

KERROSTAVAN ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄN TEHOKKUUS TOIMISTOTILASSA

T.Karimipannah¹, B. Mosfegh^{1,2} (Sähköposti: bahram.moshfegh@liu.se)

¹ Energian ja konetekniikan osasto, Tekniikan ja rakennetun ympäristön laitos, Gävlen yliopisto, S -801 76 Gävle, Ruotsi,

² Energiajärjestelmien osasto, Tuotantotalouden laitos, Linköpingin yliopisto, S -581 83 Linköping, Ruotsi

ABSTRAKTI

Tämän tutkimuksen päätarkoituksena on tutkia energiankulutusta neljässä erilaisessa ilmanjakojärjestelmässä, joissa koneellisella ilmanvaihdolla varustettuun huoneeseen johdetaan ilmaa suurella ja pienellä nopeudella. Tutkittavat ilmanjakojärjestelmät ovat sekoittava (mixing), syrjäyttävä (displacement), pintoihin törmäävä (impinging jet) ja kerrostava (confluent jet) ilmanjakojärjestelmä. Tutkimuksessa on hyödynnetty renormalisaatioryhmä (RNG) $k-\epsilon$ -mallia, jolla on pyritty arvioimaan sisäilmaparametreja kuten keskinopeutta, ilmapyörteiden ts. turbulenssien intensiteettiä, lämpötilaa ja pitoisuuskenttiä. Numeerisia arvioita validoidaan suhteessa aikaisempiin mittauksiin, joissa on käytetty identtistä järjestelyä.

Yllä mainittujen ilmanjakojärjestelmien energiatehokkuus on evaluoitu käytetyn puhallintehon perusteella. Teho on suhteutettu saman sisäilmamäärän tuottamiseen tarvittavaan ilman virtausmäärään. ADI-ilmanvaihtoindeksi (Air Distribution Index) avulla evaluoidaan käytetyllä menetelmällä huoneeseen luotua sisäilmaympäristöä. Tuloksista ilmeni, että suurin osa puhallintehosta kuluu ilman sekoittamiseen, ja että kerrostava ilmanjakojärjestelmä tarvitsee pienimmän puhallintehon suunnilleen saman ADI-arvon aikaansaamiseen.

1. JOHDANTO

Kahden viimeksi kuluneen vuosikymmenen aikana maailman primäärienergian tarve on kaksinkertaistunut, ja samana aikana sähköenergian kysyntä on kolminkertaistunut. Ruotsissa rakennetun ympäristön energiakysyntä on kasvussa, ja rakennussektori kuluttaa lähes 40 % kokonaisenergiasta. Samalla sen osuus hiilidioksidipäästöistä on 15 %.

EU-komissio mainitsee rakennettua ympäristöä koskevassa energiatehokkuusdirektiivissä, että rakennussektorin on alennettava energiankulutustaan hiilidioksidipäästöjen alentamiseksi. Environmental Advisory Council on maininnut Ruotsissa "Bygga Bo Dialogen", (Asuinrakennusdialogi) -kehitysprojektin yhteydessä, että rakennussektorin ostoenergian kysynnän tulee pienentyä vuoden 2000 tilanteeseen verrattuna vähintään 30 % vuoteen 2025 mennessä ja että energiankulutuksen tulee olla vuonna 2010 alle vuoden 1995 tason.

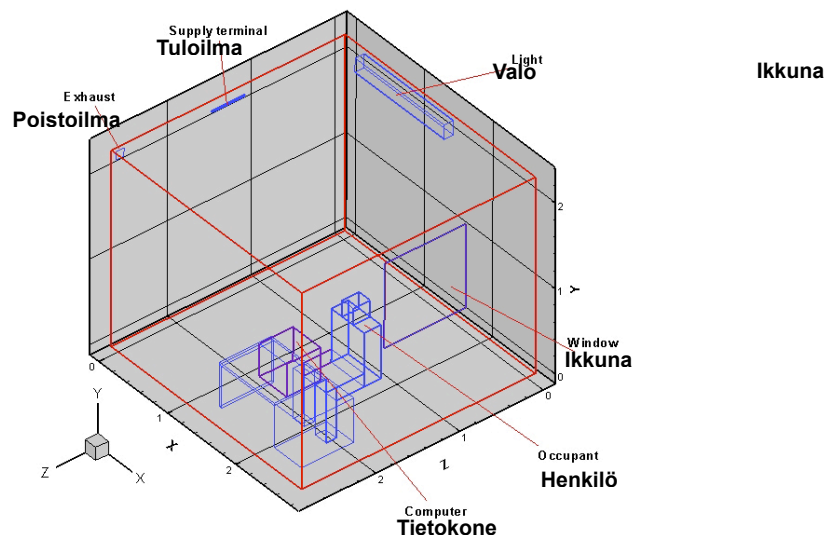
Lisääntyneiden hiilidioksidipäästöjen ja energiankulutuksen välinen yhteys on myös vaikuttanut tehostaa energiankulutusta ja alentaa energian kokonaiskysyntää. Tämän johdosta rakennetun ympäristön energian säästämisen ja sähköenergian kulutuksen alentamisen tarve on hyvin merkittävä. Rakennetun ympäristön ilmanvaihtojärjestelmät, lämpöviihtyvyys ja ilman laatu ovat tärkeitä aiheita, sillä ne liittyvät sekä energian säästämiseen että asukkaiden terveyteen.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on edellä mainittujen päämäärien toteuttaminen ja edistää osaltaan rakennussektorin kestävä kehityksen tavoitetta. Tutkimuksessa keskitytään ilmanvaihtojärjestelmällä varustetun toimistotilan suurella ja pienellä nopeudella toimivien tuloilmanprosessien energiankulutukseen. Energiatehokkuuden vertailu tehdään puhaltimen energiankulutuksella suhteutettuna ilman virtausmäärään pyrkien saavuttamaan jokaisessa tapauksessa sama sisäilmaympäristö. Tutkimuksessa keskitytään neljään erilaiseen ilmanjakojärjestelmään, jotka ovat syrjäyttävä, kerrostava, pintoihin törmäävä ja korkean tason sekoittava järjestelmä. Näiden järjestelmien tuottaman ilmanvaihdon tehokkuutta on tutkittu lähteissä [1-8].

Lämpötilagradientin vaikutusta energiankulutukseen sekoittavassa, syrjäyttävässä ja kerrostavassa ilmanjakojärjestelmässä on tutkinut laskennallisesti Vuolle [9]. Hän käytti laskelmissaan IDA - Indoor Climate and Energy-ohjelmistoa lämpöviihtyvyyden, sisäilman laadun ja energiankulutuksen simulointiin rakennuksissa [10]. Hän toi esiin noin 10–15 % energiansäästön mahdollisuuden kerrostavalla ja syrjäyttävällä järjestelmillä verrattuna perinteiseen sekoittavaan ilmanvaihtoon. Toisin kuin tämä artikkeli, Vuolle [9] ei käsittele lämpöviihtyvyyden ja ilmanlaadun välistä suhdetta energiankulutukseen.

2. LASKENTAPERUSTEET JA LASKENNALLISET MENETELMÄT

Kuvassa 1 esitetään toimistotilaksi sisustettu testihuone. Huoneen mitat ovat $2,78 \times 2,78 \times 2,3$ metriä. Tuloilman nopeusjakauman rajaehdot ja ilmapyörteiden intensiteetti sekä sisäseinien pintalämpötilat on johdettu mittauksista, jotka teki Cho et alia. [3]. Tuloilman lämpötila on $18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lämpökuorma koostuu ulkoseinän lämpöisäyksestä (55 W), ikkunasta (120 W) ja sisäisestä lämmöntuotosta (100 W), mikä vastaa 35 W/m^2 jäähdytyskuormaa.



Kuva 1 - Toimistuhuoneen kaaviokuva.

VORTEX CFD -ohjelmistoa [11] käytettiin sekä esitetyn ongelman ruudukon generointiin että lukuarvoratkaisun tuottamiseen. Generoitu ruudukko on kolmiulotteinen rakenne, jonka koostumus on $61 \times 58 \times 63$ pistettä (suhteessa x, y, z) sekoittavassa, $58 \times 44 \times 51$ kerrostavassa, $60 \times 60 \times 65$ syrjäyttävässä ja $67 \times 60 \times 69$ pintoihin törmäävässä ilmapirrassa, jolloin kokonaistuloksena saatiin vastaavasti noin 222 894, 130 152, 234 000 ja 277 380 solua. Ruudukon klusterointia seiniin päin on kontrolloitu sitten, että sovellettu seinäfunktion

käsittely on toteutettu asianmukaisesti. Renormalisaatioryhmä (RNG) k - ϵ -mallilla on pyritty arvioimaan huoneen ilmapvirtauksen turbulenssikäyttäytymistä. Merkitsevät yhtälöt on ratkaistu käyttäen jaoteltua mallia. Liikemäärän, energian, pitoisuuden, liike-energian ja turbulenssin hajoamisnopeuden yhtälöt on laskettu avaruudellisesti QUICK-mallilla. Jatkuvuusyhtälön ratkaisussa on käytetty nopeuden ja paineen suhteen SIMPLE-algoritmia. Numeerisen konvergenssin paikallinen kriteeri, ts. minkä tahansa paikallisen muuttujan kahden peräkkäisen iteraation suurin suhteellinen ero on alle 10^{-3} . Mahdollisimman hyvän tarkkuuden saamiseksi on lisäksi käytetty energiabalanssin laskentaa.

3. Tietojen esittäminen yhtälömuodossa

Ilmanvaihtojärjestelmän tehokkuuden määrittämiseksi on käytetty lämmönpoiston (ϵ_t) ja epäpuhtauksien poistotehokkuutta (ϵ_c) yhdessä lämpöviihtyvyyden suhteen tyytymättömien (PPD) arvioidun prosentuaalisen osuuden ja ilman laatuun tyytymättömien (PD) prosenttiosuuden kanssa. Indeksit ϵ_t ja ϵ_c määritetään lähteessä [12]:

$$\epsilon_t = \frac{T_o - T_i}{T_m - T_i} \quad (1)$$

$$\epsilon_c = \frac{C_o - C_i}{C_m - C_i} \quad (2)$$

Yhtälöissä (1) ja (2) T on lämpötila ($^{\circ}\text{C}$), C on epäpuhtauspitoisuus (ppm), alaindeksit o , i ja m tarkoittavat (o) poistoa, (i) tuloa ja (m) huoneen oleskeluvyöhykkeen keskiarvoa (1,8 m korkeudessa). Indeksi ϵ_t vastaa lämmönvaihtimen tehokkuutta, ja sillä mitataan järjestelmän lämmönpoistokykyä. Indeksi ϵ_c vastaa epäpuhtauksien poiston tehokkuutta. Indeksien ϵ_t ja ϵ_c arvot määräytyvät mm. lämmön- ja epäpuhtauslähteiden, ilmanjaon ja huoneen mittojen perusteella. Indeksien hyvät arvot eivät kuitenkaan aina takaa hyvää lämpöviihtyvyyttä ja ilmanlaatua huoneen oleskeluvyöhykkeellä.

Sisäilman laatuun tyytymättömien (PD) ja lämpöolosuhteisiin tyytymättömien (PPD) arvioidut prosenttiosuudet saadaan yhtälöillä (3) ja (4), ks. Fanger [13].

$$PD = 395 \cdot \exp(-1.83 \dot{v}^{0.25}) \quad (3)$$

$$PPD = 100 - 95 \exp - \left[0.033353(PMV)^4 + 0.2179(PMV)^2 \right] \quad (4)$$

jossa $\dot{v}$ on ilmanvaihdon määrä (l/s) ja PMV (Predicted Mean Vote) on lämpöaistimus määriteltynä ISO 7730:n mukaan [14]. Ihanteellisen lämpöolosuhteen suositeltu PPD-raja-arvo on 10 %, mikä vastaa lauseketta $-0.5 \leq PMV \leq 0.5$. Siten kummankin indeksin alhainen lukema kuvaa hyvää sisäilman laatua ja hyvää lämpöviihtyvyyttä.

Ilmanvaihtojärjestelmän laadun kuvaamiseksi lämpöviihtyvyysarvo, N_t , ja ilmanlaatuarvo, N_c , voidaan määritellä yhdistämällä yhtälöt (1) ja (2) PPD- ja vastaavasti PD-indekseihin [12 ja 15] seuraavasti:

$$N_t = \frac{\varepsilon_t}{PPD} \quad (5)$$

$$N_c = \frac{\varepsilon_c}{PD} \quad (6)$$

Näistä kahdesta arvosta voidaan yhdistämällä saada yksi ilmanvaihtoindeksi, Air Distribution Index (ADI), joka kuvaa ilmanvaihtojärjestelmän tehokkuutta sekä ilman laadun että lämpöolosuhteiden osalta. Yhtälömuodossa se on määritelty [12] seuraavasti:

$$ADI = (N_t \times N_c)^{0.5} \quad (7)$$

Tässä tutkimuksessa verrataan edellä olevalla yhtälöllä ilmanvaihtojärjestelmien ilmanvaihtotehoa.

Ilman keski-ikä huoneen eri kohdissa on laskettu yhtälöllä:

$$\bar{\tau}_p = \frac{\int_0^\infty C_p(t) dt}{C(0)} \quad (8)$$

Ilmanvaihtojärjestelmien energiatehokkuutta arvioidaan seuraavilla yhtälöillä, joissa ilman virtausmäärä on q , paine-ero Δp ja puhallinteho E :

$$\Delta p \propto q^2, E \propto q^3 \quad (9)$$

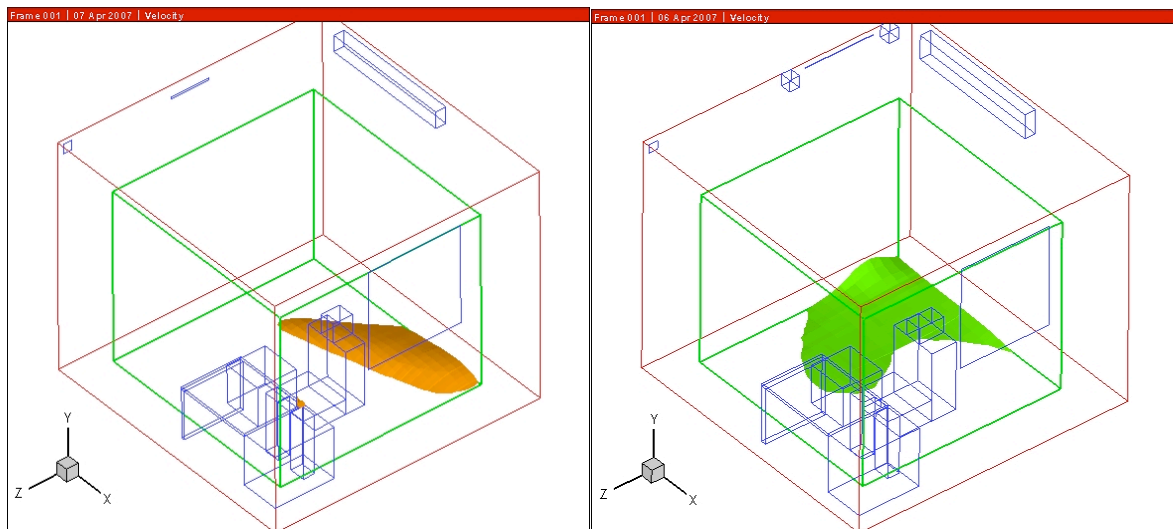
4. TULOKSET

Tutkittujen ilmanjakojärjestelmien tuottaman sisäilmaympäristön vertaaminen saman ADI-indeksin mukaan

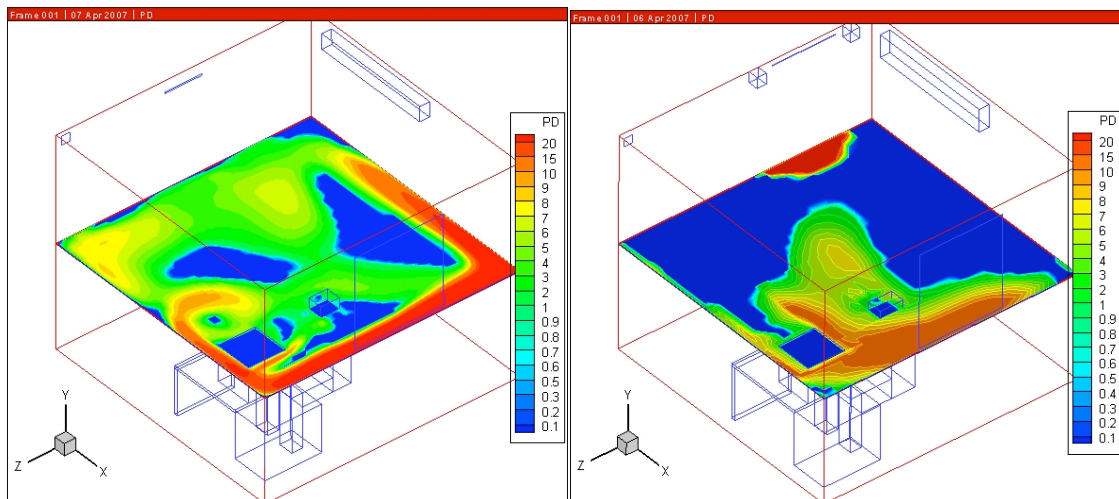
Kuvassa 2 esitetään perspektiivinäkymänä vakionopeuden suuruus oleskeluvyöhykkeellä kesäolosuhteissa ISO-nopeusarvolla 0,25 m/s, kun kyseessä ovat sekoittavat ja kerrostavat ilmanvaihtojärjestelmät. Oleskeluvyöhykkeen korkeus on 1,8 m ja oleskeluvyöhykkeen etäisyydet ympäröiviin pintoihin ovat: 0,3 m jokaisesta seinästä ja 0,1 m lattiapinnasta. Kuvasta 2 ilmenee, että sekoittavassa järjestelmässä on yksi alue, lattianraja, jossa nopeus on suurempi kuin 0,25 m/s. Lisäksi kuvasta 2 ilmenee, että kerrostavassa järjestelmässä oleskeluvyöhykkeellä ei ole mitään merkitsevää nopeusjakautumaongelmaa, lukuun ottamatta

pientä osaa lattialla ilmanvaihtokoneen alla. Sama ominaisuus havaittiin myös syrjäyttävässä järjestelmässä, joka muodostaa nk. *läheisvyöhykkeen*. Pintoihin törmäävässä järjestelmässä ilman nopeus on koko oleskeluvyöhykkeellä alle 0,25 m/s. Tästä seuraa, että pintoihin törmäävässä järjestelmässä oleskeluvyöhykkeen alle 0,25 m/s nopeuden vakiokriteerit täyttyvät oikein hyvin.

Vetoon tyytymättömien PD-indeksi on laadittu sisäilman fyysisten parametrien suhteuttamiseksi henkilöstön arvioituun viihtyvyyteen. PD-indeksiä kuvataan kuvassa 3, kun kyseessä ovat sekoittavat ja kerrostavat ilmanvaihtojärjestelmät. PD-indeksi on merkitty tasolla, joka on 1,1 m lattiatason yläpuolella, ts. hengitysvyöhykkeellä.



Kuva 2. ISO-nopeusarvo 0,25 m/s oleskeluvyöhykkeellä (sekoittava ilmanvaihtojärjestelmä vasemmalla ja kerrostava oikealla).



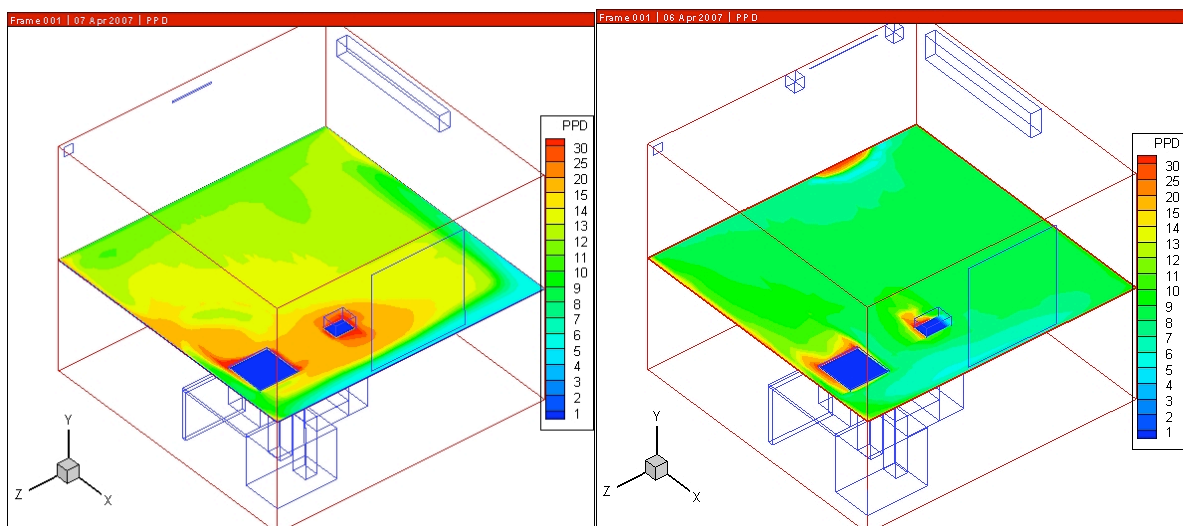
Kuva 3. Lattian tasosta 1,1 m korkeudella ilmenneen vedon johdosta tyytymättömien prosenttiosuus (sekoittava ilmanvaihtojärjestelmä vasemmalla ja kerrostava oikealla).

Kuten kuvasta 3 ilmenee, tutkimuksessa käytetyn sekoittavan järjestelmän yhteydessä ilmenevä veto voi olla ongelmallista. Toisaalta kerrostavassa järjestelmässä ilmeni huoneessa olevan henkilön mukaan hyväksyttäviä PD-tasoja. Yksi korkeampi taso on havaittavissa kaukana huoneessa olevasta henkilöstä ja lähellä läheisvyöhykettä, mikä ei ole tässä

tapauksessa merkittävää. Kerrostavan järjestelmän PD-tasot ovat alemmat kuin sekoittavan järjestelmän vastaavat tasot, ja ne ovat täysin suositeltujen vakioarvojen puitteissa. Kerrostava järjestelmä toimii kuten syrjäyttävä sekä pintoihin törmäävä järjestelmä.

Kuvassa 4 esitetään arvioidut PPD-arvot 1,1 m korkeudella lattiasta, kun kyseessä on sekoittava sekä kerrostava järjestelmä. Kuvasta 4 ilmenee, että korkeimmat PPD-tasot havaittiin lähellä huoneessa olevaa henkilöä, kun kyseessä on sekoittava järjestelmä. Mainittakoon tässä yhteydessä, että yli 10 % PPD-arvot eivät ole hyväksyttäviä. Tällainen tulos voi johtua sekoittavan järjestelmän hyvin alhaisesta ilmanvaihtotehosta, mikä on teoreettisesti enintään 50 %. Tätä voidaan verrata syrjäyttävän, kerrostavan ja pintoihin törmäävän järjestelmän vastaaviin lukuihin, jotka ovat useissa tapauksissa yli 60 %.

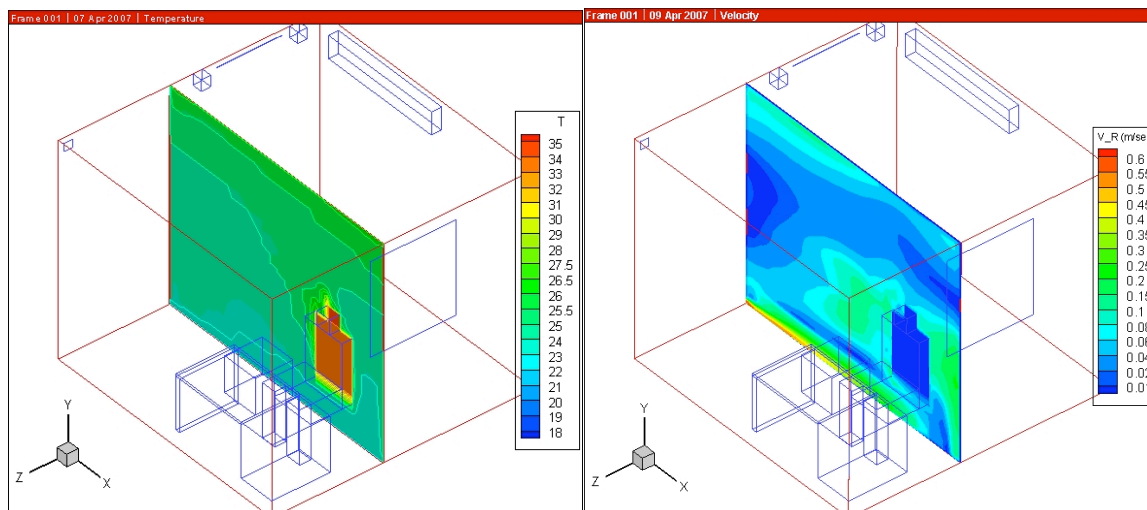
Kun kyseessä on kerrostava järjestelmä, kuten kuvassa 4, korkeimmat PPD-tasot havaittiin hyvin lähellä huoneessa olevaa henkilöä ja ilmanvaihtokoneen alla. Mainittakoon tässä yhteydessä, että suurimmassa osassa huonetta PPD-taso on enintään 10 %, mikä on suosituksen mukainen vakioarvo. Tässä voidaan nähdä suunnitteluvaiheessa tehtyjen virtausteknisten CFD-laskelmien hyödyt. Edellä tehdyn havainnon perusteella on suositeltavaa sijoittaa huoneessa oleva henkilö huoneen riskittömille vyöhykkeille.



Kuva 4. Lattian tasosta 1,1 m korkeudella tyytymättömien PPD-prosenttiosuus (sekoittava ilmanvaihtojärjestelmä vasemmalla ja kerrostava oikealla).

Lopuksi mainittakoon, että käytettäessä PPD-havainnot ilmeni, että kaikki kolme järjestelmää – kerrostava, pintoihin törmäävä ja syrjäyttävä – toimivat samalla tavalla, kun kyseessä on pienen toimiston ilmanvaihto. Kokonaisuuden kannalta ajatellen arvioidut PPD-arvot ovat melkein hyväksyttäviä. Tämä ei kuitenkaan päde markkinoiden yleisimmässä eli sekoittavassa järjestelmässä, ja sitä tulisi välttää korkean energiankulutuksen ja huoneessa oleskelevien terveyden kannalta.

Kuvassa 5 esitetään kerrostavan ilmanjakojärjestelmän lämpötila- ja nopeuskäyrät huoneen keskitasolla. Korkeimmat lämpötilat esiintyvät katon tasolla ja nopeudet ovat suositeltujen vakioarvojen puitteissa. Siksi kerrostava ilmanjakojärjestelmä voi yhdistää syrjäyttävän järjestelmän (kerrokseen jakautuminen) ja sekoittavan järjestelmän (ympäröivän ilman mukaan otto ilmavirtaan) edut. Toinen kerrostavan ilmanjakojärjestelmän etu on, että sitä voidaan käyttää sekä lämmitys- että jäähdytystarkoituksiin.



Kuva 5. Lämpötila- (vasemmalla) ja nopeuskäyrät (oikealla) keskitasolla ($z = n. 1,6 \text{ m}$) kun kyseessä on kerrostava ilmanvaihtojärjestelmä.

Kaikkien ilmanvaihtojärjestelmien energiankulutuksen vertaaminen käytettäessä samaa ADI-indeksiä

Huoneen oleskeluvyöhykkeen PD- ja PPD-arvojen minimi-, keskiarvo- ja maksimimäärät esitetään taulukossa 1. Tulokset osoittivat, että syrjäyttävä, pintoihin törmäävä ja kerrostava järjestelmä tuottavat lähes samat suoritusarvot, kun taas sekoittavan ilmanjakojärjestelmän PD- ja PPD-arvot oleskeluvyöhykkeellä ovat korkeimmat, katso myös lähde [16].

Taulukko 1: Kaikkien ilmanjakojärjestelmien PPD- ja PD-arvot oleskeluvyöhykkeellä samalla ADI-indeksillä.

	Sekoittava			Syrjäyttävä			Pintoihin törmäävä			Kerrostava		
	Min	Max	Keski-arvo	Min	Max	Keski-arvo	Min	Max	Keski-arvo	Min	Max	Keski-arvo
PPD (%)	8,4	13,9	11,2	5,0	11,4	8,0	5,0	14,6	8,8	5,2	11,1	8,3
PD (%)	2,2	12,9	11,7	1,0	6,8	4,5	1,4	5,0	3,6	1,2	10,0	6,9

Keskimääräiset arvot indekseille ϵ_t , PPD, ϵ_c , PD ja ADI koko huonetilassa esitetään yhteenvedona taulukossa 2. Tuloksista ilmeni, että suurin lämpöviihtyvyysslukema, N_t , ja ilmanlaatulukema, N_c , saatiin kerrostavassa järjestelmässä, minkä jälkeen tulivat pintoihin törmäävä ja syrjäyttävä järjestelmä. Pienin lämpöviihtyvyysslukema, N_t , oli sekoittavassa ilmanjakojärjestelmässä.

Taulukko 2: Keskimääräiset arvot indekseille ϵ_t , PPD, ϵ_c , PD ja ADI koko huonetilassa kaikissa ilmanjakojärjestelmissä.

	Sekoittava	Syrjäyttävä	Pintoihin törmäävä	Kerrostava
ϵ_t (%)	99	121	125	123
PPD (%)	9,0	9,2	8,9	8,5
ϵ_c (%)	118	118	120	121
PD (%)	5,4	6,1	7,0	7,2
ADI [-]	15,5	15,9	15,7	16,1

Käytettäessä erilaisia ilmanjakomenetelmiä – ks. taulukko 3 ja vertailun vuoksi ilmanvaihtoindeksi (ADI) – ilmenee, että parempaa ilmanjakojärjestelmää käytettäessä ei tarvita suurempaa ilmavirtausta. Taulukon 3 perusteella ilmenee, että pienimmällä virtausnopeudella 0,025 m³/s kerrostava järjestelmä tuotti parhaan ADI-arvon, ts. 16,1.

Sekoittava järjestelmä tarvitsee suunnilleen saman ADI-indeksin tuottamiseen 1,8 kerta suuremman virtausmäärän. Yhtälöllä (9) laskettuna energiankulutus on tällöin 5,83 kertaa suurempi. Pintoihin törmäävän järjestelmän virtausmäärä on 1,4 kertaa suurempi, ja se tarvitsee 2,74 kertaa enemmän energiaa. Pintoihin törmäävän järjestelmän energiankulutus on lähes puolet sekoittavan järjestelmän kulutuksesta. Syrjäyttävä järjestelmä tarvitsee 1,1 kertaa suuremman virtausmäärän ja sen energiankulutus on 1,33 kertaa suurempi kuin kerrostavassa järjestelmässä. Vaikka energiankulutus on pienempi kuin kahdessa muussa järjestelmässä, se on silti suurempi kuin kerrostavassa järjestelmässä.

Taulukko 3: Ilmanjakojärjestelmien energiankulutuksen vertaaminen ADI-indeksin ollessa sama.

	<i>ADI</i>	<i>Kokonaisvirtaus</i>	<i>Energian- kulutus</i>
Sekoittava ilmanjako	15,5	0,045 m ³ /s	
Ero kerrostavaan järjestelmään verrattuna		180 %	580 %
Pintoihin törmäävä ilmanjako	15,7	0,035 m ³ /s	
Ero kerrostavaan järjestelmään verrattuna		140 %	270 %
Syrjäyttävä ilmanjako	15,9	0,0275 m ³ /s	
Ero kerrostavaan järjestelmään verrattuna		110 %	130 %
Kerrostava ilmanjako	16,1	0,025 m ³ /s	

5. LOPPUPÄÄTELMÄT

Ilmanjakojärjestelmän valinta vaikuttaa ratkaisevasti ilmanvaihtojärjestelmän energiankulutukseen. Kerrostava ilmanjakojärjestelmä on kokonaisuutena tehokkaampi kuin syrjäyttävä, pintoihin törmäävä tai sekoittava järjestelmä. Saman ADI-indeksin saavuttamiseksi sekoittavalla järjestelmällä tarvitaan 1,8 kertaa suurempi ilman virtausmäärä ja 5,83 kertaa enemmän energiaa. Syrjäyttävä ilmanjakojärjestelmä kuluttaa 1,33 kertaa ja pintoihin törmäävä ilmanjakojärjestelmä 2,74 kertaa enemmän energiaa kuin kerrostava ilmanvaihto, mutta ne ovat silti tehokkaampia kuin perinteinen sekoittava ilmanjako. Artikkelin kirjoittajien näkemyksen mukaan energiasäästöön tarvitaan matalaa nopeutta käyttävien järjestelmien uusia kehitysversioita. Lisäksi perinteisiin sekoittaviin järjestelmiin, jotka ovat pientä nopeutta käyttäviin järjestelmiin verrattuna suorituskyvyltään heikompia, ei pitäisi enää tukeutua.

VIIITTEET

1. Karimipناه T., Sandberg M. and H. B. Awbi, A Comparative Study of Different Air Distribution Systems in a Classroom. In *Proc. of Roomvent 2000, Reading, England*, 1013-1018 (2000).
2. Karimipناه T. and H. B. Awbi. Theoretical and Experimental Investigation of Impinging Jet Ventilation and Comparison with Wall Displacement Ventilation, *Building and Environment* **37** (2002) 1329-1342.
3. Cho Y., Awbi H. B and T. Karimipناه. A Comparison between Four Different Ventilation Systems". In *Proc. of Roomvent 2002, Copenhagen, June* (2002).
4. Karimipناه T., Awbi H. B., Sandberg M. and Blomqvist C. Investigation of air quality, comfort parameters and effectiveness for two floor-level air supply systems in classrooms. *Building and Environment* **42** (2007) 647-655.
5. Cehlin M., Moshfegh B. and Sandberg M., Measurements of air temperatures close to a low-velocity diffuser in displacement ventilation using infrared camera: parameter and error analysis. *Energy and Buildings*, **34** (2002) 687-698.
6. Cho YJ, Awbi H. B. and T. Karimipناه (2004), The characteristics of wall confluent jets for ventilated enclosures. In *Proc. of Roomvent 2004, Coimbra, Portugal* (2004).
7. Karimipناه T. and H. B. Awbi. Performance evaluation of two air distribution systems. Presented in The 5th International Conference on Ventilation for Automotive Industry, 11-12 June 2001, Stratford -Upon-Avon, United Kingdom (2001).
8. Awbi H. B. and T. Karimipناه. A comparison between three methods of low-level air supplies. In *Proc. of Internat. Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings (IAQVEC 2001), Chagsha, China*, Vol. I, 311-316 (2001).
9. Vuolle M. The impact of air temperature gradient on energy consumption, SIY Sisäilmatio Oy Finland, In Finnish, (2006).
10. IDA Indoor Climate and Energy, <http://www.equa.se/eng.ice.html>
11. Awbi H. B. VORTEX: A computer code for airflow, heat transfer and concentration in enclosures, Version 3C and 4D-RNG, Reading, UK (2005).
12. Awbi H. B. *Ventilation of Buildings*. 2nd Ed., Taylor and Francis (E&FN Spon), (2003).
13. Fanger P.O. *Thermal comfort*. McGraw-Hill New York, (1972).
14. ISO/CEN 7730. Moderate thermal environments: Determination of PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort (1994).
15. Awbi H. B. Energy Efficient Room Air Distribution, *Renewable Energy* **15** (1998) 293-299.
16. Karimipناه T., Awbi H. B. and Moshfegh B., On the energy consumption of high and low-level air suppliers. In *Proc. of World Renewable Energy Congress IX and exhibition, Florence, Italy* (2006).