

Uudenlainen kerrostavan ilmanvaihdon tuloilmalaite teollisuustoimitiloja varten

Setareh Janbakhsh^{1,2} Bahram Moshfegh^{1,2} Shahriar Ghahremanian^{1,2}

1 Linköpingin yliopisto, johtamisen ja konetekniikan laitos, energiajärjestelmien osasto

2 Gävlen yliopisto, tekniikan ja rakennetun ympäristön laitos, energia- ja konetekniikan osasto

Tiivistelmä

Tutkimuksen tuloksista käy ilmi uuden kerrostavan ilmanvaihdon tuloilmalaitteen tuottaman ilmvirran jakautuminen ei-isotermisissä olosuhteissa. Oleskeluvyöhykkeen sisäilman parametrien havainnollistamiseksi sekä lämmitys- että jäähdytyskaudella kokeellinen tutkimus on suoritettu teollisuustoimitiloissa. Sisäilmastoa tutkittiin seisovan henkilön nilkan, vyötärön ja niskan tasolla eri paikoissa, mikä edustaa toimitiloissa käytettävien mittauspisteiden vaihtelemisesta johtuvaa termisen viihtyvyyden indeksien ja vetoindeksin (DR) vaihtelua. Havaitut PPD- ja DR-arvot ilmaisevat termisen viihtyvyyden tyydyttävät tasot toimitiloissa kesä- ja talvitapauksessa. Loppupäätelmänä voidaan esittää, että hyvin toteutettu ilmvirran jakautuminen säästää energiaa, sillä se ehkäisee ylimääräisten lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien tarvetta kylminä ja kuumina kausina.

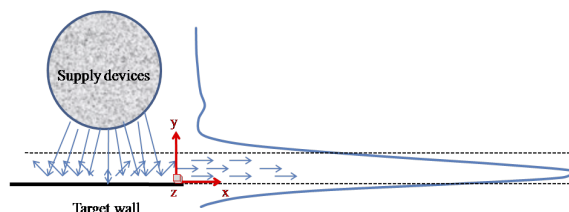
Avainsanat: teollisuusilmastointi, kokeellinen tutkimus, sisäilmasto, kerrostavan ilmanvaihdon tuloilmalaite

Johdanto

Ilmastointijärjestelmä on teollisuustoimitiloissa tärkeä prosessi, sillä se liittyy tilojen energiatehokkaaseen käyttöön ja ylläpitää terveellistä sisäilmastoa tarjoamalla riittävästi raikasta ilmaa.

Tässä artikkelissa tutkitaan sisäilman laatustrategioita ja ilmvirtauksen hallintaa toimitiloissa tarkastelutasojen osalta. Näiden tarkoituksena on tarjota sopiva ympäristö, joka ei heikennä tiloissa oleskelevien terveyttä ja toimintakykyä. Tärkeimmät tarkastelutasot teollisuustiloissa ovat ilman virtausnopeuden vaihtelut, ilman virtaus, lämpötila, kosteus ja epäpuhtauksien pitoisuudet [1].

Tässä tutkimuksessa keskitytään arvioimaan sisäilman peruspiirteiden ennusteita koskevaa realistista tapausta teollisuustoimitiloissa uudenlaisen kerrostavan ilmanvaihdon tuloilmalaitteen yhteydessä. Tarkasteltavaa kerrostavaa ilmvaihtojärjestelmää (Confluent Jets) voidaan kuvata sylinterin runkoon kiinnitettyjen tuloilman päätelaitteiden aukoista tuleviksi yksittäisiksi pyörteileviksi ilmasuihkuiksi. Tuloilmalaite on sijoitettu pystysuoraan, ja ilmasuihkut on suunnattu kohdeseinää vasten, ks. kuva 1, 3 a. LVI-järjestelmässä käytettiin vakioilmamääräistä virtausta (CAV), jossa ilmanvaihdon kokonaisilmavirta oli 3,6 m³/s.



Kuva 1. Kuva ylhäältä päin, virtauskuvio, nopeusmittauksen tuloksen perusteella, talvitapaus.

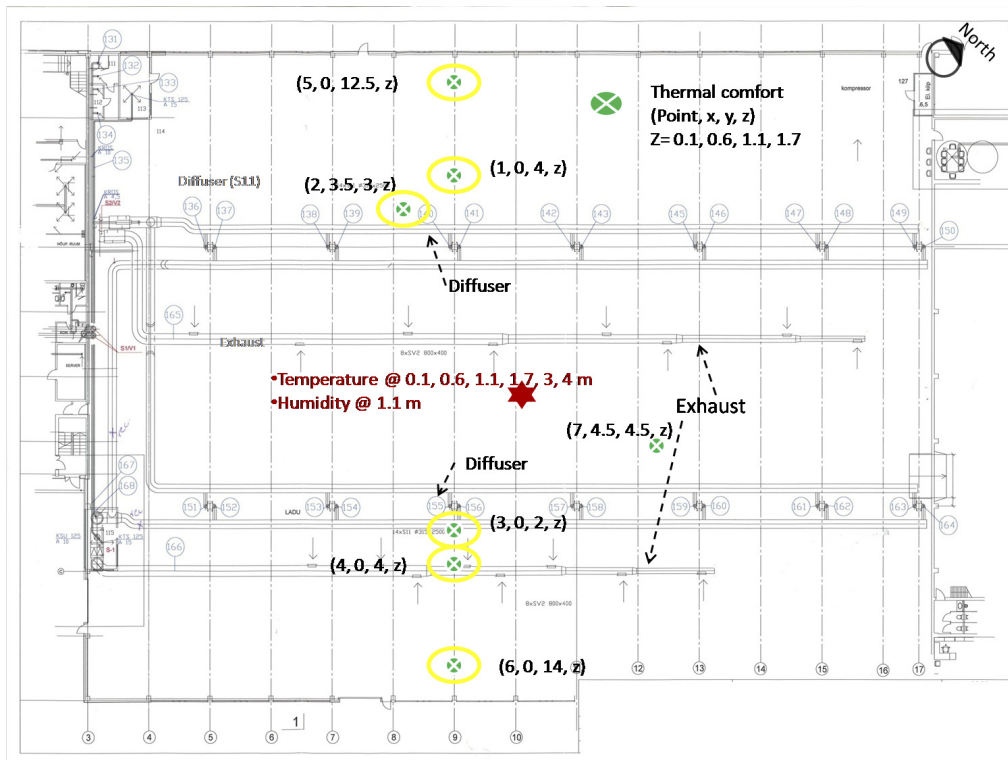
Tuloilman lämpötila pidettiin lämmityskaudella vakiona, kun taas kylmällä kaudella tuloilman lämpötila riippui pääasiassa ulkolämpötilasta, mikä mahdollisti nopean reagoinnin muutoksiin. Tulee huomata, että toimitiloihin ei ole asennettu ulkoista jäähdytys- ja lämmitysjärjestelmää.

2. Kokeellinen menetelmä

2.1 Fysikaalinen malli

Tallinnassa Virossa sijaitsevien toimitilojen lattiapinta-ala on 4 890 m², pituus 81,5 m, leveys 60 m ja suurin korkeus noin 7,4 m. Toimitiloihin on asennettu uudenlainen kerrostavan ilmanvaihdon tuloilmalaite. Kuva 2 esittää sisäilman parametrien mittauspisteiden sijaintia oleskeluvyöhykkeellä sekä lämmitys- että jäähdytyskaudella.

Ilman tulo on järjestetty 14 päätelaitteen kautta. Jokaisessa laitteessa on kaksi tuloilmalaitetta. Ilmasuihkut tulevat kussakin tuloilmalaitteessa olevista yhdeksästä rinnakkaisesta 58 suuttimen pystyrivistä. Suuttimien välinen etäisyys on $s = 3d$, missä d on pyöreiden suuttimien halkaisija. Päätelaitteet sijaitsevat vasten kohdeseinää, jonka sivumitat ovat $0,56 \times 0,56$ m, ja ensimmäinen laite on asennettu 0,29 m lattian yläpuolelle. Poistoilmalaitteet on sijoitettu kahteen rinnakkaiseen pitkään kanavaan toimitilojen sivuille kahteen eri paikkaan samaan tasoon, ks. kuva 2. Toimitilan ulkoseinien keskimääräinen U-arvo on ikkunan alapuolella 0,3 ja yläpuolella 0,25 W/m²K, ja toimistojen ja toimitilojen toisen puolen välisten eristettyjen sisäseinien keskimääräinen U-arvo on 0,6 W/m²K. Ulkoseiniin on sijoitettu 57 ikkunaa, joiden U-arvo on 1,4 W/m²K; kehystä ei ole sisällytetty U-arvoon. Ulkoseinissä on kolme tuotteiden viemiseen ja tuomiseen käytettävää ovea, joiden leveys on 4 m ja korkeus 4,8 m, ja niiden U-arvo on 0,8 W/m²K. Toimitiloissa käytettiin kahdentyyppisiä valaisimia, joiden teho oli 42,8 kW, sekä leikkaamiseen ja liitosten tekemiseen käytettäviä erilaisia koneita teholtaan 14,6 kW. Oleskelukuormitus kohdistui kello 7.30:n ja 17.00:n välille.



Kuva 2. Mittauspisteiden geometria ja sijainti.

2.2 Kenttämittaukset

Termografia on ilman lämmönjako- ja virtauskuvioiden visualisointitekniikka, jolla voidaan taltioida kuvaa esineiden lähettämästä säteilystä [2]. Lämpökuvaa käytettiin kokonaisilmavirtauksen ja tuloilmalaitteen lähellä olevan lämpökentän kuvaamiseksi. Kamerana käytettiin Agema S60:tä (FLIR-järjestelmä), jonka sensitiivisyys infrapunasäteilylle on 7,5–13 μm , kuvaruudun lämpötilatarkkuus $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja resoluutio 320×240 pikseliä. Infrapunakamera kalibroitiin valmistajalla ennen käyttöä. Infrapunakameraa käytettiin myös kaikkien koneiden, varaston ja rakennuksen vaipan pintalämpötilojen määrittämiseen. Yksityiskohtaiset ilman virtausnopeuden mittaukset kirjattiin lähellä päätelaitteita kuumalanka-anturilla. Anturi kytkettiin monitoimimittalaitteeseen. Mittaus tehtiin eri etäisyyksiltä ja eri tasoilla lattian pinnasta, jotta virtausnopeusprofiili voitiin muodostaa kahteen suuntaan virtauksesta, ja jokaisessa pisteessä virtausnopeutta mitattiin kolmen minuutin ajan. Näytteenottotaajuus oli 1 Hz ja tarkkuus $\pm(0,03\text{ m/s} + 5\text{ } \%)$. Gradientilämpötilaa ja kosteutta mitattiin jatkuvasti kahdessa paikassa toimitilojen ja mitausalueen keskikohdassa, minkä avulla voitiin valvoa mahdollista nousua tai laskua mittauksen aikana. Kannettavat dataloggerit taltioivat lämpötilan ja kosteuden keskiarvoja 15 minuutin välein mittauspäivän aikana, ja laitteet kalibroitiin valmistajalla.

Ilman virtausnopeutta, lämpötilaa, kosteutta ja termistä viihtyvyyttä sekä DR-arvoja tutkittiin Innova-antureilla ISO 7730 standardin mukaisesti [3, 4]. Lämpötila-anturit rekisteröivät ilman lämpötilaa tarkkuudella $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ ja toimintalämpötilaa tarkkuudella $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ lämpötila-alueella 5–40 $^{\circ}\text{C}$. Ilman lämpötilaa rekisteröitäessä ympäristön lämpösäteily oli minimaalista. PMV-arvot laskettiin suoraan kosteuden, ilman virtausnopeuden, aktiivisuustason ja vaatetuksen

perusteella. Ilman virtausnopeuden anturit, joiden tarkkuus oli $\pm(0,05\text{ Va} + 0,05)\text{ m/s}$, kirjasivat ilman virtausnopeutta vakiolämpötilaeron anemometriperiaatteella.

Kosteus mitattiin ilman absoluuttisen kosteuden osalta. Keskimääräiset mittausarvot taltioitiin kolmen minuutin välein, ja vakaan tilan saavuttamiseksi sovellettiin 20 minuutin viivettä mittauspaikkojen välillä. Mittaukset tehtiin seisovan henkilön nilkan, vyötärön ja niskan tasolta. Mittauspisteiden sijainnit valittiin oleskeluvyöhykkeen termisen viihtyvyyden selvittämiseksi, ks. kuva 2.

Ilman nopeus ja virtaus mitattiin jokaisen päätelaitteen kanavan sisällä ennen mittausvyöhykkeellä tapahtuvan mittauksen aloittamista.

3. Tapaustutkimus

Tässä artikkelissa on tarkasteltu kahta tapausta sisäilmaston parametrien esittämiseksi. Mittaustuloksia käytettiin termisen viihtyvyyden tason ja ilmanvaihtostrategian määrittämiseksi jäähdytys- ja lämmityskausia varten. Näiden tasojen arviointi riippuu mittausparametreista, kuten ilman nopeudesta, lämpötilasta sekä termisestä viihtyvyydestä oleskeluvyöhykkeellä ja päätelaitteen lähivyöhykkeellä.

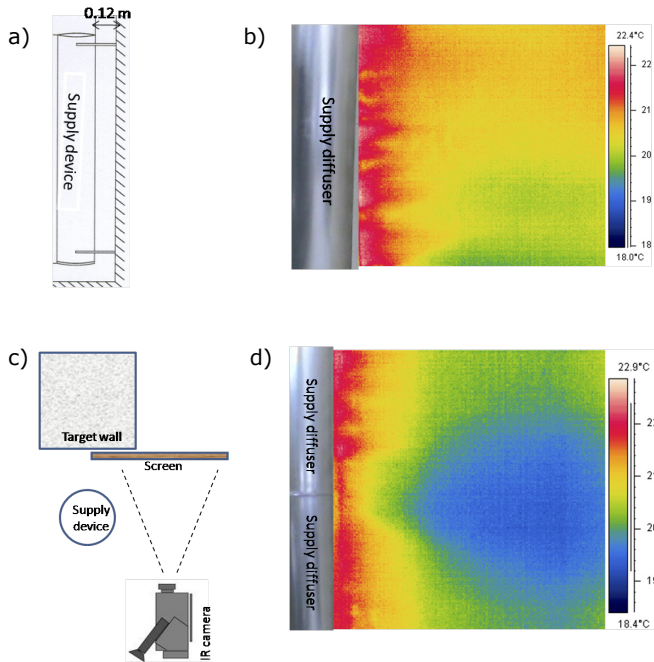
Heinäkuussa mitatussa kesätapauksessa ilman kokonaisvirtaus päätelaitteista oli 3,6 m³/s, ja ilmanvaihto oli toiminnassa klo 2.00–6.00 / 7.30–18.00, ks. kuva 7a.

Tammikuussa mitatussa talvitapauksessa ilman kokonaisvirtaus päätelaitteista oli 3,6 m³/s, ja ilmanvaihto oli toiminnassa klo 7.00–16.00, ks. kuva 7b.

4. Tulokset

4.1 Infrapunakuva

Tuloilman lämpötilaa muutettiin tuloilmalaitteen virtauskuvion infrapunakamerakuvan rekisteröinnin aikana, mikä oli helpoin keino tarkastella hyvin sijoitetuista päätelaitteista tulevaa virtausta. Kalvo, jonka emissiivisyys on 0,91, asetettiin seinän reunaan, ks. kuva 3a, siten, ettei se häirinnyt ilman virtauskuviota ja lämpötilan jakautumista päätelaitteesta, kuvat 3c ja 3d.



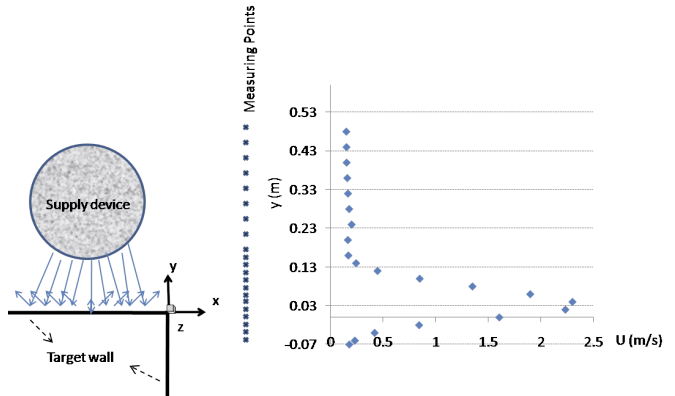
Kuva 3. Infrapunakuvan visualisointi – tuloilman lämpötila noin 22 °C, ilman virtaus 0,25 m³/s, talvitapaus a) sivulta b) järjestely ylhäältäpäin c) yksi päätelaite d) kaksi päätelaitetta.

4.2 Nopeusprofiilit ja ilmasuihkujen ominaisuudet

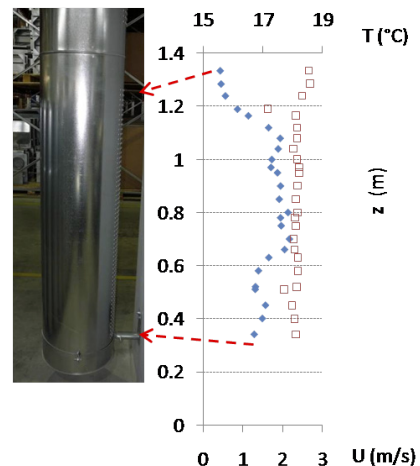
Kokeelliset tulokset suoritettiin kuumalanka-anturilla, jolla mitattiin yksiulotteista nopeuskenttää; suurin tuloilmalaitteesta mitattu keskinopeus oli kesätapauksessa 8,2 ja talvitapauksessa 8,8 m/s. Kuvassa 4 on esitetty nopeusprofiili U_x y-akselilla. Tarkasteltava nopeus rekisteröitiin 0,8 m:n korkeudelta ja 0,2 m:n etäisyydeltä kohdeseinän reunasta kohdasta, jossa ilmasuihkut osuvat kohdeseinään.

Kuvassa 5 on esitetty paikallisen nopeuden profiili U_x ja ilman lämpötila T lattiasta mitatun etäisyyden funktiona virtauksesta ulospäin päätelaitteen ja kohdeseinän välisellä keski-etäisyydellä, eli y-etäisyys kohdeseinän reunasta on 0,06 m ja x-etäisyys 0,2 m. Tulokset rekisteröitiin eri pystykorkeuksilla alemman ilmanvaihtolaitteen ensimmäisestä suuttimesta lähinnä lattiaa olevaan viimeiseen suuttimeen. Nopeusprofiili tietyllä etäisyydellä päätelaitteesta esittää ilmasuihkun käyttäytymistä suihkujen yhtymisilmiönä [5]. Ilman lämpötilan pystygradientti vaikuttaa lähes vakiolta ilmasuihkun hallitsevan vaikutusalueen vuoksi.

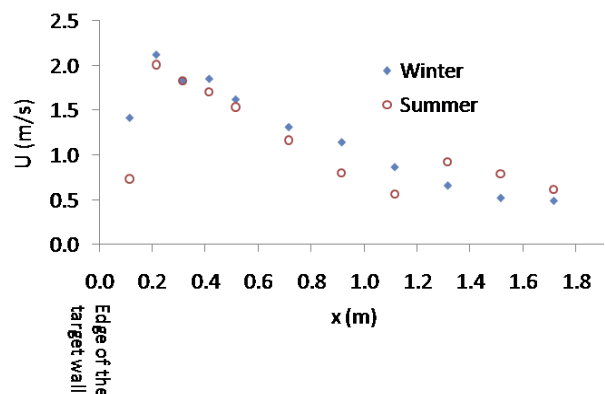
Kaksi eri kaaviota kuvaa kokeellisesti todettua mitatun nopeuden heikkenemistä kesä- ja talvitapauksissa. Vertailun vuoksi molemmat tapaukset suoritettiin samalla tasolla lattian pinnasta. Mitatulla nopeusprofiililla todettiin tasoseinänsuihkun käyttäytyvän samalla tavalla, ks. kuva 6. Kuten kuvasta 6 näkyy, suurin nopeus on kasvanut puolen metrin päässä tuloilmalaitteen keskikohdasta, ja sen jälkeen suihkun keskinopeus vähenee normaalisti hieman.



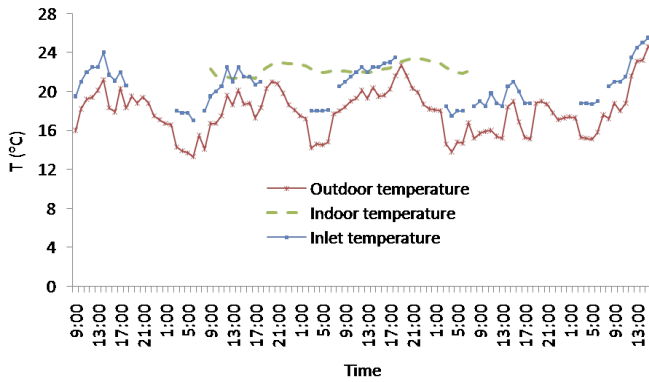
Kuva 4. Nopeuden x-komponentin profiili y-akselilla, talvitapaus.



Kuva 5. Nopeuskomponentin x ja ilman lämpötilan profiili z-akselilla, talvitapaus.



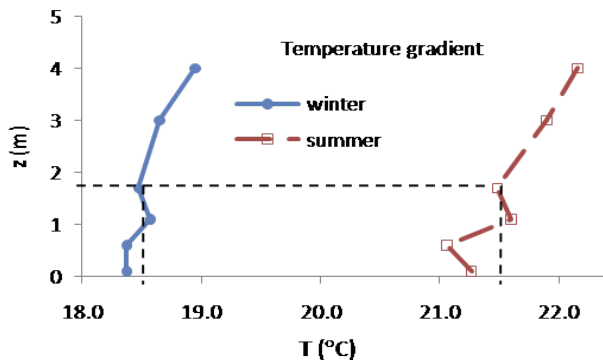
Kuva 6. Nopeuskomponentin x heikkeneminen x-akselilla 0,8 m:n korkeudella lattiasta



Kuva 7a. Mitattu ulko-, sisä- ja tuloilman lämpötila, kesätapaus

4.3. Sisäilmaston analyysi

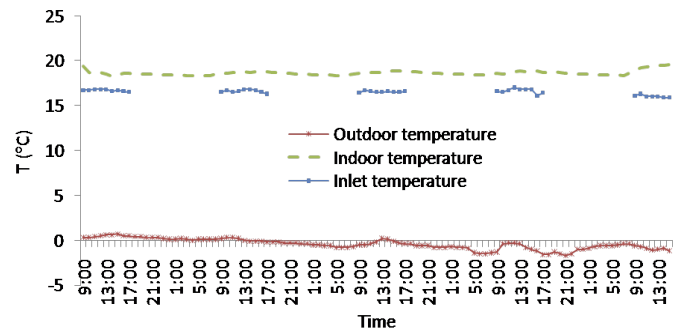
Tähän tutkimukseen sisältyy kaksi ilmaston ääritapausta – talvi- ja kesätapaus; kuvat 7a ja 7b esittävät sisälämpötilaprofiileja toimitiloissa tehdyn viiden päivän mittauksen aikana. Kesätapauksessa miellyttävä sisäympäristö muodostettiin ennen työntekijöiden tuloa toimitiloihin säätämällä tuloilman lämpötilaa ulkoilmaa käyttäen klo 2.00–6.00, ks. kuva 7a. Tämä hallintastrategia säästää energiaa sekä tarjoaa hyvän sisäympäristön. Mittauksen aikana keskilämpötilaa mitattiin jatkuvasti korkeuksilta 0,1, 0,6, 1,1, 1,7, 3 ja 4 m lattiasta. Keskimääräinen lämpötilan gradientti ja suhteellinen ilmastokosteus olivat talvitapauksessa 0,8 °C ja 29 % ja kesätapauksessa 1,1 °C ja 55 % työaikana mittauspäivinä toimitilojen keskikohdassa; suhteellisen kosteuden sensori oli sijoitettu 1,1 m:n korkeudelle lattiasta, ks. kuva 8.



Kuva 8. Lämpötilan gradientti toimitilojen keskikohdassa.



Kuva 9. Mittauslaitteisto, mittauspiste 3.



Kuva 7b. Mitattu ulko-, sisä- ja tuloilman lämpötila, talvitapaus.

Henkilöstön termisen viihtyvyyden arvioimiseksi toimitiloissa tehtiin mittauksia työaikana. Vaatetuksen lämmöneristystasona käytettiin talvella 0,9 clo ja kesällä 0,8 clo. Molemmissa tapauksissa seisovan henkilön keskimääräinen aktiivisuus oli 2 met. Mittauksen reunaehdot näkyvät taulukosta 1.

Taulukossa 2 esitetty keskimääräisen termisen ilmastoarvon vertailu eri pisteissä eri tasoilla on seisovan henkilön vyötärön ja niskan tasolla tyydyttävällä alueella talvitapauksessa ja pienin eroin kesätapauksessa. Korkeampi keskimääräinen DR-arvo nilkan kohdalla selittyy kylmällä ilmapirralla. Mittauspisteet on valittu kuvassa 2 esitetyn mukaisesti.

Taulukko 3 esittää keskimääräisen termisen ilmaston vaihtelua seisovan nilkan, vyötärön ja niskan tasolla [3] eri toimitilojen kohdissa.

Taulukoissa 2 ja 3 ja yhtälössä (1) ul on paikallinen ilman keskinopeus ja T_l paikallinen ilman lämpötila. DR on valittu siten, että se edustaa niiden henkilöiden osuutta, jotka ovat tyytymättömiä oleskeluvyöhykkeen olosuhteisiin.

$$DR = (34 - T_l)(u_l - 0.05)^{0.62} (0.37u_l Tu + 3.14) \quad (1)$$

Tu on turbulenssin intensiteetti (%).

PMV-arvoja on tarkasteltu mittaamalla lämpötilaa, ilman nopeutta ja suhteellista kosteutta, joista voidaan muodostaa PPD-indeksi (ennustettu tyytymättömien osuus) seuraavan yhtälön avulla:

$$PPD = 100 - 95 \exp(- (0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)) \quad (2)$$

Kahden eri päätelaitteen ympäriltä tehty mittaus osoittaa, että kauempana tuloilmalaitteesta (pisteiden 3, 4 ja 6 välinen vertailu) PMV- ja PPD-arvot kasvavat kesätapaoksen osalta – tuloilma ei ulotu kauas tuloilmalaitteesta, mutta tulokset ovat tyydyttäviä talvitapaoksen osalta. On selvää, että ilman keskinopeus ja veto vähenevät lisäämällä etäisyyttä päätelaitteista, ks. taulukko 3. Ilman keskinopeuden ja vedon enimmäisarvot esiintyivät 2 m:n päässä päätelaitteesta. Tulokset edustavat noin 1 °C:n lämpötilan nousua kesätapauksessa ja lievää nousua talvitapauksessa suurempien etäisyyksien yhteydessä. Talvitapaoksen osalta vaikuttaa siltä, ettei PPD- ja PMV-arvoissa ole suurta vaihtelua eri mittauspisteiden välillä.

Taulukko 1. Päätelaitteiden asetukset.

	Kesätapaus		Talvitapaus	
Mittauspiste	1,2,5	3,4,6	1,2,5	3,4,6
Q^* (m ³ /s)	0.283	0.250	0.311	0.270
U^* (m/s)	3.64	3.21	4.0	3.5
T^* (°C)	22.1	21.9	17.4	17.2

Taulukko 2. Keskimääräiset sisäilmaston parametrit eri korkeuksilla kaikissa mittauspisteissä (1, 2, 3, 4, 5 ja 7).

	Kesätapaus			Talvitapaus		
Mittauspiste	Nilkka	Vyötärö	Niska	Nilkka	Vyötärö	Niska
u_l (m/s)	0.28	0.25	0.32	0.30	0.20	0.14
T_l (°C)	21.9	21.7	21.7	18.3	18.6	18.7
DR (%)	41	30	34	48	31	20
PMV (-)	0.8	0.8	0.8	0.2	0.3	0.3
PPD (%)	20	18	19	7	7	8

Nilkan (0,1 m), vyötärön (1,1 m) ja niskan (1,7 m) korkeus lattian pinnasta.

Taulukko 3. Keskimääräiset sisäilmaston parametrit kussakin mittauspisteessä eri korkeuksilla (nilkka, vyötärö, niska), kesä- ja talvitapauksessa.

	Kesätapaus						Talvitapaus					
Mittauspiste	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
u_l (m/s)	0.21	0.14	0.75	0.27	0.12	0.10	0.18	0.05	0.66	0.27	0.03	0.12
T_l (°C)	21.4	21.4	21.9	21.8	21.9	23.2	18.5	18.6	18.3	18.6	18.3	18.18
DR (%)	27	13	94	49	11	7	32	5	98	55	0	17
PMV (-)	0.8	0.8	0.6	0.7	0.9	1.1	0.2	0.4	0	0.2	0.3	0.3
PPD (%)	17	20	13	17	24	30	6.8	7.8	6	6.7	7.1	6

5. Loppupäätelmät

Uusi kerrostavan ilmanvaihdon tuloilmalaite tarjoaa sisäilman hyvän termisen viihtyvyyden oleskeluvyöhykkeellä ilmavirran edullisen jakautumisen ansiosta. Päätelaitteet säästävät myös energiaa, sillä ne ehkäisevät ylimääräisten lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien tarvetta kylminä ja kuumina kausina. Toimitiloissa eri kohdissa talvella ja kesällä havaittujen termisen viihtyvyyden arvojen seurauksena viihtyvyysindeksit (PMV, PPD) ovat tyydyttävissä rajoissa ISO 7730 standardin mukaan, ja termisen mukavuuden tulokset ovat paremmat talvella. Myös DR-arviointi oli ISO 7730:n mukaan hyvä etäämpänä tuloilmalaitteesta tai muualla kuin ilmavirran suunnassa.

Keskimääräinen lämpötilaero seisovan henkilön nilkan ja niskan tason välillä on talvella noin 0,2 ja kesällä noin 0,4.

Sekä kesä- että talvitapauksessa ei-isotermisten yhtyvien ilmasuihkujen nopeusprofiili osoittaa tasoseinäsuihkun osalta samankaltaisia tuloksia tarkasteltavalla, työpaikoille tyypillisimmällä alueella.

6. Kiitokset

Työ suoritettiin KK-stiftelsenin (Tukholma, Ruotsi) ja Gävlen yliopiston (Gävle, Ruotsi) taloudellisella tuella, ja haluaisimme kiittää myös Stravent Oy:tä (Helsinki, Suomi) ja ETS Nord AS:ää (Tallinna, Viro) mittauksiin käytetystä ajasta ja tuesta.

7. Lähteet

Goodfellow, H. ja Tähti, E. 2001: *Industrial Ventilation, design guidebook*

Cehlin, M., Moshfegh, B. ja Sandberg, M. 2002: *Measurements of air temperatures close to a low-velocity diffuser in displacement ventilation using infrared camera: Parameter and error analysis, Energy and Buildings, 34, s. 687–698.*

EN ISO 7730 (2005): *Ergonomics of the thermal environment-analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.*

Fanger, P.O. 1972: *Thermal Comfort.* McGraw-Hill New York.

Cho, Yu, Awbi, H. ja Karimipannah, T. 2008: *Theoretical and experimental investigation of wall confluent jets ventilation and comparison with wall displacement ventilation, Journal of Building and Environment, 43, s. 1091–1100.*

**STRAVENT OY**

Puh. 09-424 13630

Fax. 09-424 13631

STRAVENT Pohjois-Suomi

Puh. 09-424 13636

Fax. 09-424 13631

STRAVENT Itä-Suomi

Puh. 09-424 13639

Fax. 09-424 13631

www.stravent.fi