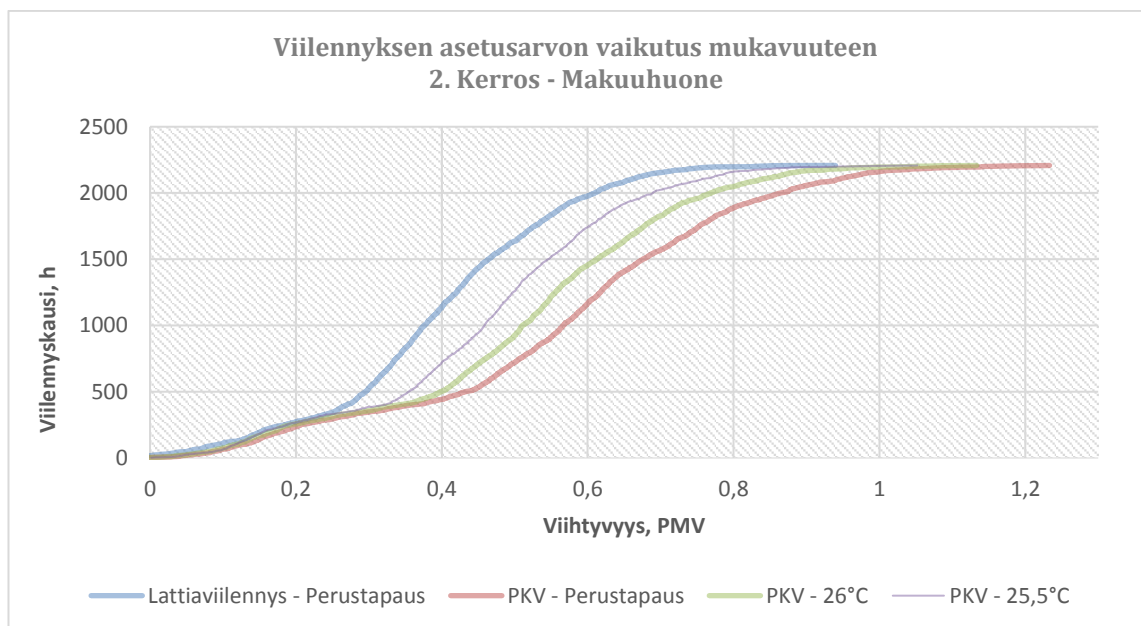
4.2.2.2 2. kerros

Toisessa kerroksessa huomataan korkeamman auringonsäteilyn määrän aiheuttavan selkeän kasvun epämukavuudessa keskitetyllä PKV:llä, kun taas lattiviilennyksellä erot ovat suhteellisesti huomattavasti pienemmät 1. ja 2. kerroksen välillä. Lattiviilennyksen suurimman epämukavuuden alue on jälleen noin kymmenesosa PKV:stä (kuva 16).



Kuva 16. Lämpömukavuus viilennyskaudella 2. kerroksen makuuhuoneessa

Mukavuuden pysyvyyskäyrät ovat samanlaiset 1. kerroksen kanssa, mutta lattiaviilennyksen ero muihin on vielä selkeämpi (kuvio 18).

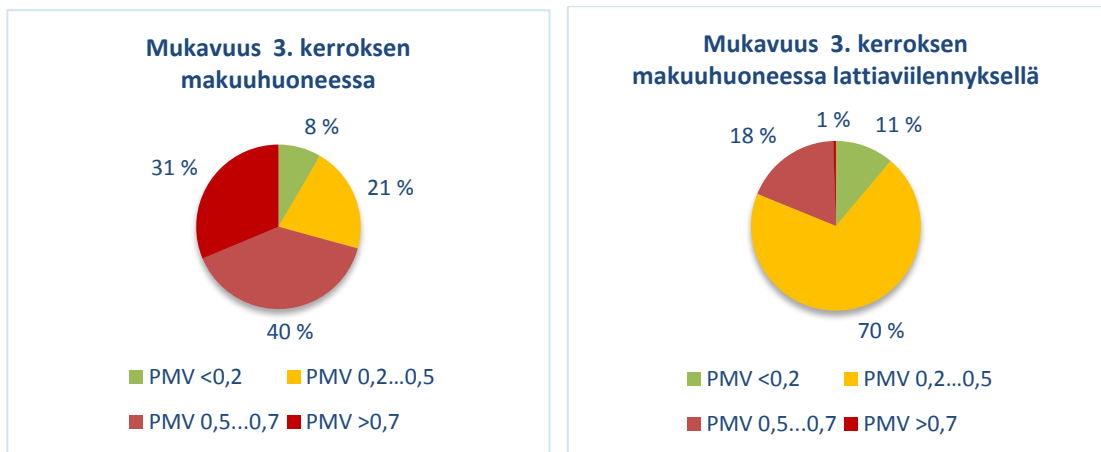


Kuvio 18. 2. kerroksen lämpöviihtyvyyksien pysyvyyskäyrät makuuhuoneessa viilennyskautena

Käyrät erkanevat noin PMV-arvon 0,3 kohdalla, lattiaviilennys hieman ennen muita, ja perustapausten isoimmilla epämukavuuksilla lattiaviilennyksellä noin 24 % ja PKV:llä noin 37 % ihmisistä ei viihdy vallitsevissa lämpöoloissa.

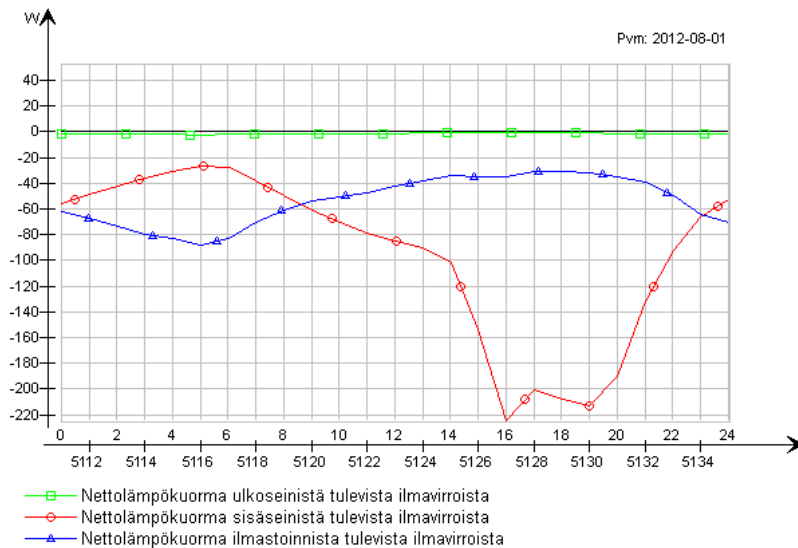
4.2.2.3 3. kerros

Kolmannessa kerroksessa viihtyvyys jopa parani toiseen kerrokseen nähden lattiaviilennyksellä. PKV:llä viihtyvyys taas huononi verrattuna alempaan kerrokseen. Lattiaviilennyksellä 81 % viilennyskaudesta sijoittuu ”PMV <0,5”-alueelle, kun samaan viihtyvyyteen osuu puhallinkonvektorilla vain 29 % ajasta (kuva 16).



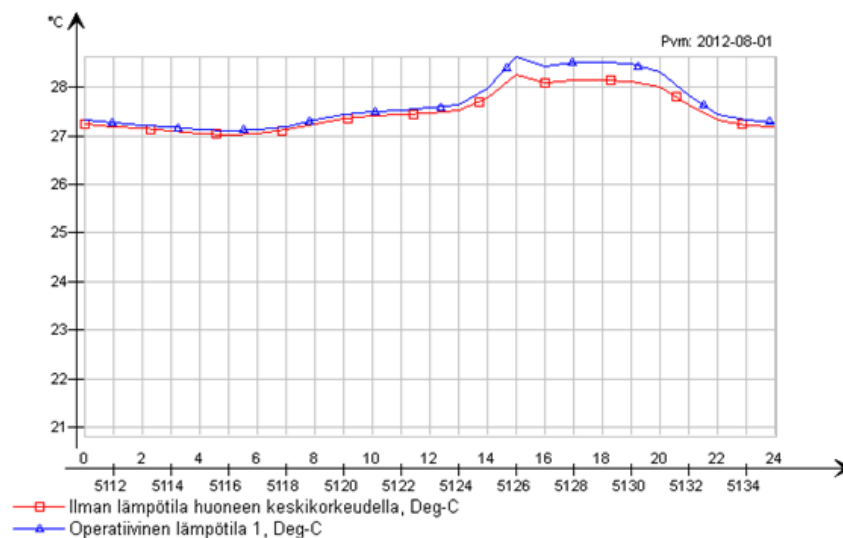
Kuva 16. Lämpömukavuus viilennyskaudella 3. kerroksen makuuhuoneessa

Jos tarkastellaan PKV-huoneiston makuuhuoneeseen tulevaa viilennystehoa oven läpi (kuvio 19), nähdään olohuoneen viilennyslaitteesta saatavan parhaimmillaan noin 220 W viilennystehoa. Viilennysteho koostuu olohuoneen viileämmän ilman virtaamasta välioven läpi ja makuuhuoneen lämpimämmän ilman siirtymisestä olohuoneeseen. Avonaisellakin ovella sisäilman lämpötila tänä aikana pysyttelee yli 27 °C (kuvio 20).

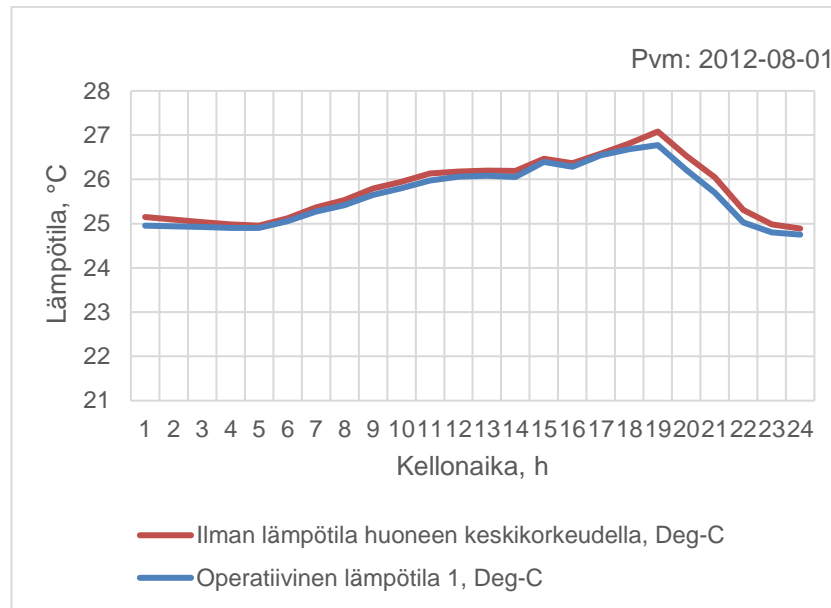


Kuvio 19. Avonaisen oven läpi tuleva viennysteho (punainen viiva, IDA-ICE)

Kuviosta 20 nähdään myös, että avonaisen oven läpi tuoma viennysteho vaikuttaa huominn operatiiviseen lämpötilaan, kuin itse sisäilman lämpötilaan. Operatiivinen lämpötila myös pysyttelee koko päivän sisäilman lämpötilaa korkeammalla, eli ympäröivät pinnat ovat keskimäärin huoneilman lämpötilaa korkeammalla. Lämpötila lähtee pieneen laskuun klo 19:n jälkeen, kun aurinko on siirtynyt pois huonetta lämmittämästä, mutta ei jatka laskuaan illalla. Tästä voidaan päätellä rakenteisiin varautuneen huomattava määrä lämpöä, jota ei nähdä lattaviennyskohteen sisälämpötilassa samalla aikavälillä (kuvio 21).

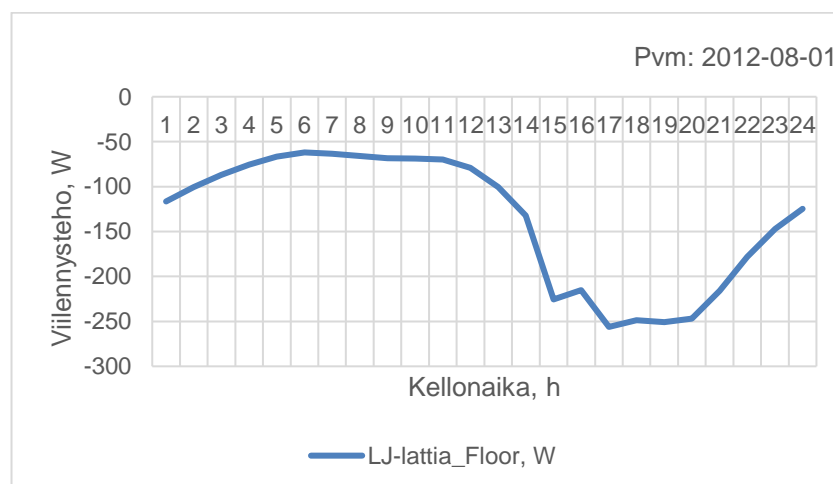


Kuvio 20. Makuuhuoneen sisälämpötila oven ollessa auki (IDA-ICE)



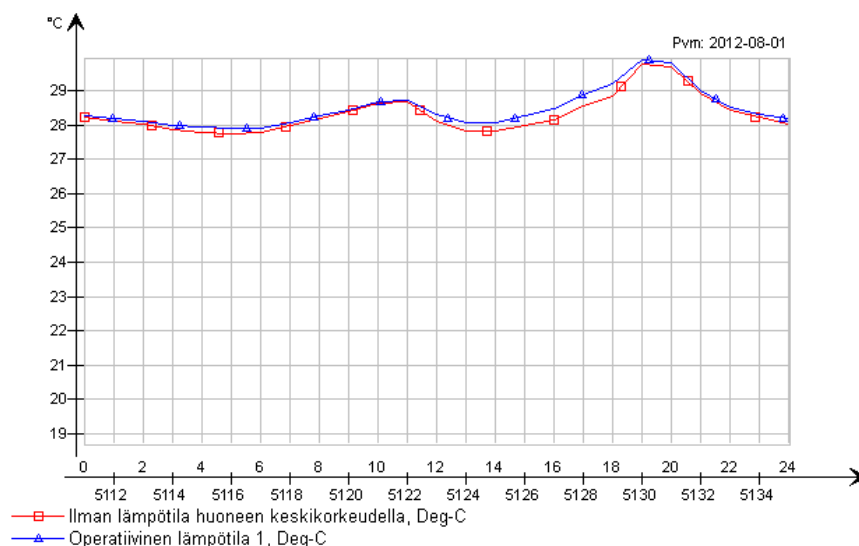
Kuvio 21. Makuuhuoneen sisälämpötila lattiaviilennyksellä

Lattiaviilennyksellä operatiivisen lämpötilan voidaan myös nähdä olevan aina sisäilman lämpötilaa alempana (kuvio 21), toisin kuin puhallinkonvektorilla, jossa tilanne on päinvastainen. Lämpötila myös jatkaa laskuaan alle 25 °C:n, vaikka huoneen säädin on asetettu 26,5 °C:seen. Lattiaviilennys kaappaa ison osan auringosta ikkunan läpi tulevasta lyhytaaltoisesta säteilystä, joka muuten varastoituisi rakenteisiin. Lattia pysyy koko päivän ajan huonelämpötilaa alhaisemmassa lämpötilassa, jolloin viilennystehoa saadaan myös aikana, jolloin huonetilan säädin ei sitä pyydä (kuvio 22). Järjestelmä on kytkenyt viilennyksen päälle vasta noin klo 15:30 ja sulkenut sen noin klo 20:00.



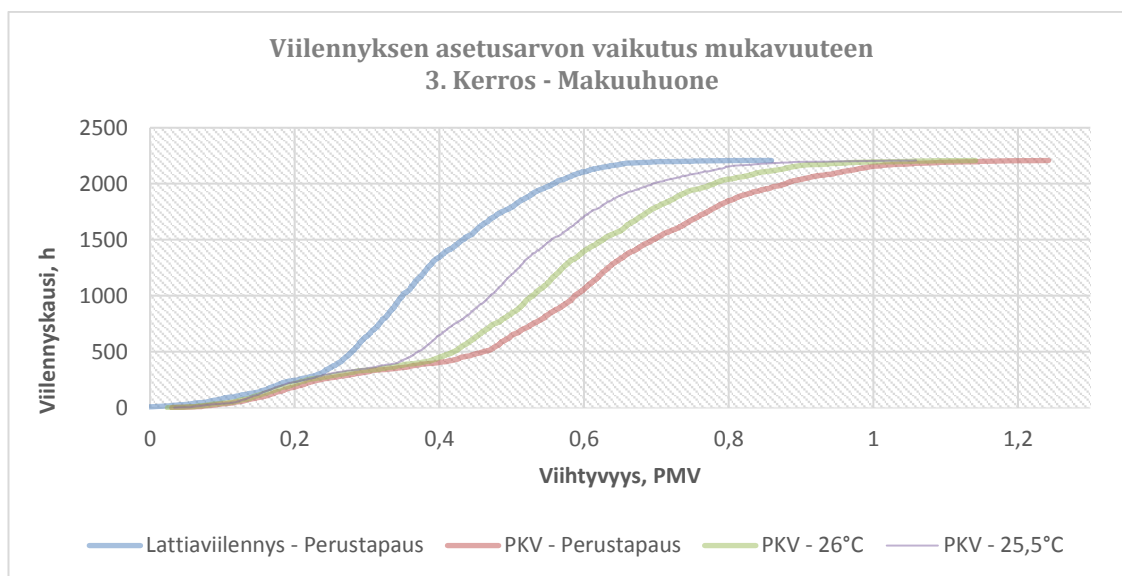
Kuvio 22. Lattiasta tuleva viilennysteho päivän aikana

Väliovien auki pitäminen on edellytys viilennyskauden astetuntivaatimuksen täyttämiseksi simuloinnissa. Käytännössä väliovia ei kuitenkaan aina voida pitää auki kaiken aikaa, jolloin keskitetyn viilennysjärjestelmän olohuoneeseen tuoma viilennysteho ei jakaudu makuuhuoneeseen. Ilmanvaihtojärjestelmästä tulee tällöin hieman viilennystehoa, mutta ilman avonaista väliovea nousee sisälämpötila jopa lähelle 30 °C:ta (kuvio 23).



Kuvio 23. Sisälämpötila oven ollessa kiinni

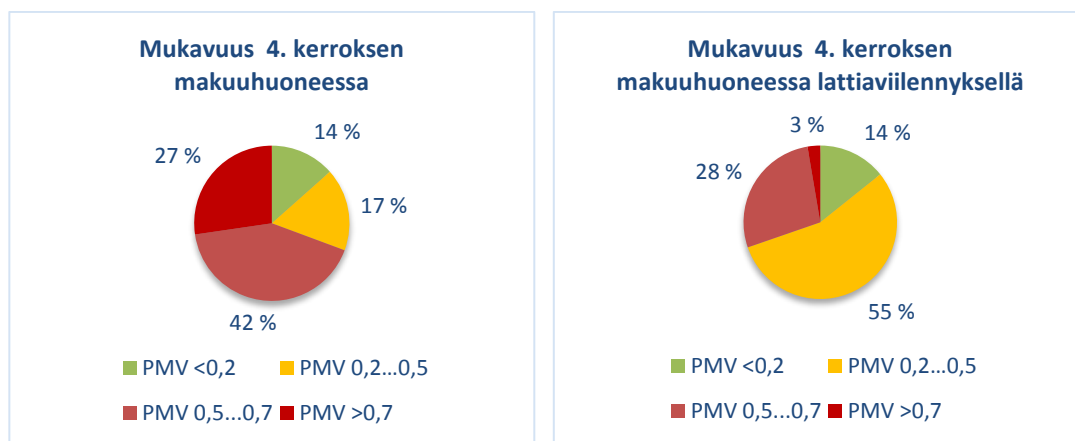
Makuuhuoneen pysyvyyskäyrissä (kuvio 24) nähdään aiempia kuvaajia isompi ero lattiaviilennyksen, ja puhallinkonvektoreiden välillä. Lattiaviilennys on yhtä kaukana asetusarvon 25,5 °C PKV:stä, kuin perustapauksen PKV. Tarkastelemalla taulukoita 29–32 nähdään, että vaikka huoneisiin tuleva viilennysteho on lähes samantasoinen, ei puhallinkonvektorijärjestelmä kykene riittävän tehokkaasi vaikuttamaan makuuhuoneen operatiiviseen lämpötilaan, vaan lämpötila pysyy pitkien lämpimien ajanjaksojen aikana olohuoneen viilennyksen asetusarvon 26,5 °C yläpuolella öisinkin. Ekstrapoloimalla kuvion 24 viihtyvyyskäyrien muutokset asetusarvon muuttuessa, voidaan arvioida 3. kerroksen makuuhuoneen lattiaviilennyksen olevan mukavuudeltaan samantasoinen PKV:n kanssa, jossa olohuoneen säätimen asetusarvo on laskettu 24,5 °C:seen. Tämä kuitenkin vaatii jo huomattavasti enemmän energiaa lattiaviilennykseen verrattuna.



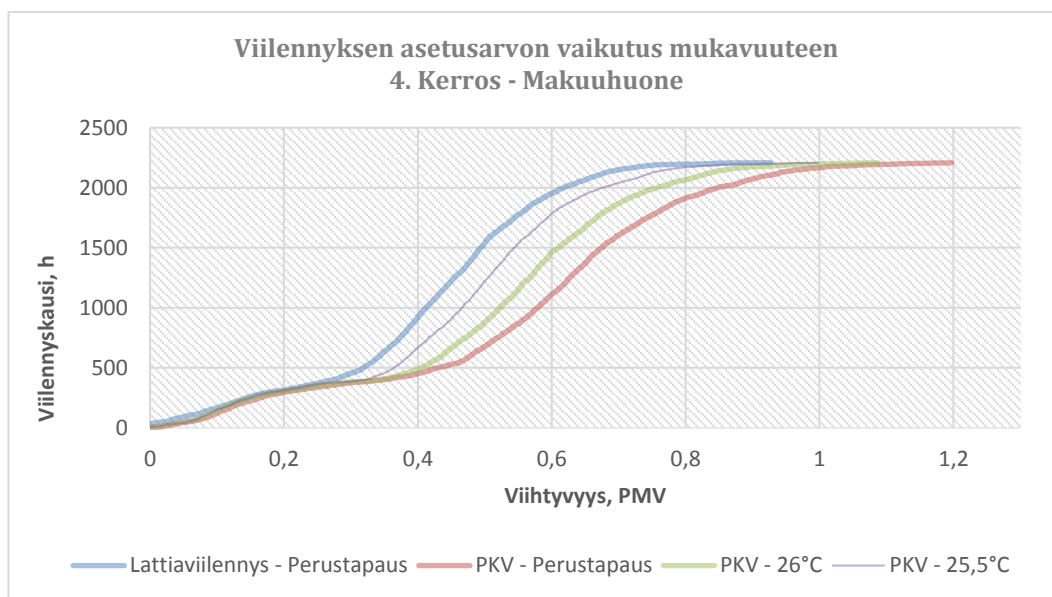
Kuvio 24. 3. kerroksen pysyvyyssäyrät makuuhuoneessa viilennyskautena

4.2.2.4 4. kerros

Neljännessä kerroksessa järjestelmillä on parhaan mukavuuden tunteja yhtä paljon, mutta puhallinkonvektorilla makuuhuoneessa vain noin kolmasosa, 31 %, tunneista on alle PMV-arvon 0,5. Vastaavasti lattiaviilennyksellä vain kolmasosa viilennyskaudesta ylittää kyseisen indeksin 0,5 (kuva 17).



Kuva 17. Lämpömukavuus viilennyskaudella 3. kerroksen makuuhuoneessa



Kuvio 25. 4. kerroksen pysyvyykäyrät makuuhuoneessa viilennyskautena

Pysyvyykäyrissä on alempia kerroksia pienempi ero viihtyvyyden jakautumisessa järjestelmien välillä. Lattiaviilennys on jälleen viihtyisämpi, esimerkiksi kolmannen kerroksen makuuhuoneeseen verrattuna makuuhuone on hieman asetusarvon 25,5 °C PKV:tä parempi (kuvio 25).

4.2.3 Yhteenveto viihtyvyydestä viilennyskaudella

Aiemmassa kappaleessa esiteltyjä kuvia ja kuvioita tarkastelemalla huomataan lattiaviilennyksellä olevan selkeästi parempi keskimääräinen viihtyvyys kuin PKV:llä. Taulukosta 5 nähdään, että lattiaviilennyksellä makuuhuoneiden viihtyvyys on olohuoneita parempi. Vastaavasti puhallinkonvektorilla tulos on päinvastainen. Vaikka PKV-asunnon makuuhuone saakin viilennystä lähes samalla teholla (kuvio 19 ja 22), on makuuhuoneeseen välioven kautta tuleva ilma sekoittunut olohuoneen lämpimämpään ilmaan, eikä näin pysty laskemaan huoneen operatiivista lämpötilaa riittävästi parantaakseen viihtyvyyttä. Tämä ilmiö korostuu sitä enemmän, mitä useamman huoneen asunnosta on kysymys. Koko asunnon keskimääräinen PPD näin ollen nousee sitä korkeammaksi, mitä enemmän asunnossa on huoneita, kun viilennyslähteenä käytetään puhallinkonvektoria. Lattiaviilennykselle ei huonelukumäärän kasvattaminen ole mitenkään heikentävä tekijä.

Taulukko 5. Asuntojen huonekohtaiset keskimääräiset PPD-arvot viilennyskaudelta

Kerros	Huone	Keskimääräinen PPD			
		LV	PKV	PKV 26 °C	PKV 25,5 °C
1	OH	8,04	9,26	8,38	7,56
	MH	7,47	9,74	8,95	8,24
2	OH	9,42	11,49	9,96	8,66
	MH	8,80	12,96	11,45	10,16
3	OH	9,63	11,77	10,14	8,78
	MH	8,26	13,41	11,78	10,39
4	OH	9,92	11,59	10,04	8,71
	MH	9,15	12,86	11,38	10,08

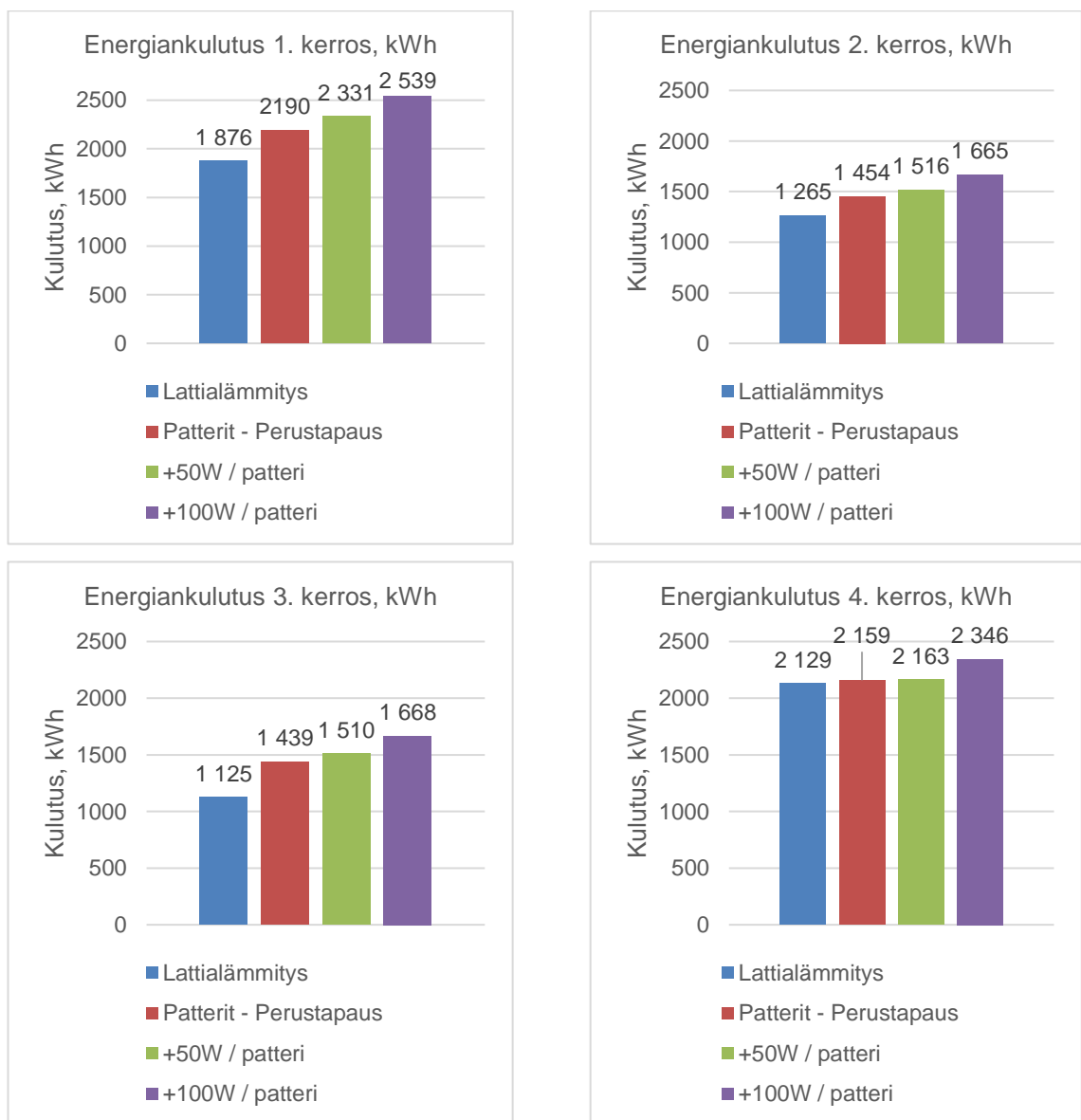
Pysyvyyskäyriä tarkastelemalla huomattiin, että yhden kylmän seinän tiloissa, eli makuuhuoneissa, lattiaviilennyksen viihtyvyyden pysyvyyskäyrän kulmakerroin ja muoto ovat samanlaiset PKV:n kanssa, mutta olohuoneissa käyrä ei muistuta muiden skenaarioiden muotoa, vaan on huomattavasti loivempi pisteen PMV $\sim 0,45$ jälkeen. Hitaamman reagoitavuuden ja pienemmän huonekohtaisen tehon johdosta käyrä laskee aina viilennysmuotoja isomman epämuokavuuden alueelle, mutta keskimääräisesti lattiaviilennys on myös olohuoneissa puhallinkonvektoreita viihtyisämpi.

Kun lasketaan jälkeen viihtyvyyksien konkreettiset erot kaavoilla 3-7, esimerkiksi 4. kerroksen makuuhuoneissa samalla aineenvaihdunnan tasolla, sisä- ja säteilylämpötiloilla 25 °C ja vesihöyryn osapaineella 1 500 Pa, saadaan lattiaviilennyksen vaatetasoksi 0,274 clo ja PKV:lle 0,310 clo. Laskettu erotus, 0,036 clo, vastaa alusvaatekerrastoa. 3. kerroksen makuuhuoneessa esiintyvässä ääriepämuokavuudessa PKV:n vaatetus saa arvon 0,516 clo ja lattiaviilennys 0,374. Erotus, 0,142 clo, vastaa noin kesämekkoa tai pitkähihaista paitapuseroa.

5 Energitehokkuusvertailu

5.1 Lämmityksen energiankulutus

Lämmityksen energiankulutuksia vertailtaessa voidaan todeta järjestelmien käyttäytyvän odotusten mukaisesti. Lattialämmitys käyttää neljättä kerrosta lukuunottamatta huomattavasti vähemmän lämpöenergiaa saman operatiivisen lämpötilan saavuttamiseksi kuin radiaattorilämmitys (kuva 18). Energiankulutusta vertailtaessa on lämmityksen kohdalla otettu huomioon vain tilalämmityksen primäärienergia, sisältäen säätö- ja siirtohäviöt.

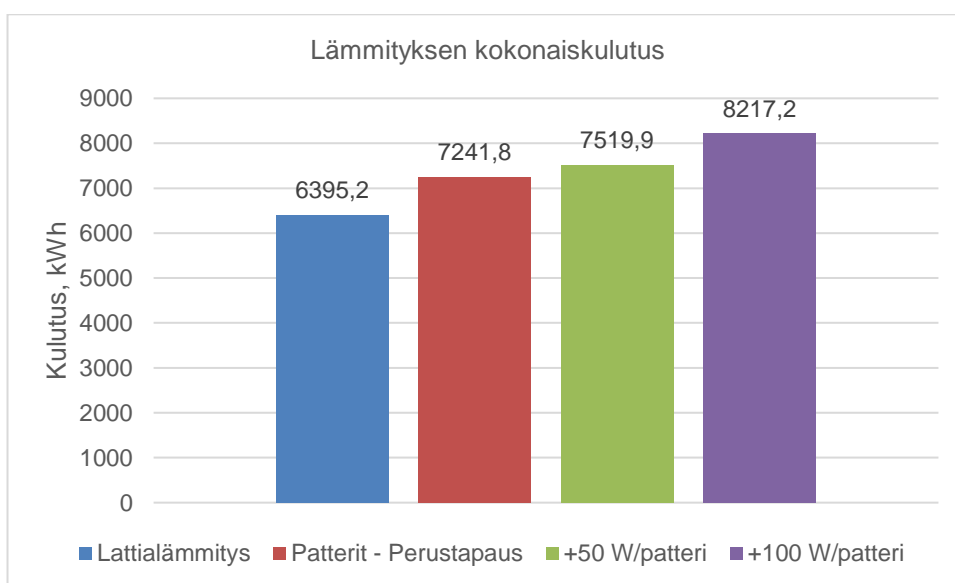


Kuva 18. Järjestelmien lämmitysenergian kulutus tarkastelujaksolla

Ensimmäisessä kerroksessa havaitaan, ettei lattialämmityksen käyttämä energia valu hyvin eristetystä maanvaraisesta lattiasta hukkaan, vaan se toimii ennemminkin esteenä maan viileyden pääsemiselle vaikuttamaan tilan lämpöviihtyvyyteen. Radiaattorilämmitys vastaavasti samalla asennusteholla käyttää lähes 17 % enemmän energiaa saavuttaakseen heikomman lämpöviihtyvyyden.

Toisessa kerroksessa viihtyvyys oli suurimmalla patteritehon lisäyksellä lähes lattialämmityksen tasoinen, mutta tällöin patterilämmitys tarvitsi lähes 32 % enemmän energiaa, kuin lattialämmitys.

Neljännessä kerroksessa nähdään sekä ylimmän kerroksen energiankulutuksen ero muihin kerrokseen, mutta myös ylimmän kerroksen vaikutus itse lattialämmitykseen. Kulutus nousee radiaattorilämmityksen tasolle, kun yläkerran lattialämmityksen aiheuttama lämpimämpi katto ei ole tasoittamassa tilan säteilylämmön epätasapainoa. Kylmempi katto on myös aiheuttanut isomman tarpeen lämmitykselle operatiivisessa lämpötilasäädössä, jolloin lattiaa lämmitetään lisää, mikä lisää epätasapainoa pintojen lämpötiloissa.



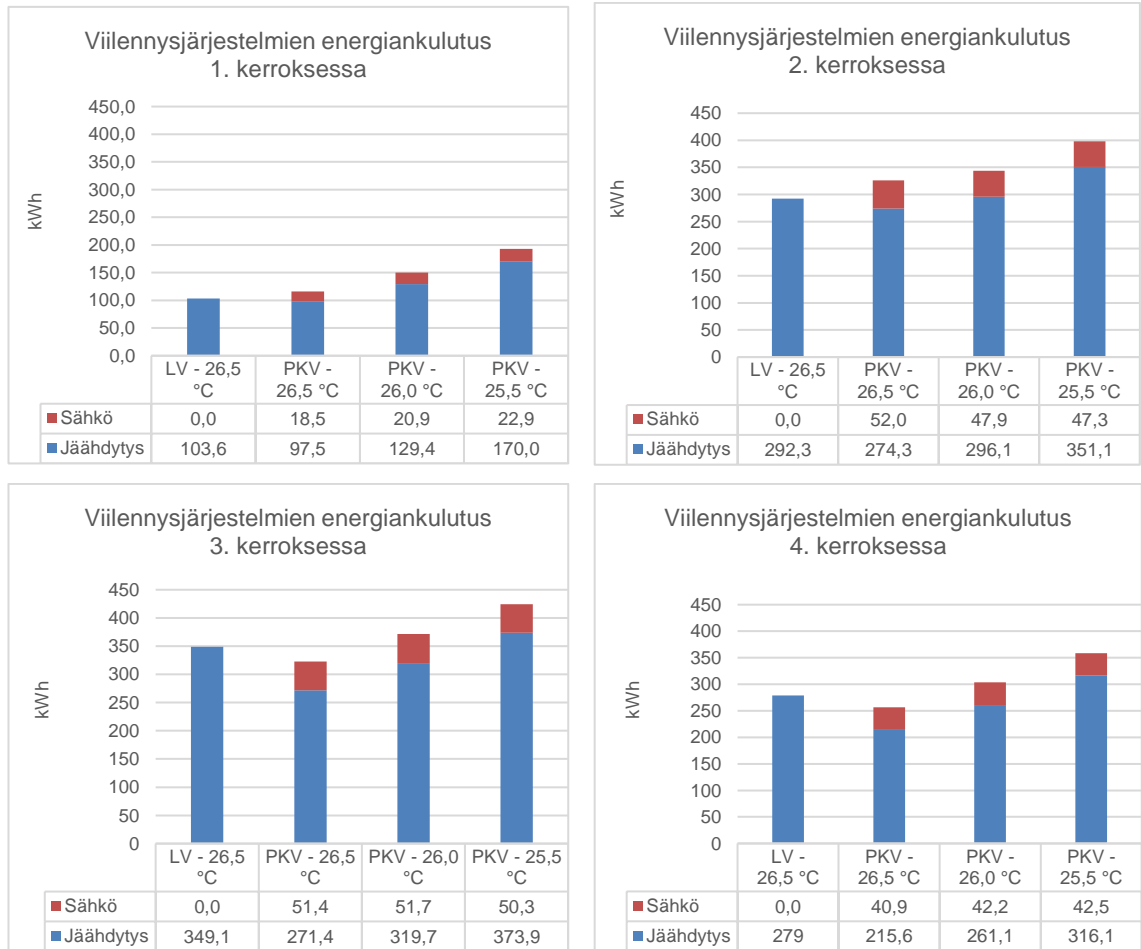
Kuva 19. Lämmitysjärjestelmien kokonaiskulutus

Perustason patterilämmitys käytti noin 13 % enemmän energiaa lämmityskaudella (kuva 19). On huomionarvoista, että lattialämmitys käytti yhteensä 6 395 kWh saavuttaakseen paremman viihtyvyyden kuin isoimman tehonlisäyksen patterilämmitys, joka käytti yhteensä 8 217 kWh, eli noin 1,8 MWh enemmän energiaa neljää asuntoa kohti. Koska neljännen kerroksen erot ovat muita pienemmät, kasvaa suhteellinen ero järjestelmien välillä sitä isommaksi, mitä useampikerroksinen rakennus on kyseessä.

5.2 Viilennyksen energiankulutus

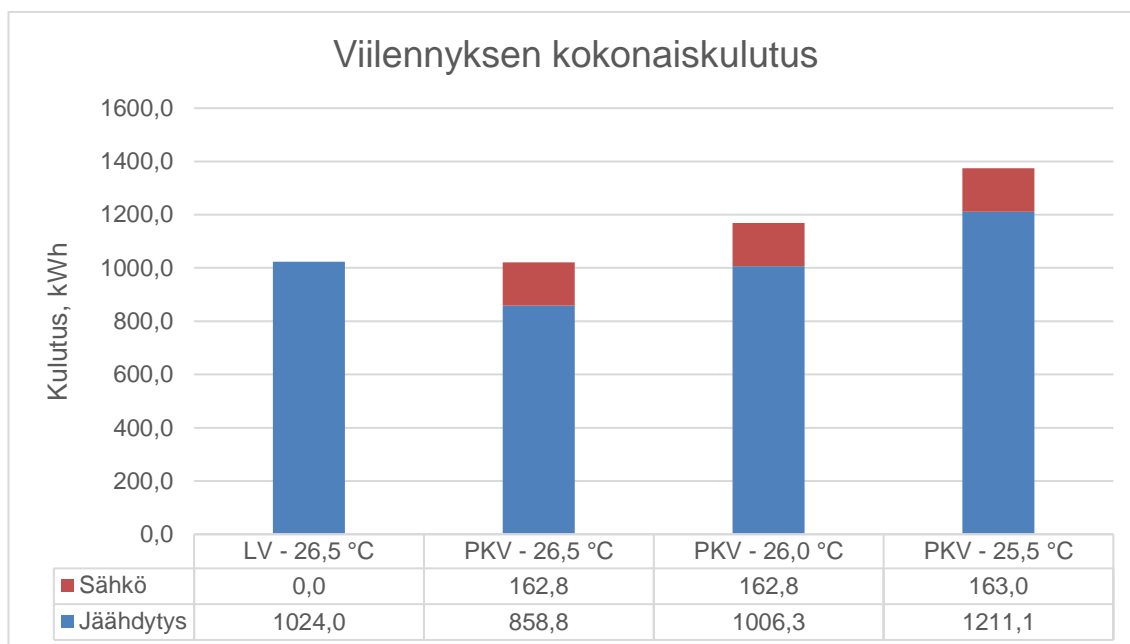
Viilennysenergian kulutuksessa havaittiin lattiaviilennyksen käyttävän enemmän energiaa, kuin puhallinkonvektori, mutta kun otetaan huomioon puhallinkonvektorin puhaltimen lisäämä sähkönkulutus, huomataan todellinen ero energiankulutuksissa järjestelmien välillä (kuva 20).

Pumppujen energiankulutus oletettiin viilennyskaudella samaksi, eikä sitä ole otettu huomioon kulutuksissa. Sähköenergian kulutus arvioitiin IDA-ICE-tulosten kuukausittaisen puhallinsähkön kulutustiedoista. Tulostiedoissa eritelty kuukausittainen puhallinsähkön käyttö sisältää mukanaan myös ilmanvaihtokoneen puhallinsähkön koko rakennuksen osalta. Konvektoriskenaarioiden viilennettyjen kuukausien kulutuksesta poistettiin viilentämättömien kuukausien keskimääräinen puhallinsähkömäärä ja jäljelle jäänyt osuus jaettiin puhallinkonvektoreiden viilennysenergiankulutuksien suhteellisten osuuksien perusteella.



Kuva 20. Järjestelmien energiankulutus viilennyskaudella

Lattiaviilennyksen korkeampi viilennysenergiankulutus aiheutuu pääasiassa auringonsäteilyn lämpökuormasta, jonka lattiaan osuvan lyhytaaltoisen osuuden lattialämmitys kaappaa tehokkaasti ennen kuin lämpö jakautuu huonetilaan. Lattiaviilennyksen tehoa rajoittaa lähinnä kastepistelämpötila, jolloin rakenteiden tai lattian pinnan lämpötilaa ei voida laskea alle vallitsevan kastepistelämpötilan, mutta auringosta suoraan tulevan säteilyn kaappaamisesta johtuva tehonlisäys ei ole kastepisteen rajoittama, vaan tulee muun viilennystehon päälle. Ensimmäisessä kerroksessa auringon sisään päässyt säteily on muita kerroksia pienempää, jolloin erot viilennysenergian kulutuksissakin ovat selkeästi pienemmät.



Kuva 21. Viilennysjärjestelmien energiankulutus

Lattiaviilennys käytti yhteensä 1 024 kWh viilennysenergiaa kauden aikana (kuva 21). Perustapauksen puhallinkonvektori käytti 859 kWh viilennysenergiaa ja 163 kWh sähköä. Näinollen lattiaviilennys kuluttaa saman verran energiaa kuin PKV kokonaisuutena, mutta saavuttaa huomattavasti paremman keskimääräisen lämpöviihtyvyyden. Päästäkseen lähelle lattiaviilennyksen keskimääräistä viihtyvyyttä piti PKV:n käyttää noin 18,2 % enemmän viilennysenergiaa, eli noin 187 kWh, sekä lähes saman verran sähköä puhalltimille.

Alhaisimman asetusarvon PKV saavutti lähes saman keskimääräisen viihtyvyyden, mutta samaan aikaan PKV käytti keskimäärin 47 kWh viilennysenergiaa ja 41 kWh sähköä enemmän asuntoa kohti kuin lattiaviilennys.

6 Kustannusvertailu

6.1 Rakentamiskustannukset

Järjestelmien rakentamiskustannukset arvioitiin Haahtelan Talonrakennuksen kustannustiedon vuoden 2014 painoksen [8] avulla (taulukko 6). Laskenta tehtiin vain 3D-mallinnuksessa olevia bruttoneliömetrejä käyttämällä, mutta arvioimalla hintatasot isommille kohteille. Laskentaan otettiin ainoastaan järjestelmine talotekniset erot. Mallinnuksen bruttopinta-ala oli 245 m², joista märkätiloja oli 44 m².

Taulukko 6. Järjestelmien välisten rakennuskustannusten ero ja niiden muodostuminen [8]

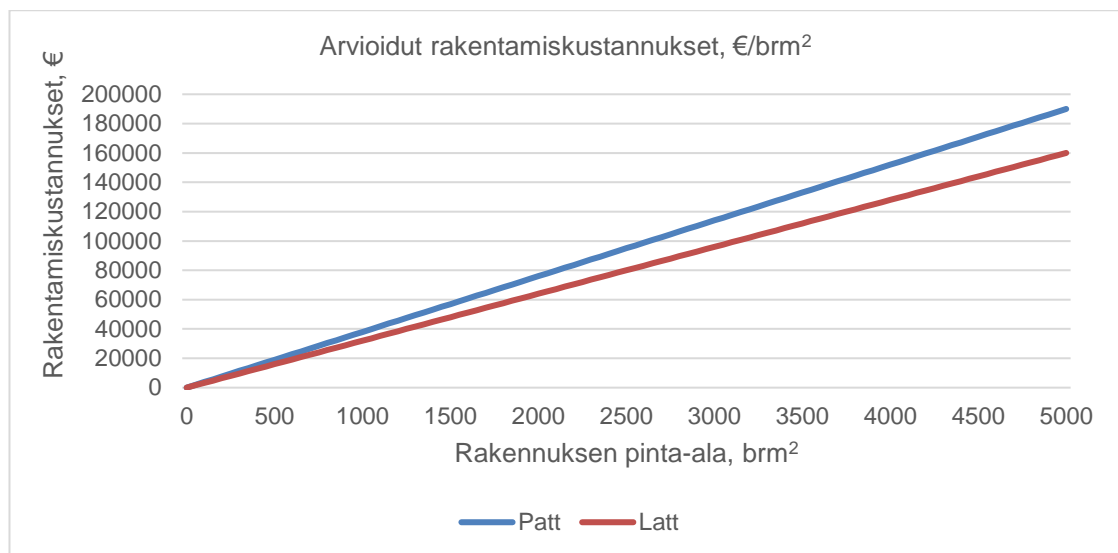
	Pääkaupunkiseutu	Hintataso 84		Haahtela 2014	
		Yksikkö	Määrä	€/yksikkö	€
211	Radiaattorit ja PKV				
2113	Lämpöjohdot	brm2	201	10	2007
2114	Radiaattorit	brm2	201	7	1345
2122	Kylpyhuoneen mukavuuslattialämmitys	m2	44	30	1322
2123	Tilakohtainen kylmän siirtoputkisto	brm2	201	9,6	1927
2124	Puhallinkonvektorit	kpl	4	700	2800
	Kokonaishinta-arvio yhteensä				9401 € 38 €/brm2
211	LL ja LV				
2113	Lattialämmitys ja viilennys, Betonilattia	m2	245	30	7344
2113	Kylpyhuoneiden mukavuuslattialämmityksen lämpöjohdot	m2	44	10	441
	Kokonaishinta-arvio yhteensä				7785 € 32 €/brm2

Talonrakennuksen kustannustieto ei kata kaikkia rakennuksen järjestelmiä, esimerkiksi lattiaviilennystä ei kirjassa mainita erikseen, eikä huoneistokohtaiselle PKV:lle löytynyt yksiselitteistä laskentatapaa. PKV-asunnoille on laskettu myös vesikiertoinen lattialämmitys kylpyhuoneisiin, että huoneistojen varustelutaso ja energiankulutus pysyvät vertailukelpoisina. Korvaamalla vesikiertoinen mukavuuslattialämmitys sähköisellä voidaan laskea rakentamiskustannuksia, mutta tällöin tämän vertailun kulutustiedot eivät enää päde. Kylpyhuoneet oletettiin varustelultaan saman tasoisiksi ja kuluttavan saman verran energiaa.

Jos kustannuksista otetaan pois kaikki viilennyksen tarvittavat osat, laskevat lattialämmityksen rakentamiskustannukset 30 €/oon/m², kun taas radiaattorilämmitys on vain 19 €/m². Täten lattialämmitys on noin 58 % kalliimpi investointi kuin radiaattorit.

Lattialämmitys ja -viilennys tapahtuvat kuitenkin samoilla putkilla, mutta märkätilojen lattialämmitys vaatii oman erillisen syöttöputkistonsa. Suunnittelukustannukset laskevat myös hieman valitessa lattialämmitys ja -viilennys, koska lattialämmitystoimittajat suunnittelevat järjestelmän ilman lisäkustannuksia, kun järjestelmälle on tullut tilaus. Lattialämmitys- ja viilennysjärjestelmä tulee näin laskettuna 6 €/brm², eli noin 16 % halvemmaksi rakentaa kuin radiaattorilämmitys ja PKV.

Kuviossa 26 on havainnollistettu kyseisen hinta-eron vaikutus järjestelmän kustannusten eroihin eri rakennuksen pinta-aloilla. Näin laskettuna noin 5 000 brm²:n rakennuksen varustaminen lattialämmityksellä ja -viilennyksellä on noin 30 000 € edullisempi investointi, kuin jos rakennukseen olisi hankittu lämmityspatterit ja puhallinkonvektorit.



Kuvio 26. Rakentamiskustannusten kehittyminen eri pinta-aloilla

Eräessä toisessa kustannuslaskelmassa, jossa verrattiin ATT:n toteuttaman, 7 500 m²:n radiaattorilämmitteisen kerrostalon lämmitysjärjestelmän ja välipohjan kustannuksia lattialämmitteiseen järjestelmään ja erilaiseen välipohjaan. Kyseisen laskelman pohjana on käytetty ATT:n, kohteen rakentajan, Uponorin ja Areiten kustannustietoja. Kun laskelma toteutetaan ilman välipohjarakenteita, oli lattialämmitys ja runkoputket asennettuina oli noin 453 000 € ja radiaattorilämmitys runkoputkineen asennettuna noin 289 000 € [9]. Tällöin lattialämmitys oli 56 % kalliimpi, eli lähes sama, kuin Haahtelalla laskettuna. Kun otetaan huomioon myös erot välipohjarakenteissa, saatiin kokonaiskustannuksiksi radiaattorilämmitykselle noin 2,21 M€ ja lattialämmitykselle 2,25 M€. Eroa tällöin on enää noin 6 €/m², eli noin 2 %. Kun näihin hintoihin lisättäisiin viilennysjärjestelmien kustannukset, nousisi lattialämmitys ja -viilennys huomattavasti edullisemmaksi vaihtoehdoksi.

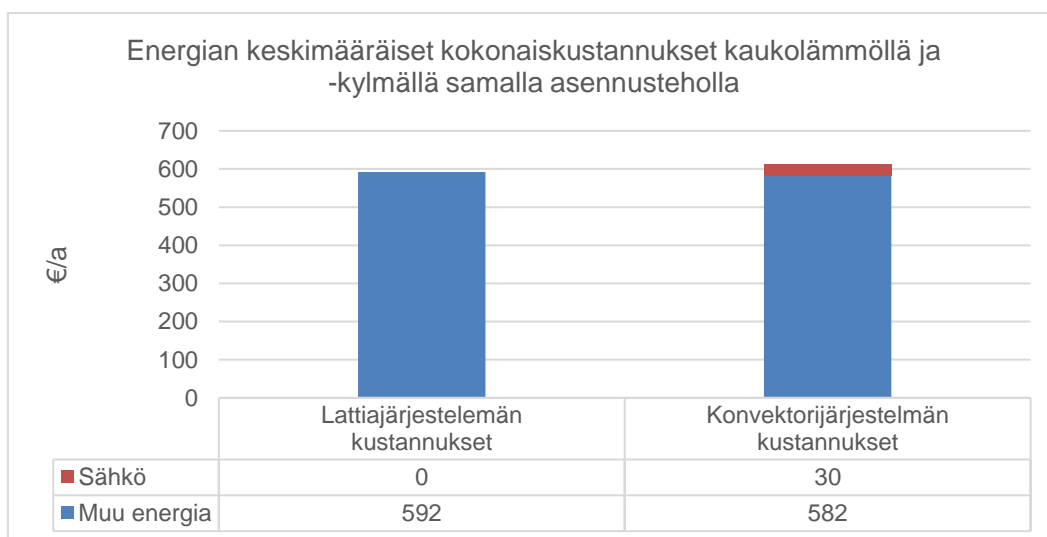
6.2 Energian kustannukset

Energiankulutustietoja paremmin järjestelmien eroja kuvaavat erot käytetyn energian kustannuksissa. IDA-ICE:n simulointiraporteista poimittiin lämmityksen ja jäähdytyksen energiankulutuksen lisäksi myös LVI-sähkönkulutus. Energiankulutus laskettiin keskiarvona kaikkiin neljään eri ilmansuuntaan osoittavien asuntojen kulutustiedoista, ja erikseen maalämmölle ja kaukolämmölle. Näin määritettyjä keskimääräisiä energian kustannuksia käytetään myöhemmin laskettaessa järjestelmien kustannustehokkuutta ja elinkaarikustannuksia.

Laskelmat tehtiin energianhinnoilla:	Sähkö:	183 €/MWh
	Kaukolämpö:	61 €/MWh
	Kaukokylmä:	18 €/MWh

6.2.1 Kaukolämpö ja -kylmä

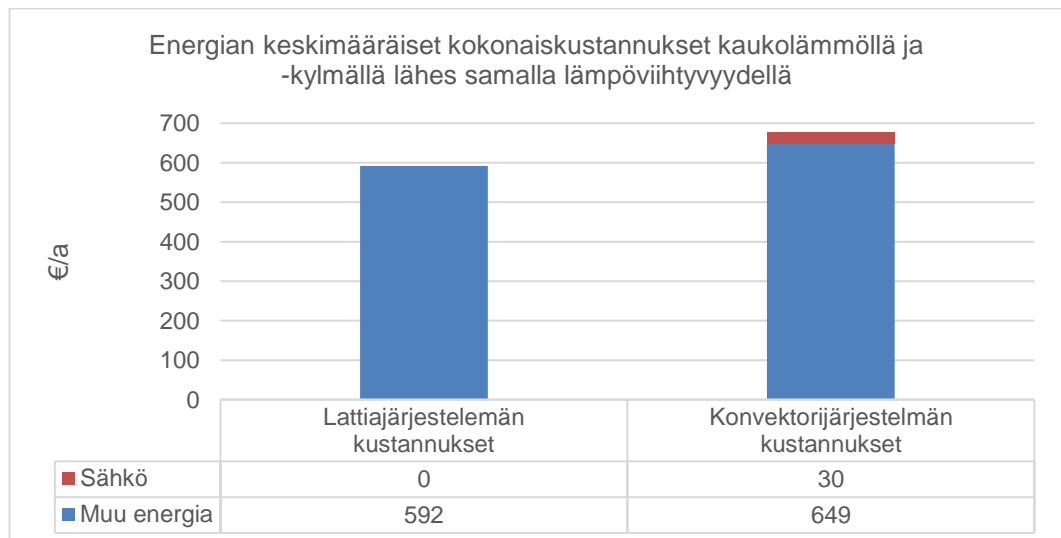
Kaukolämpöön ja –kylmään kytketyllä rakennuksella ei ole samalla asennusteholla merkittävää eroa kokonaisenergian kustannuksissa lattijärjestelmän ja konvektorijärjestelmän välillä. Kun kesäkauden puhallinsähkön osuus otetaan huomioon, nousevat konvektorijärjestelmän energian kustannukset vain 20 €/a kalliimmaksi (kuva 22).



Kuva 22. Kaukolämpöön ja -kylmään kytketyn rakennuksen keskimääräiset energiankustannukset vuodessa.

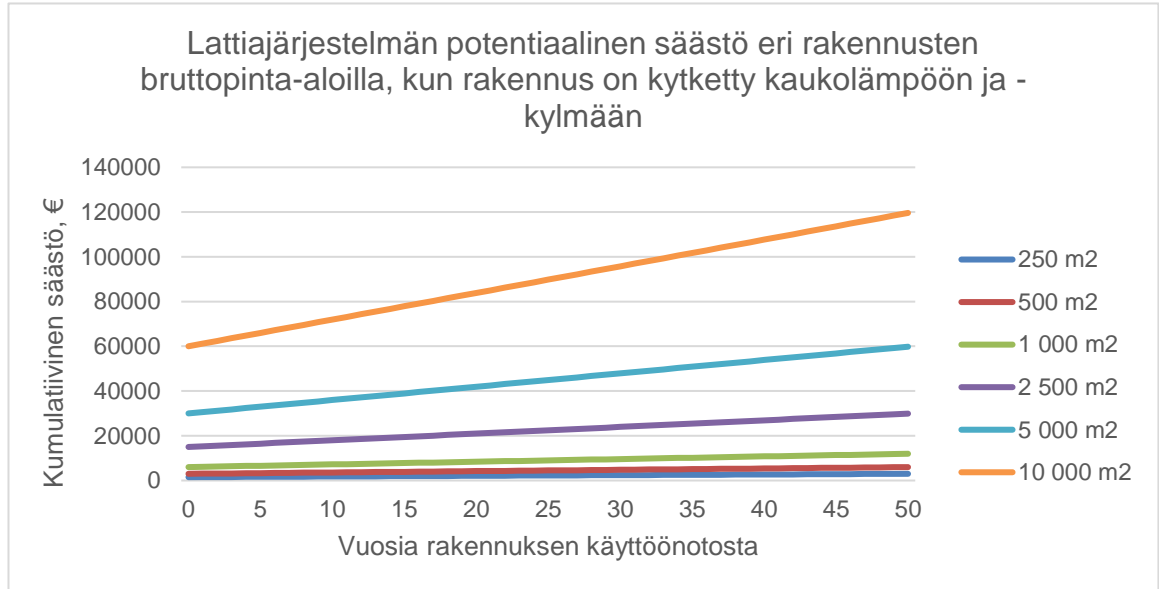
Jos lasketaan vain olo- ja makuuhuoneen pinta-aloja käyttämällä, saadaan lattialämmitys ja -viilennysjärjestelmän vuosittaiseksi energiakustannukseksi noin 3,52 €/m²/a ja radiaattori-puhallinkonvektori-järjestelmälle noin 3,64 €/m²/a, kun rakennus on kytketty kaukolämpöön ja -kylmään. Lattiajärjestelmä vuosittaiset energiankustannukset tulevat näin laskettuna noin 3,3 % halvemmaksi, kuin konvektorijärjestelmän, mutta viihtyvyys lattijärjestelmällä on huomattavasti parempi.

Jos verrataan lattialämmityksen ja -viilennyksen kanssa lähes samaan viihtyvyyteen päässeeseen, isoimman patteritehon ja pienimmän viilennyksen asetusarvon skenaarion kustannuksia (kuva 23), huomataan, että konvektorijärjestelmän kustannukset ovat lähes 15 % korkeammat, kuin lattijärjestelmällä, saavuttamatta kuitenkaan yhtä hyvää lämpöviihtyvyyttä. Konvektorijärjestelmän energian hankintakustannukset olivat näin ollen noin 4,04 €/m²/a lähes samalla viihtyvyydellä.



Kuva 23. Lähes saman viihtyvyyden omaavien järjestelmien erot vuosittaisissa kustannuksissa

Konvektorijärjestelmä on siis noin 6 €/brm²/a kalliimpi rakentaa ja käyttää samalla asennusteholla noin 0,08 €/brm²/a enemmän energiaa, kuin lattijärjestelmä. Näitä arvoja käyttämällä voidaan arvioida lattijärjestelmän aikaansaama säästö eri rakennusten pinta-aloilla esimerkiksi 50 vuoden ajanjaksolle (kuvio 27).

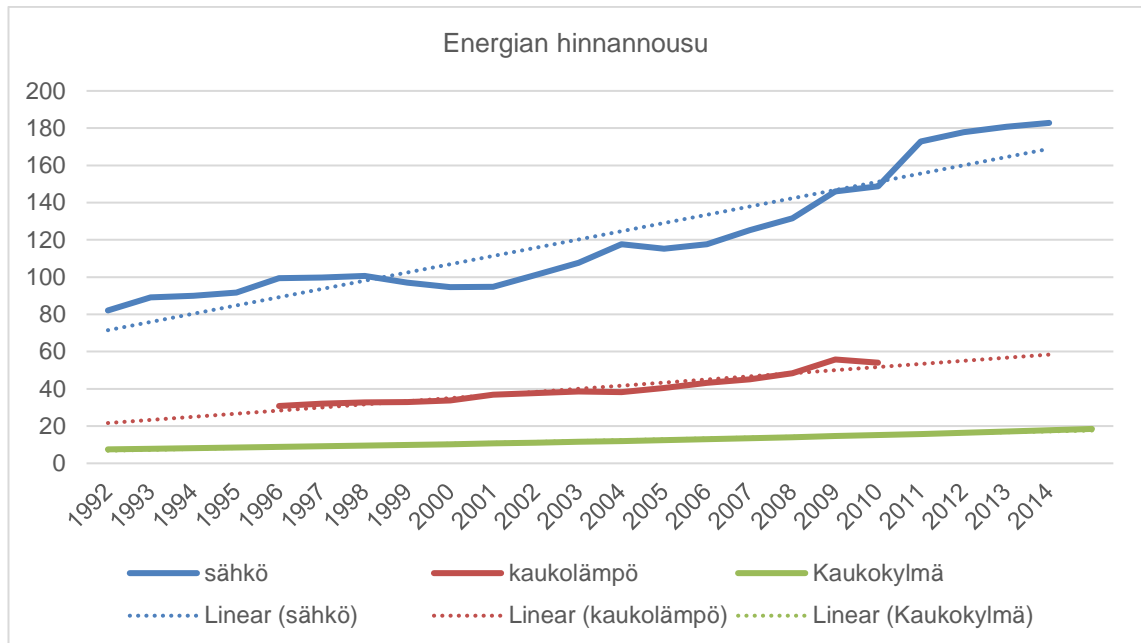


Kuvio 27. Lattijärjestelmän rakentamis- ja energiakustannusten säästö

Kuviosta 27 nähdään, että 10 000 m²:n rakennuksen varustaminen konvektori-järjestelmällä tulisi noin 60 000 € kalliimmaksi investoinniksi, ja 50 vuoden aikana tarvitsisi noin 60 000 €:n edestä enemmän energiaa huonomman lämpöviihtyvyyden aikaansaamiseksi. Erot kasvavat vain suuremmiksi, jos vertaillaan saman viihtyvyyden järjestelmiä, koska tällöin saatetaan joutua hankkimaan esimerkiksi isompia radiaattoreita/konvektoreita tehotarpeen saavuttamiseksi, mutta ennen kaikkea energian hankintakustannusten erotus kasvaa. Samalla asennusteholla erotusta oli 12 snt/m²/a, kun samalla viihtyvyydellä ero kasvoi yli nelinkertaiseksi, 52 snt/m²/a. Tällöin aiemmin mainitun 10 000 m²:n rakennuksen 50 vuoden aikainen säästö energiakustannuksissa on jo lähes 260 000 €, kun energian hinnanvaihteluita ei oteta huomioon.

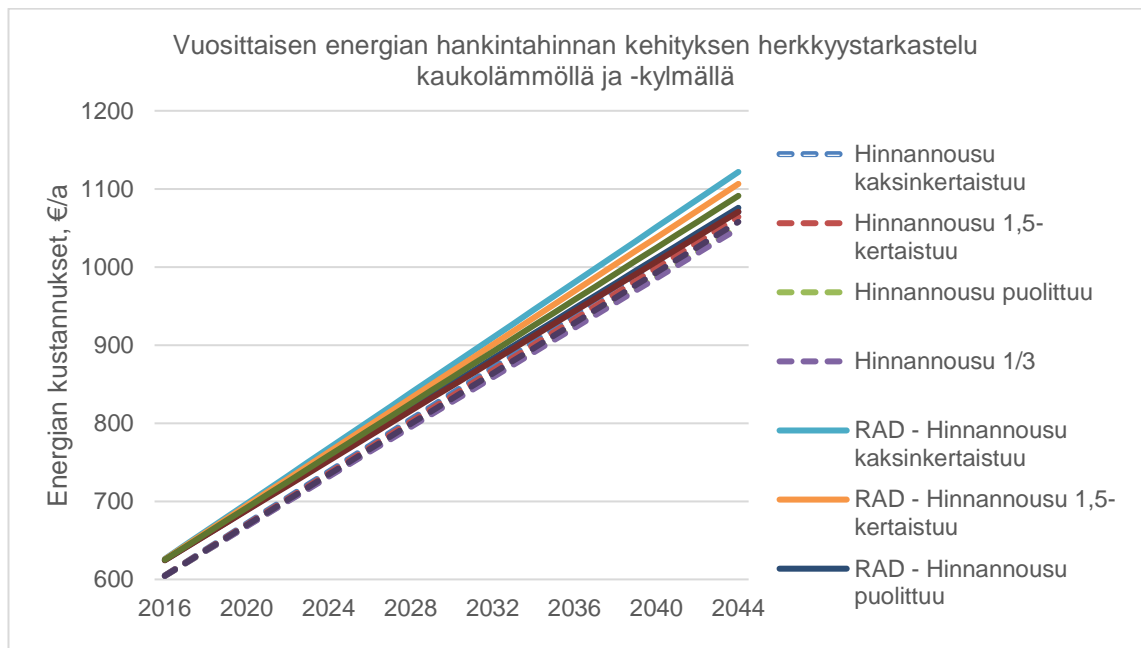
6.2.1.1 Kaukolämmön ja -kylmän herkkyytarkastelu

Energian hinta nousee jatkuvasti ja eri energiamuodot kallistuvat eri tahdilla. Tilastokeskuksen aiempien vuosien energian hintoja taulukoimalla voidaan laskea keskimääräinen hinnannousuprosentti. Näin laskettuna sähkön kallistuminen on noin 3,8 % vuodessa ja kaukolämpö 4,2 % vuodessa (kuvio 28). Kaukokylmälle ei vielä ole saatavilla samankaltaisia tilastoituja tietoja, joten kaukokylmän hinnanmuutos oletettiin sähkön ja kaukolämmön muutosten keskiarvoksi, 4 % vuodessa.



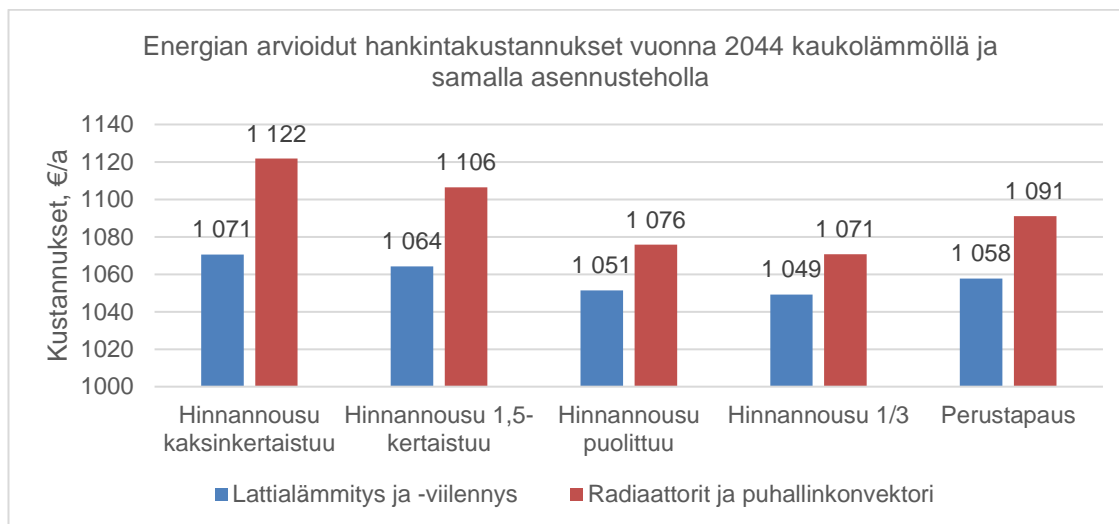
Kuvio 28. Eri energioiden hintakehitys vuosina 1992 – 2014 [5]

Energian hinnannousu ei ole lineaarista, vaan kasvu saattaa tulevaisuudessa kiihtyä, tai hidastua. Täten on aiheellista tarkastella tulevia vuotuisia energian hankintakustannuksia eri hinnannousuprosenteilla. Kuviossa 29 on havainnollistettu tulevien vuosittaisten kustannusten kehitys, kun energian hinnannousu on kaksinkertaistunut, 1,5-kertaistunut, puolittunut sekä laskenut kolmasosaan alkuperäisistä.



Kuvio 29. Energian hankintahinnan kehitys eri nousuprosenteilla

Kuviosta 27 nähdään, että järjestelmillä ei ole kovin suurta eroa kustannuksissa. Tarkastelemalla kuitenkin tarkemmin havaitaan, että 30 vuoden tarkastelujakson lopussa lattijärjestelmän kustannukset kaksinkertaistuneella energian hinnannousulla ovat samantasoiset, kuin radiaattori- ja konvektorijärjestelmällä kolmasosan hinnannousulla (kuva 24). Tällöin voidaan päätellä lattijärjestelmän olevan käyttökustannuksiltaan riskittämpi vaihtoehto lämmitys- ja viilennysjärjestelmäksi.

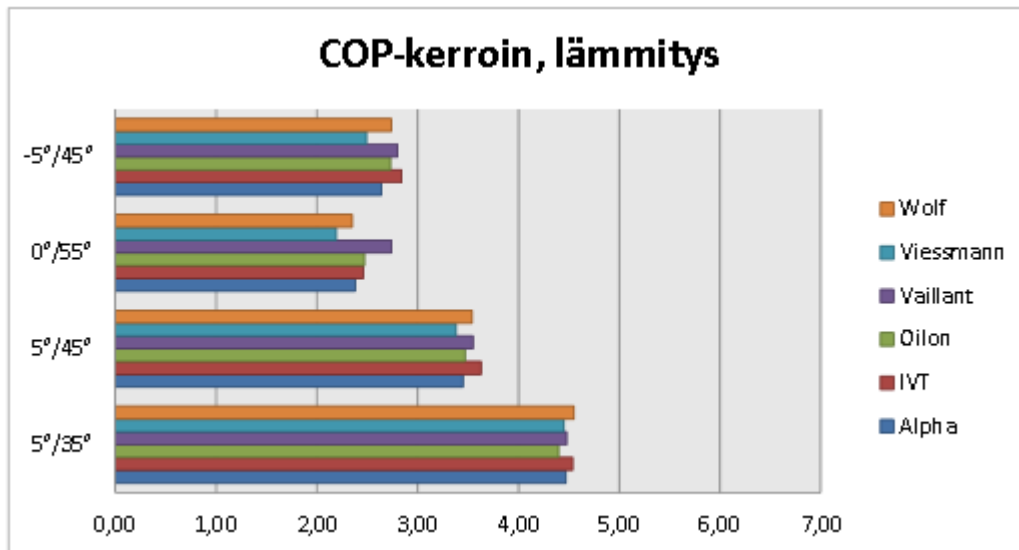


Kuva 24. Energian vuosittaiset hankintakustannukset herkkyystarkastelun lopussa

Kuvion 28 perusteella voidaan päätellä lattijärjestelmän olevan käyttökustannuksiltaan riskittämpi vaihtoehto lämmitys- ja viilennysjärjestelmäksi. Taulukon tiedot on laskettu saman asennustehon kulutustietoja käyttämällä, jolloin ero kasvaa vain suuremmaksi lattijärjestelmän hyväksi tavoiteltaessa saman lämpöviihtyvyyden tasoa.

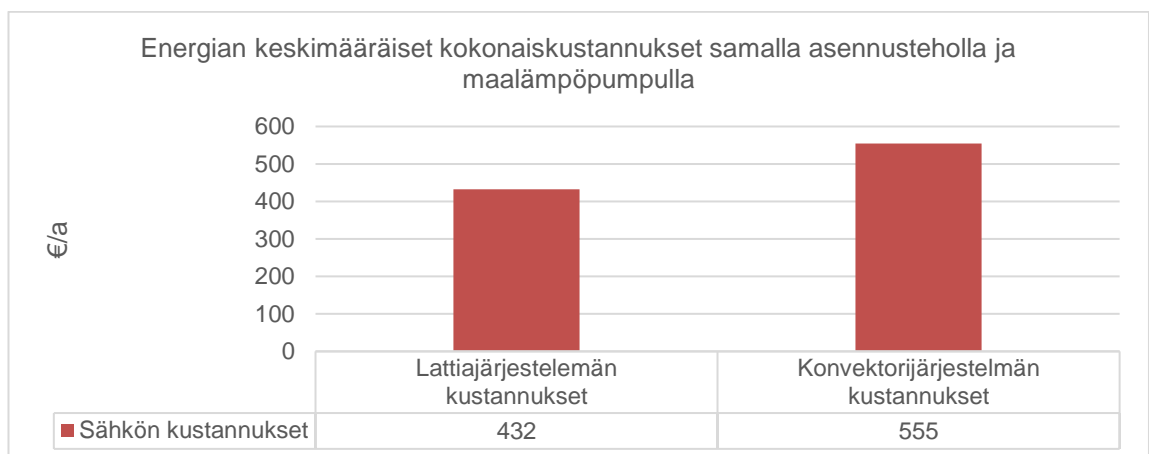
6.2.2 Maalämpö

Mikäli rakennukseen valitaan maalämpöpumppu, muuttuvat energian hankintakustannukset oleellisesti, koska maalämpöpumpun käyttämä sähköenergia on riippuvainen toisiopiirin menoveden lämpötilasta. Alhaisemman lämpötilan menovettä on lämpöpumpulla kannattavampaa tuottaa kuin korkeamman. Tämä nostaa maalämpöpumpulla lattialämmitykselle tuotettavan energian COP-kertoimen 4,5:een, kun radiaattorilämmityksessä lämpöä tuotetaan keskimäärin 3,5:n kertoimella (taulukko 52). Viilennysenergia tuotettiin samoilla kertoimilla.



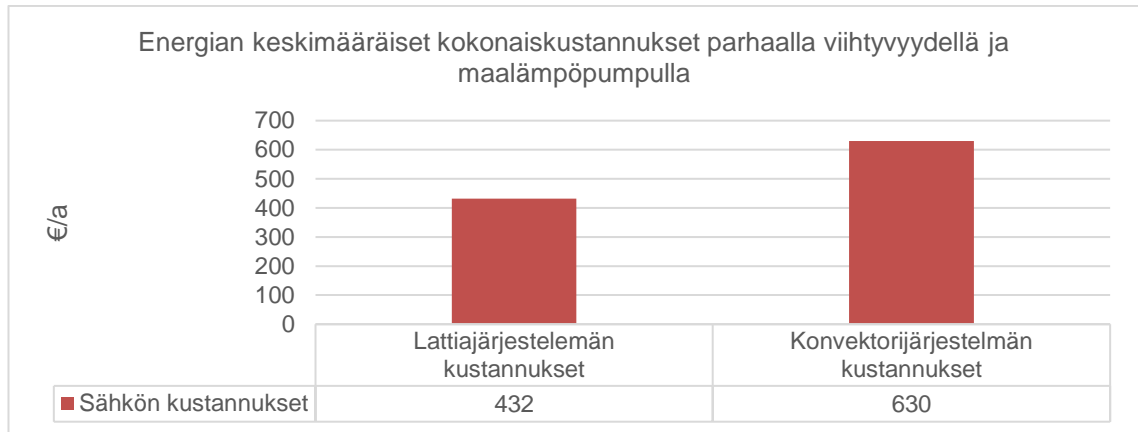
Kuva 25. Tekniikan Maailman numerossa 18E/2012 testatut valmistajakohtaiset COP-kertoimet [4]

Näin ollen, kun lasketaan keskimääräiset vuosittaiset energian ostokustannukset jakamalla lämmitysenergian tarve 4,5:llä lattialämmitykselle ja vastaavasti 3,5:llä patterilämmitykselle, saadaan maalämmöllä lämpenevän ja viilenevän rakennuksen vuosittaisiksi energiakustannuksiksi 432 € lattialämmitykselle ja -viilennykselle, ja 555 € radiaattorilämmitykselle ja PKV:lle. Laskemalla jälleen vain olo- ja makuuhuoneen neliöllä, saadaan lattijärjestelmän kustannuksiksi 2,57 €/m²/a ja radiaattori-puhallinkonvektorille 3,30 €/m²/a. Radiaattori-puhallinkonvektorijärjestelmä tulee noin 28,5 % kalliimmaksi osastoenergian suhteen samalla asennusteholla (kuva 26).



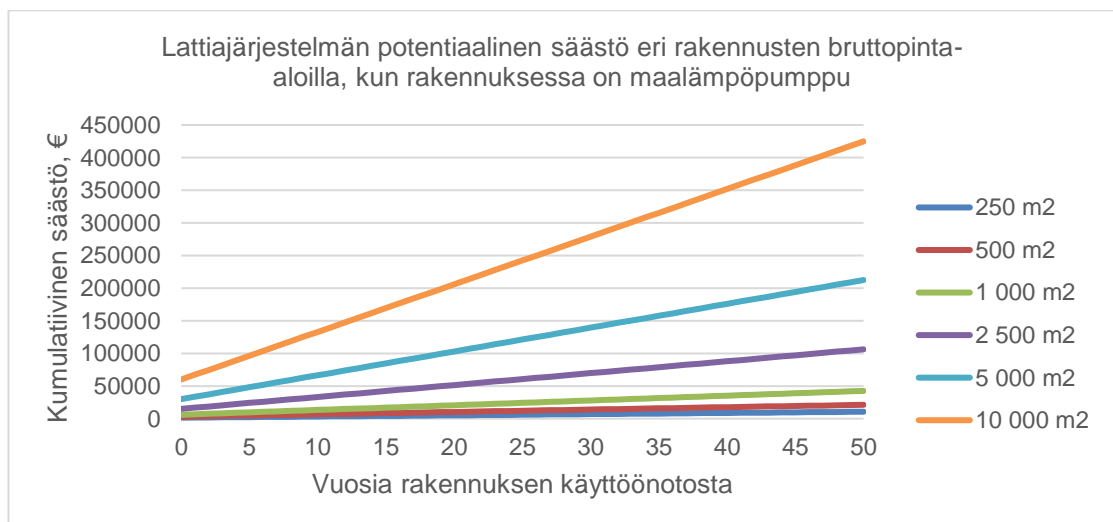
Kuva 26. Vertailtujen järjestelmien erot vuosittaisissa energiankustannuksissa

Tavoiteltaessa samaa viihtyvyyttä lattialämmityksen ja -viilennyksen kanssa, nousevat radiaattori-puhallinkonvektorijärjestelmän energiakustannukset peräti 46 % lattijärjestelmää kalliimmaksi (kuva 27). Tällöin eroa energiakustannuksissa on jo noin 1,18 €/m²/a.



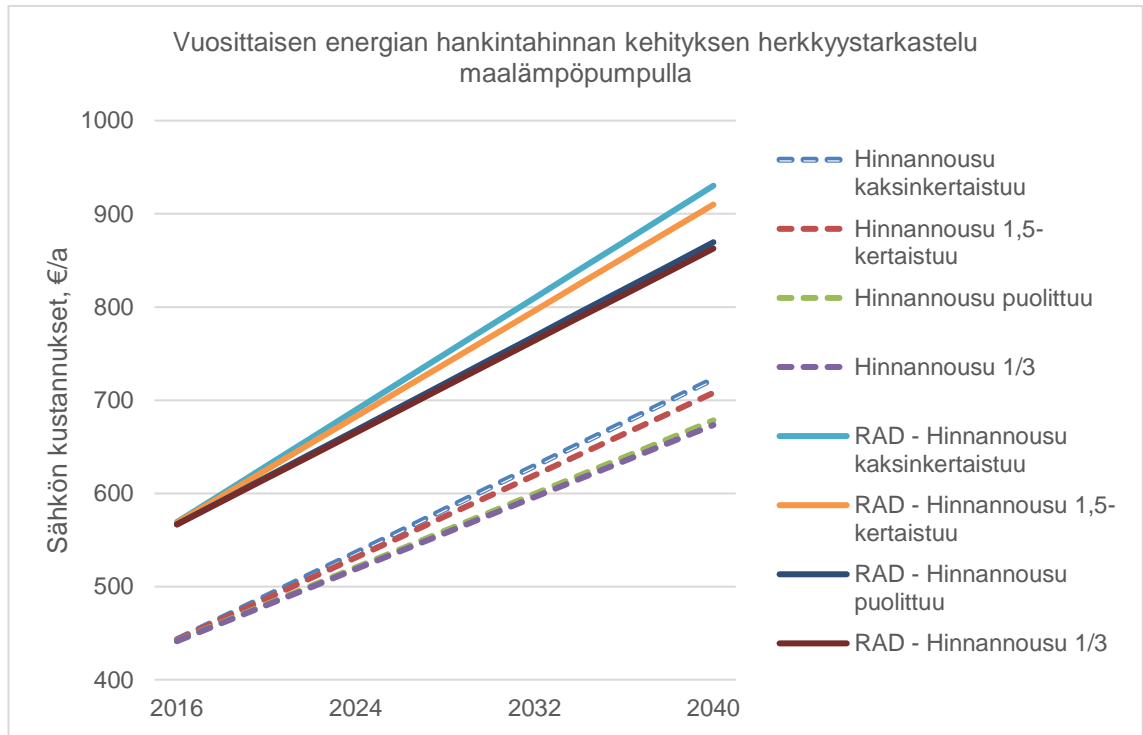
Kuva 27. Erot energiakustannuksissa lähes samalla lämpöviihtyvyydellä

Koska lämmitys- ja viilennyskustannusten ero on maalämpöpumpulla suurempi, kuin kaukolämmöllä ja -kylmällä, ovat erot myös potentiaalisissa säästöissä selkeästi suuremmat. 10 000 m²:n rakennuksen säästö vuosittaisissa energiakustannuksissa on peräti 7 300 € samalla asennusteholla ja 11 800 € lähes samalla lämpöviihtyvyydellä. 50 vuoden aikana potentiaalinen säästö on lähes 425 000 € (kuvio 30).



Kuvio 30. Lattijärjestelmän rakentamis- ja energiakustannusten säästö

Tekemällä lasketuille sähkönkulutuksille herkkyytarkastelu huomataan lattijärjestelmän olevan selkeästi riskittävämpi vaihtoehto lämmitys- ja viilennysjärjestelmäksi (kuvio 31). Käyrät pysyvät kaukolämpöön kytketyistä käyristä poiketen selkeästi erossa toisistaan kaikissa laskentatapauksissa.



Kuvio 31. Energian vuosittaisten hankintakustannusten herkkyytarkastelu samalla asennusteholla ja maalämpöpumpulla

7 Yhteenveto

Tässä raportissa selvitettiin lattialämmitetyn ja -viilennetyn rakennuksen eroja radiaattorilämmitettyyn ja puhallinkonvektoriviilennettyyn, muutoin täysin samalaiseen rakennukseen. Eroja etsittiin pääasiassa käyttäjien kokemasta lämpöviihtyvyydestä, mutta myös järjestelmien kustannuksista niin energian, kuin rakentamiskustannusten osalta.

Lattialämmityksen huomattiin olevan radiaattorilämmitystä huomattavasti viihtyisämpi vaihtoehto. Olohuoneissa lattialämmitys oli samalla asennusteholla selkeästi radiaattorilämmitystä viihtyisämpi. Ero näkyi erityisesti 1.–3. kerroksissa, joissa lattialämmityksellä sekä katto, että lattia olivat sisäilmaa lämpimämpiä. Radiaattorilämmityksellä vain pattereiden pinnat ovat ympäristöä lämpimämmät eivätkä saa alhaisemman operatiivisen lämpötilan takia aikaan yhtä hyvää lämpöviihtyvyyttä. Ylimmässä kerroksessa menetetään ylemmän kerroksen lattialämmityksen hyöty, ja lattialämmitys on samalla asennusteholla yhtä viihtyisä radiaattorilämmityksen kanssa. Ylimmän kerroksen olohuone oli simulaation ainoa tila, jossa oli yhtä monta lämmintä ja viileää pintaa. Makuuhuoneissa, joissa jokaisessa kerroksessa oli enemmän lämpimiä kuin kylmiä pintoja, oli lattialämmitys radiaattorilämmitystä viihtyisämpi. Radiaattorilämmityksellä pystyttiin saavuttamaan lähes lattialämmityksen tasoinen viihtyvyys, mutta tällöin tarvittiin lähes kolmanneksen enemmän energiaa.

Viilennysjärjestelmien eroissa huomattiin selkeästi lämmitysjärjestelmiä selkeämpi ero lämpöviihtyvyyksissä. Tuloksissa korostuvat tila- ja huonekohtaisen viilennysjärjestelmän erot. Makuuhuoneet, jotka saivat viilennystehonsa välioven kautta, eivät oletetusti pärjänneet viihtyvyydessä lattiaviilennykselle, vaikka ne läpäisivätkin Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D3 astetuntivaatimuksen ylilämpenemisen osalta. Olohuoneissa voidaan PKV:llä saavuttaa parempi viihtyvyys kuin lattiaviilennyksellä, mutta tällöin energiankulutusta tuli noin viidenneksellä. Kun tähän otetaan vielä puhallinkonvektorin puhaltimen kuluttama sähkömäärä, on lattiaviilennys huomattavasti kustannustehokkaampi menetelmä tilan viihtyisyyden takaamiseksi. Lattiaviilennyksellä ei myöskään esiinny PKV:n ilmavirtauksen aiheuttamaa paikallista vetoisuutta, kun viilennys perustuu tehokkaaseen keskimääräisen säteilylämpötilan laskemiseen. Kuten lämmittäessä, myös viilentäessä laaja lattiapinta-ala vaikuttaa huomattavasti tehokkaammin operatiiviseen lämpötilaan kuin PKV.

Lattiaviilennys parantaa erityisesti isojen asuntojen keskimääräistä viihtyvyyttä. Keskitetyllä järjestelmällä tilat, joihin ei ole suoraa viileänjakelua, heikkenevät nopeasti lämpövihtyvyydeltään lämpimimpinä ajanhetkinä, vaikka tilan väliovia pidettäisiinkin auki. Lattiaviilennyksellä este ovien aukipitämiselle poistuu, ja koko asunto on yhtä viihtyisä. Lattiaviilennys ei kuitenkaan ollut aina viihtyisämpi vaihtoehto. Kaikkein lämpimimpinä tunteina lattiaviilennyksen viihtyvyys heikkeni muita tiloja nopeammin, ja suurimmat olohuoneiden kesäajan epämukavuuden olivat yllättäen lattiaviilennyksellä. Kyseisiä tilanteita ilmeni kuitenkin vain noin 2–3 kertaa koko simulaatiojaksossa, eli noin 0,1 % ajasta.

Lattialämmitys ja -viilennys osoittautuivat odotetusti investointikustannuksiltaan PKV:tä ja radiaattorilämmitystä edullisemmaksi. Pelkkä radiaattorilämmitys on Haahtelan Talonrakentamisen kustannustiedon vuoden 2014 painoksen mukaan laskettuna noin kaksi kolmasosaa lattialämmityksen hinnasta, mutta toteutettaessa viilennysjärjestelmä, on lattialämmitys ja -viilennys noin 16 % halvempi investointi kuin radiaattorit ja puhallinkonvektorit. Jos laskelmissa otetaan huomioon välipohjarakenteiden kustannukset, nousevat lattialämmitys ja radiaattorilämmitys lähes samaan hintaluokkaan, mutta lattialämmitteeseen taloon voidaan lisätä viilennys selvästi radiaattorilämmitteistä edullisemmin. Laskettuja kustannuksia tarkasteltaessa tulee kuitenkin muistaa, että ne ovat huonosti yleistettävissä muihin kohteisiin.

Lattialämmityksen- ja viilennyksen alhaisempi energiankulutus ja etenkin pienempi sähköntarve vähentää riskiä energian hankintakustannusten kasvamisesta. Erot järjestelmien välisissä energiakustannuksissa korostuvat, jos lämmön ja viileän lähteeksi valitaan maalämpöpumppu. Pienemmän menoveden lämpötilan ansiosta korkeampi lämpöpumpun COP-kerroin mahdollistaa erittäin kustannustehokkaan tavan lämmön ja viileän tuotannolle ja jakelulle kiinteistössä.

Isoja ikkunoita voidaan hyödyntää entistä paremmin lattialämmityksellä ja -viilennyksellä, kun radiaattoreille ei tarvitse jättää tilaa. Luonnonvalon kasvamisen lisäksi sisään pääsevä auringonsäteily kasvaa ikkunapinta-alan mukana, mutta lattiaviilennyksellä voidaan koko asunnon kasvava lämpökuorma hallita huomattavasti PKV:tä tehokkaammin ja viihtyisämmin. Kun huomioidaan lattiaviilennyksen keräävän tehokkaasti lämpöä auringonsäteilystä, voidaan rakennuksen energiatehokkuutta parantaa entisestään hyödyntämällä lattiaviilennyksen keräämää lämpöenergiaa esimerkiksi käyttöveden lämmityksessä tai ehkäistä maalämpökaivon liiallista kylmenemistä talvella varaamalla lämpöä sinne kesäisin.

Lähteet

- 1 SFS-EN ISO 7730. Lämpöolojen ergonomia. 2006. Lämpömukavuuden analyytinen määrittäminen ja tulkinta käyttäen laskettuja PMV- ja PPD-indeksejä sekä paikallista mukavuutta. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- 2 Lämpömukavuus. 2009. Verkkodokumentti. Virtuaali ammattikorkeakoulu. <<http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/opintojak-sot/0505015/1119948180490/1119952720312/1119959444731/1119959469687.html>> Luettu 25.6.2016.
- 3 Operative Temperature. 2017. Verkkodokumentti. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Operative_temperature>. Luettu 20.6.2016.
- 4 Lehtinen, Jari. 2013. Maalämpöpumpun ja maalämmön valinta. Verkkodokumentti. Lämpövinkki Oy. <<http://www.lampovinkki.fi/DowebEasyCMS/Sivusto/Dokumentit/ladattavatoppaatjatyokalut/Maal%C3%A4mp%C3%B6pumpun%20ja%20maal%C3%A4mm%C3%B6n%20valinta%20pikaopas.pdf>>. Luettu 15.7.2016.
- 5 Energian hinnat. 2016. Verkkotietokanta. Tilastokeskus. <http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ene__ehi/?tablelist=true&rxid=4ff4c873-2266-48c4-83c7-b7ba23ebd7e8>. Luettu 30.7.2016.
- 6 Rakennusten energiatehokkuus. 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D3. Helsinki: ympäristöministeriö.
- 7 Rakennusten energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D5. Helsinki: ympäristöministeriö.
- 8 Haahtela Yrjänä, Kiiras Juhani. 2014. Talonrakennuksen kustannustieto 2014. Helsinki: Haahtela-kehitys Oy.
- 9 Tjurin, Sami. 2016. Suunnittelupäällikkö, Uponor Suomi Oy, Tuusula. Haastattelu 1.9.2016