



**TARPEENMUKAISEN ILMANVAIH-
DON POTENTIAALIT ASUINRA-
KENNUKSISSA HIILIDIOKSIDIP-
TOISUUKSIEN JA MET-ARVOJEN
KANNALTA TARKASTELTUINA**

Santtu Meristö

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2013
Talotekniikan
koulutusohjelma
LVI-talotekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Talotekniikan koulutusohjelma
LVI-talotekniikka

SANTTU MERISTÖ:

Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon potentiaalit asuinrakennuksissa hiilidioksidipitoisuuksien ja MET-arvojen kannalta tarkasteltuina

Opinnäytetyö 69 sivua, joista litteitä 0 sivua
Huhtikuu 2013

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää ja tutkia asuinrakennuksissa ihmisen hiilidioksidin tuottoa, ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden tasoa ja näiden vaikutusta tarpeenmukaisen ilmavaihdon ilmavirtoihin sekä nykyisten ilmanvaihtoa koskevien määräysten ja ohjeiden mukaisten ilmavirtojen riittävyttä tarpeeseen nähden.

Ihmisten hiilidioksidin tuottoa lähestyttiin kansainvälisesti tunnettujen ja käytettyjen MET-arvojen avulla. MET-arvoja voidaan käyttää ihmisen hapenkulutuksen suhteutettujen arvojen laskentaan. MET-arvo kertoo erilaisten fyysisten suoritusten rasittavuuden suhteutettuna ihmisen lepotilan rasitukseen. Ihmisen hapenkulutuksen kautta hengitysosamäärän avulla voidaan määrittellä ihmisen hiilidioksidin tuotto eri aktiviteeteissa.

Ulkoilman hiilidioksidipitoisuudella on suuri vaikutus sisäilmanlaatuun. Nykyään ulkoilman hiilidioksidipitoisuus on noin 400 ppm. Viimevuosina hiilidioksidipitoisuus on noussut vuosittain noin 2 ppm ja tulevaisuudessa hiilidioksidipitoisuuden nousu ennustetaan kiihtyvän. Tämä vaikuttaa sisäilmanlaatuun, energiankulutukseen ja tarpeenmukaisiin ilmavirtoihin.

Opinnäytetyössä on laskettu ja simuloitu ihmisen hiilidioksidin tuottoja, ulkoilman hiilidioksidipitoisuutta ja arvioitu asuinrakennuksen tilojen käyttöaikoja. Laskelmien perusteella asuinrakennuksissa hiilidioksidipitoisuuden mukaan ohjatulla tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla voidaan säästää energiaa verrattuna vakioilmavirtajärjestelmällä toteutettuun ratkaisuun. Laskelmien ja simulointien mukaan ilmanlaatua pystytään hallitsemaan paremmin hiilidioksidipitoisuuden mukaan ohjatulla tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla kuin vakioilmavirtajärjestelmällä toteutetulla ratkaisulla.

Asiasanat: tarpeenmukainen ilmanvaihto, ihmisen hiilidioksidin tuotto, MET-arvot

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Building Services Engineering
HVAC Services

MERISTÖ, SANTTU:

Potentials examined of demand controlled ventilation in residential buildings by carbon dioxide concentrations levels and MET values

Bachelor's thesis 69 pages, appendices 0 pages
April 2013

The aim of this thesis was to find out and study carbon dioxide output of humans, outdoor air carbon dioxide concentration levels and their impact in the air flows of demand controlled ventilation system as well as current regulation of ventilation and the level of air flow rates.

The output of carbon dioxide of humans was begun to be approached by internationally recognized and used MET values. MET values can be used to calculate the human oxygen consumption. MET value indicates the performance of a variety of physical stress in relation to sleep stress of human. The respiratory quotient can be used to determine the output of carbon dioxide in different activities of humans by human oxygen consumption.

Outdoor air carbon dioxide concentration has a major impact for indoor air quality. Nowadays, atmospheric carbon dioxide concentration is about 400 ppm. In recent years, carbon dioxide level has been rising by about 2 ppm per year and, in the future the increase in the concentration of carbon dioxide is expected to accelerate. This has a major impact on indoor air quality, on energy consumption and on air flows of demand controlled ventilation system.

In this thesis, have been calculated and simulated, human carbon dioxide output, carbon dioxide level in outdoors and operating times of residential building premises have been assessed.

Based on calculations and simulations, energy can be saved in residential buildings by demand controlled ventilation systems. These systems are controlled by carbon dioxide levels in this thesis. The air quality can be managed better by this system compared to a standard air flow system.

Key words: demand controlled ventilation, human carbon dioxide output, MET values

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	TEORIA	7
2.1	Ilmanvaihto asuinrakennuksissa	7
2.1.1	Ilmanvaihto vakioilmavirroilla.....	7
2.1.2	Ilmanvaihto tarpeenmukaisilla ilmavirroilla	7
2.1.3	Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon ulkoilmavirran pienentämismahdollisuuksia Suomen rakentamismääräyskokoelman D2 määräysten valossa.....	8
2.2	Ilman epäpuhtaudet	8
2.3	Hiilidioksidi	9
2.3.1	Hiilidioksidi sisäilman laadun kuvaajana	10
2.3.2	Hiilidioksidin lähteet.....	10
3	SISÄILMAN HIILIDIOKSIDIPITOISUUSTASOON VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	12
3.1	Ihmisen hiilidioksidin tuottoon vaikuttavia tekijöitä	12
3.1.1	Ihmisen hapenkulutus.....	12
3.1.2	Ihmisen hiilidioksidin tuotto suhteessa hapenkulutukseen	14
3.2	Tietoja suomalaisten vartaloista ja asumistiheyksistä	15
3.3	Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus.....	21
3.3.1	Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus nykypäivänä	21
3.3.2	Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus Tampereen kaupunkialueella	23
3.3.3	Ennuste ulkoilman hiilidioksidipitoisuudesta tulevaisuudessa	23
4	HIILIDIOKSIDIPITOISUUKSIEN, ILMAVIRTOJEN JA ENERGIANKULUTUSTEN LASKELMIA JA KESKENÄISTEN RIIPPUVUUKSIEN SIMULOINTEJA ASUINTILOISSA	26
4.1	Ihmisen hiilidioksidin tuotto, tarpeenmukaiset ulkoilmavirrat ja hiilidioksidipitoisuudet sisäilmaluokitusten ilmavirroilla eri aktiviteeteissa.....	27
4.1.1	Ihmisen hiilidioksidin tuottoarvot eri aktiviteeteissa	27
4.1.2	Hiilidioksidipitoisuus tasapainotilassa miehellä ja naisella	28
4.1.3	Ulkoilmavirrat hiilidioksidipitoisuuden tasapainotilassa.....	29
4.2	Hiilidioksidipitoisuuden nousun vaikutus tarpeenmukaisiin ulkoilmavirtoihin tulevaisuudessa	30
4.3	Makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuksien simulointia ja energialaskelmia	33
4.3.1	Vakioilmavirtatarkastelu makuuhuoneessa.....	33
4.3.2	Tarpeenmukainen ilmavirtatarkastelu makuuhuoneessa.....	35
4.3.3	Energiansäästön ja ilmanlaadun parannuspotentiaalit makuuhuoneessa.....	37

4.4	Työhuoneen hiilidioksidipitoisuuksien simulointia ja energialaskelmia.....	39
4.4.1	Vakioilmavirtatarkastelu työhuoneessa	40
4.4.2	Tarpeenmukainen ilmavirtatarkastelu työhuoneessa	41
4.4.3	Energiansäästön ja ilmanlaadun parannuspotentiaalit työhuoneessa.....	44
4.5	Olohuoneen hiilidioksidipitoisuuksien simulointia ja energialaskelmia	45
4.5.1	Vakioilmavirtatarkastelu olohuoneessa	46
4.5.2	Tarpeenmukainen ilmavirtatarkastelu olohuoneessa	47
4.5.3	Energiansäästön ja ilmanlaadun parannuspotentiaalit olohuoneessa.....	49
4.6	Keittiön hiilidioksidipitoisuuksien simulointia ja energialaskelmia.....	51
4.6.1	Vakioilmavirtatarkastelu keittiössä.....	51
4.6.2	Tarpeenmukainen ilmavirtatarkastelu keittiössä.....	53
4.6.3	Energiansäästön ja ilmanlaadun parannuspotentiaalit keittiössä	55
4.7	Hiilidioksidipitoisuuden seurantamittaus makuuhuoneessa	57
4.8	Hiilidioksidipitoisuuden simulointia ja vertailua IDA-ICE- ja Excel- ohjelmilla	58
5	POHDINTA.....	66
	LÄHTEET.....	68

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää hiilidioksidiohjatun tarpeenmukaisen ilmanvaihdon hyödynnettävyyttä asuinrakennuksissa. Tarpeenmukaista ilmanvaihtoa käytetään yleensä suurissa tiloissa, joissa epäpuhtauksien kuormitus on epätasaista, esimerkiksi luentosaleissa ja kokoustiloissa. Tällaisissa tiloissa tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla saavutetaan hyvä sisäilmanlaatu ja säästetään suuria määriä energiaa verrattuna vakioilmanvaihtojärjestelmällä toteutettuun sisäilmanlaadullisesti yhtä hyvään ratkaisuun. Tavoitteena on selvittää, onko samankaltaiset hyödyt mahdollista saavuttaa tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla myös asuinrakennuksien tiloissa, joita voidaan ohjata hiilidioksidipitoisuuksien perusteella.

Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon hyödyllisyyden selvittämiseksi opinnäytetyössä selvitetään ihmisen hiilidioksidin tuottoa erilaisissa asuinrakennuksen tiloissa ja aktiviteeteissa sekä ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden tasoa nykypäivänä ja tulevaisuudessa. Nämä tekijät vaikuttavat sisäilman hiilidioksidipitoisuuteen ja laatuun. Lisäksi opinnäytetyössä vertaillaan Sisäilmastoluokituksen 2008 antamia henkilöperusteisia ulkoilmavirtoja eri sisäilmaluokituksissa ja niiden paikkansapitävyyttä erilaisissa asuinrakennuksen tiloissa.

Opinnäytetyön tavoitteena on laskea ja simuloida hiilidioksidipitoisuuksia erilaisissa asuinrakennuksien tiloissa mahdollisilla käyttöajoilla. Näiden perusteella voidaan laskea ja arvioida energiansäästön ja sisäilmanlaadun parantamisen potentiaaleja sekä tarpeenmukaisen ilmanvaihdon tarpeellisuutta asuinrakennuksissa.

Hiilidioksidipitoisuuksien ja tarpeenmukaisten ilmavirtojen laskelmia on tehty Microsoft Excel-taulukko-ohjelmalla LVI-alalla tunnettuihin yhtälöihin ja niiden sovellukseen pohjautuen. Microsoft Excel-ohjelman laskelmien ja IDA ICE-ohjelmalla tehtyjen simulointien perusteella on tehty havainnollistavia kuvioita. Kuviot havainnollistavat hiilidioksidipitoisuuksien muutoksia ajan suhteen erilaisissa asuinrakennusten tiloissa ja ihmisten erilaisissa aktiviteeteissa. Kuvioista voidaan tarkastella hiilidioksidipitoisuuden vaikuttavia tekijöitä: tilassa vietettyä aikaa, suomalaisen miehen ja naisen keskipainoa ja aktiivisuustasoa sekä ihmismäärää suhteessa tilan kokoon.

2 TEORIA

2.1 Ilmanvaihto asuinrakennuksissa

Ilmanvaihdon tarkoitus on huolehtia, että talossa on hyvä ja puhdas sisäilma. Ilmanvaihdolla poistetaan ihmisistä, eläimistä ja rakennusaineista syntyneitä epäpuhtauksia ja tuodaan puhdasta ilmaa tilalle. Nykyään käytännössä kaikkiin uusiin taloihin suunnitellaan ja rakennetaan koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto. Jos ilmanvaihdon tuloilmaa esimerkiksi kostutetaan tai viilennetään, kutsutaan sitä ilmastoinniksi. (Sisäilmayhdistys ry: Ilmanvaihdon perusteet 1995.) Asuinrakennusten ilmanvaihto toteutetaan perinteisesti vakioilmanvaihdolla. Tarpeenmukaisen ilmanvaihtoratkaisun kohteita on ollut tyypillisesti muissa kuin asuinrakennuksissa ja niissäkin lähinnä kokous-, neuvottelu-, auditorio- ja luokkatiloissa.

2.1.1 Ilmanvaihto vakioilmavirroilla

Vakioilmanvaihtojärjestelmä suunnitellaan huonetilojen käyttötarkoituksen perusteella ja ilmavirran suuruus määräytyy tilan mitoitushenkilömäärän mukaisesti. Mitoitus perustuu yleensä epäpuhtauskuormiin ja usein myös lämpöolosuhteiden hallintaan. Ilmavirtoja suunniteltaessa on hyvä tarkistaa, että ne vastaavat ainakin rakennusmääräyskoelman osan D2 tilakohtaisia minimi-ilmavirtoja. Vakioilmavirtajärjestelmä soveltuu tiloihin, joissa kuormitus on tasaista. Järjestelmä soveltuu huonosti kohteisiin, joissa on suuret ajalliset vaihtelut esimerkiksi tilassa syntyvässä epäpuhtaus- tai lämpökuormissa. (Seppänen 2004, 44.) Yleensä asuinrakennuksiin on suunniteltu vakioilmavirtajärjestelmä.

2.1.2 Ilmanvaihto tarpeenmukaisilla ilmavirroilla

Tarpeenmukaisessa ilmanvaihdossa tulo- ja poistoilman määrää säädetään tarpeen mukaan vastaamaan ajanhetken todellista tarvetta. Tarpeenmukaista ilmanvaihtoa käytetään energiansäästön ja sisäilman laadullisten syiden johdosta. Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon edut ovat merkittäviä tiloissa, joissa henkilömäärät ja kuormittavuudet vaihte-

levat rajusti, esimerkiksi kouluissa, kokoustiloissa ja juhlasaleissa. Kyseisissä tiloissa tarpeenmukainen ilmanvaihtotekniikka onkin jo laajalti yleistynyt. (Vaisala: Ilmanvaihdon sovellutukset.)

2.1.3 Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon ulkoilmavirran pienentämismahdollisuuksia Suomen rakentamismääräyskokoelman D2 määräysten valossa

Suomen rakentamismääräyskokoelman D2: Rakennusten sisäilmasto ja ilmavaihto on ohjeteksti: ”Jos ilmanvaihto on asuntokohtaisesti ohjattavissa, voidaan ilmanvaihtojärjestelmä suunnitella ja rakentaa siten, että ilmavirtoja voidaan ohjata myös käyttöajan ilmavirtoja pienemmiksi. Kun asunnossa ei oleskella eikä käyttöajan ilmanvaihdolle ole tarvetta esimerkiksi kosteuden hallitsemiseksi, voidaan ilmanvaihdon ohjaus suunnitella siten, että asunnon ilmavirtaa voidaan pienentää enintään 60 % käyttöajan ilmavirrasta.” (D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma: Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto 2012, 10).

Käyttöajan ulkopuolisen ajan ulkoilmavirran mitoittavana tekijänä opinnäytetyössä on käytetty seuraavaa Suomen rakentamismääräyskokoelman D2: Rakennusten sisäilmasto ja ilmavaihto tekstiä: ”Yleensä ulkoilmavirta tulee kuitenkin olla vähintään 0,35 (dm³/s)/m², joka vastaa ilmanvaihtokerrointa 0,5 1/h huoneessa, jonka vapaa korkeus on 2,5 m” (D2 Suomenrakentamismääräyskokoelma: Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto 2012, 10).

2.2 Ilman epäpuhtaudet

Sisäilman epäpuhtaudet ovat peräisin ulkoilmasta, ihmisistä, eläimistä, rakennusmateriaaleista, sisustusmateriaaleista tai jostain muusta tilan toimintaan liittyvästä epäpuhtauslähteestä. Tiloissa, joissa epäpuhtauden lähdettä ei voida poistaa, on terveellisen sisäilman takaamiseksi vaihdettava ilmaa tai esimerkiksi käytettävä ilmansuodatusta. NykYTEKNIKALLA sisäilman suodattaminen on kallista, eikä se ole tarpeeksi luotettava tekniikka asuinrakennuksissa käytettäväksi. Tarkasteltaessa asuinrakennusten sisäilman laatua voidaan käyttää hyödyksi viranomaisten antamia raja- ja ohjearvoja epäpuhtauksille. (Seppänen 2004, 20.)

2.3 Hiilidioksidi

Hiilidioksidin molekyylikaava on CO₂ ja rakennekaava O=C=O. Vapaana hiilidioksidi esiintyy kaasuna tai kiinteässä muodossa hiilidioksidijäänä. Hiilidioksidi on kaasumaisena väritöntä ja lähes hajutonta. Kaasumainen hiilidioksidi on ilmaa raskaampaa ja tiheämpää. (Työterveyslaitos: Hiilidioksidi 2011.) Taulukossa 1 on esitetty hiilidioksidin yleisiä kemiallis-fysikaalisia ominaisuuksia päätelmien ja laskelmien pohjaksi.

TAULUKKO 1. Hiilidioksidin yleisiä kemiallis-fysikaalisia ominaisuuksia (Työterveyslaitos: Hiilidioksidi 2011)

Molekyyli massa	44,0 g/mol
Tiheys	0,77 (vesi = 1) 20 °C:ssa
Sulamispiste	-56,6 °C (5,2 atm paineessa)
Sublimoitumispiste	-78,5 °C
Höyrynpaine	5730 kPa 20 °C:ssa
Höyryn tiheys	1,52 (ilma = 1)
Liukoisuus	veteen niukkaliukoinen (2 g/l); liukenee asetoniin, etanoliin, dietyylieetteriin, bentseeniin, tolueeniin, metanoliin, heptaanisiin, metyyliasetaattiin ja useisiin muihin orgaanisiin liuottimiin
Muuntokertoimet (höyry) 20 °C:ssa	1 ppm = 1,83 mg/m ³ 1 mg/m ³ = 0,547 ppm

Raja-arvoksi hiilidioksidille on annettu sosiaali- ja terveysministeriön julkaisussa haitalliseksi tunnetut pitoisuudet (HTP 2012) työpaikan ilmalle 5000 ppm (9100 mg/m³) /8 h. Sisäilman ohjearvoksi on annettu 1500 ppm (2700 mg/m³) (Työterveyslaitos: Hiilidioksidi 2011, 6). Sisäilmastoluokituksen 2008 antamat ohjeelliset maksimi-arvot ovat sisäilmaluokassa S3 1200 ppm, S2 900 ppm ja S1 750 ppm (LVI-kortisto: Sisäilmaluokitus 2008, 6).

2.3.1 Hiilidioksidi sisäilman laadun kuvaajana

Hiilidioksidipitoisuutta voidaan käyttää sisäilmanlaadun kuvaamiseen, koska ihmisten hiilidioksidin tuotto on likimain verrannollinen hengityksestä ja ihosta vapautuviin epäpuhtauksiin. Sisäilman korkea hiilidioksidipitoisuus kuvastaa täten liian pientä ilmanvaihtoa tilassa. (Seppänen 2004, 21.) Hiilidioksidi ja sen indikoimat epäpuhtaudet saavat ilman tuntumaan tunkkaiselta ja aiheuttavat väsymystä ja päänsärkyä sekä haittaavat keskittymistä (Hengityслиitto: Sisäilma). Hiilidioksidipitoisuus sopii hyvin kuvaamaan sisäilman laatua asuintiloissa, joissa ei synny paljoa muita epäpuhtauksia kuin hiilidioksidia ja sen indikoimia epäpuhtauksia. Hiilidioksidipitoisuus ei sovellu kuvaamaan esimerkiksi suihku-, sauna-, wc- ja kodinhoitotilojen sisäilman laatua. Rakennusperäisten epäpuhtauksien poistamiseksi riittävät kohtuullisen pienet ilmavirrat. Taulukossa 2 on esitetty Sisäilmastoluokituksen 2008 antamat ohjeelliset hiilidioksidipitoisuuden maksimi-arvot ja ulkoilmavirrat. Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D2 mukaan asuinrakennusten ilmanvaihtuvuus tulee olla minimissään 0,5 kertaa tunnissa.

TAULUKKO 2. Sisäilmastoluokituksen 2008 hiilidioksidin maksimi arvot ja ulkoilmavirrat

	Yksikkö	S1	S2	S3
Hiilidioksidipitoisuus	ppm	< 750	< 900	< 1200
Ulkoilmavirta	dm ³ /s, hlö	12	8	6

2.3.2 Hiilidioksidin lähteet

Asuinrakennuksissa pääasiallinen hiilidioksidin lähde on ihmisten uloshengitysilma (Seppänen 2004, 21). Ilmanvaihdolla toteutetuissa ratkaisuissa sisäilman hiilidioksidipitoisuus voi olla alimmillaan niin paljon kuin ulkoilman hiilidioksidipitoisuus on. Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus oli esiteollisella ajalla noin 280 ppm ja nykyään se on jo noin 400 ppm. Hiilidioksidi on tärkeä osa luonnonkiertokulkua ihmisten, kasvien ja eläinten välillä. Hiilidioksidipäästöistä noin 75 prosenttia tulee fossiilisten polttoaineiden käytöstä, lisäksi päästöjä syntyy teollisuudesta ja metsien hävittämisestä. Miljoonien vuosien aikana sitoutuneet hiilidioksidit vapautuvat kivihiiiltä, öljyä ja maakaasua poltettaessa. Viimeisen parin sadan vuoden ajan fossiilisten polttoaineiden käytön kasvu

on ollut kiihtyvää. Kaikista maapallon lämpenemistä aiheuttavista kaasuista hiilidioksidin osuus on noin 80 prosenttia. (CO2-raportti: Tietoa ilmastonmuutoksesta 2012.)

3 SISÄILMAN HIILIDIOKSIDIPITOISUUSTASOON VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Asuinrakennusten sisäilman hiilidioksidipitoisuuden vaikuttavat sisätiloissa tapahtuva hiilidioksidin tuotto, joka on yleensä ihmisperäistä, ja tuloilman eli ulkoilman hiilidioksidipitoisuus (Seppänen 2004, 21).

3.1 Ihmisen hiilidioksidin tuottoon vaikuttavia tekijöitä

Ihmisen veressä hapen ja hiilidioksidin osapaineet pysyvät jokseenkin muuttumattomina, joten aineenvaihdunnan vilkastuessa esimerkiksi ruumiillisessa työssä, lisäänty myös elimistön ja solujen hengitys (Nienstedt, Hänninen, Arstila, Björkqvist 1999, 289). Tästä johtuen ihmisen hiilidioksidin tuottoa tulisi tarkastella ihmisen aktiivisuustason, hapen kulutuksen ja hengitysosamäärän kautta.

3.1.1 Ihmisen hapenkulutus

MET-arvosta saadaan suhteutettu ihmisen hapen- tai energiankulutus. MET-arvo kertoo erilaisten fyysisten suoritusten rasittavuuden suhteutettuna ihmisen lepotilan rasitukseen. MET-arvoja käytetään erilaisissa fyysisiin suorituksiin liittyvissä tutkimuksissa ja arvioinneissa. MET-arvon oletetaan olevan sama, vaikka perustoimintojen energiankulutus vaihtelee yksilöllisesti ihmisen sukupuolen, iän ja kehonkoostumuksen mukaan. MET on lyhenne englanninkielisistä sanoista Metabolic Equivalent. Suomeksi MET on metabolinen ekvivalentti, toisin sanoen lepoaineenvaihdunnankerrannainen. (Mänttari 2006, 29, Heikkilän 2009, 4-5 mukaan.) Taulukossa 3 on esitetty MET-arvon määrittely hapen- ja energiankulutuksen suhteen. MET-arvoja voidaan käyttää apuna myös energiankulutuksen kautta ihmisestä vapautuvan lämpöenergian laskentaan.

TAULUKKO 3. MET-arvon määrittäminen (Mänttari 2006, 29, Heikkilän 2009, 4 mukaan)

Hapenkulutus	Energiankulutus
1 MET = 3,5 ml/kg/min	1 MET = 1 kcal/kg/h

Ainsworth, B.E., Haskell, W.L., Whitt, M.C., Irwin, M.L., Swartz, A.N., Strath S.J., O'Brien, W.L., Bassett, D.R., Schmitz, K.H., Emplaincourt, P.O., Jacobs (2000) julkaisemia MET-arvotaulukoita käytetään useissa arvioinneissa ja tutkimuksissa sekä niitä on julkaistu eri lähteissä. MET-arvot ovat kansainvälisesti hyväksytyjä lukuja ja täten niitä voidaan perustellusti käyttää. (Byrne, Nuala, Hills, Hunter, Weinsier & Schutz 2005, 1113. 2005, 1113, Heikkilän 2009, 5 mukaan.)

Yksi MET vastaa istuvan ihmisen hapenkulutusta eli noin 3,5 ml/kg/min (Vuori 1994, 259, Heikkilän 2009, 4 mukaan). Tämän perusteella voidaan laskennallisesti arvioida ihmisen kuluttamaa hapenmäärää esimerkiksi nukkuessa, kun tiedetään henkilön massa ja suorituksen kesto. Taulukon 4 MET-arvoja apuna käyttäen saadaan ihmiselle lasketua hapenkulutus yhtälön (1) mukaan.

$$MET\text{-arvo} \times 3,5 \text{ ml/kg/min} \times \text{paino (kg)} \times \text{aika (min)} = \text{hapenkulutus}$$

(1)

TAULUKKO 4. Erilaisten aktiviteettien rasittavuus ilmaistuna MET-arvoilla (Ainsworth ym. 1993, Ilanderin mukaan, 2008, 46)

Aktiviteetti	MET-arvo
Nukkuminen	0,9
Istuminen	1,0
Makaaminen	1,0
Lukeminen	1,0
Television katselu	1,0
Seisominen	1,2
Istumatyö	1,5
Syöminen	2,0
Peseytyminen	2,0
Silittäminen	2,0
Kevyt siivoaminen	2,0
Ruuan valmistus	2,0
Pukeutuminen	2,0
Vuoteen sijaaminen	2,0
Seisomatyö	2,5
Kevyt ruumiillinen työ	3,0
Kuntosali, kevyt	3,0
Ruumiillinen työ	4,0
Siivoaminen	4,0
Kohtuuraskaat arkiaskareet	noin 4
Raskaat arkiaskareet	noin 6
Kuntosali, kova	6,0
Kuntopiiri, kova	8,0

3.1.2 Ihmisen hiilidioksidin tuotto suhteessa hapenkulutukseen

Ihmisen hiilidioksidin tuottoa suhteessa hapenkulutukseen kutsutaan hengitysosamääräksi. Hengitysosamäärään vaikuttaa ihmisen ruokavalio. Jos elimistö saa sekaravintoa, on hiilidioksidin tuotto suhteessa hapenkulutukseen 80 prosenttia eli hengitysosamäärä

on silloin 0,8. Elimistön polttaessa pelkästään hiilihydraatteja hengitysosamäärä on 1,0. Pelkkää rasvaa polttaessaan hengitysosamäärä on 0,7, sillä silloin happea kuluu myös rasvassa olevan vedyn polttamiseen vedeksi. (Nienstedt ym. 1999, 289.) Hiilidioksidin tuotto saadaan laskettua hapankulutuksesta kaavalla yhtälön (2) mukaan.

$$\text{Hapenkulutus} \times \text{hengitysosamäärä} = \text{hiilidioksidin tuotto} \quad (2)$$

3.2 Tietoja suomalaisten vartaloista ja asumistiheyksistä

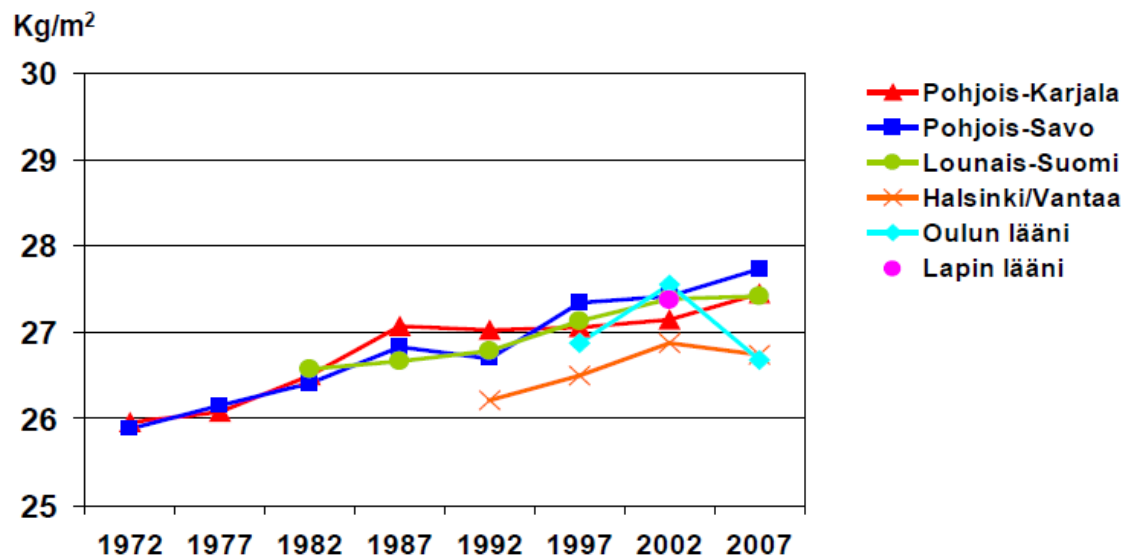
Suomalaismiesten keskipituus on noin 181 senttimetriä ja naisten 167,5 senttimetriä. Keskipituuskaan ei ole muuttumaton tekijä, sillä noin 30 vuotta sitten miesten keskipituus oli 176 senttimetriä ja naisten 163 senttimetriä. Suomalaisten keskipituus on kasvanut keskimääräisesti noin 5 senttimetriä 30 vuodessa. (Turun Sanomat: Suomalaiset miehet venyivät pituutta viisi senttiä 30 vuodessa.)

Kuvioista 1 ja 2 voidaan todeta, että suomalaisten miesten keskimääräinen painoindeksi on noin 27 ja naisten 26. Painoindeksi (BMI) määritellään yhtälön (3) mukaan. Suomalaisten miesten ja naisten keskipaino saadaan laskettua yhtälön (3) avulla. Suomalaisten keskipaino ei ole muuttumaton tekijä, sillä suomalaisten miesten paino on lisääntynyt viimeisen 30 vuoden aikana keskimääräisesti 10 kilogrammaa ja naisten 5 kilogrammaa. (Terveyden ja hyvinvoinninlaitos 2011: Lihavuus Suomessa, 3 ja 28.) Suomalaisten 30–59-vuotiaiden keskipaino on keskimääräistä painoindeksiä ja keskipituutta apuna käyttäen miehillä 88,5 kilogrammaa ja naisilla 73 kilogrammaa. 30–59-vuotiaiden keskiarvot kuvastavat tarpeeksi suurta ryhmää asuinrakennusten käyttäjistä, joten lukuja voidaan käyttää esimerkkilaskelmissa ja ne kuvastavat keskivertosuomalaisia. Taulukossa 5 on koottuna suomalaisten laskennallisia keskiarvoja painoon ja pituuteen liittyen.

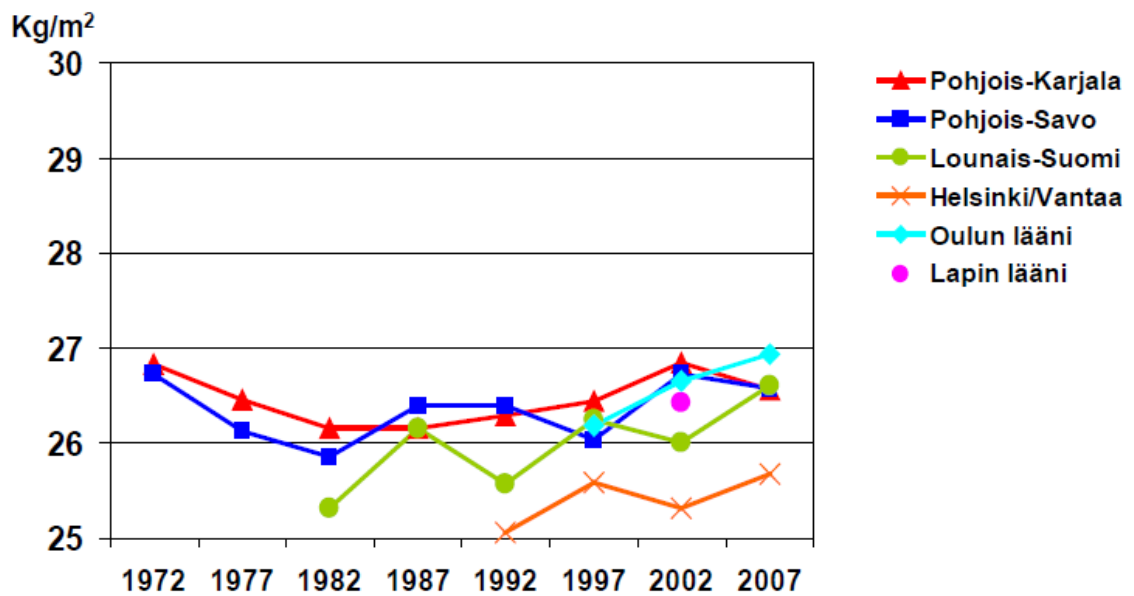
$$\text{painoindeksi} = \text{paino (kg)} / \text{pituus}^2 \text{ (m)} \quad (3)$$

TAULUKKO 5. Suomalaisten miesten ja naisten laskennallisia keskiarvoja

	Keskimääräinen painoindeksi (kg/m ²)	Keskimääräinen pituus (m)	Keskimääräinen paino (kg)
Miehet	27,00	1,81	88,45
Naiset	26,00	1,68	72,95



KUVIO 1. Painoindeksi 30–59-vuotiailla miehillä (Terveyden ja hyvinvoinninlaitos 2011: Lihavuus Suomessa, 5)



KUVIO 2. Painoindeksi 30–59-vuotiailla naisilla (Terveyden ja hyvinvoinninlaitos 2011: Lihavuus Suomessa, 6)

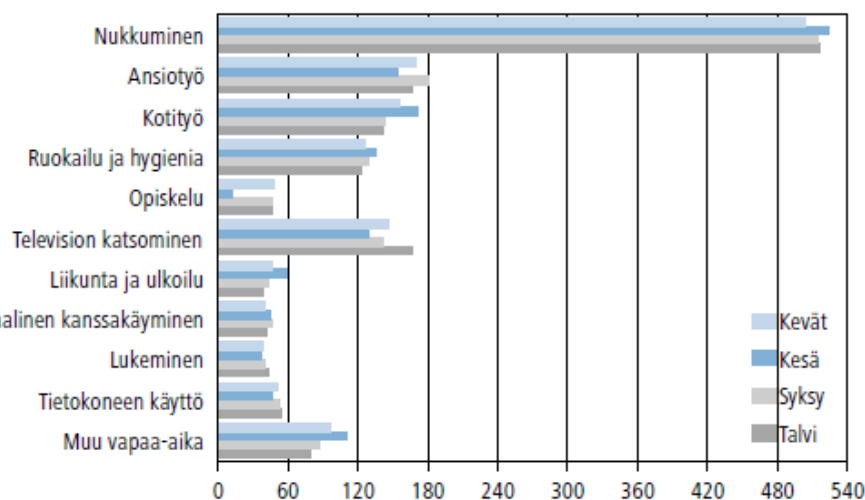
Taulukossa 6 on suomalaisten keskimääräinen henkilötiheys erilaisissa asumismuodoissa. Asumistiheyksiä voidaan käyttää laskettaessa ihmisistä aiheutuvia hiilidioksidikuormituksia erikokoisissa ja erilaisissa asuinrakennuksissa.

TAULUKKO 6. Henkilötiheys eri rakennustyypeille (Suomen rakentamismääräyskoelma 2012: D3 Rakennusten energiatehokkuus, 20)

Käyttötarkoituseraluokka	Henkilötiheys hlö/m ²
Erillinen pientalo sekä rivi- ja ketjutalo	1/43
Asuinkerrostalo	1/28
Toimistorakennus	1/17
Liikerakennus	1/43
Majoitusliikerakennus	1/21
Opetusrakennus ja päiväkot	1/5
Liikuntahalli	1/17
Sairaala	1/11

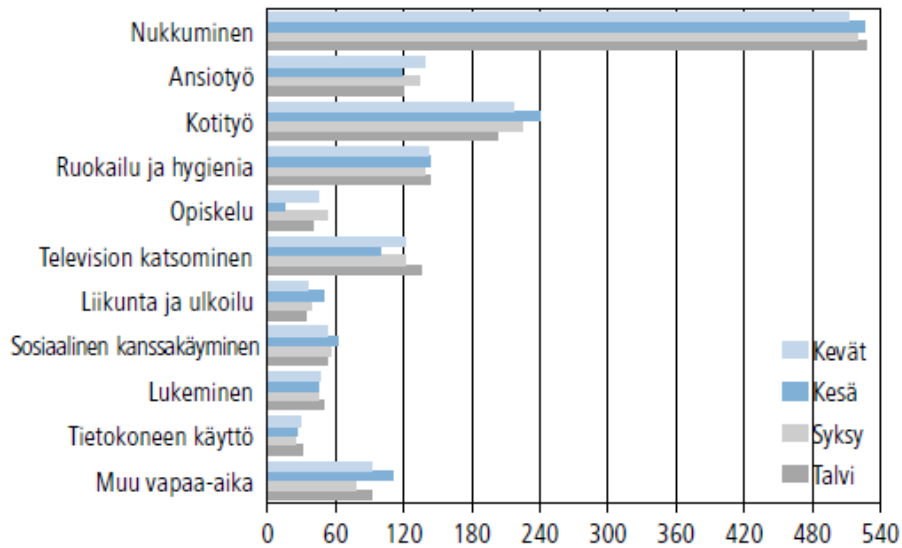
Kuvioissa 3–9 on esitetty suomalaisten eri aktiviteetteihin keskimääräisesti käyttämiä aikoja. Kuvioista saatavia tietoja voi hyödyntää arvioitaessa ihmisten eri tiloissa yhtäjaksoisesti vietetyn ajan pituutta. Esimerkiksi suomalaiset nukkuvat keskimäärin noin 8 tuntia yössä. Ajankäyttötilastoja yhdistelemällä voidaan arvioida suomalaisten yhtäjaksoisesti kuluttamaa aikaa erilaisissa tiloissa. Eri tiloissa tehtävät erilaiset aktiviteetit vaikuttavat syntyvien epäpuhtauksien määrään eri tavoin.

Miesten ajankäyttö vuodenaikojen mukaan 2009–2010, 10 vuotta täyttäneet, minuuttia/vuorokausi



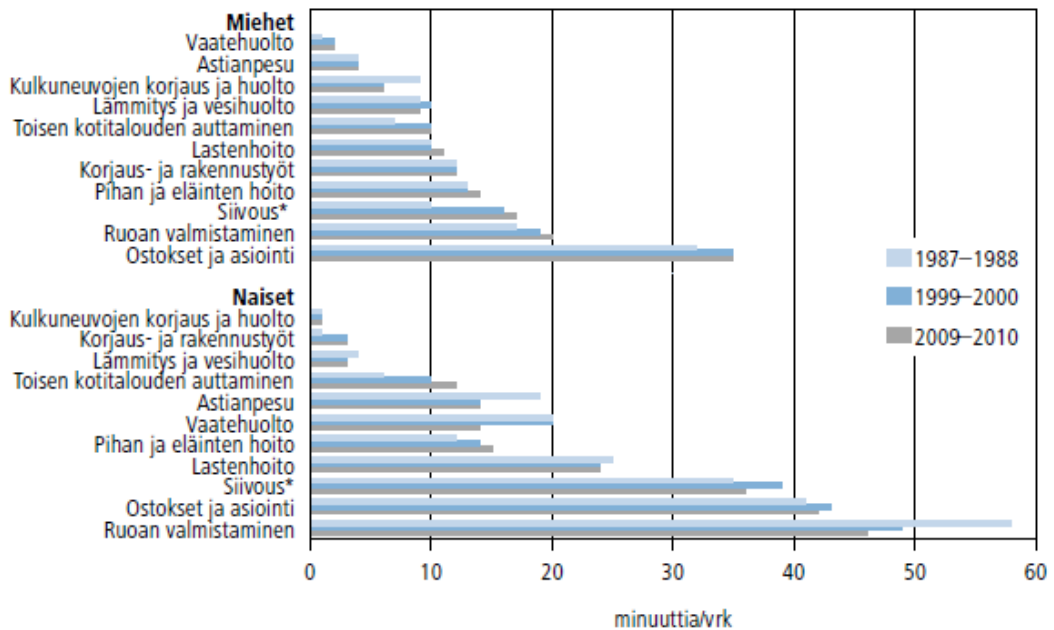
KUVIO 3. Miesten ajankäyttö (Tilastokeskus: Ajankäytön muutokset 2000-luvulla, 17)

Naisten ajankäyttö vuodenaikojen mukaan 2009–2010, 10 vuotta täyttäneet, minuuttia/vuorokausi



KUVIO 4. Naisten ajankäyttö (Tilastokeskus: Ajankäytön muutokset 2000-luvulla, 17)

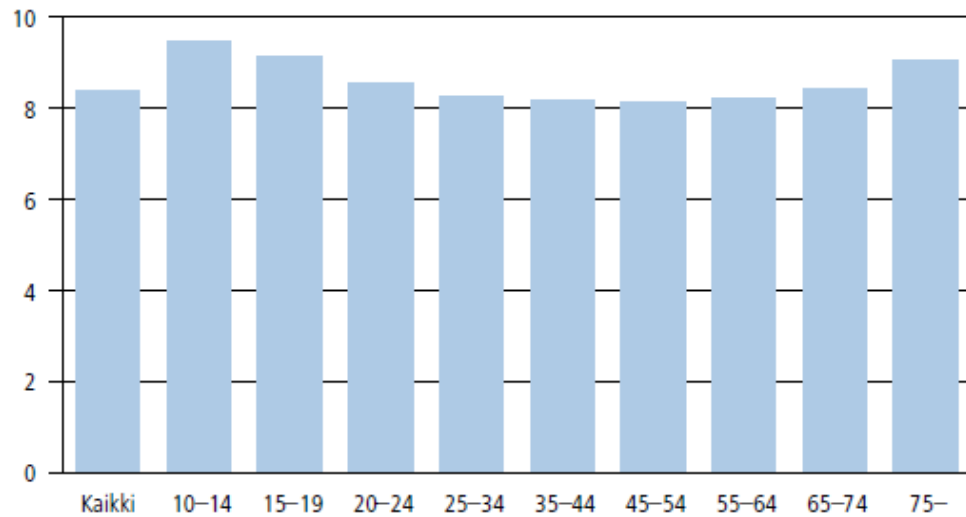
Miesten ja naisten erityyppisiin kotitöihin käyttämä aika 1987–1988, 1999–2000 ja 2009–2010, 10 vuotta täyttäneet, minuuttia/vuorokausi



* Vuosien 1987-88 tieto ei täysin vertailukelpoinen.

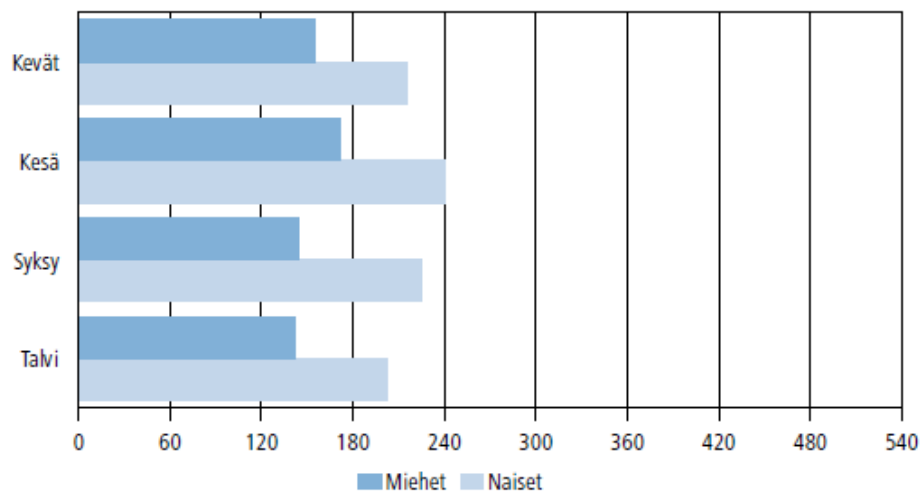
KUVIO 5. Suomalaisten käyttämä aika kotitöihin (Tilastokeskus: Ajankäytön muutokset 2000-luvulla, 28)

Nukkumiseen käytetty aika iän mukaan 2009–2010, 10 vuotta täyttäneet, tuntia/vuorokausi



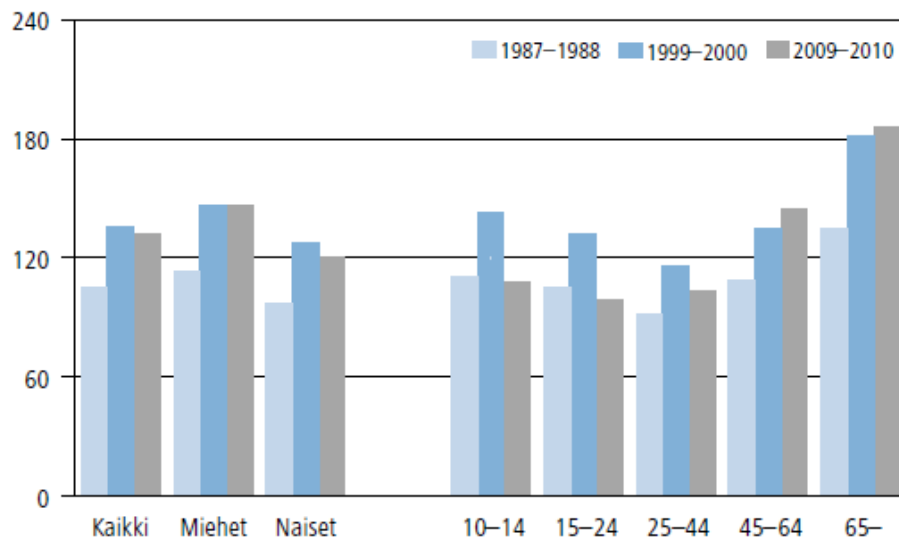
KUVIO 6. Suomalaisten käyttämä aika nukkumiseen (Tilastokeskus: Ajankäytön muutokset 2000-luvulla, 18)

Kotitöihin käytetty aika eri vuodenaikoina sukupuolen mukaan 2009–2010, 10 vuotta täyttäneet, minuuttia/vuorokausi



KUVIO 7. Suomalaisten käyttämä aika kotitöihin vuodenaikojen mukaan (Tilastokeskus: Ajankäytön muutokset 2000-luvulla, 21)

Television päätoimiseen katseluun käytetty aika sukupuolen ja iän mukaan 1987–1988, 1999–2000 ja 2009–2010, 10 vuotta täyttäneet, minuuttia/vuorokausi



KUVIO 8. Suomalaisen käyttämä aika television katseluun (Tilastokeskus: Ajankäytön muutokset 2000-luvulla, 22)

Vapaa-ajan toimintoihin käytetty aika eri vuodenaikoina 2009–2010, minuuttia/vuorokausi

	Kevät	Kesä	Syysy	Talvi
Vapaa-ajan opiskelu	2	1	3	1
Osallistuva toiminta	10	7	7	8
Kulttuuri ja hovit	8	10	6	7
Sosiaalinen kanssakäyminen	55	65	59	58
Liikunta ja ulkoilu	45	59	45	40
Television katsominen	134	114	131	151
Tietokone	40	36	38	42
Lukeminen	42	41	43	46
Käsityöt	3	2	4	5
Lepäily	17	23	14	14

KUVIO 9. Suomalaisen käyttämä aika vapaa-ajan toimintoihin (Tilastokeskus: Ajankäytön muutokset 2000-luvulla, 37)

3.3 Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus

Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus on yksi merkittävä tekijä sisäilmanlaadussa, sillä ulkoilman ja sisäilman hiilidioksidipitoisuuden ero määrittelee sen, kuinka paljon sisäilma puhdistuu ulkoilmavirran vaikutuksesta. Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus määrittelee myös sen, kuinka alhainen sisäilman hiilidioksidipitoisuus voi alimmillaan olla. Maapallon ilmaston muutoksen vaikutuksesta ulkoilman hiilidioksidipitoisuus on ollut jatkuvassa nousussa ja tulevaisuudessa nousu saattaa kiihtyä entisestään. Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus oli esiteollisella ajalla noin 280 ppm ja nykyään se on jo noin 400 ppm (CO₂-raportti: Tietoa ilmastonmuutoksesta 2012). Jos tulevaisuuden ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden nousua ei huomioida ilmanvaihtoa mitoitettaessa, tulee sisäilman laatu heikkenemään nykyisestään.

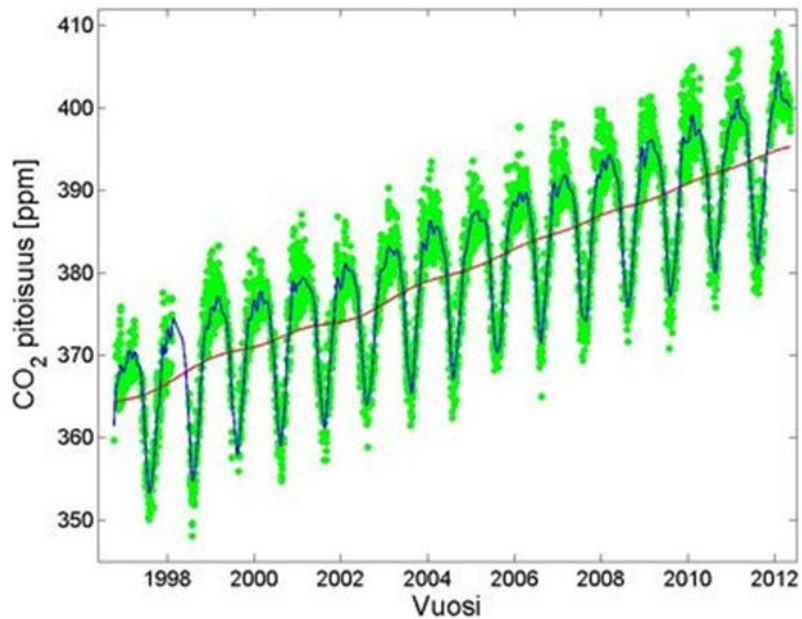
3.3.1 Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus nykypäivänä

Pallaksen Sammaltunturilla sijaitseva kasvihuonekaasuja mittaava asema ja Sodankylän tutkimuskeskus muodostavat yhdessä arktisten ja pohjoisten alueiden johtavan maapallon ilmakehää seuraavan ja kansainvälistä yhteistyötä tekevän Pallas-Sodankylä GAW-aseman (Global Atmospheric Watch) (Ilmatieteenlaitos: Lapin ilmatieteellinen tutkimuskeskus). Hiilidioksidipitoisuuksia mitataan Suomessa myös Hyytiälän SMEAR II ilmakehäasemalla (Ilmatieteenlaitos: Pallas ja Hyytiälä CO₂ esite, 1). Asemat tuottavat ainutlaatuisia tietoa kasvillisuuden, maaperän ja lumen vaikutuksesta hiilen kiertoon ja hiilidioksidin pitoisuuteen ilmakehässä (Ilmatieteenlaitos: Lapin ilmatieteellinen tutkimuskeskus).

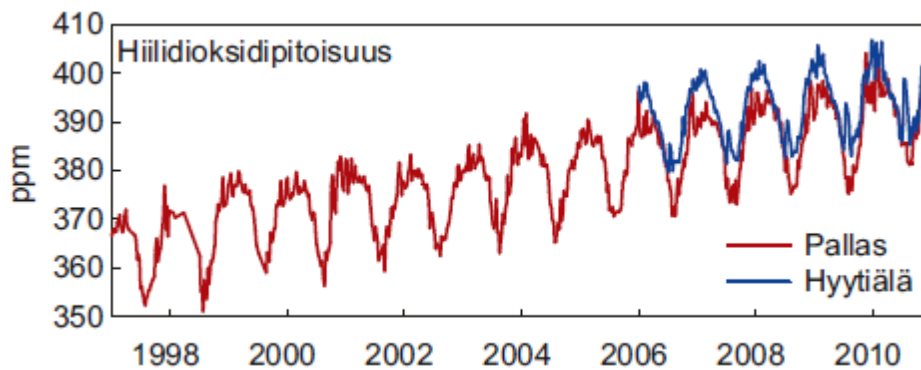
Kuvioista 10, 11 ja 12 sekä taulukosta 7 voidaan todeta, että nykypäivänä hiilidioksidin keskimääräinen pitoisuus on noin 396 ppm alueilla, joiden lähellä ei ole suuria kaupunkeja. Kuvioista 10–12 ja taulukosta 7 huomataan, että hiilidioksidipitoisuudet ovat samansuuruisia niin Suomessa kuin Amerikan Yhdysvaltojen Havaijillakin. Voidaan siis todeta, että hiilidioksidipitoisuus 396 ppm kuvastaa hyvin koko maapallon hiilidioksidipitoisuuden tasoa.

Kuvioiden 10, 11 ja 12 perusteella voidaan todeta, että hiilidioksidipitoisuus vaihtelee rajusti vuodenajasta riippuen. Talvisin hiilidioksidipitoisuus on korkeampi kuin kesä-

sin. Kesällä metsät ja kasvillisuus käyttävät hiilidioksidia kasvuaineenaan. Kasvukaudella metsät toimivat hyvänä hiilinieluna, mutta muulloin vuorostaan maaperä toimii hiilen lähteenä (CO₂-raportti: Ilmasto uutisia 2012).



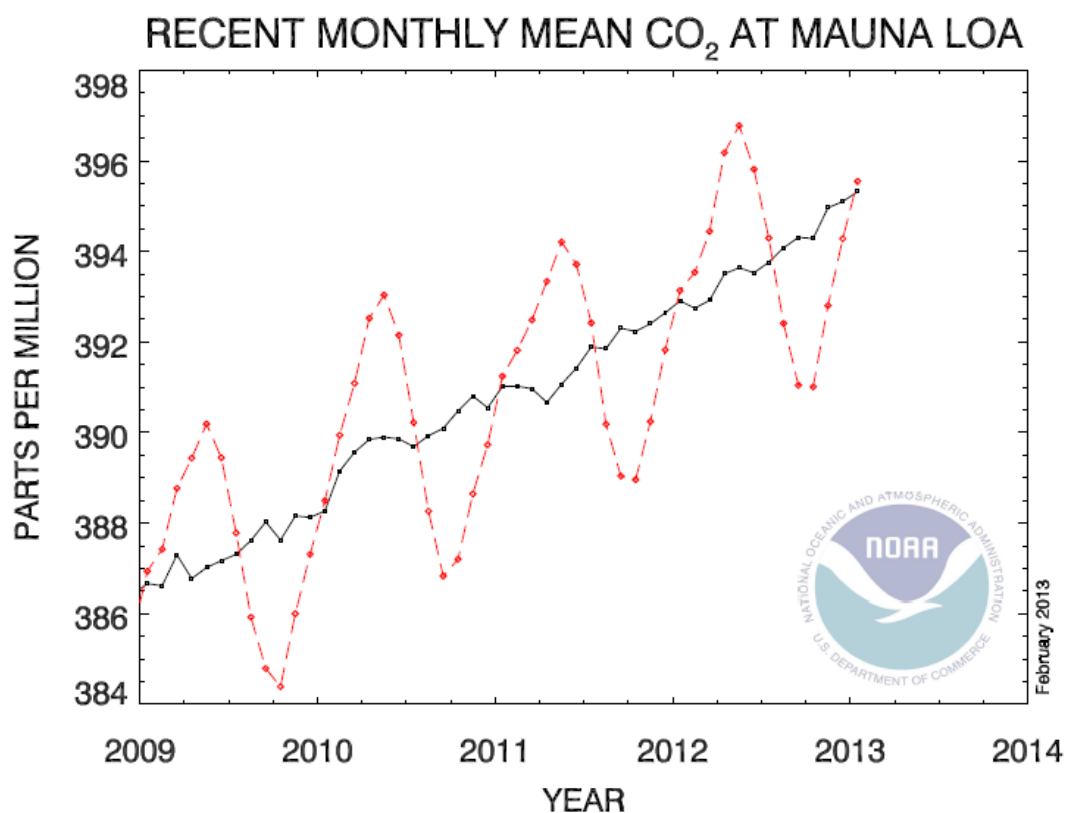
KUVIO 10. Hiilidioksidipitoisuus ulkoilmassa Pallaksen Sammaltunturilla (CO₂-raportti: Ilmasto uutisia 2012)



KUVIO 11. Hiilidioksidipitoisuus ulkoilmassa Hyytiälässä (Ilmatieteenlaitos: Pallas ja Hyytiälä CO₂ esite, 1)

TAULUKKO 7. Hiilidioksidipitoisuus ulkoilmassa Mauna Loa, Havaji (Earth System Research Laboratory: Trends in Atmospheric Carbon Dioxide 2013)

Tammikuu 2013	395.55 ppm
Tammikuu 2012	393.14 ppm



KUVIO 12. Hiilidioksidipitoisuus ulkoilmassa Mauna Loa, Havaiji (Earth System Research Laboratory: Trends in Atmospheric Carbon Dioxide 2013)

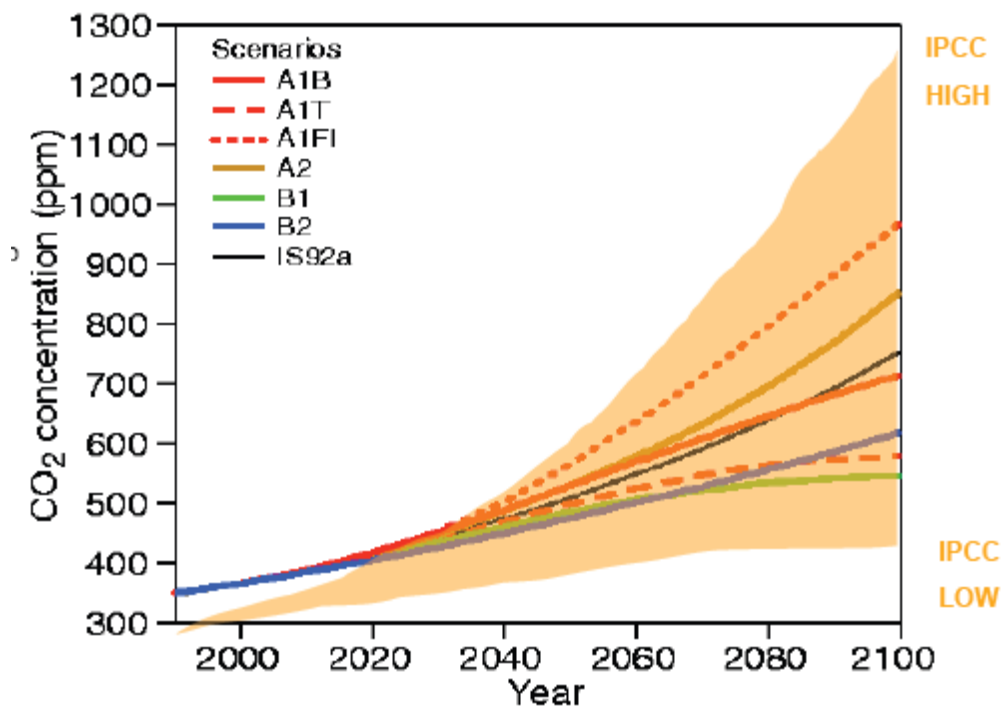
3.3.2 Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus Tampereen kaupunkialueella

Opinnäytetyössä tehtyjen ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden mittauksien suuruusluokka on talviaikaan Tampereen kaupunkialueella samaa suuruusluokkaa kuin hiilidioksidipitoisuus Pallaksella talviaikaan (kuvio10). Mittaukset on tehty DeltaOhm HD21AB17 hiilidioksidimittarilla.

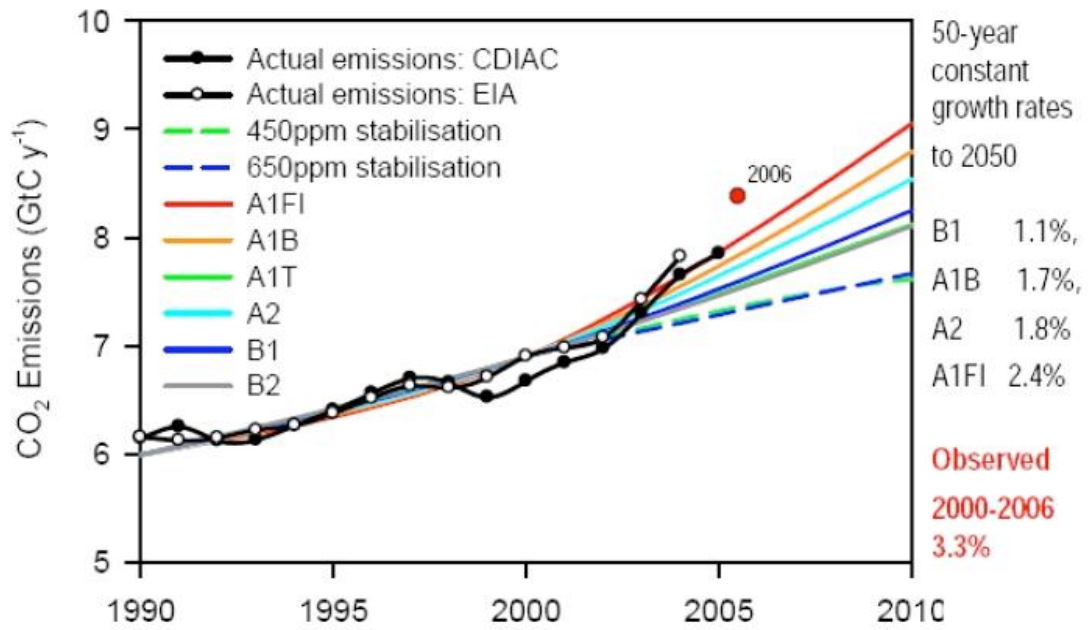
3.3.3 Ennuste ulkoilman hiilidioksidipitoisuudesta tulevaisuudessa

Hiilidioksidipitoisuuden tasainen kasvu näkyy Ilmatieteen laitoksen tekemissä mittauksissa Pallaksen Sammaltunturilla: nousua on noin 2,0 ppm vuodessa (CO₂-raportti: Ilmasto uutisia 2012). Hiilidioksidin kasvu näkyy myös kuvioissa 10, 11 ja 12, joiden perusteella voidaan päätellä, että koko maapallon hiilidioksidipitoisuus on tasaisessa kasvussa. Jos tasainen kasvu jatkuu kolmenkymmenen vuoden ajan vuoteen 2043, on ulkoilman hiilidioksidipitoisuus silloin noin 456 ppm.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) on tehnyt 450 johtavan kirjoittajan kanssa erilaisia tulevaisuuden skenaarioita, jotka ennustavat maapallon hiilidioksidipitoisuutta tulevaisuudessa. Kirjoittajat ovat jopa 130:stä eri maasta. (Ilmatieteenlaitos 2008: Ilmastomuutos- mitä siitä seuraa? 2.) Kuvista 13 voidaan todeta asiantuntijoiden ennustavan, että skenaarioiden mukaan vuonna 2050 ulkoilman hiilidioksidipitoisuus tulee olemaan minimissään noin 470 ppm. Tästä voidaan todeta, että hiilidioksidin pitoisuuksien nousu ennustetaan olevan kiihtyvää. Kuvion 14 perusteella voidaan todeta, että edelliset hiilidioksidipäästöt ennustavat skenaariot, jotka ennakoivat hiilidioksidipitoisuutta ulkoilmassa, eivät ole toteutuneet vaan päästöt ovat ylittäneet kaikki ennustukset.



KUVIO 13. Hiilidioksidipitoisuudet ulkoilmassa eri skenaarioilla tulevaisuudessa (Ilmatieteenlaitos 2008: Ilmastomuutos- mitä siitä seuraa? 18)



KUVIO 14. Hiilidioksidipäästöt ovat ylittäneet aikaisemmat skenaariot (Ilmatieteenlaitos 2008: Ilmastonmuutos- mitä siitä seuraa? 20)

4 HIILIDIOKSIDIPITOISUUKSIEN, ILMAVIRTOJEN JA ENERGIANKULUTUSTEN LASKELMIA JA KESKENÄISTEN RIIPPUVUUKSIEN SIMULOINTEJA ASUINTILOISSA

Asuinhuoneiden eri osatekijöiden keskinäiset riippuvuussimulaatiot on tehty Microsoft Excel laskentatyökalulla ja yhtälön (4) mukaisesti. Yhtälöllä (4) simuloidaan tilannetta, jossa huoneiden väliovet ovat kiinni ja näin eri huoneiden ilmassojen hiilidioksidipitoisuudet eivät pääse tasaantumaan keskenään. Yhtälössä (4) ilmanvaihdon sekoittuminen oletetaan täydelliseksi. Yhtälö (4) ei huomioi vuotoilmanvaihtoa. Nykyään tavoitteena on rakentaa yhä ilmatiiviimpiä rakennuksia, joissa ilmanvaihto on entistä hallitumpaa ja ilman hallitsematon vuoto entistä vähäisempää.

$$(A + B \times C / D) - (E \times C \times (A - F) / D) \quad (4)$$

$A =$ Huoneen hiilidioksidipitoisuus (ppm)

$B =$ Hiilidioksidintuotto (cm^3/s)

$C =$ Ajanfunktio (s)

$D =$ Huoneen tilavuus (m^3)

$E =$ Ulkoilmavirta (m^3/s)

$F =$ Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus (ppm)

Asuinhuoneiden hiilidioksidipitoisuuksien simuloinneissa käyttöajan ulkopuolella eli kun tiloissa ei ole ketään ja hiilidioksidipitoisuus on alhainen, ulkoilmavirtana on käytetty arvoa $0,35 \text{ (dm}^3/\text{s)/m}^2$.

Kun tilaan saapuu ihmisiä ja hiilidioksidipitoisuus lähestyy tilan sisäilmaluokituksen asettamaa hiilidioksidipitoisuuden maksimiarvoa, ulkoilmavirta kasvatetaan kyseisen kohteen tarvitsemaksi tarpeenmukaiseksi ulkoilmavirraksi yhtälön (5) mukaan.

Kun tilasta poistutaan ja kuormitus katoaa, niin hiilidioksidipitoisuus alkaa laskea. Tästä johtuen tarpeenmukainen ulkoilmavirta pienennetään takaisin käyttöajan ulkopuoliseksi ilmavirraksi yhtälön (5) mukaan.

Yhtälössä (5) käyttöajan ulkoilmavirran tarpeenmukainen ilmanvaihto menee päälle 200 ppm ennen hiilidioksidipitoisuuden maksimiarvoa. Hiilidioksidipitoisuuden pudotessa 200 ppm maksimiarvon alle tarpeenmukainen ilmanvirta muuttuu käyttöajan ulkopuoliseksi vakioilmavirraksi.

$$G < H > I \quad (5)$$

G = Käyttöajan ulkopuolinen ulkoilmavirta

H = Tilan sisäilmaluokituksen hiilidioksidipitoisuuden raja-arvo – 200 ppm

I = Käyttöajan tarpeenmukainen ulkoilmavirta

Energialaskelmissa ei ole otettu huomioon lämmöntalteenottoa, sillä lämmöntalteenoton tekniikka kehittyy jatkuvasti ja vaihtelee tapauskohtaisesti. Lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen huomioiminen energialaskelmissa vaikeuttaisi asian hahmottamista ja energialaskelmien soveltamista tapauskohtaisilla vuosihyötysuhteilla. Energialaskelmat on tehty yhtälöllä (6).

$$J = K \times L \times M \times N \times O \quad (6)$$

J = Ilmanvaihdon kuluttama energia vuodessa (kWh)

K = Ilman ominaislämpökapasiteetti 1 (kJ/kg)

L = Ilman tiheys 1,2 (kg/m³)

M = Ilman tilavuusvirta (m³/s)

N = Ilmanvaihdon käyttöaika päivässä (h)

O = Helsinki-Vantaan lämmitystarveluku (kd)

4.1 Ihmisen hiilidioksidin tuotto, tarpeenmukaiset ulkoilmavirrat ja hiilidioksidipitoisuudet sisäilmaluokitusten ilmavirroilla eri aktiviteeteissa

4.1.1 Ihmisen hiilidioksidin tuottoarvot eri aktiviteeteissa

Taulukossa 8 on laskettuna suomalaisen miehen ja naisen hiilidioksidin tuotto asuinrakennuksissa esiintyvissä erilaisissa aktiviteeteissa. Taulukon 8 luontiin on käytetty yhtälöä (2) ja (3) sekä taulukon 4 tietoja. Opinnäytetyön laskelmissa on käytetty suomalais-

ten keskimääräisiä painoja. Laskelmissa on käytetty sekaravintoa syövän ihmisen hengitysosamäärän arvoa 0,8.

Taulukosta 8 huomataan, kuinka ihmisen hiilidioksidin tuotto kasvaa sitä suuremmaksi, mitä raskaampi on aktiviteettitaso.

TAULUKKO 8. Sekaravintoa syövien suomalaisten miesten ja naisten hiilidioksidin tuotto eri aktiviteeteissa keskimääräisillä painoilla ja kaavoilla 1 ja 2 laskettuna

Aktiviteetti	Met-arvo	Ihmisen hiilidioksidin tuotto sekaravintoa syödessä	
		Mies (cm ³ /s)	Nainen (cm ³ /s)
Nukkuminen	0,9	3,72	3,06
Lepo, TV:n katselu	1	4,13	3,40
Istumatyö, kevyt toimistotyö	1,5	6,19	5,11
Kotiaskareet	2	8,26	6,81
Seisomatyö	2,5	10,32	8,51
Kevyt ruumiillinen työ	3	12,38	10,21
Ruumiillinen työ	4	16,51	13,62

4.1.2 Hiilidioksidipitoisuus tasapainotilassa miehellä ja naisella

Taulukossa 9 on laskettuna suomalaisen miehen ja naisen aiheuttamia hiilidioksidipitoisuuksia tasapainotilassa eri aktiviteeteissa. Laskelmissa on käytetty Sisäilmaluokituksen 2008 ilmavirtoja, taulukon 8 hiilidioksidin tuottoja, ulkoilman hiilidioksidin arvoa 396 ppm ja yhtälöä (6).

$$P = Q + R / S \quad (6)$$

P = Hiilidioksidipitoisuus tasapainotilassa (ppm)

Q = Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus (ppm)

R = hiilidioksidin tuotto (cm³/s)

S = ulkoilmavirta (m³/s)

Taulukosta 9 huomataan, kuinka hiilidioksidipitoisuuden tasapainotila nousee sitä suuremmaksi, mitä raskaampi on aktiviteettitaso. Jos asuinrakennuksessa olisi esimerkiksi hieman erikoisempi tila, vaikka kotikuntosali, voi taulukosta 9 ja 10 päätellä, kuinka suureksi hiilidioksidipitoisuus voi kasvaa ja kuinka suuria ilmavirtoja hiilidioksidipitoisuuden hallitsemiseksi tarvitaan. Toisaalta kotikuntosalin kaltaisessa tilassa yhtäjaksoi-

nen käyttöaika ei yleensä ole kovin pitkä eli hiilidioksidipitoisuuden maksimiarvojen ylitys on vain hetkellistä.

TAULUKKO 9. Hiilidioksidipitoisuus tasapainotilassa miehellä ja naisella sisäilma-
luokitusten S3, S2 ja S1 ilmavirroilla

Aktiviteetti	Hiilidioksidipitoisuus tasapainotilassa, ulkoilman CO ₂ -pitoisuuden ollessa 396 ppm					
	S3 (ppm) max 1200 ppm		S2 (ppm) max 950 ppm		S1 (ppm) max 700 ppm	
	Mies	Nainen	Mies	Nainen	Mies	Nainen
Nukkuminen	1015	907	860	779	706	651
Lepo, TV:n katselu	1084	963	912	822	740	680
Istumatyö, kevyt toimistotyö	1428	1247	1170	1034	912	822
Kotiaskareet	1772	1531	1428	1247	1084	963
Seisomatyö	2116	1814	1686	1460	1256	1105
Kevyt ruumiillinen työ	2460	2098	1944	1673	1428	1247
Ruumiillinen työ	3148	2665	2460	2098	1772	1531

4.1.3 Ulkoilmavirrat hiilidioksidipitoisuuden tasapainotilassa

Taulukossa 10 on laskettuna tarpeenmukaiset ulkoilmavirrat hiilidioksidipitoisuuden tasapainotilassa sisäilmaluokituksen 2008 antamalla hiilidioksidipitoisuuden maksimiarvoilla. Laskelmissa on käytetty Sisäilmaluokituksen 2008 antamia hiilidioksidipitoisuuden maksimiarvoja, taulukon 8 hiilidioksidin tuottoja, ulkoilman hiilidioksidipitoisuusarvoa 396 ppm ja yhtälöä (7).

$$T = U / V \quad (7)$$

$T =$ Ilmanvaihdon ilmavirta (m³/s)

$U =$ Hiilidioksidin tuotto (cm³/s)

$V =$ hiilidioksidipitoisuuden nousu, ulkoilma - sisäilma (ppm = cm³/m³)

Taulukosta 10 voidaan huomata, kuinka tarpeenmukainen ulkoilmavirta kasvaa sitä suuremmaksi, mitä raskaampi on tilassa olevan ihmisen aktiviteettitaso.

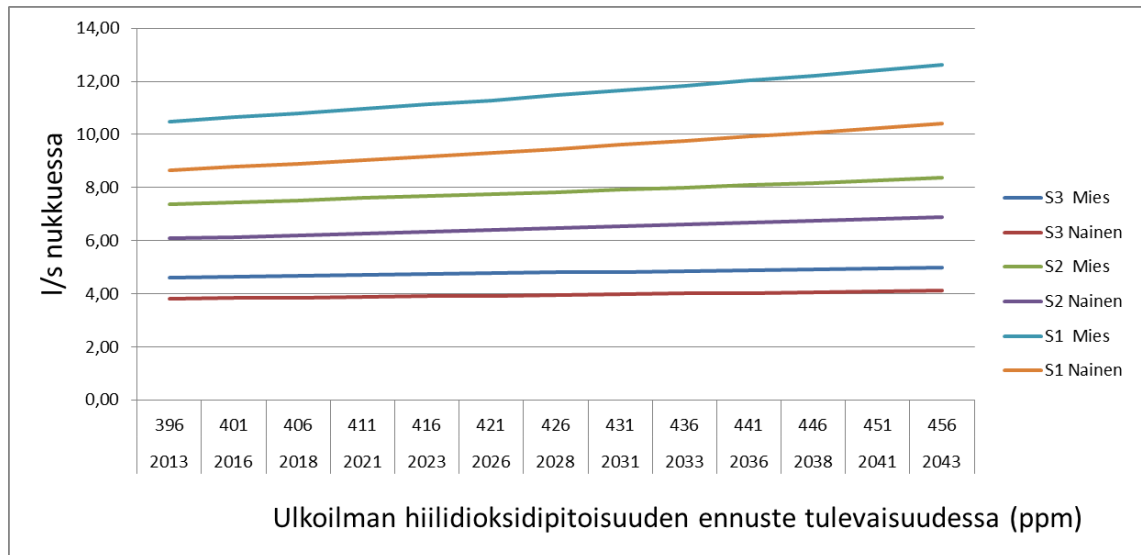
TAULUKKO 10. Ulkoilmavirrat hiilidioksidipitoisuuden tasapainotilassa miehellä ja naisella sisäilmaluokitusten S3, S2 ja S1 CO₂:n hiilidioksidipitoisuuksien maksimiarvoilla ja ulkoilman hiilidioksidipitoisuusarvolla 396 ppm

Aktiviteetti	Ilmanvaihdon ilmavirta tasapainotilassa, ulkoilman CO ₂ -pitoisuuden ollessa 396 ppm					
	S3 (l/s)		S2 (l/s)		S1 (l/s)	
	Mies	Nainen	Mies	Nainen	Mies	Nainen
Nukkuminen	4,62	3,81	7,37	6,08	10,49	8,65
Lepo, TV:n katselu	5,13	4,23	8,19	6,75	11,66	9,62
Istumatyö, kevyt toimistotyö	7,70	6,35	12,29	10,13	17,49	14,42
Kotiaskareet	10,27	8,47	16,38	13,51	23,32	19,23
Seisomatyö	12,84	10,59	20,48	16,89	29,15	24,04
Kevyt ruumiillinen työ	15,40	12,70	24,57	20,26	34,98	28,85
Ruumiillinen työ	20,54	16,94	32,76	27,02	46,64	38,47

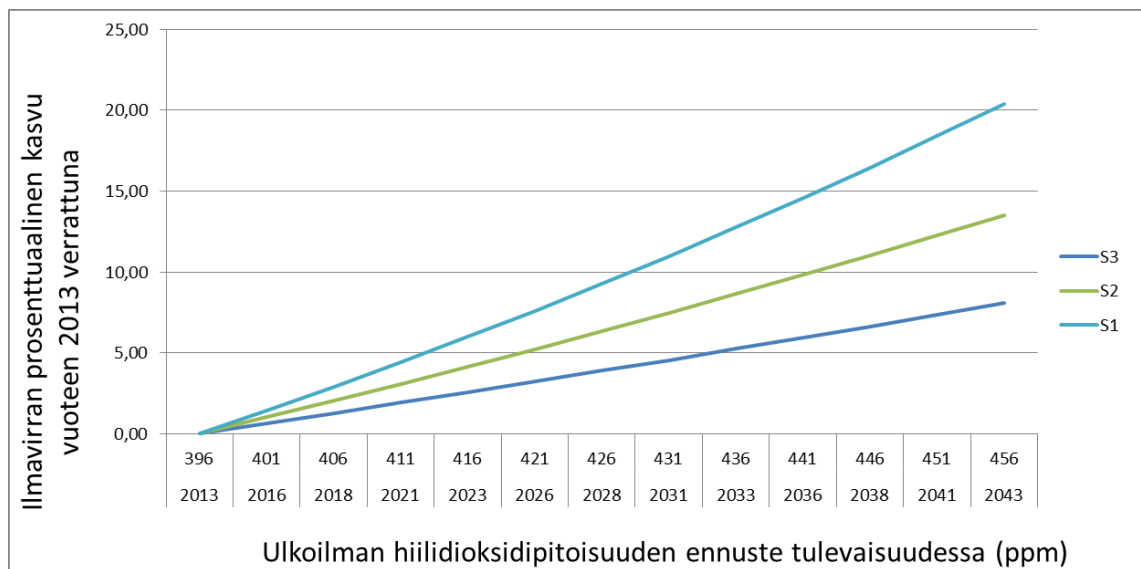
4.2 Hiilidioksidipitoisuuden nousun vaikutus tarpeenmukaisiin ulkoilmavirtoihin tulevaisuudessa

Kuviossa 15 on laskettuna ja esitettyä tarpeenmukaisten ilmavirtojen kasvua ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden noustessa tulevaisuudessa ennustetulla tavalla. Kuviossa 15 on laskettu ja esitetty ilmanvaihdon ilmavirrat sisäilmaluokituksen 2008 antamien hiilidioksidipitoisuuksien maksimiarvojen tasapainotilassa. Opinnäytetyön laskelmissa nykyinen ulkoilman hiilidioksiditaso on 396 ppm ja sen ennustetaan nousevan 2 ppm vuodessa. Ihmisen hiilidioksidin tuotto on taulukon 8 mukainen ja ilmavirrat taulukon 10 mukaisia lähtötilanteessa. Kuviossa 16 on laskettu sama asia kuin kuviossa 15, mutta siinä on esitetty ilmavirtojen prosentuaalinen kasvu muutoksen suuruuden ymmärtämiseksi.

Kuvioista 15–18 voidaan todeta, että tarpeenmukaisten ilmavirtojen kasvu on sitä suurempaa, mitä vaativammat sisäilman laatuvaatimukset ovat. Vaativammat sisäilmavaatimukset tarkoittavat sitä, että hiilidioksidipitoisuuden maksimitaso on alhaisempi ja ilmanvaihdon puhdistavuus pienempi kuin alhaisemmilla sisäilman laatuvaatimuksilla. Ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden noustessa ilmanvaihdon puhdistavuus pienenee ja vaativammissa sisäilmaluokissa prosentuaalinen muutos on suurempi.



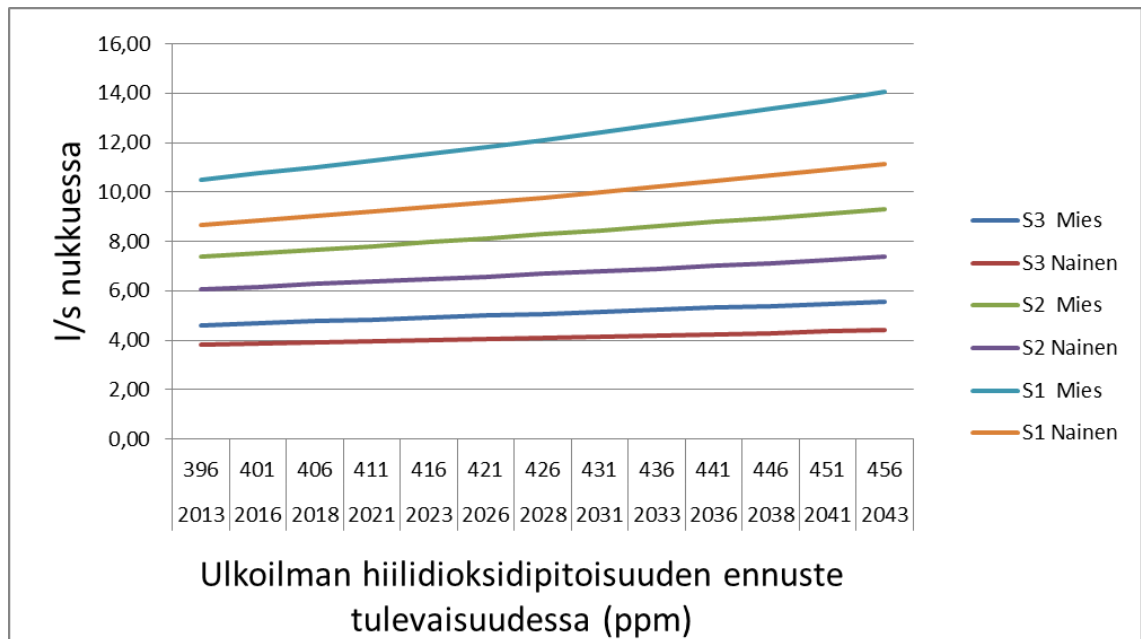
KUVIO 15. Ilmanvaihdon ilmavirrat Sisäilmastoluokituksen S3,S2 ja S1 hiilidioksidipitoisuuksien maksimiarvojen tasapainotilassa, kun ulkoilman hiilidioksidipitoisuus nousee ennustetulla tavalla tulevaisuudessa



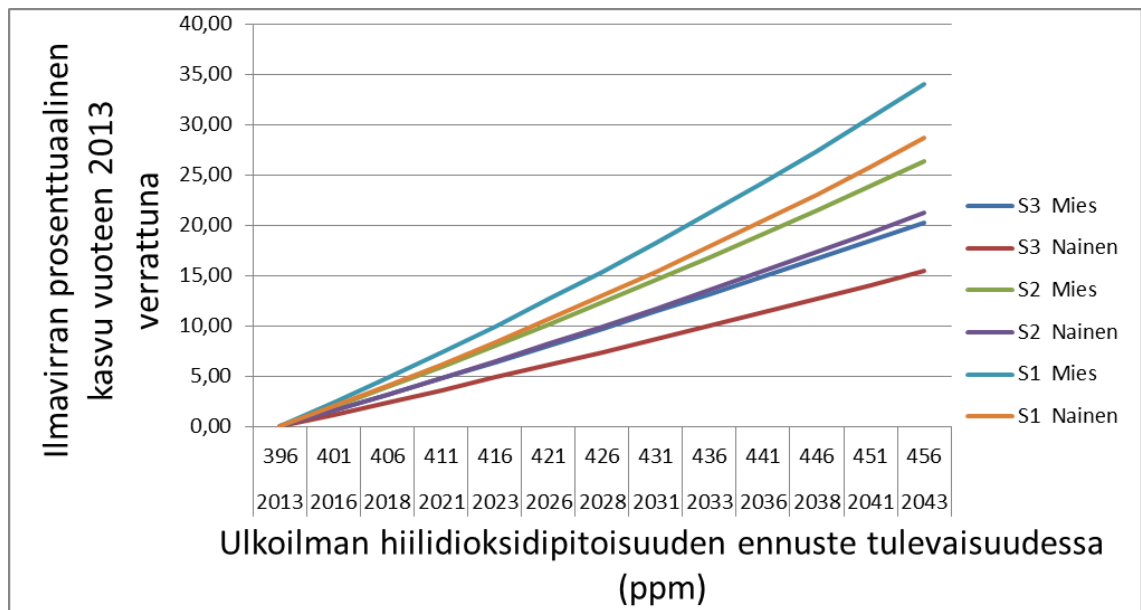
KUVIO 16. Ilmanvaihdon ilmavirran prosentuaalinen kasvu Sisäilmastoluokituksen S3,S2 ja S1 hiilidioksidipitoisuuksien maksimiarvojen tasapainotilassa, kun ulkoilman hiilidioksidipitoisuus nousee tulevaisuudessa ennustetulla tavalla, verrattuna vuoden 2013 pitoisuuteen

Kuviossa 17 on laskettuna ja esitettyä ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden nousun, suomalaisten keskipituuden kasvun ja keskipainon nousun vaikutukset tarpeenmukaisiin ulkoilmailmavirtoihin. Laskuissa on oletettu, että suomalaisten ruumiinrakenne muuttuu tulevaisuudessa samoin kuin viimeisen 30 vuoden aikana. Laskennalliset perusteet ovat samat kuin kuvioissa 15 ja 16. Kuviossa 18 on laskettu ja esitetty sama asia kuin kuvi-

ossa 17, mutta ilmavirtojen prosentuaalisena kasvuna muutoksen suuruuden ymmärtämiseksi.



KUVIO 17. Ilmanvaihdon ilmavirrat Sisäilmastoluokituksen S3,S2 ja S1 hiilidioksidipitoisuuksien maksimiarvojen tasapainotilassa, kun ulkoilman hiilidioksidipitoisuus nousee ennustetulla tavalla tulevaisuudessa ja suomalaisten keskimääräinen paino nousee tulevaisuudessa samoin kuin edellisen 30 vuoden aikana



KUVIO 18. Ilmanvaihdon ilmavirran prosentuaalinen kasvu Sisäilmastoluokituksen S3,S2 ja S1 hiilidioksidipitoisuuksien maksimiarvojen tasapainotilassa, kun ulkoilman hiilidioksidipitoisuus nousee tulevaisuudessa ennustetulla tavalla verrattuna vuoden 2013 hiilidioksidipitoisuuteen ja suomalaisten keskipainon noustessa edellisen 30 vuoden tavoin

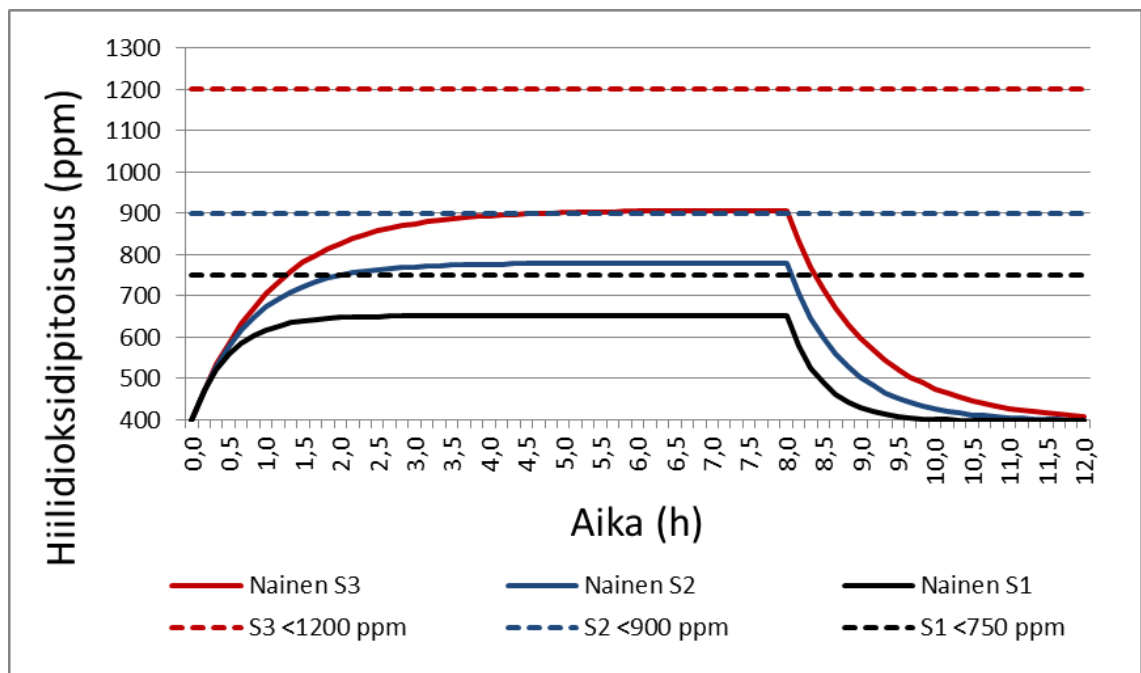
4.3 Makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuksien simulointia ja energialaskelmia

Makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuden simuloinnissa on käytetty yhtäjaksoisena kuormituksen pituutena kahdeksaa tuntia. Ihmisen hiilidioksidin tuotto on nukkuessa alhaisimmillaan.

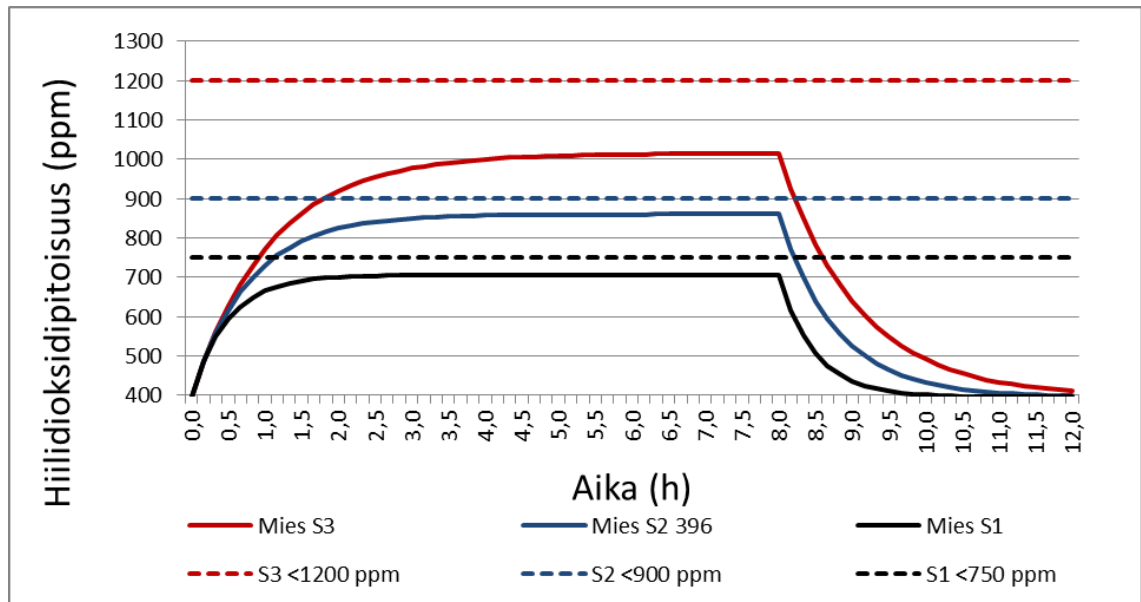
4.3.1 Vakioilmavirtatarkastelu makuuhuoneessa

Kuvioissa 19–21 on laskettuna ja simuloituna makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuksia Sisäilmaluokituksen 2008 antamilla ilmavirroilla tilassa vietetyn ajan funktiona. Huoneen koko on 10 m^2 ja tilavuus on 25 m^3 . Laskelmissa on käytetty ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden arvona 396 ppm ja ihmisten hiilidioksidin tuottoarvoina taulukon 8 arvoja. Tilan hiilidioksidipitoisuuksien maksimiarvot ja suositellut ulkoilmavirrat ovat taulukon 2 eli Sisäilmastoluokituksen 2008 mukaisia. Hiilidioksidipitoisuutta tilassa on simuloitu yhtälön (4) mukaan. Tilassa vietetyn yhtäjaksoisen ajan pituus on arvioitu kuvioiden 3–9 perusteella.

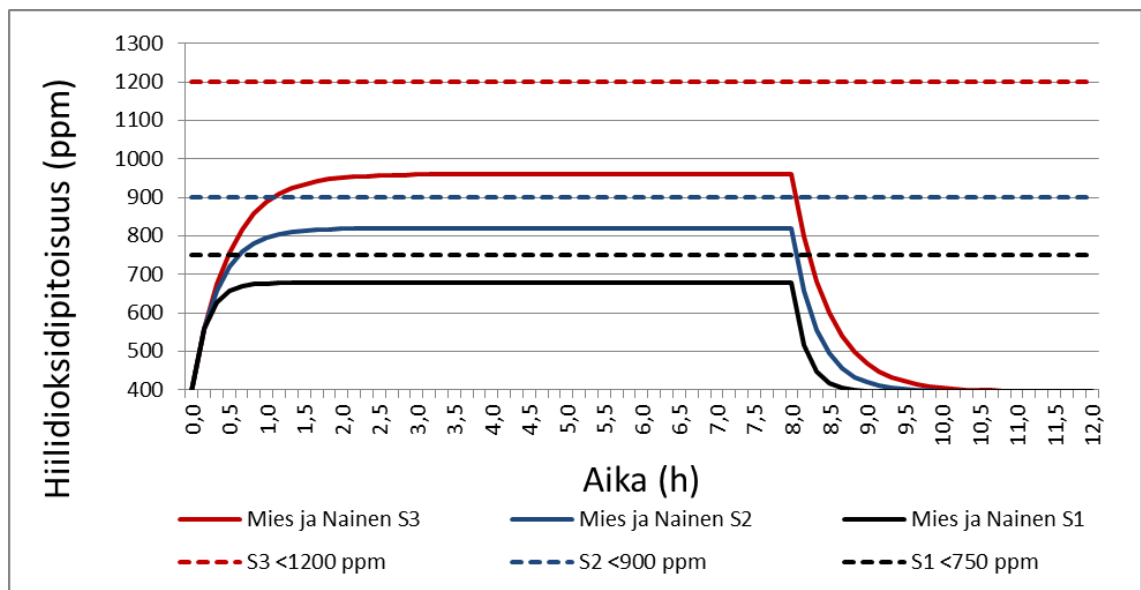
Kuvioista 19–21 voidaan todeta, että Sisäilmaluokituksen 2008 antamat ulkoilmavirrat ovat hieman ylivoimaisia makuuhuoneessa, sillä ihmisen hiilidioksidin tuotto on nukkuessa alhaisimmillaan. Hiilidioksidipitoisuus saavuttaa tasapainotilansa jo oleskelujakson alkupuolella, sillä makuuhuoneessa vietetään säännöllisesti pitkiä aikoja yhtäjaksoisesti. Tilan hiilidioksidipitoisuus pienenee nopeasti oleskelun päätyttyä tilassa. Hiilidioksidipitoisuuksien muutos on sitä nopeampaa, mitä suurempi kuormitus on suhteessa tilan kokoon.



KUVIO 19. Makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna vakioilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa yksistään nainen



KUVIO 20. Makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna vakioilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa yksistään mies



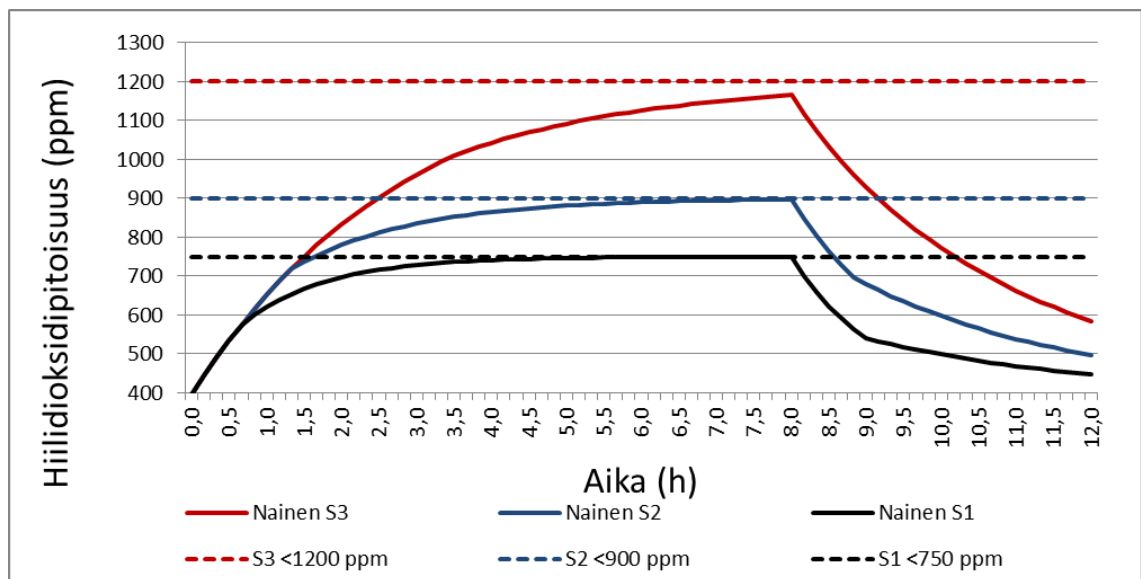
KUVIO 21. Makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna vakioilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa mies ja nainen

4.3.2 Tarpeenmukainen ilmavirtatarkastelu makuuhuoneessa

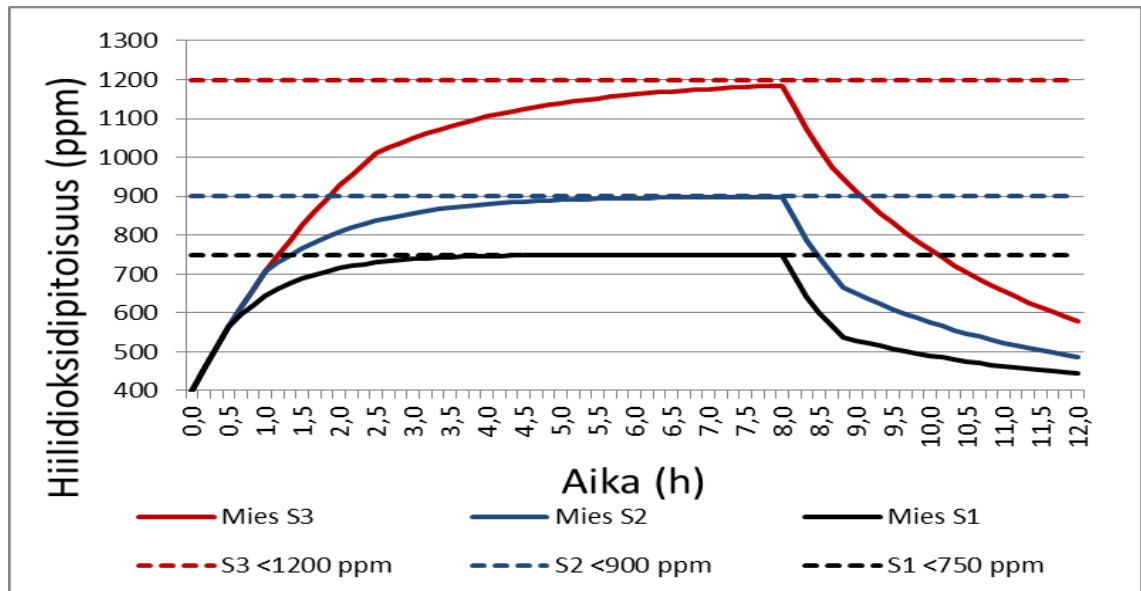
Kuvioissa 19–20 on laskettuna ja simuloituna makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuksia Sisäilmaluokituksen 2008 antamilla hiilidioksidipitoisuuksien maksimiarvoilla tilassa vietetyn ajan funktiona. Huoneen koko on 10 m^2 ja tilavuus on 25 m^3 . Laskelmissa on

käytetty ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden arvona 396 ppm ja ihmisten hiilidioksidin tuottoarvoina taulukon 8 arvoja. Hiilidioksidin maksimiarvot ovat taulukon 2 ja käyttöajan ulkoilmavirrat ovat taulukon 10 mukaisia. Käyttöajan ulkopuolinen ulkoilmavirta on $0,35 \text{ (dm}^3\text{/s)/m}^2$, joka vastaa ilmanvaihtokerrointa $0,5 \text{ 1/h}$ tilassa, jonka vapaa korkeus on $2,5 \text{ m}$. Hiilidioksidipitoisuutta tilassa on simuloitu yhtälön (4) mukaisesti. Tilassa vietetyn yhtäjaksoisen ajan pituus on arvioitu kuvioiden 3–7 perusteella. Tarpeenmukaisen ja käyttöajan ulkopuolisten ulkoilmavirtojen ohjaus tapahtuu yhtälön (5) mukaisesti.

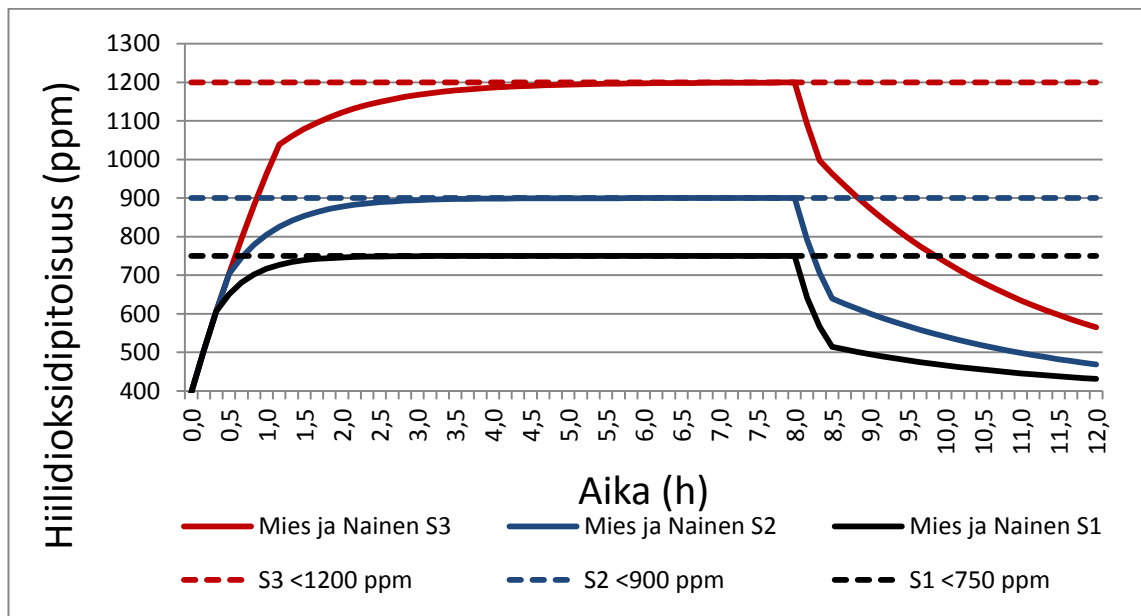
Kuvioiden 22–24 perusteella voidaan todeta, että hiilidioksidipitoisuus nousee nopeammin kuin vakiulkoilmavirroilla lähestyttäessä hiilidioksidipitoisuuden maksimiarvoa, mutta tarpeenmukaisen ulkoilmavirran tullessa päälle nousu hidastuu ja hiilidioksidipitoisuus saavuttaa vähitellen sille asetetun maksimiarvonsa. Hiilidioksidipitoisuuden muutos on sitä nopeampaa, mitä suurempi hiilidioksidikuormitus on suhteessa tilan kokoon.



KUVIO 22. Makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna tarpeenmukaisilla ilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa yksistään nainen



KUVIO 23. Makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna tarpeenmukaisilla ilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa yksistään mies



KUVIO 24. Makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna tarpeenmukaisilla ilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa mies ja nainen

4.3.3 Energiansäästön ja ilmanlaadun parannuspotentiaalit makuuhuoneessa

Taulukoiden 11–13 perusteella voidaan todeta, että makuuhuoneen ilmanvaihdsta löytyy energiansäästöpotentiaalia. Makuuhuoneen yhtäjaksoinen käyttöaika on asuinrakenn-

nuksissa pisin, mutta silti noin kahtena kolmasosana ajasta siellä ei oleskele ketään. Lapsiperheissä makuuhuoneen käyttöaste voi olla hyvin toisenkinlainen, mutta lasten paino ja näin ollen hiilidioksidinkin tuotto on tilassa paljon vähäisempää kuin aikuisella. Käyttöajan ulkopuoliset ilmanvaihtovirrat ovat pienessä makuuhuoneessa noin puolet sisäilmaluokituksen antamista henkilöperusteisista ilmavirroista heikoimmallakin sisäilmaluokituksella (S3). Käyttöajan tarpeenmukainen ilmanvaihtovirta on pienehkö makuuhuoneessa, johtuen nukkumisen aikaisesta vähäisestä hiilidioksidin tuotosta. Suurin säästöpotentiaali löytyy makuuhuoneista, joissa nukkuu useampi kuin yksi aikuinen henkilö ja sisäilman laatuvaatimus on korkea.

Ilmanlaadun kannalta taulukoista 11–13 voidaan todeta, että tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla voidaan saavuttaa sisäilmaluokan S1 mukainen ilmanlaatu vakioilmavirtaisen sisäilmaluokan S3 energiankulutuksella. Makuuhuoneessa ilmanlaatu pysyy hyvänä Sisäilmaluokituksen 2008 antamalla vakioulkoilmavirroillaakin, sillä ilmavirrat ovat hieman ylimitoitettuja suhteessa ihmisen nukkumisen aikaiseen hiilidioksidin tuottoon.

TAULUKKO 11. Naisen makuuhuoneen tarpeenmukaisen ilmanvaihdon energiansäästöpotentiaalit

Makuuhuone	Nainen		
	S3	S2	S1
Käyttöajan iv päällä (min/d)	310	450	500
Käyttöajan iv päällä (h/d)	5,2	7,5	8,3
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (min/d)	1130	990	940
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (h/d)	18,8	16,5	15,7
Käyttöajan iv (m ³ /s)	0,00381	0,00608	0,00865
Käyttöajan ulkopuolinen iv (m ³ /s)	0,00350	0,00350	0,00350
Lämmitystarveluku Hesinki-Vantaa, S17 (Kd)	3952	3952	3952
Energian kulutus tarpeenmukaisella IV:llä (kWh)	406	490	602
Energian kulutus vakioilmavirroilla (kWh/a)	683	911	1366
Säästö energiassa (kWh)	277	420	764
Säästö prosenteissa (%)	41	46	56

TAULUKKO 12. Miehen makuuhuoneen tarpeenmukaisen ilmanvaihdon energiansäästöpotentiaalit

Makuuhuone	Mies		
	S3	S2	S1
Käyttöajan iv päällä (min/d)	370	470	500
Käyttöajan iv päällä (h/d)	6,2	7,8	8,3
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (min/d)	1070	970	940
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (h/d)	17,8	16,2	15,7
Käyttöajan iv (m ³ /s)	0,00462	0,00737	0,01049
Käyttöajan ulkopuolinen iv (m ³ /s)	0,00350	0,00350	0,00350
Lämmitystarveluku Hesinki-Vantaa, S17 (Kd)	3952	3952	3952
Energian kulutus tarpeenmukaisella IV:llä (kWh/ a)	431	542	675
Energian kulutus vakioilmavirroilla (kWh/ a)	683	911	1366
Säästö energiassa (kWh)	252	368	691
Säästö prosenteissa (%)	37	40	51

TAULUKKO 13. Miehen ja naisen makuuhuoneen tarpeenmukaisen ilmanvaihdon energiansäästöpotentiaalit

Makuuhuone	Mies ja Nainen		
	S3	S2	S1
Käyttöajan iv päällä (min/d)	430	480	490
Käyttöajan iv päällä (h/d)	7,2	8,0	8,2
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (min/d)	1010	960	950
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (h/d)	16,8	16,0	15,8
Käyttöajan iv (m ³ /s)	0,00843	0,01345	0,01915
Käyttöajan ulkopuolinen iv (m ³ /s)	0,00350	0,00350	0,00350
Lämmitystarveluku Hesinki-Vantaa, S17 (Kd)	3952	3952	3952
Energian kulutus tarpeenmukaisella IV:llä (kWh/ a)	566	776	1004
Energian kulutus vakioilmavirroilla (kWh/ a)	1366	1821	2732
Säästö energiassa (kWh)	800	1045	1727
Säästö prosenteissa (%)	59	57	63

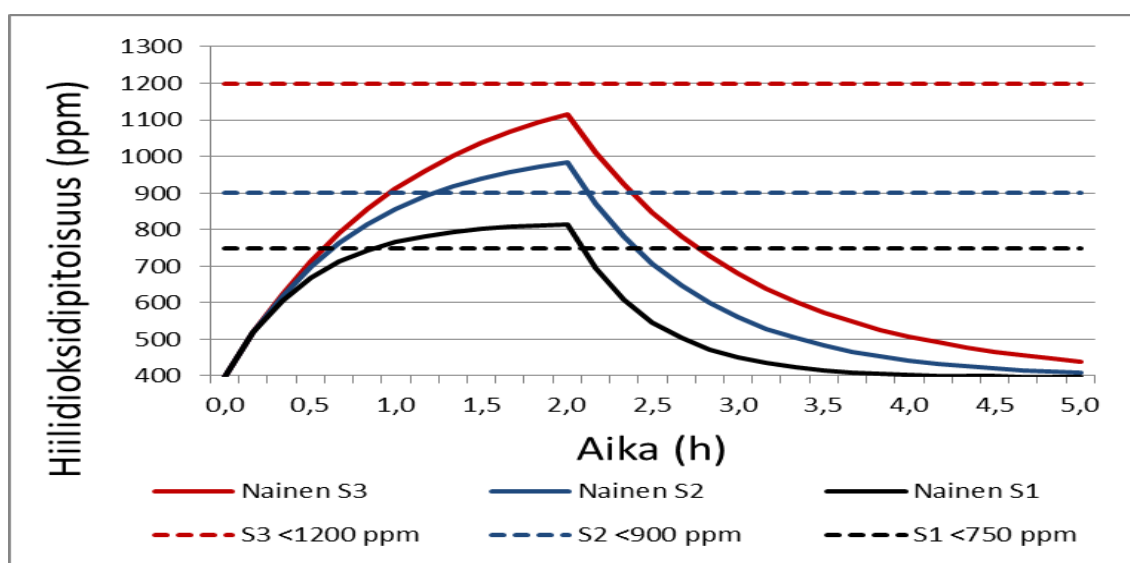
4.4 Työhuoneen hiilidioksidipitoisuuksien simulointia ja energialaskelmia

Työhuoneen hiilidioksidipitoisuuden simuloinnissa on käytetty yhtäjaksoisena kuormituksen pituutena kahta tuntia.

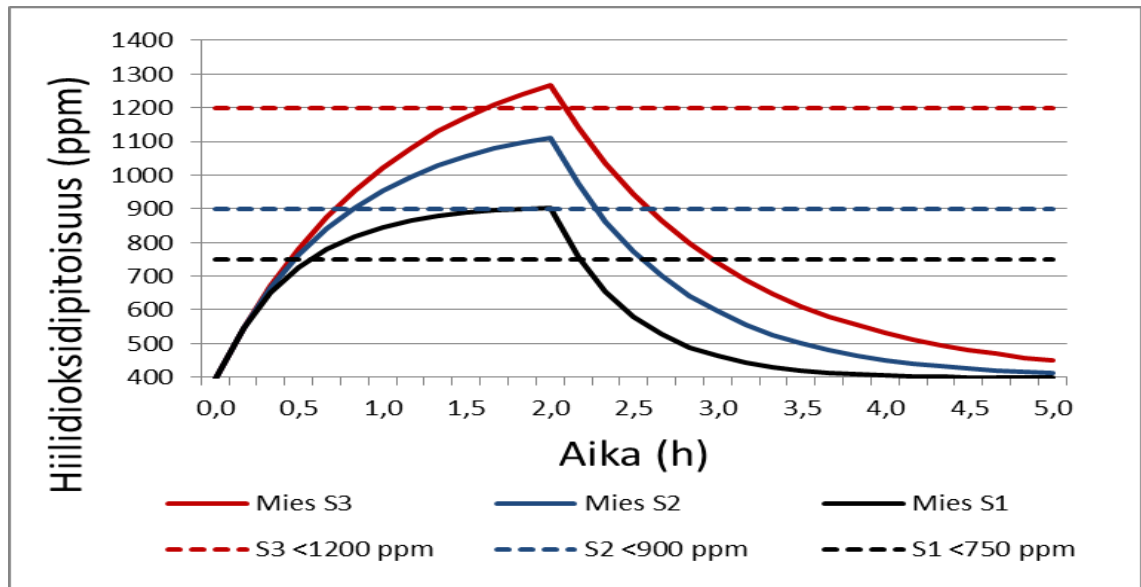
4.4.1 Vakioilmavirtatarkastelu työhuoneessa

Kuvioissa 25–27 on laskettuna ja simuloituna työhuoneen hiilidioksidipitoisuuksia Sisäilmaluokituksen 2008 antamilla ilmavirroilla tilassa vietetyn ajan funktiona. Huoneen koko on 10 m^2 ja tilavuus on 25 m^3 . Laskelmissa on käytetty ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden arvona 396 ppm ja ihmisten hiilidioksidin tuottoarvoina taulukon 8 arvoja. Tilan hiilidioksidipitoisuuksien maksimi-arvot ja suositellut ulkoilmavirrat ovat taulukon 2 eli Sisäilmastoluokituksen 2008 mukaisia. Hiilidioksidipitoisuutta tilassa on simuloitu yhtälön (4) mukaan. Tilassa vietetyn yhtäjaksoisen ajan pituus on arvioitu kuvioiden 3–9 perusteella.

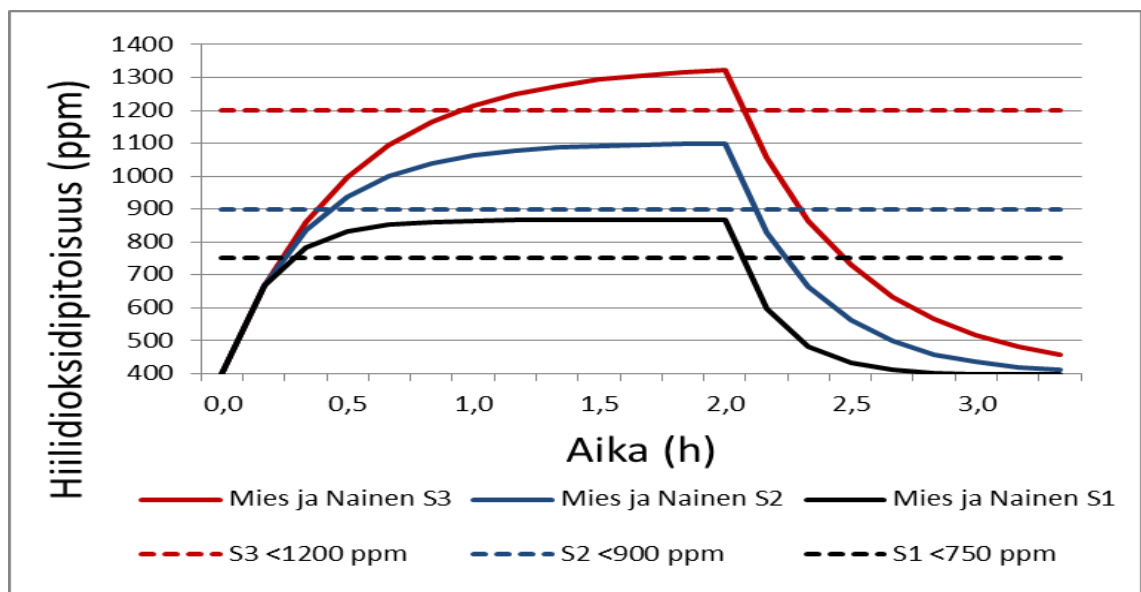
Kuvioiden 25–27 perusteella voidaan todeta, että tilassa vietetty yhtämittainen ajanjakso on melko lyhyt ja hiilidioksidipitoisuus ei ehdi saavuttamaan tasapainotilaansa. Sisäilmaluokituksen antamat ilmavirrat ovat kohtuullisen hyvin kohdallaan naisella, mutta jos mies tai mies ja nainen yhdessä työskentelevät huoneessa kahdentunnin ajan, niin hiilidioksidipitoisuudelle annetut maksimi-arvot ylittyvät huomattavasti. Miehen ja naisen työskennellessä yhdessä työhuoneessa myös tilan koolla on huomattava vaikutus siihen ehtiikö hiilidioksidipitoisuus nousemaan liiallisen korkeaksi tasapainotilaansa. Kuvioiden 25–27 ja taulukon 9 perusteella voidaan todeta, että Sisäilmaluokituksen 2008 ulkoilmavirrat ovat liian pienet kevyessä toimistotyöskentelyssä. Ilmavirrat ovat liian pienet myös, jos työhuoneessa opiskellaan tai työskennellään hieman pidempään tai jopa täysipäiväisesti kotitoimiston tyyliä.



KUVIO 25. Työhuoneen hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna vakioilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa yksistään nainen



KUVIO 26. Työhuoneen hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna vakioilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa yksistään mies



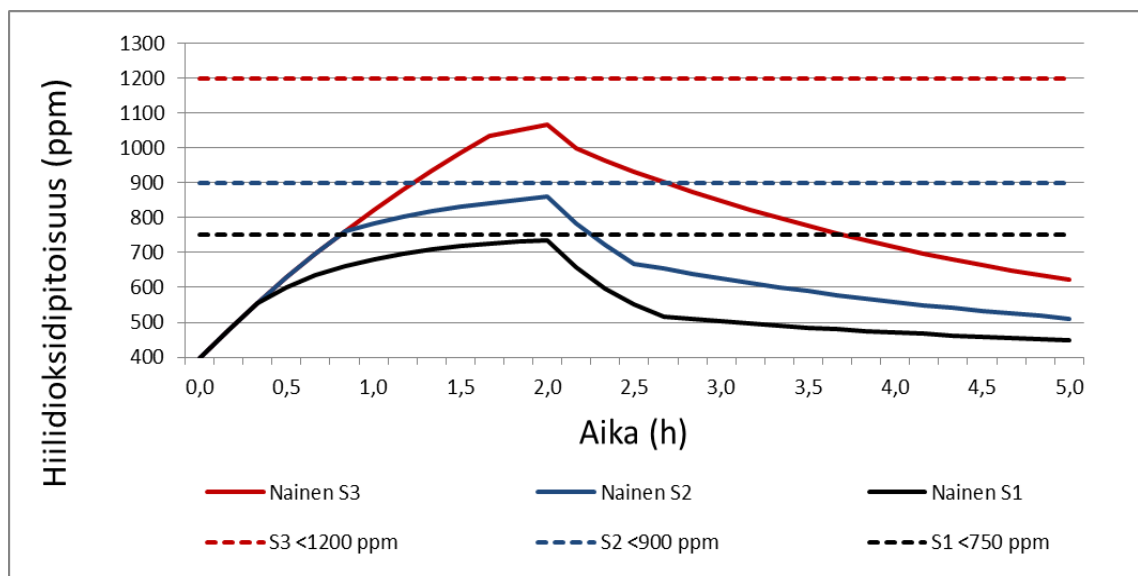
KUVIO 27. Työhuoneen hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna vakioilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa mies ja nainen

4.4.2 Tarpeenmukainen ilmavirtatarkastelu työhuoneessa

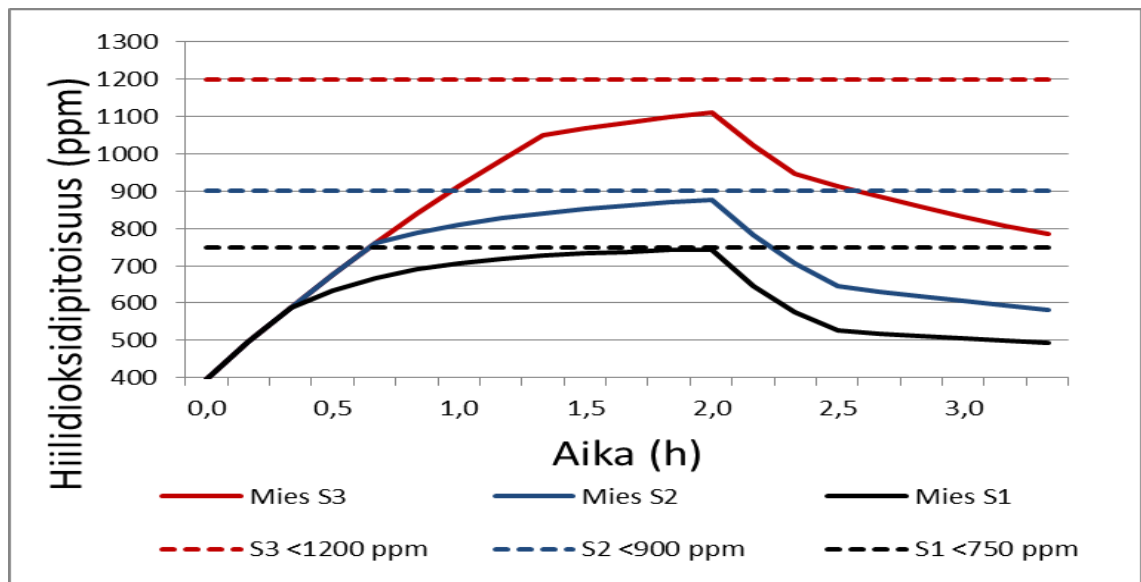
Kuvioissa 28–30 on laskettuna ja simuloituna työhuoneen hiilidioksidipitoisuuksia Sisäilmaluokituksen 2008 antamilla hiilidioksidipitoisuuksien maksimiarvoilla tilassa vietetyn ajan funktiona. Huoneen koko on 10 m^2 ja tilavuus on 25 m^3 . Laskelmissa on käytetty ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden arvona 396 ppm ja ihmisten hiilidioksidin

tuottoarvoina taulukon 8 arvoja. Hiilidioksidipitoisuuksien maksimiarvot ovat taulukon 2 mukaisia ja käyttöajan ulkoilmavirrat ovat taulukon 10 mukaisia. Käyttöajan ulkopuolinen ulkoilmavirta on $0,35 \text{ (dm}^3\text{/s)/m}^2$, joka vastaa ilmanvaihtokerrointa $0,5 \text{ 1/h}$ tilassa, jonka vapaa korkeus on $2,5 \text{ m}$. Hiilidioksidipitoisuutta tilassa on simuloitu yhtälön (4) mukaan. Tilassa vietetyn yhtäjaksoisen ajan pituus on arvioitu kuvioden 3-7 perusteella. Tarpeenmukaisten ja käyttöajan ulkopuolisten ulkoilmavirtojen ohjaus tapahtuu yhtälön (5) mukaisesti.

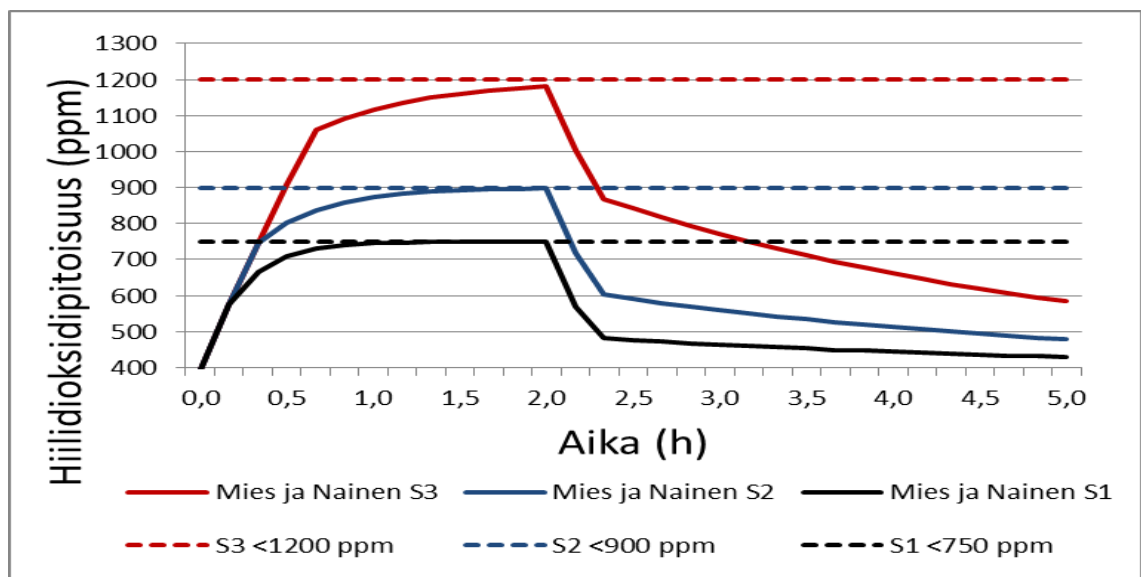
Kuvioden 28–30 perusteella voidaan todeta, että tarpeenmukaisen ulkoilmavirran tarpeen kesto on melko lyhytaikaista vuorokaudessa johtuen lyhyestä käyttöajasta. Käyttöajan ulkopuolinen ajanjakso on hyvinkin pitkä, jolloin energiansäästön potentiaali on hyvin suuri.



KUVIO 28. Työhuoneen hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna tarpeenmukaisilla ilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa yksistään nainen



KUVIO 29 Työhuoneen hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna tarpeenmukaisilla ilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa yksistään mies



KUVIO 30. Työhuoneen hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna tarpeenmukaisilla ilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa mies ja nainen

4.4.3 Energiensäästön ja ilmanlaadun parannuspotentiaalit työhuoneessa

Taulukoiden 14–16 perusteella voidaan todeta, että työhuoneen ilmanvaihdossa on energiansäästöpotentiaalia alkuperäisestä ilmanlaadusta silti tinkimättä. Tilan yhtäjaksoinen käyttöaika on melko lyhyttä normaalissa kotikäytössä, esimerkiksi kun opiskellaan, käytetään tietokonetta tai tehdään tilapäisesti ja hetkellisesti töitä kotona. Jos työhuonetta käytetään kotitoimistona ja siellä tehdään töitä kahdeksan tuntia päivässä, niin energiansäästöpotentiaalin mahdollisuus pienenee huomattavasti.

Ilmanlaadun kannalta taulukoiden 14–16 perusteella voidaan todeta, että tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla sisäilmaluokan S1 ilmanlaatuksen saavuttaminen vakioilmavirtaisen sisäilmaluokan S3 energiankulutuksella on mahdollista. Jos työhuoneen käyttö on taulukon 16 kaltaista ja sisäilmanlaadun halutaan olevan sisäilmaluokituksen S1 mukaista, niin sen voi saavuttaa jopa puolella vakioilmavirtaisen S3 energiankulutuksella. Sisäilmaluokituksen antamalla vakioulkoihmavirroilla jo kahden tunnin yhtäjaksoisella käytöllä hiilidioksidipitoisuuksien maksimiarvot ylittyvät kohtalaisesti, vaikka hiilidioksidipitoisuus ei ole edes saavuttanut tasapainotilaansa. Taulukon 9 perusteella voidaan todeta, mihin arvoon hiilidioksidipitoisuus asettuu pidemmällä yhtäjaksoisella käytöllä vakioulkoihmavirroilla, esimerkiksi käyttäessä työhuonetta kotitoimistona.

TAULUKKO 14. Naisen työhuoneen tarpeenmukaisen ilmanvaihdon energiansäästöpotentiaalit

Työhuone	Nainen		
	S3	S2	S1
Käyttöajan iv päällä (min/d)	30	100	140
Käyttöajan iv päällä (h/d)	0,5	1,7	2,3
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (min/d)	1410	1340	1300
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (h/d)	23,5	22,3	21,7
Käyttöajan iv (m ³ /s)	0,00635	0,01013	0,01442
Käyttöajan ulkopuolinen iv (m ³ /s)	0,00350	0,00350	0,00350
Lämmitystarveluku Hesinki-Vantaa, S17 (Kd)	3952	3952	3952
Energian kulutus tarpeenmukaisella IV:llä (kWh)	405	451	519
Energian kulutus vakioilmavirroilla (kWh/ a)	683	911	1366
Säästö energiassa (kWh)	278	460	847
Säästö prosenteissa (%)	41	50	62

TAULUKKO 15. Miehen työhuoneen tarpeenmukaisen ilmanvaihdon energiansäästö-
potentiaalit

Työhuone	Mies		
	S3	S2	S1
Käyttöajan iv päällä (min/d)	60	110	130
Käyttöajan iv päällä (h/d)	1,0	1,8	2,2
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (min/d)	1380	1330	1310
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (h/d)	23,0	22,2	21,8
Käyttöajan iv (m ³ /s)	0,00770	0,01229	0,01749
Käyttöajan ulkopuolinen iv (m ³ /s)	0,00350	0,00350	0,00350
Lämmitystarveluku Hesinki-Vantaa, S17 (Kd)	3952	3952	3952
Energian kulutus tarpeenmukaisella IV:llä (kWh/ a)	418	475	542
Energian kulutus vakioilmavirroilla (kWh/ a)	683	911	1366
Säästö energiassa (kWh)	265	436	824
Säästö prosenteissa (%)	39	48	60

TAULUKKO 16. Miehen ja naisen työhuoneen tarpeenmukaisen ilmanvaihdon energi-
ansäästöpotentiaalit

Työhuone	Mies ja Nainen		
	S3	S2	S1
Käyttöajan iv päällä (min/d)	100	120	130
Käyttöajan iv päällä (h/d)	1,7	2,0	2,2
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (min/d)	1340	1320	1310
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (h/d)	22,3	22,0	21,8
Käyttöajan iv (m ³ /s)	0,01405	0,02242	0,03192
Käyttöajan ulkopuolinen iv (m ³ /s)	0,00350	0,00350	0,00350
Lämmitystarveluku Hesinki-Vantaa, S17 (Kd)	3952	3952	3952
Energian kulutus tarpeenmukaisella IV:llä (kWh/ a)	482	578	690
Energian kulutus vakioilmavirroilla (kWh/ a)	1366	1821	2732
Säästö energiassa (kWh)	884	1243	2041
Säästö prosenteissa (%)	65	68	75

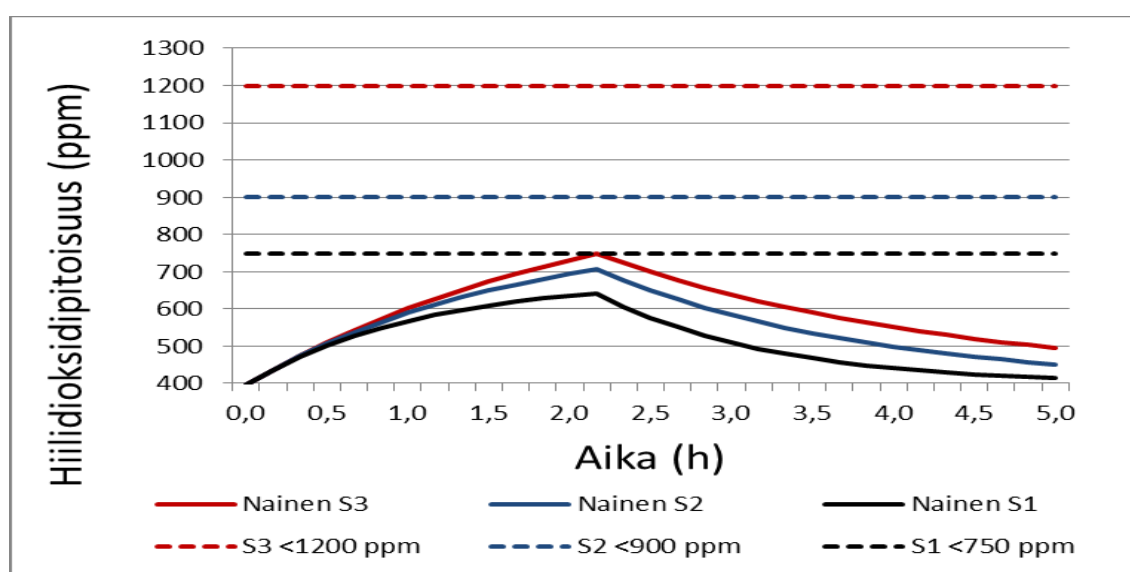
4.5 Olohuoneen hiilidioksidipitoisuuksien simulointia ja energialaskelmia

Olohuoneen hiilidioksidipitoisuuden simuloinnissa on käytetty yhtäjaksoisena kuormi-
tuksen pituutena kahta tuntia ja kymmentä minuuttia.

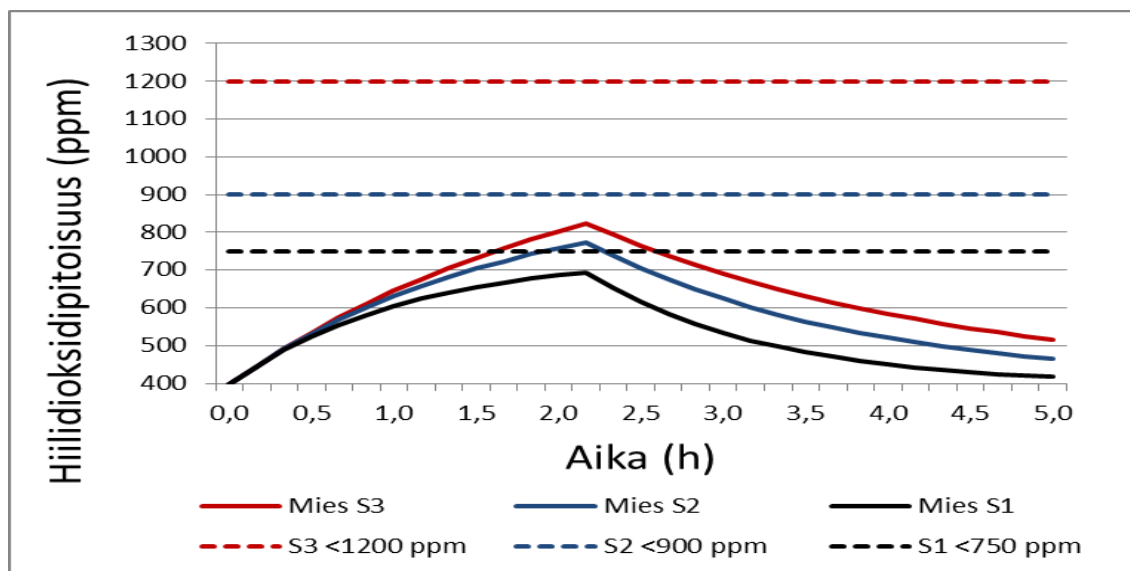
4.5.1 Vakioilmavirtatarkastelu olohuoneessa

Kuviossa 31–33 on laskettuna ja simuloituna olohuoneen hiilidioksidipitoisuuksia Sisäilmaluokituksen 2008 antamalla ilmavirroilla tilassa vietetyn ajan funktiona. Huoneen koko on 20 m^2 ja tilavuus on 50 m^3 . Laskelmissa on käytetty ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden arvona 396 ppm ja ihmisten hiilidioksidin tuottoarvoina taulukon 8 arvoja. Hiilidioksidipitoisuuksien maksimiarvot ja suositellut ulkoilmavirrat ovat taulukon 2 eli Sisäilmastoluokituksen 2008 mukaisia. Hiilidioksidipitoisuutta tilassa on simuloitu yhtälön (4) mukaan. Tilassa vietetyn yhtäjaksoisen ajan pituus on arvioitu kuvioden 3–9 perusteella.

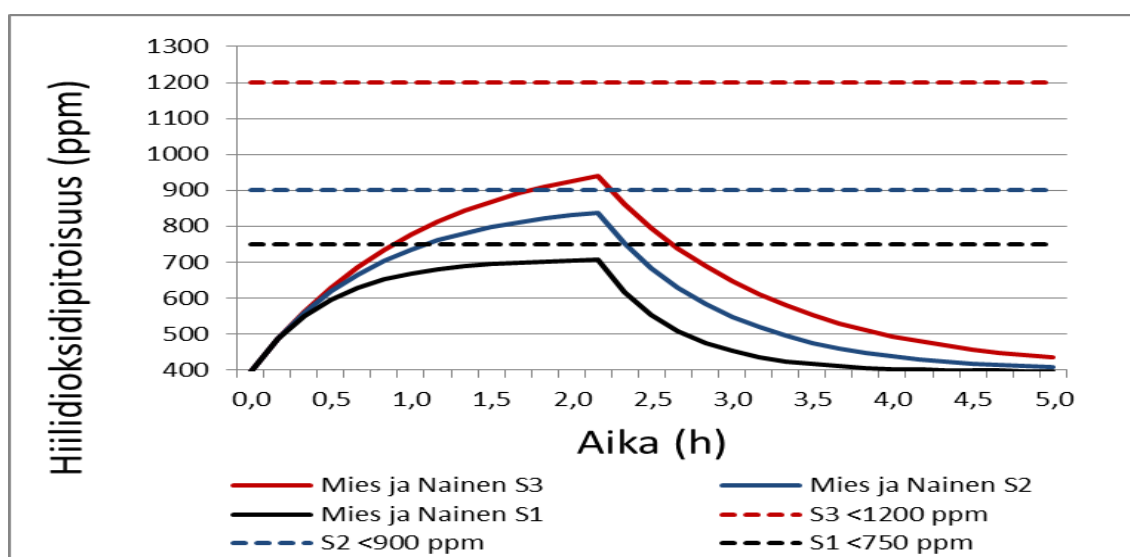
Kuvioden 31–33 perusteella voidaan todeta, että tilan koko on suuri ja tilan yhtäjaksoinen käyttö on lyhyttä verrattuna hiilidioksidin tuoton määrään, joten hiilidioksidipitoisuudet eivät ehdi nousta korkeiksi ja saavuttaa tasapainotilaansa. Sisäilmaluokituksen 2008 antamat henkilöperusteiset ulkoilmavirrat ovat siis tarpeettoman suuret olohuoneessa suhteessa sen käytön pituuteen.



KUVIO 31. Olohuoneen hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna vakioilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa yksistään nainen



KUVIO 32. Olohuoneen hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna vakioilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa yksistään mies



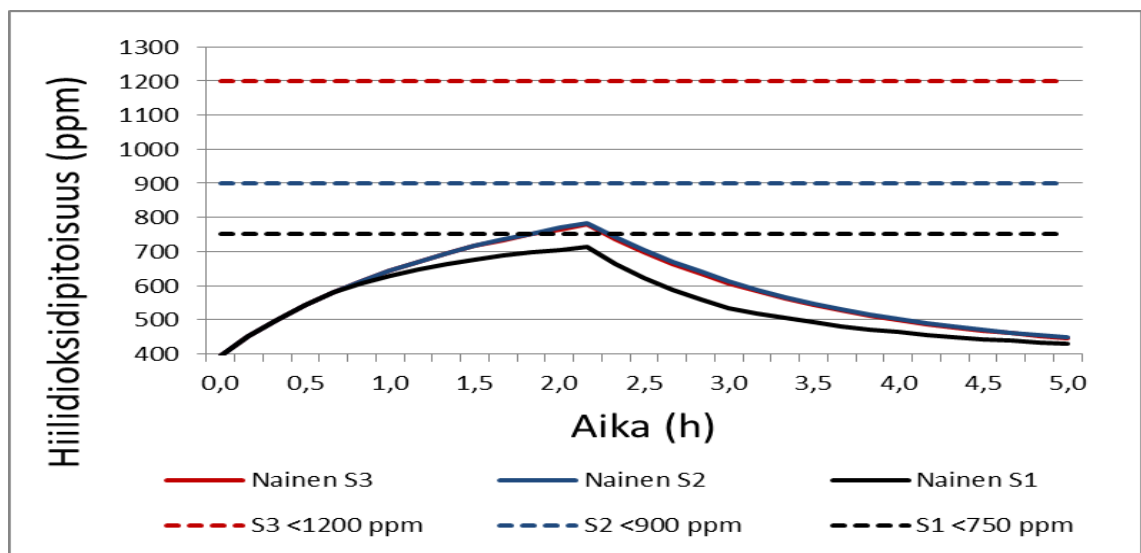
KUVIO 33. Olohuoneen hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna vakioilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa mies ja nainen

4.5.2 Tarpeenmukainen ilmavirtatarkastelu olohuoneessa

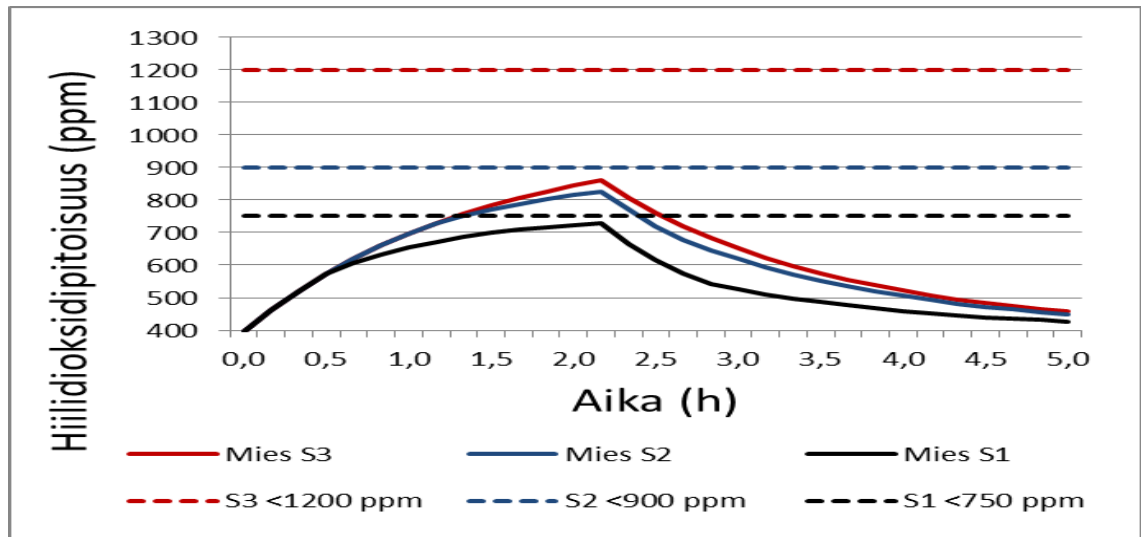
Kuviossa 34–36 on laskettuna ja simuloituna olohuoneen hiilidioksidipitoisuuksia sisäilmaluokituksen 2008 antamilla hiilidioksidipitoisuuksien maksimiarvoilla tilassa vietetyn ajan funktiona. Huoneen koko on 20 m^2 ja tilavuus on 50 m^3 . Laskelmissa on käytetty ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden arvona 396 ppm ja ihmisten hiilidioksidin tuottoarvoina taulukon 8 arvoja. Hiilidioksidipitoisuuksien maksimiarvot ovat taulukon

2 mukaisia ja käyttöajan ulkoilmavirta-arvot ovat taulukon 10 mukaisia. Käyttöajan ulkopuolinen ulkoilmavirta on $0,35 \text{ (dm}^3\text{/s)/m}^2$, joka vastaa ilmanvaihtokerrointa $0,5 \text{ 1/h}$ tilassa, jonka vapaa korkeus on $2,5 \text{ m}$. Hiilidioksidipitoisuutta tilassa on simuloitu yhtälön (4) mukaan. Tilassa vietetyn yhtäjaksoisen ajan pituus on arvioitu kuvioiden 3–9 perusteella. Tarpeenmukaisten ja käyttöajan ulkopuolisten ulkoilmavirtojen ohjaus tapahtuu yhtälön (5) mukaisesti.

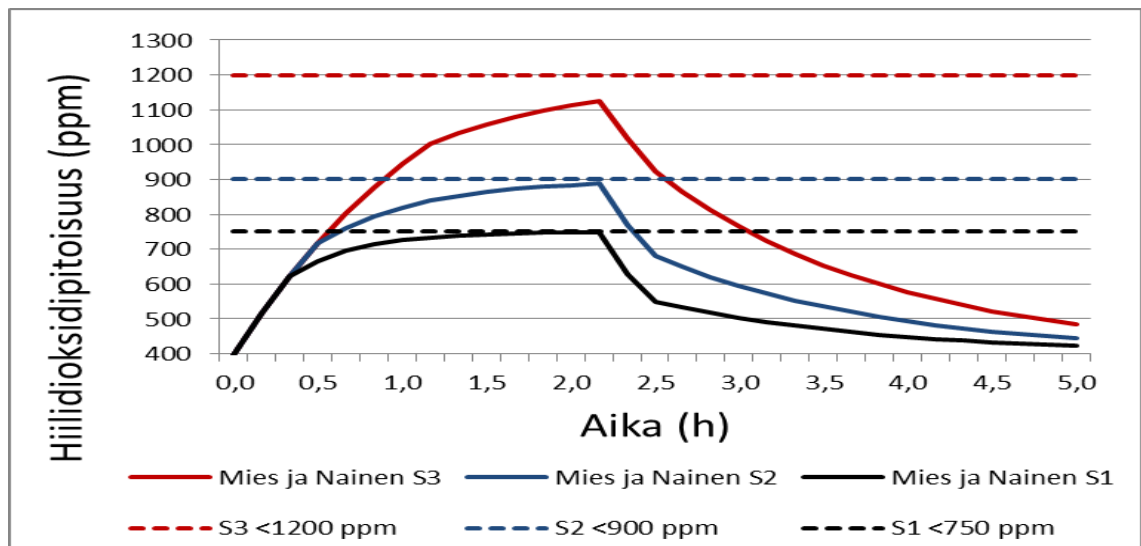
Kuvioiden 34–36 perusteella voidaan todeta, että tarpeenmukaisen ulkoilmavirran tarpeen kesto on melko lyhytaikaista vuorokaudessa johtuen lyhyestä käyttöajasta ja melkein hyödytöntä sisäilmanlaadun parantamisen kannalta. Käyttöajan ulkopuolinen ajanjakso on hyvinkin pitkä, jolloin energiansäästön potentiaali on hyvin suuri.



KUVIO 34. Olohuoneen hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna tarpeenmukaisilla ilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa yksistään nainen



KUVIO 35. Olohuoneen hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna tarpeenmukaisilla ilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa yksistään mies



KUVIO 36. Olohuoneen hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna tarpeenmukaisilla ilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa mies ja nainen

4.5.3 Energiensäästön ja ilmanlaadun parannuspotentiaalit olohuoneessa

Taulukoiden 17–19 perusteella voidaan todeta, että olohuoneen ilmanvaihdesta löytyy energiansäästönpotentiaalia. Olohuone on tilana yleensä kohtuullisen suuri suhteessa hiilidioksidin tuottoon ja tilassa vietetty yhtäjaksoinen aika on melko lyhytkestoista.

Ilman laadun kannalta taulukoiden 17–19 perusteella voidaan todeta, että tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla sisäilmaluokan S1 ilmanlaatutason saavuttaminen vakioilmavirtaisen sisäilmaluokan S3 energiankulutuksella on mahdollista. Ilmanlaatua tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla ei oikeastaan näin lyhyillä yhtäjaksoisilla käyttötunneilla voida parantaa, sillä hiilidioksidin tuotto on suhteessa tilan kokoon nähden vähäistä. Jos tilaa käytettäisiin yhtäjaksoisesti pidempiä aikoja ja siellä olisi useita ihmisiä eli hiilidioksidin tuottoa olisi runsaasti suhteessa tilan kokoon, voisi ilmanlaadullisia parannuksia saavuttaa olohuoneessa.

TAULUKKO 17. Naisen olohuoneen ilmanvaihdon energiansäästöpotentiaalit

Olohuone	Nainen		
	S3	S2	S1
Käyttöajan iv päällä (min/d)	0	70	140
Käyttöajan iv päällä (h/d)	0,0	1,2	2,3
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (min/d)	1440	1370	1300
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (h/d)	24,0	22,8	21,7
Käyttöajan iv (m ³ /s)	0,00423	0,00675	0,00962
Käyttöajan ulkopuolinen iv (m ³ /s)	0,00350	0,00350	0,00350
Lämmitystarveluku Hesinki-Vantaa, S17 (Kd)	3952	3952	3952
Energian kulutus tarpeenmukaisella IV:illä (kWh)	398	416	466
Energian kulutus vakioilmavirroilla (kWh/ a)	683	911	1366
Säästö energiassa (kWh)	285	494	900
Säästö prosenteissa (%)	42	54	66

TAULUKKO 18. Miehen olohuoneen ilmanvaihdon energiansäästöpotentiaalit

Olohuone	Mies		
	S3	S2	S1
Käyttöajan iv päällä (min/d)	0	90	140
Käyttöajan iv päällä (h/d)	0,0	1,5	2,3
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (min/d)	1440	1350	1300
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (h/d)	24,0	22,5	21,7
Käyttöajan iv (m ³ /s)	0,00513	0,00819	0,01166
Käyttöajan ulkopuolinen iv (m ³ /s)	0,00350	0,00350	0,00350
Lämmitystarveluku Hesinki-Vantaa, S17 (Kd)	3952	3952	3952
Energian kulutus tarpeenmukaisella IV:illä (kWh)	398	432	489
Energian kulutus vakioilmavirroilla (kWh/ a)	683	911	1366
Säästö energiassa (kWh)	285	479	877
Säästö prosenteissa (%)	42	53	64

TAULUKKO 19. Miehen ja naisen olohuoneen ilmanvaihdon energiansäästöpotentiaalit

Olohuone	Mies ja Nainen		
	S3	S2	S1
Käyttöajan iv päällä (min/d)	80	120	130
Käyttöajan iv päällä (h/d)	1,3	2,0	2,2
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (min/d)	1360	1320	1310
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (h/d)	22,7	22,0	21,8
Käyttöajan iv (m ³ /s)	0,00937	0,01494	0,02128
Käyttöajan ulkopuolinen iv (m ³ /s)	0,00350	0,00350	0,00350
Lämmitystarveluku Hesinki-Vantaa, S17 (Kd)	3952	3952	3952
Energian kulutus tarpeenmukaisella IV:llä (kWh)	435	507	581
Energian kulutus vakioilmavirroilla (kWh/ a)	1366	1821	2732
Säästö energiassa (kWh)	930	1314	2151
Säästö prosenteissa (%)	68	72	79

4.6 Keittiön hiilidioksidipitoisuuksien simulointia ja energialaskelmia

Keittiön hiilidioksidipitoisuuden simuloinnissa käytetty yhtäjaksoisena kuormituksen pituutena on 1,5 tuntia. Mahdollista liesituulettimen tai liesikuvun käyttöä ei ole hiilidioksidipitoisuuden simuloinneissa huomioitu.

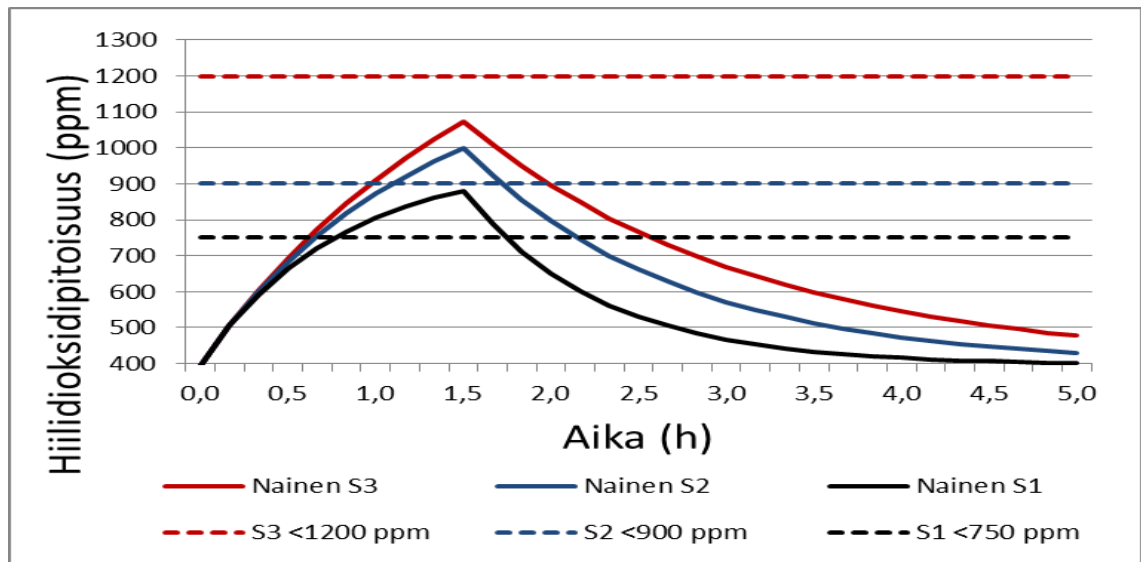
Keittiötä ei yleensä luokitella tilaksi, jonka ilmanvaihto määritellään henkilöperusteiseksi. Tässä opinnäytetyössä keittiön hiilidioksidipitoisuuksien simulaatioissa on kuitenkin käytetty ihmisperusteisia ilmavirtoja. Rakennusmääräyskokoelman osa D2 antaa keittiölle vakioilmavirraksi 8 l/s, joka vastaa suuruudeltaan sisäilmaluokan S2 yhdelle ihmiselle antamaa ilmanvaihtovirtaa.

4.6.1 Vakioilmavirtatarkastelu keittiössä

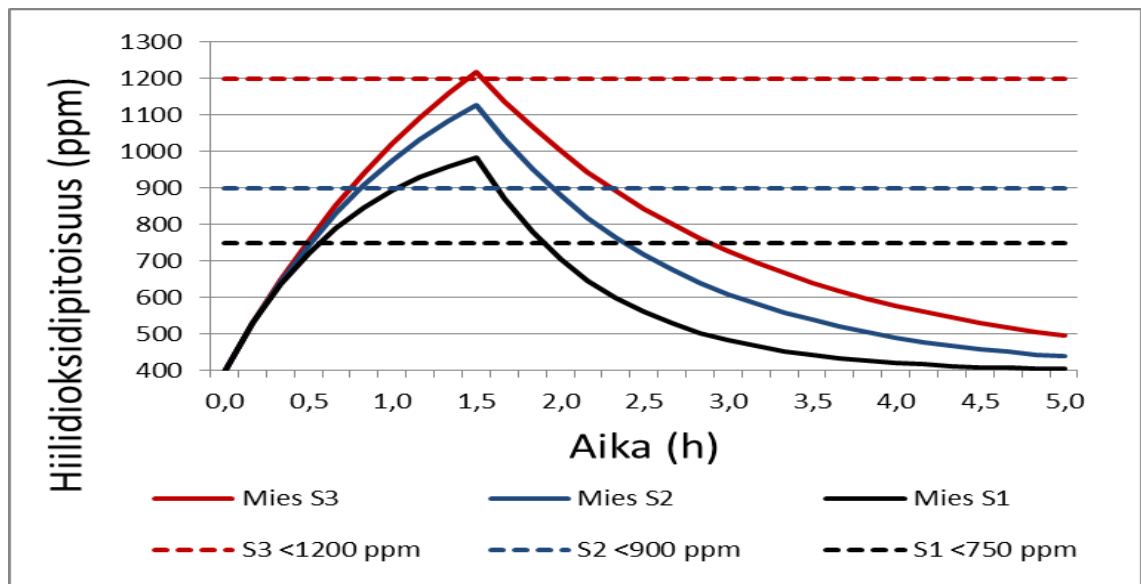
Kuviossa 37–39 on laskettuna ja simuloituna keittiön hiilidioksidipitoisuuksia Sisäilmaluokituksen 2008 antamilla ilmavirroilla tilassa vietetyn ajan funktiona. Huoneen koko on 15 m² ja tilavuus on 37,5 m³. Laskelmissa on käytetty ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden arvona 396 ppm ja ihmisten hiilidioksidin tuottoarvoina taulukon 8 arvoja. Hiilidioksidipitoisuuksien maksimiarvot ja suositellut ulkoilmavirrat ovat taulukon 2 eli Sisäilmaluokituksen 2008 mukaisia. Hiilidioksidipitoisuutta tilassa on simuloitu yh-

tälön (4) mukaan. Tilassa vietetyn yhtäjaksoisen ajan pituus on arvioitu kuvioiden 3–9 perusteella.

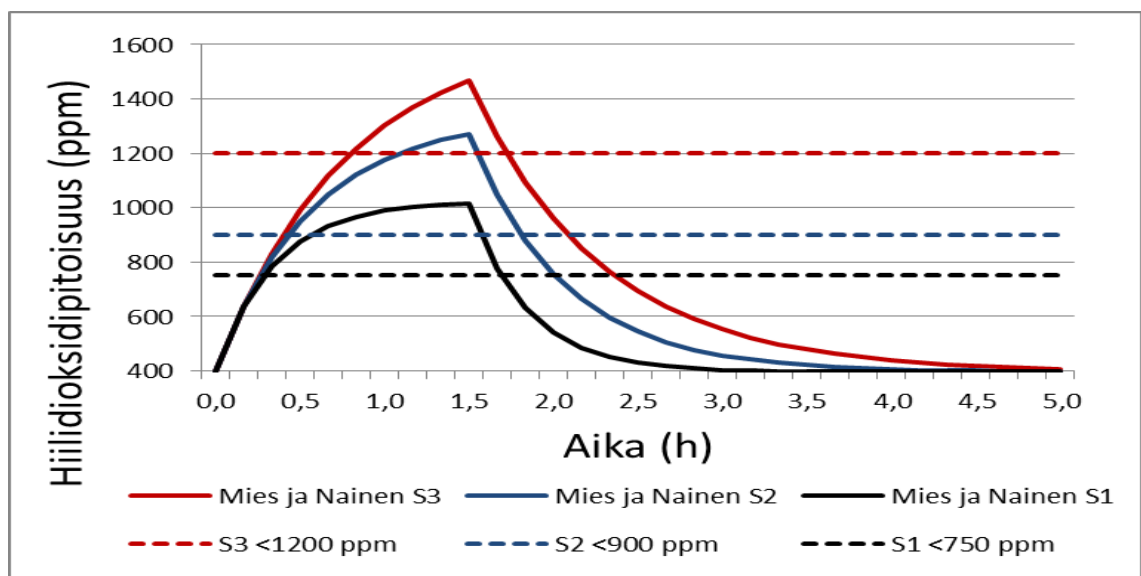
Kuvioiden 37–39 perusteella voidaan todeta, että paremmilla sisäilmaluokilla hiilidioksidipitoisuuksien maksimiarvot ylittyvät jonkin verran jo yhden ihmisen oleskellessa keittiössä. Useamman ihmisen oleskellessa tilassa lyhyitäkin aikoja ylittyvät Sisäilmastoluokituksen 2008 antamat hiilidioksidipitoisuuksien maksimiarvot reilusti. Kuvioiden 37–39 tulkinnan perusteella ja taulukosta 9 voimme todeta, että henkilöperusteiset ilmamäärät ovat liian pieniä keittiössä, varsinkin silloin kun tilassa on enemmän ihmisiä ja siellä oleskellaan pidempiä aikoja yhtäjaksoisesti, esimerkiksi valmistetaan ruokaa, seurustellaan ja syödään.



KUVIO 37. Keittiön hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna vakioilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa yksistään nainen



KUVIO 38. Keittiön hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna vakioilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa yksistään mies



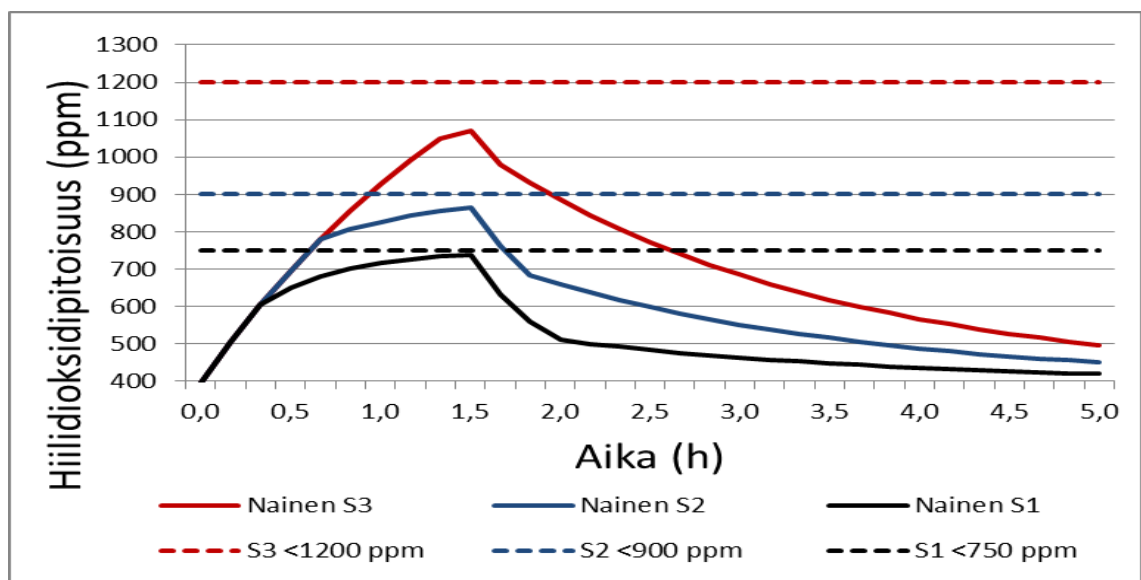
KUVIO 39. Keittiön hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna vakioilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa mies ja nainen

4.6.2 Tarpeenmukainen ilmavirtatarkastelu keittiössä

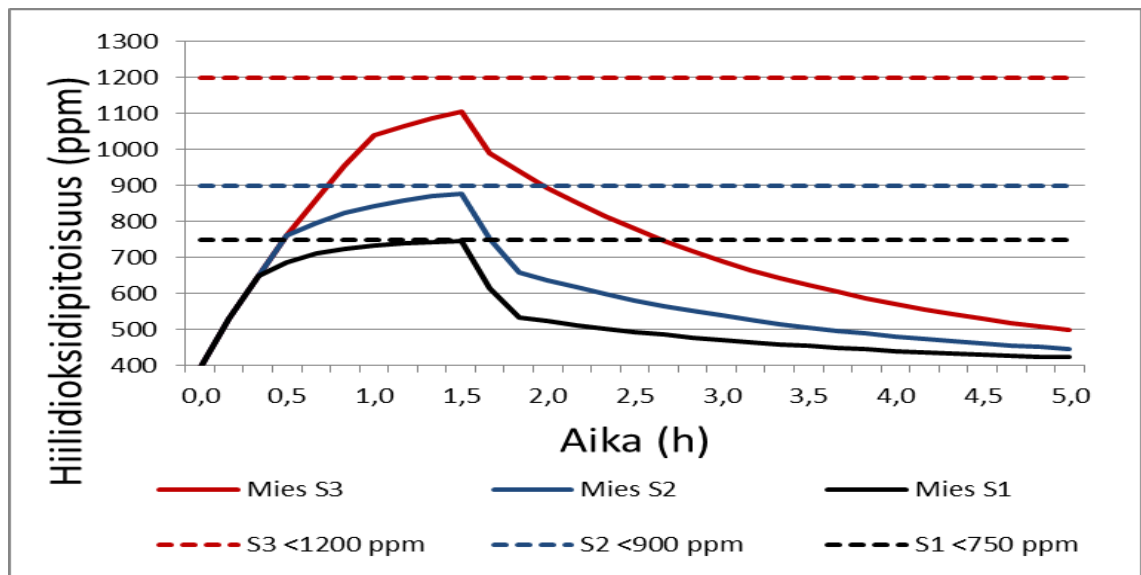
Kuviossa 40–42 on laskettuna ja simuloituna keittiön hiilidioksidipitoisuuksia Sisäilmaluokituksen 2008 antamilla hiilidioksidipitoisuuksien maksimiarvoilla tilassa vietetyn ajan funktiona. Huoneen koko on 15 m^2 ja tilavuus on $37,5 \text{ m}^3$. Laskuissa on käytetty ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden arvona 396 ppm ja ihmisten hiilidioksidin tuottoar-

voina taulukon 8 arvoja Hiilidioksidipitoisuuksien maksimiarvot ovat taulukon 2 ja käyttöajan ulkoilmavirrat ovat taulukon 10 mukaisia. Käyttöajan ulkopuolinen ulkoilmavirta on $0,35 \text{ (dm}^3\text{/s)/m}^2$, joka vastaa ilmanvaihtokerrointa $0,5 \text{ 1/h}$ tilassa, jonka vapaa korkeus on $2,5 \text{ m}$. Hiilidioksidipitoisuutta tilassa on simuloitu yhtälön (4) mukaan. Tilassa vietetyn yhtäjaksoisen ajan pituus on arvioitu kuvioiden 3–9 perusteella. Tarpeenmukaisten ja käyttöajan ulkopuolisten ulkoilmavirtojen ohjaus tapahtuu yhtälön (5) mukaisesti.

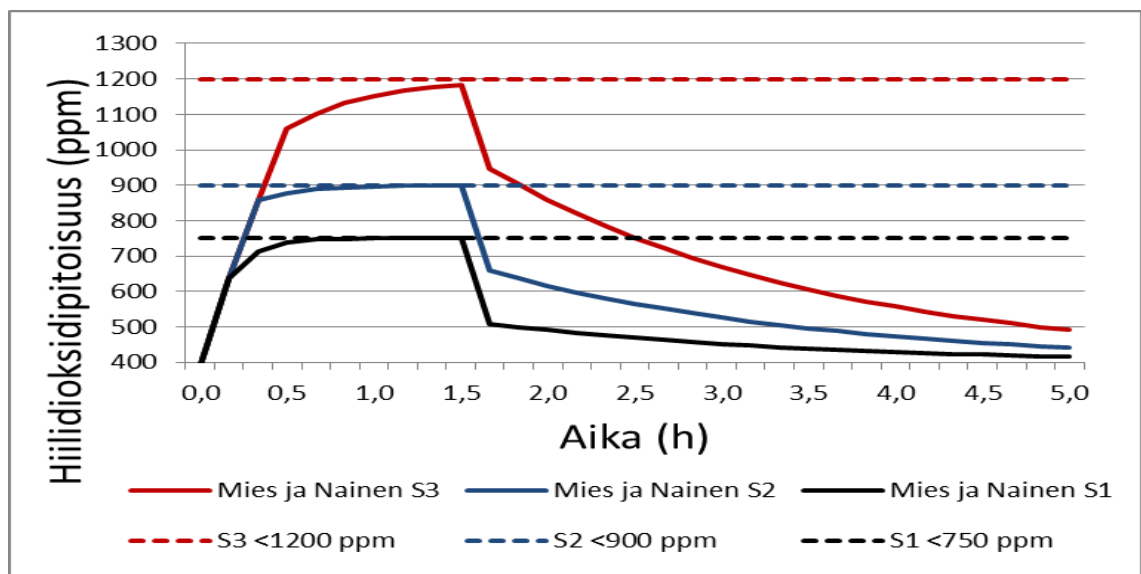
Kuvioiden 40–42 perusteella voidaan todeta, että tarpeenmukaisen ulkoilmavirran tarpeen kesto on melko lyhytaikaista vuorokaudessa johtuen lyhyestä käyttöajasta. Ilmanlaatua tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla on selvästi mahdollisuus parantaa, riippuen tilan koosta, ihmismäärästä ja käyttötottumuksista. Keittiön käyttöajan ulkopuolinen ajanjakso on usein hyvinkin pitkä, jolloin energiansäästön potentiaali on suuri.



KUVIO 40. Keittiön hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna tarpeenmukaisilla ilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa yksistään nainen



KUVIO 41. Keittiön hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna tarpeenmukaisilla ilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa yksistään mies



KUVIO 42. Keittiön hiilidioksidipitoisuuden ajallinen riippuvuus sisäilmaluokkiin S3, S2 ja S1 suhteutettuna tarpeenmukaisilla ilmavirroilla, kun tilaa kuormittaa mies ja nainen

4.6.3 Energiansäästön ja ilmanlaadun parannuspotentiaalit keittiössä

Taulukoiden 20–22 perusteella voidaan todeta, että energiansäästön potentiaali on keittiöissä suuri, jos tilan ilmanvaihto toteutetaan henkilöperusteisella ilmanvaihdolla. Tila

on yleensä kohtuullisen kokoinen ja hiilidioksidin tuotto on tilassa runsasta, etenkin jos ihmisiä on tilassa useampi kuin yksi.

Ruuanlaitto ja syöminen ovat kohtalaisesti ihmistä rasittavia aktiviteetteja, joten hiilidioksidin suurehko tuotto on ilmanlaadun kannalta hyvin merkittävää. Ilmanlaadun kannalta taulukoiden 20–22 perusteella voidaan todeta, että tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla sisäilmaluokan S1 ilmanlaadun saavuttaminen vakioilmavirtaisen sisäilmaluokan S3 energiankulutuksella on mahdollista.

TAULUKKO 20. Naisen keittiön ilmanvaihdon energiansäästöpotentiaalit

Keittiö	Nainen		
	S3	S2	S1
Käyttöajan iv päällä (min/d)	20	70	100
Käyttöajan iv päällä (h/d)	0,3	1,2	1,7
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (min/d)	1420	1370	1340
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (h/d)	23,7	22,8	22,3
Käyttöajan iv (m ³ /s)	0,00847	0,01351	0,01923
Käyttöajan ulkopuolinen iv (m ³ /s)	0,00350	0,00350	0,00350
Lämmitystarveluku Hesinki-Vantaa, S17 (Kd)	3952	3952	3952
Energian kulutus tarpeenmukaisella IV:llä (kWh)	406	454	523
Energian kulutus vakioilmavirroilla (kWh/ a)	683	911	1366
Säästö energiassa (kWh)	277	457	843
Säästö prosenteissa (%)	41	50	62

TAULUKKO 21. Miehen keittiön ilmanvaihdon energiansäästöpotentiaalit

Keittiö	Mies		
	S3	S2	S1
Käyttöajan iv päällä (min/d)	40	80	90
Käyttöajan iv päällä (h/d)	0,7	1,3	1,5
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (min/d)	1400	1360	1350
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (h/d)	23,3	22,7	22,5
Käyttöajan iv (m ³ /s)	0,01027	0,01638	0,02332
Käyttöajan ulkopuolinen iv (m ³ /s)	0,00350	0,00350	0,00350
Lämmitystarveluku Hesinki-Vantaa, S17 (Kd)	3952	3952	3952
Energian kulutus tarpeenmukaisella IV:llä (kWh)	420	480	539
Energian kulutus vakioilmavirroilla (kWh/ a)	683	911	1366
Säästö energiassa (kWh)	263	431	826
Säästö prosenteissa (%)	39	47	61

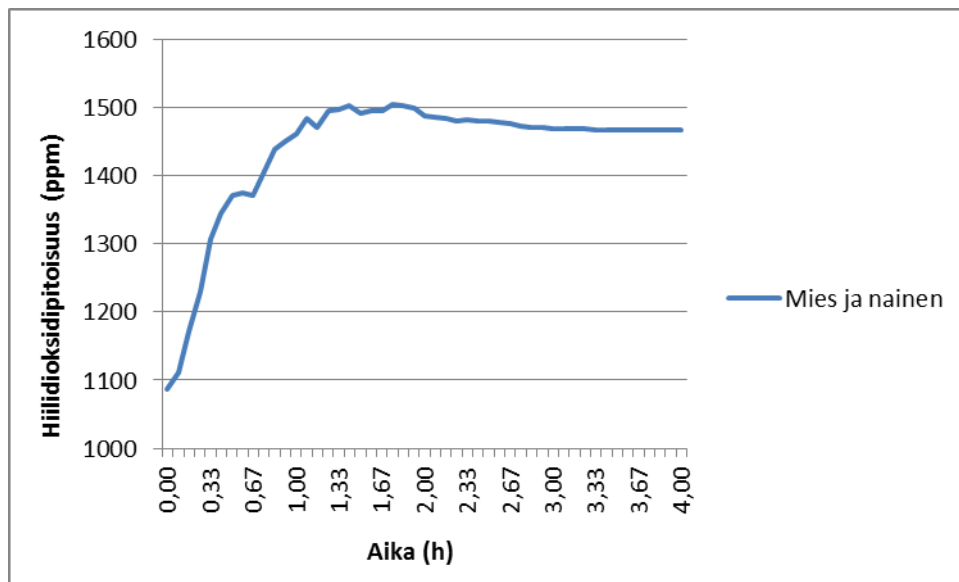
TAULUKKO 22. Miehen ja naisen keittiön ilmanvaihdon energiansäästöpotentiaalit

Keittiö	Mies ja Nainen		
	S3	S2	S1
Käyttöajan iv päällä (min/d)	70	80	90
Käyttöajan iv päällä (h/d)	1,2	1,3	1,5
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (min/d)	1370	1360	1350
Käyttöajan ulkopuolinen iv päällä (h/d)	22,8	22,7	22,5
Käyttöajan iv (m ³ /s)	0,01874	0,02989	0,04255
Käyttöajan ulkopuolinen iv (m ³ /s)	0,00350	0,00350	0,00350
Lämmitystarveluku Hesinki-Vantaa, S17 (Kd)	3952	3952	3952
Energian kulutus tarpeenmukaisella IV:llä (kW)	483	565	676
Energian kulutus vakioilmavirroilla (kWh/ a)	1366	1821	2732
Säästö energiassa (kWh)	883	1256	2055
Säästö prosenteissa (%)	65	69	75

4.7 Hiilidioksidipitoisuuden seurantamittaus makuuhuoneessa

Opinnäytetyössä on tehty kenttämittauksena seurantamittaus hiilidioksidipitoisuudesta makuuhuoneessa. Seurantamittaus tehtiin DeltaOhm HD21AB17 hiilidioksidimittarilla. Hiilidioksidimittari asetettiin mittaamaan makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuutta makuuhuoneessa tapahtuvan nukkumisen ajaksi. Kuviossa 43 on esitettyä makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuden nousu tilan käyttöaikana. Makuuhuoneen koko on noin 10 m² ja tilavuus 25 m³. Makuuhuoneessa nukkui mies ja nainen. Makuuhuone sijaitsee 1990-luvun alussa valmistuneessa kerrostalossa. Asunnon koko on 59,5 m². Asunnossa on poistoilmanvaihto ja makuuhuoneen seinässä on raitisilmaventtiili. Ulkovaippaan rajoitettava seinäpinta-alaa huoneella on noin 7,5 m².

Asuntoon on saavuttu 48 tunnin poissaolon jälkeen noin kolme tuntia ennen nukkumaanmenoa. Avoimen välioven kautta tasoittunut hiilidioksidipitoisuus on jo ennen makuuhuoneeseen saapumista yli 1000 ppm. Hiilidioksidipitoisuus tasapainottui nopeasti lähelle sisäilman terveelliseksi luokitellun hiilidioksidipitoisuuden maksimiarvoa 1500 ppm. Kuvion 43 perusteella voidaan todeta, että korkea hiilidioksidipitoisuus on todellinen ongelma etenkin vanhempien asuinrakennusten tiloissa, joissa ilmanvaihto on vähäistä.



KUVIO 43. Makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuden seurantamittaus

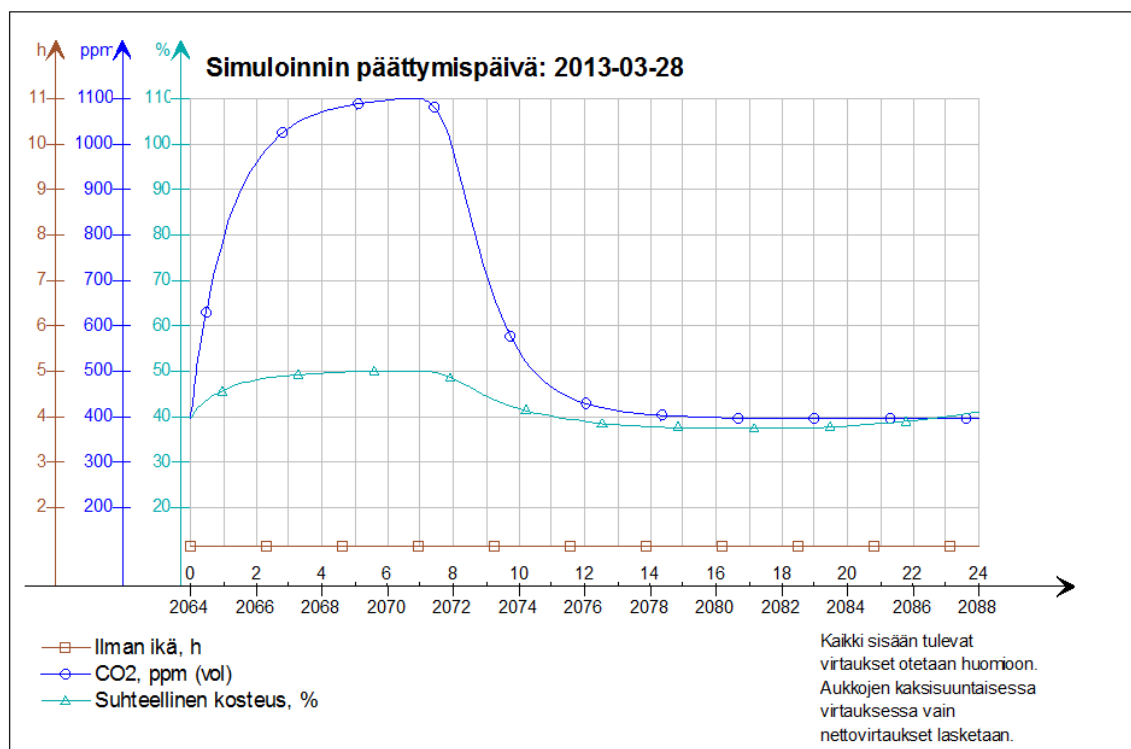
4.8 Hiilidioksidipitoisuuden simulointia ja vertailua IDA-ICE- ja Excel-ohjelmilla

Kuvioissa 44–51 on esitetty makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuussimulointia suoritettuna IDA-ICE-simulointiohjelmalla. Makuuhuoneen koko on 10 m^2 , tilavuus 25 m^3 ja ulkoseinän pinta-ala on $3,16 \text{ m}^2$. MET-arvoksi IDA-ICE-simulaatioihin on asetettu 0,9 ihmisen nukkuessa makuuhuoneessa. Vakioilmavirtoina on käytetty Sisäilmaluokituksen 2008 antamia ulkoilmavirtoja ja minimi ilmanvaihtona 0,5 kertaa tunnissa. Ulkoilman hiilidioksidipitoisuutena on käytetty arvoa 396 ppm. Ihmisten hiilidioksidin tuotto arvoina on käytetty IDA-ICE-ohjelmassa ohjelman antamia arvoja ja Excel-ohjelman laskelmissa taulukon 8 arvoja. Ulkoseinän vuotoilmavirtana on käytetty $2 \text{ (m}^3/(\text{hm}^2))$ ja ulkoseinää esimerkki huoneella on $3,16 \text{ m}^2$. Vuotoilmavirtana on käytetty 4,4 l/s. Vuotoilmavirrat ovat hyvin erisuuruisia erilaisissa asuinrakennuksissa ja huoneissa. Vuotoilman määrään vaikuttaa esimerkiksi asuinrakennuksen tyyppi, rakennuksen tiiveys, ulkovaipan pinta-ala huoneessa, tuulen voimakkuus ja sisä- ja ulkolämpötilojen ero (Seppänen 2004, 103).

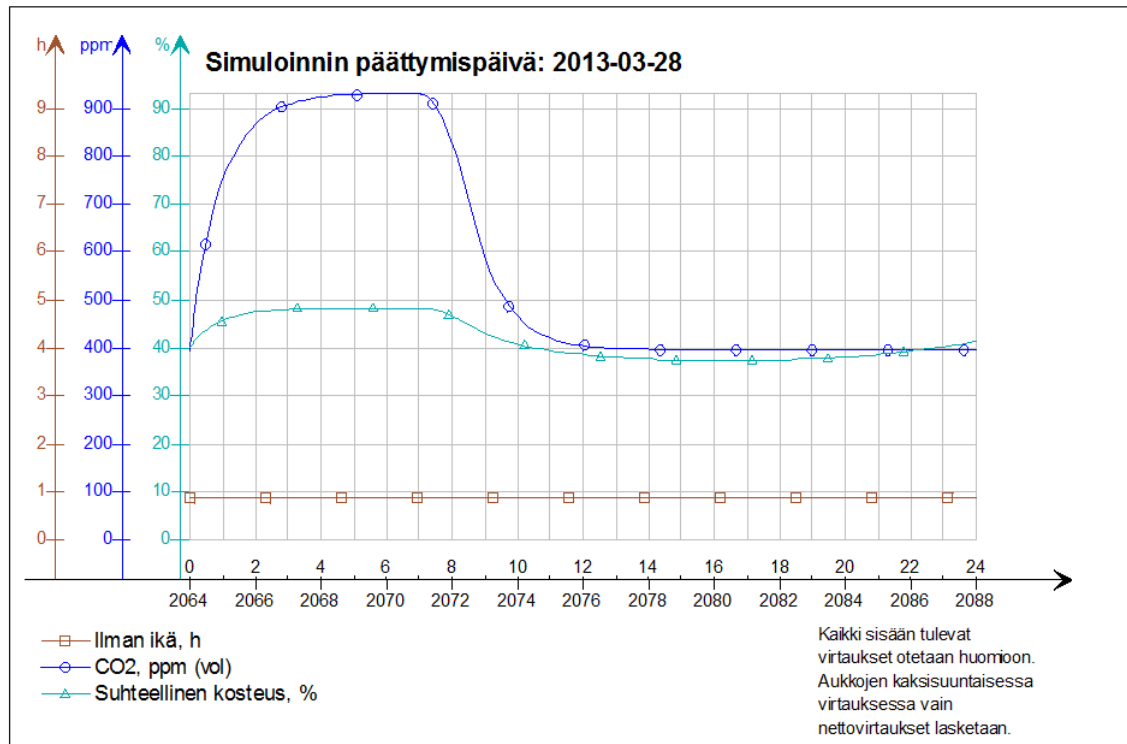
Vertaillessa makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuden simulointikuvioita 44–46 ja 19–20 sekä 47–49 ja 52 sekä 50–51 ja 53–54 toisiinsa voidaan todeta, että IDA-ICE-ohjelmalla tehdyissä simulaatioissa hiilidioksidipitoisuus nousee korkeammaksi kuin Excel-ohjelmalla tehdyissä simuloinneissa. Tästä voidaan päätellä, että IDA-ICE-ohjelman

käyttämä sukupuolesta riippumaton ihmisen hiilidioksidin tuottoarvo on hieman suurempi kuin opinnäytetyössä lasketut hiilidioksidin tuottoarvot suomalaiselle miehelle ja naiselle.

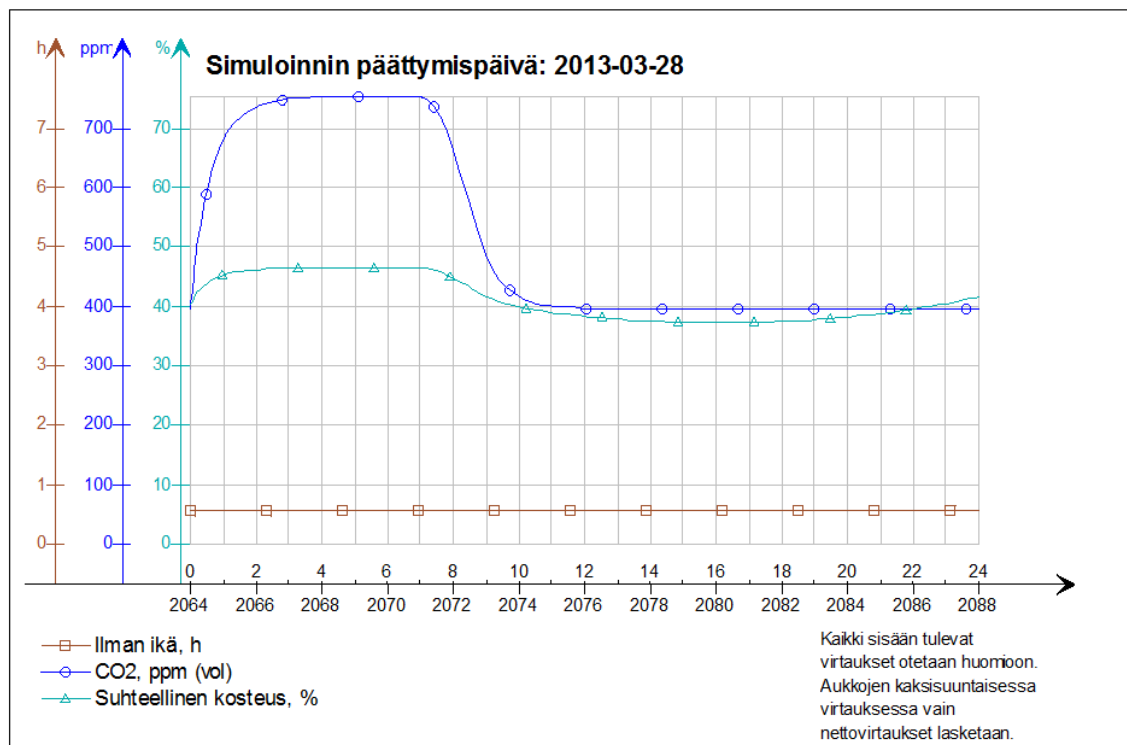
Kuviossa 47–49 on otettu huomioon myös esimerkkitapauksen vuotoilman merkitys makuuhuoneen sisäilman hiilidioksidipitoisuuteen. Vertailemalla kuvioita 44–46 ja 47–49 sekä 50 ja 51 sekä 53 ja 54 toisiinsa voidaan hiilidioksidipitoisuuksien tasoeroista todeta, että vuotoilmalla on suuri vaikutus huoneen hiilidioksidipitoisuuteen, etenkin tiloissa, joissa ilmanvaihto on muuten vähäistä.



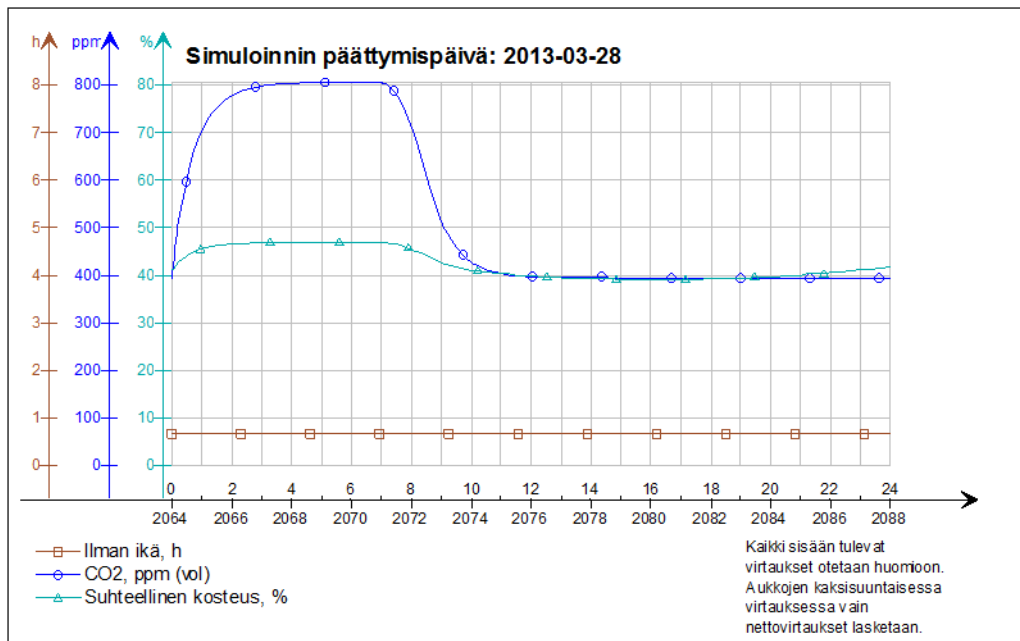
KUVIO 44. Makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuden simulointi IDA-ICE-ohjelmalla S3 vakioilmavirralla



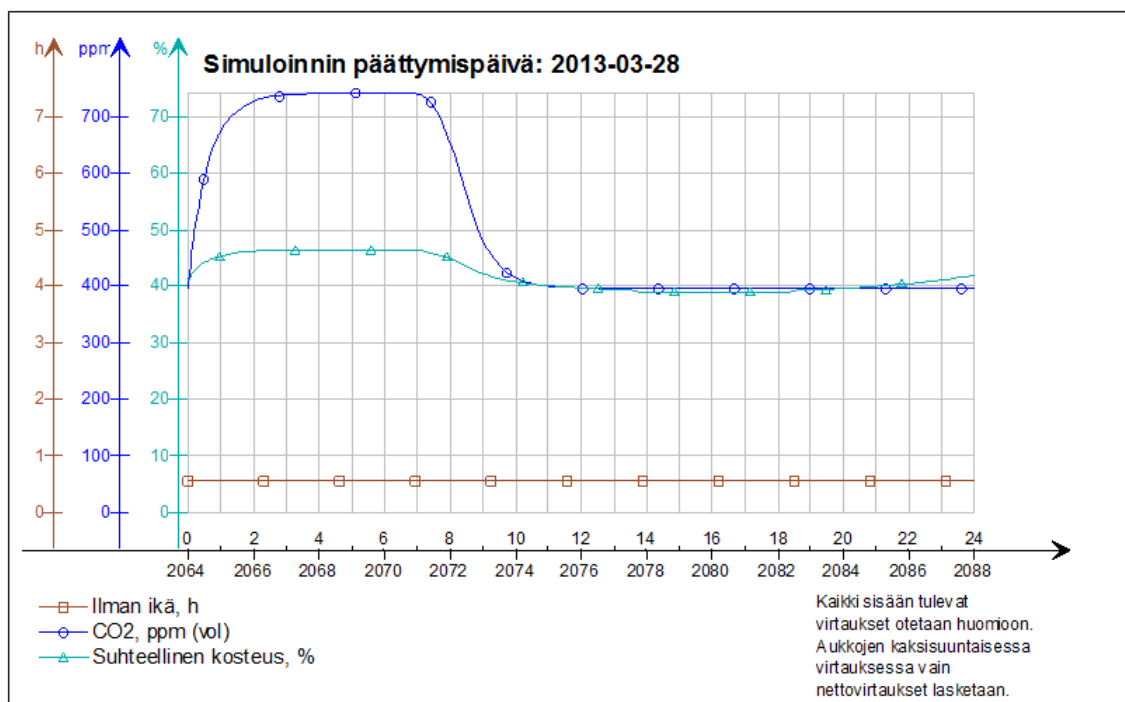
KUVIO 45. Makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuden simulointi IDA-ICE-ohjelmalla S2 vakioilmavirralla



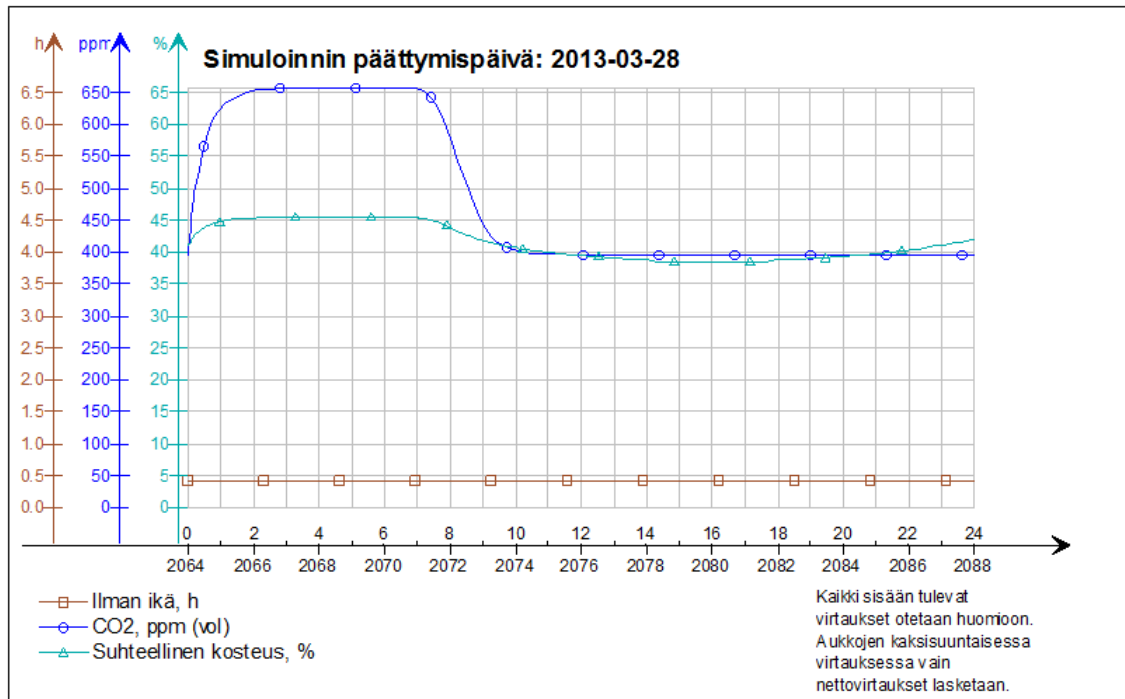
KUVIO 46. Makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuden simulointi IDA-ICE-ohjelmalla S1 vakioilmavirralla



KUVIO 47. Makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuden simulointi IDA-ICE-ohjelmalla S3 vakioilmavirralla + ulkoseinän vuotoilmavirralla 2 (m³/(hm²))

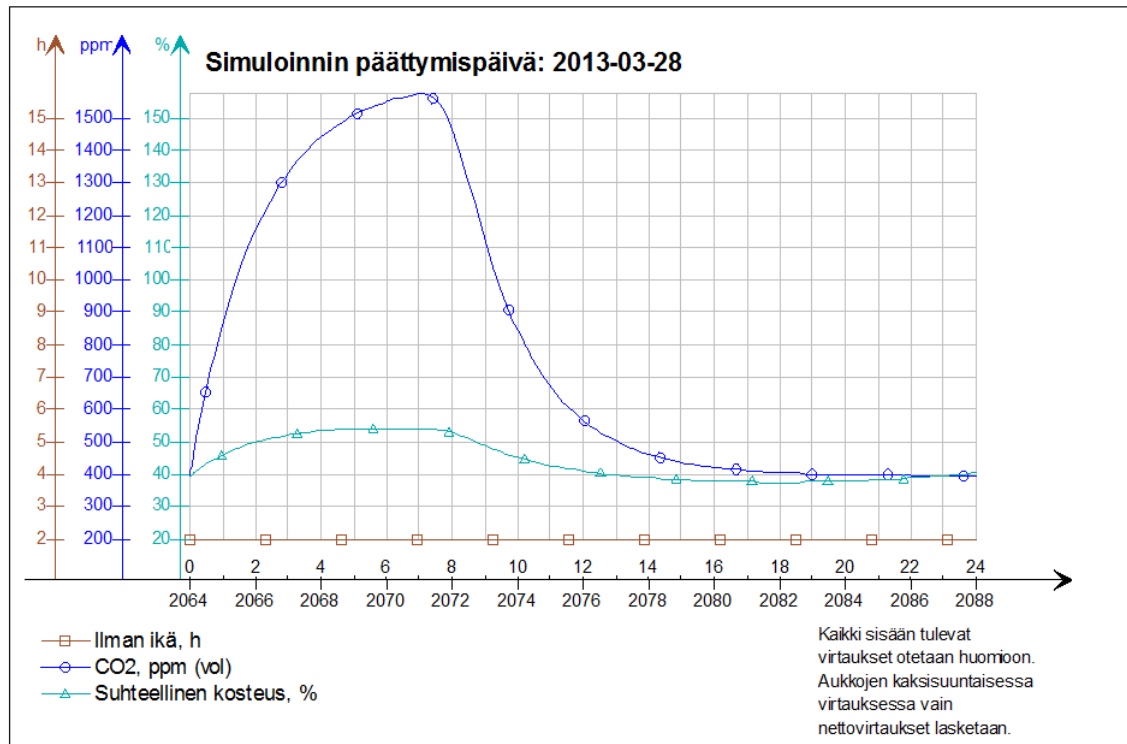


KUVIO 48. Makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuden simulointi IDA-ICE-ohjelmalla S2 vakioilmavirralla + ulkoseinän vuotoilmavirralla 2 (m³/(hm²))

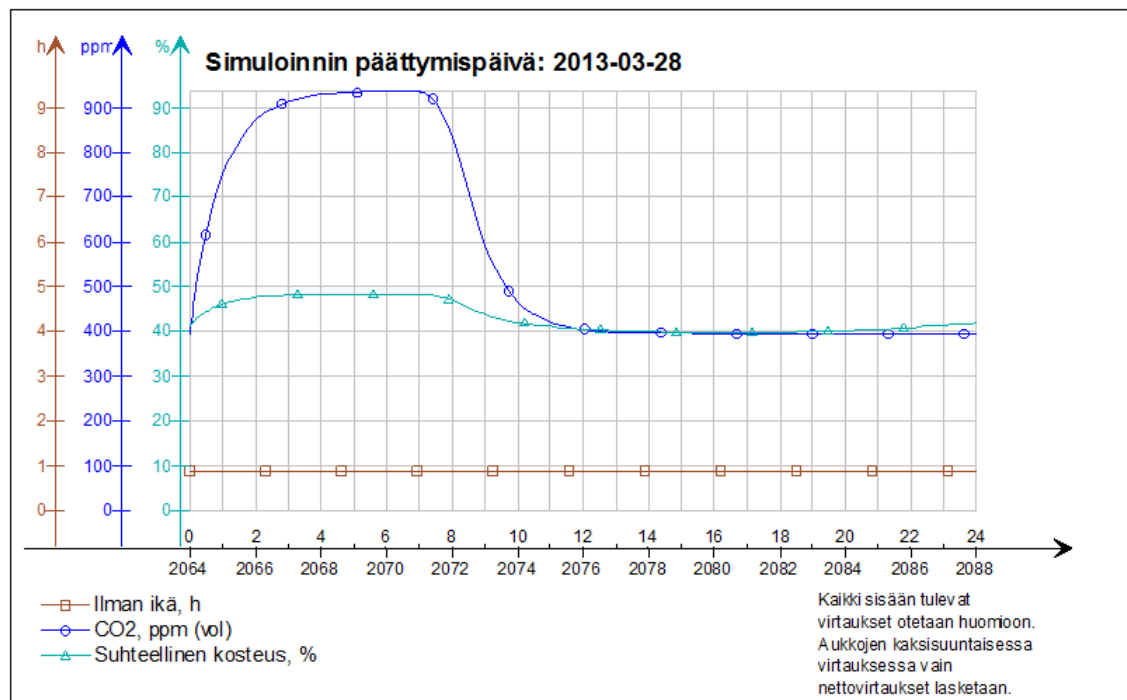


KUVIO 49. Makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuden simulointi IDA-ICE-ohjelmalla S1 vakioilmavirralla + ulkoseinän vuotoilmavirralla 2 ($\text{m}^3/(\text{hm}^2)$)

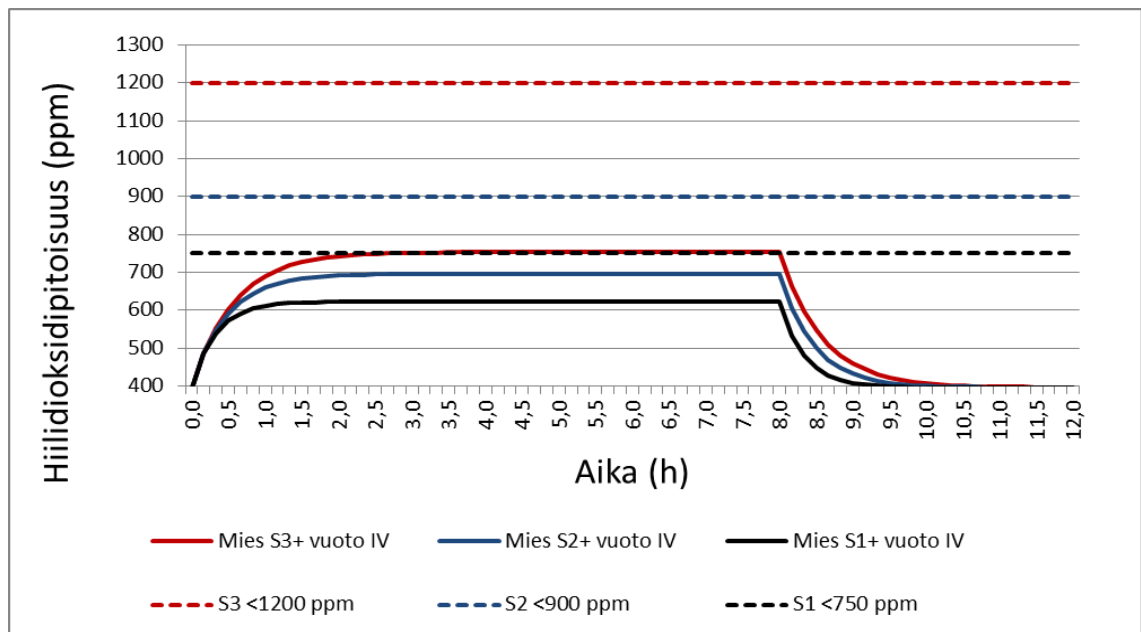
Kuvioissa 50 ja 51 sekä 53 ja 54 on simuloituna makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuutta Suomen rakentamismääräyskokoelman D2 antamalla ilmanvaihdon minimiulkoilmavirralla ilman vuotoilmanvaihtoa ja vuotoilmanvaihdolla. Simuloinneissa on käytetty ulkoilmavirtana $0,35 \text{ (dm}^3/\text{s)/m}^2$, joka vastaa ilmanvaihtokerrointa $0,5 \text{ l/h}$ huoneessa, jonka vapaa korkeus on $2,5 \text{ m}$. Ulkoilmavirtana kymmenen neliömetrin huoneelle on käytetty $3,5 \text{ l/s}$. Ulkoseinän vuotoilmavirtana on käytetty $2 \text{ (m}^3/(\text{hm}^2))$ ja ulkoseinää esimerkki huoneella on $3,16 \text{ m}^2$. Vuotoilmavirtana on käytetty $4,4 \text{ l/s}$.



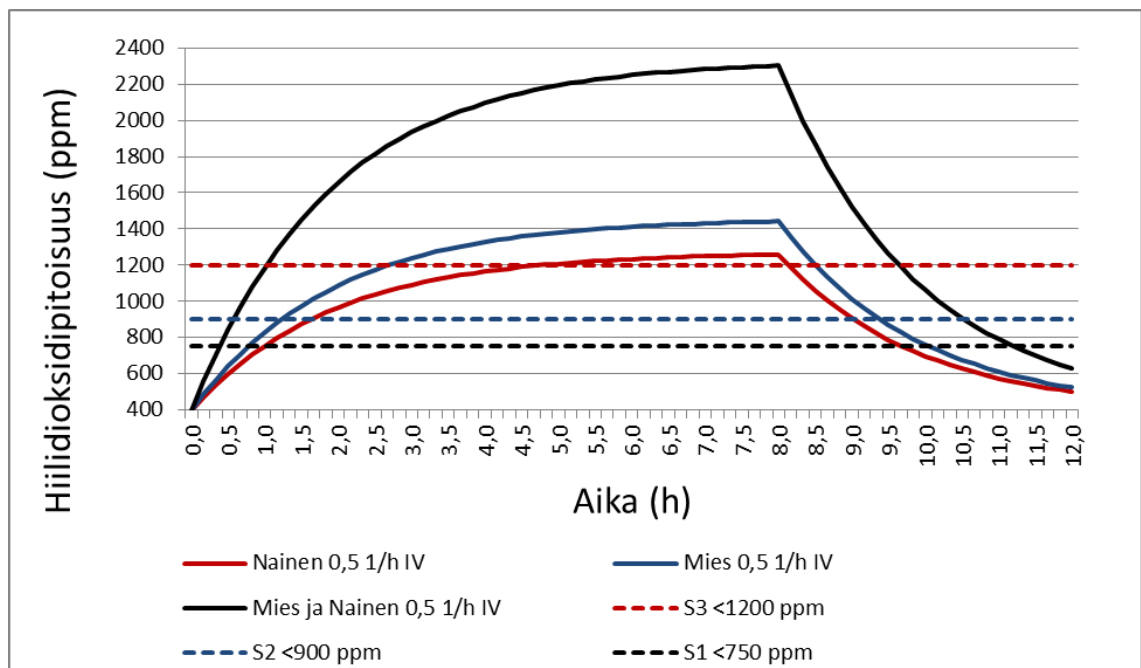
KUVIO 50. Makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuden simulointi IDA-ICE-ohjelmalla 0,5 1/h vakioilmavirralla



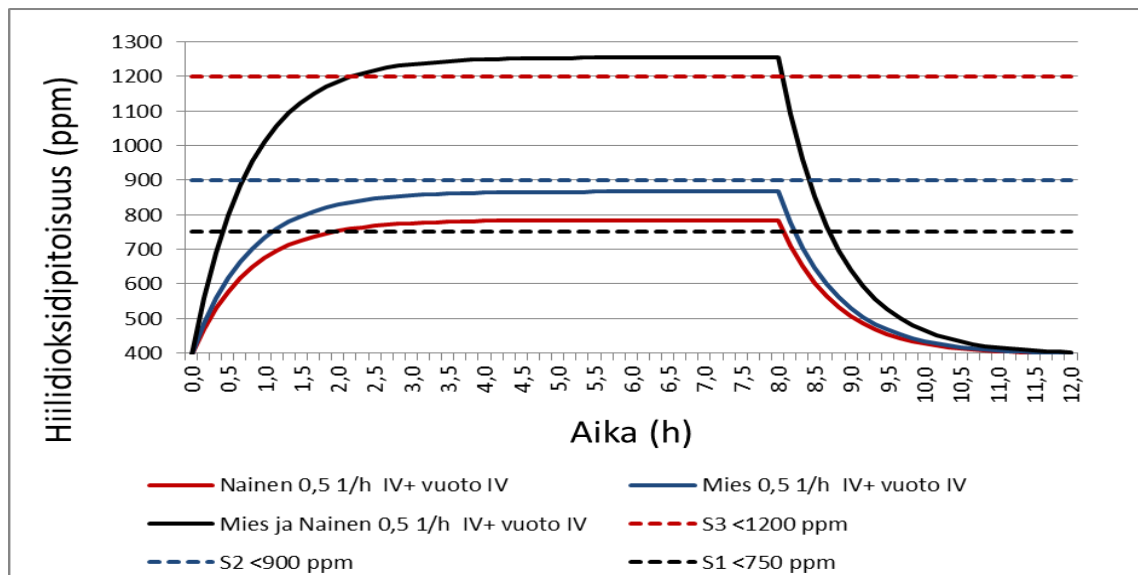
KUVIO 51. Makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuden simulointi IDA-ICE-ohjelmalla 0,5 1/h vakioilmavirralla + ulkoseinän vuotoilmavirralla 2 (m³/(hm²))



KUVIO 52. Makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuden simulointi S3, S2 ja S1 vakioilma-
virroilla + ulkoseinän vuotoilmavirralla $2 \text{ (m}^3/(\text{hm}^2))$



KUVIO 53. Makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuden simulointi vakiovirta ilmanvaihdol-
la 0,5 kertaa tunnissa



KUVIO 54. Makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuuden simulointi vakiovirta ilmanvaihdolla 0,5 kertaa tunnissa + ulkoseinän vuotoilmavirralla 2 ($\text{m}^3/(\text{hm}^2)$)

5 POHDINTA

Opinnäytetyössä tehtyjen laskelmien ja simulointien perusteella tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla on saavutettavissa suuri energiansäästöpotentiaali asuinrakennuksissa. Sisäilmastoluokituksen 2008 antamat ilmavirrat ovat osassa tiloista ylimitoitettuja käyttöaikoina. Osassa tiloista ilmanvaihto on suurimman osan ajasta turhaan henkilöperusteista, jonka vuoksi ilmanvaihto on liian suurta hiilidioksidipitoisuuksiin nähden. Ilmanlaadullisesti vakioilmanvaihto Sisäilmastoluokituksen 2008 antamilla henkilöperusteilla ulkoilmavirroilla on hyvin vaihtelevaa. Osassa tiloista ilmavirrat ovat ylisuuria ja osassa tiloista selkeästi liian pieniä, sillä ihmisen hiilidioksidin tuotto vaihtelee suuresti tilassa tapahtuvan aktiviteetin mukaan. Tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla voisi saavuttaa opinnäytetyössä simuloituissa, lasketuissa ja hiilidioksidiohjatuihin tiloihin, joissa ei ole vuotoilmanvaihtoa, noin 37–79 prosentin energiansäästön verrattuna vastaavan sisäilmaluokan tilaan vakioilmanvaihdolla toteutettuna. Tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla saavutettaisiin myös sisäilmanlaadultaan nykyistä hallitumpi asuinrakennus, vaikka asuintottumukset ja aktiviteetit tilassa hieman muuttuisivatkin suunnitelluista. Tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla pystyttäisiin myös reagoimaan vuodenaajoista aiheutuvan ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden vaihteluun, välttämään yli mitoitettuja ilmavirrat ja säästämään energiaa.

Vuotoilmalla ja sen suuruudella on suuri vaikutus tarpeenmukaisen ilmanvaihdon tarpeellisuuteen sisäilmanlaadun parantamisessa. Jos kokonaisilmanvaihtuvuus on suuri suhteessa tuotettuun hiilidioksidin määrään, sisäilman hiilidioksidipitoisuudet eivät ole korkeita ja sisäilman laadun parantamisen potentiaalit ovat heikot. Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon energiansäästöpotentiaalit kasvavat, jos sisäilmanlaatu ei tarvitse parannusta asuintiloissa.

Mitä tehokkaampi on ilmanvaihdon lämmöntalteenotto, sitä pienemmät ovat tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla saavutettavat energiansäästöt ja sama pätee myös toisin päin. Hyvästä lämmöntalteenotosta huolimatta tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla asuinrakennuksen energiansäästöt ovat rahallisestikin huomattavia riippuen asuinrakennuksen tiloista, käyttötottumuksista, huoneiden koosta suhteessa hiilidioksidin tuottoon, ilmanvaihdon lämmitysmuodosta ja tulevaisuuden energianhinnan kehityksestä. Tarpeenmu-

kaisella ilmanvaihdolla ja tehokkaalla lämmöntalteenotolla päästään energiataloudelliseen ilmanvaihtoratkaisuun.

Automaatio- ja säätölaitetekniikan halventuessa ja yleistyessä sekä valmiiden järjestelmäkokonaisuuksien lisääntyessä ja asennuksen helpottuessa nykyisestään tarpeenmukainen ilmanvaihto tulee varmasti olemaan mukana lisääntyvässä määrin uusia asuinrakennuksia rakennettaessa.

Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus tulee lähitulevaisuudessa nousemaan, mikä heikentää sisäilmanlaatua tai nostaa energiankulutusta tarvittavan ilmanvaihdon lisäämisen johdosta. Myös muut hiilidioksidin tuottoon ja sisäilmanlaatuun vaikuttavat tekijät voivat muuttua tulevaisuudessa, esimerkiksi suomalaisten ihmisten paino voi lisääntyä merkittävästi. Ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden nousu ja suomalaisten keskipainon nousu voi nostaa tarpeenmukaisia ilmavirtoja jopa kolmasosalla kolmessakymmenessä vuodessa riippuen valitusta sisäilmaluokituksen tasosta.

Tarpeenmukaista ilmanvaihtoa voidaan käyttää asuinrakennuksissa joka puolella maapalloa säästämään ilmanvaihdon kuluttamaa lämmitys- tai jäähdytysenergiaa ja parantamaan sisäilman laatua ja olosuhteiden hallittavuutta.

LÄHTEET

CO2-raportti. Ilmasto uutisia 2012. Luettu 14.2.2013.

http://www.co2-raportti.fi/index.php?page=ilmastouutisia&news_id=3631

CO2-raportti. Tietoa ilmastonmuutoksesta. Luettu 2.1.2013.

<http://www.co2-raportti.fi/?page=ilmastonmuutos>

Earth System Research Laboratory. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide 2013. Luettu 14.2.2013. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

Heikkilä, M. 2009. Opas MET-arvojen käytöstä. Kirjallisen ohjeistuksen kehittäminen fysioterapeuteille ja fysioterapeuttiopiskelijoille. Fysioterapian koulutusohjelma. Lahden ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Hengityслиitto. Sisäilma. Luettu 9.2.2013.

<http://www.heli.fi/Hengitysilma/Sisailma/Muita-sisailmaongelmia/Hiilidioksidi/>

Ilmatieteenlaitos. 2008. Ilmastonmuutos- mitä siitä seuraa?

LVI-kortisto: Sisäilmaluokitus 2008.

Seppänen, O. 2004. Ilmastoinnin suunnittelu. Forssa: Forssan Kirjapaino Oy.

Sisäilmayhdistys ry. 1995. Ilmanvaihdon perusteet. Luettu 1.2.2013.

http://www.sisailmayhdistys.fi/portal/perustietoa/ilmanvaihdon_perusteet/

Sosiaali- ja terveysministeriö 2012. HTP-arvot 2012. Haitalliseksi tunnetut pitoisuudet.

Suomen rakentamismääräyskokoelma 2012. D3 Rakennusten energiatehokkuus.

Terveyden ja hyvinvoinninlaitos 2011: Lihavuus Suomessa.

Tilastokeskus 2011. Ajankäytön muutokset 2000-luvulla.

Turun-sanomat: Suomalaiset miehet venyivät pituutta viisi senttiä 30 vuodessa. Luettu 17.2.2013.

<http://www.ts.fi/uutiset/kotimaa/135100/Suomalaiset+miehet+venyivat+pituutta+viisi+senttia+30+vuodessa>

Työterveyslaitos 2011. Hiilidioksidi. Luettu 13.2.2013.

<http://www.ttl.fi/ova/hiilidioksidi.html>

Vaisala. Ilmanvaihdon sovellutukset. Luettu 9.2.2013.

<http://www.vaisala.fi/fi/buildingautomation/applications/HVAC/demandcontrolledventilation/Pages/default.aspx>