

Tutkimus toimistohuoneen ilmanvaihdon toiminnasta kerrostavan ilmanvaihdon tuloilmalaitteella

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

Gävlen yliopisto, Tekniikan ja rakennetun ympäristön laitos, Energian ja konetekniikan osasto

² Linköpingin yliopisto, Energiajärjestelmien osasto, Tuotantotalouden laitos

ABSTRAKTI

Täysimittaiset mittaukset tehtiin uuden tuloilmalaitteen aikaansaaman termisen viihtyvyyden tutkimiseksi toimistohuoneessa. Mittaustulokset saatiin aikaan sekä koko tilan mittauksilla että perinteisen pistemittaustekniikan avulla. Kokeissa mitattiin tuloksia jotka vastaavat tuloilmassa Arkimedeen lukua 0,04 – 0,16 ja kahta jäähdytystehoa, esim. 55 and 70 W/m². Sisäilman laatua ja työntekijöiden viihtyvyyttä tutkittiin ja analysoitiin. Todettiin, että kerrostaen toimivalla ilmanjakojärjestelmällä aikaansaatu ilmanvirtaus ja lämpövihtyvyys olivat ISO 7730 mukaisia.

JOHDANTO

Ilmastointijärjestelmä on rakennusten sisäilman laadun tuottamisen ja energiakulutuksen kannalta keskeinen asia, joten ilmastoinnin virtausnopeuden olisi vastattava termisen viihtyvyyden ja ilmanlaadun vaatimuksia sekä työntekijöiden että energiasäästön kannalta. Tutkimustavoitteita on asetettu ilman epäpuhtauksien vähentämiseksi ja ilmastoinnin tehostamiseksi lisätavoitteena energiankäytön vähentäminen. Nämä kolme tekijää on otettava huomioon huoneen tai rakennuksen ilmasointijärjestelmää suunniteltaessa, koska ne ovat ensiarvoisen tärkeitä termisen viihtyvyyden ja energiankäytön kannalta. Tämän esityksen tavoite on ilmastoinnin peruspiirteiden ja ilmanvirtausten ominaisuuksien tutkiminen. Tästä syystä kokeellinen tutkimus keskittyi kerrostavan ilmanjakojärjestelmän aikaansaamaan lämpövihtyvyyteen toimistohuoneessa. Hiljattain kehitettyä kerrostavaa ilmanjakojärjestelmää voidaan kuvata tuloilmalaitteen päätelaitteen kuperan rei'itetyn peitelevyn aukoista tulevana yksittäisinä pyörteilevinä ilmasuihkuina. Tämä tutkimus esittelee oleskeluvyöhykkeessä tehtyjen mittauspisteiden tulokset sekä lähialueen olosuhteet, johon ilmavirta kohdistuu. Virtausnopeuden hetkelliset lukemat sekä keskiarvot mitattiin kuumalanka- ja termistori-anemometrillä. Termisen

viihtyvyyden eri indeksejä, kuten PMV, PPD ja DR laskettiin hyödyntämällä operatiivista lämpötilaa, ilman lämpötilaa, tuloilmavirran nopeutta, suhteellista kosteutta ja tuloilman turbulenssi astetta. Kvalitatiivista arviointia varten käytettiin infrapunakameraa tuloilmalaitteen lähellä olevien termisten viihtyvyys ja ilmanvirtaus ominaisuuksien kuvaamiseksi.

METODOLOGIA JA KOKEELLINEN MALLENNUS

Mittaukset suoritettiin hyvin eristetyssä koetilassa jonka lattiapinta-ala oli 4.2×3.6 m ja kattokorkeus 2,5 m. Tämä toimistohuoneen malli on Gävlen yliopiston tila, ks. Kuva 1. Huone on todellisen toimistohuoneen mallennus varustettuna PC-simulaattorilla (115 W), mallinukella (95 W), joka vastaa suunnilleen ihmiskehoa vastaavaa pinta-alaa ja lämmönlähdettä /1/, 144 W:n loistoputkivalaistuksella. Ikkunoista tulevan auringonsäteilyä tulevan lämmön kompensoimiseksi koko lattia oli peitetty sähköisellä (65 W/m^2) matolla; käytössä oli myös 2 m^2 :n suuruisen pinta-alan kattava sähköinen lämmityskelmu (233 W/m^2) kolmen tekoikkunan mallintamista varten. Huoneen ilmastointiin käytettiin kerrostavan ilmanjaon tuloilmalaitetta, joka oli asennettu tekoikkunaseinä vastaiselle seinälle (ns. käytäväseinälle). Tuloilman virtausnopeus vaihteli $0.02\text{-}0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ ja tulolaitteen ja huoneen keskilämpötilan välinen lämpötilaero pidettiin n. $5\text{-}8 \text{ }^\circ\text{C}$:n tasolla. Tuloilman keskilämpötila, T_r , määriteltiin mittaamalla ilman lattian ja katon väliset lämpötilat 24 lämpötila-anturin avulla keskellä huonetta. Taulukko 1 kuvaa tämän tutkimuksen eri tapaukset.

Taulukko 1. Mallennuksen tapausten yhteenveto.

Case	Q (W/m^2)	V (m^3/s)	T_{in} ($^\circ\text{C}$)	T_r ($^\circ\text{C}$)	Ar (0)
A	55	0.040	16.0	20.5	0.03
B	55	0.025	16.0	20.8	0.09
C	55	0.025	12.5	20.9	0.16
D	55	0.020	16.0	20.7	0.14
E	70	0.025	12.5	20.7	0.15

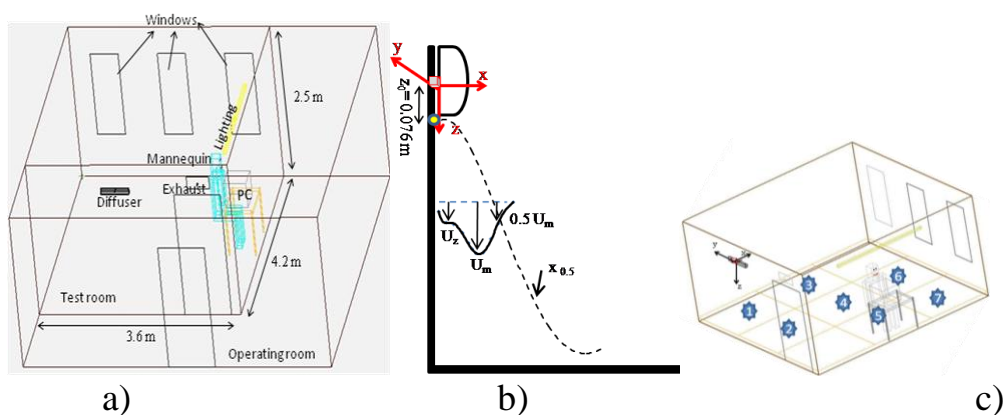
Arkimedeen luku saatiin seuraavan yhtälön tuloksena (1) tuloilmasuhteen laskemiseksi.

$$Ar(0) = \frac{g\beta\Delta T\sqrt{A(0)}}{U_{in}^2} \quad (1)$$

A $A(0)$ vastaa aukon kokoa, T_{in} tuloilman lämpötilaa, U_{in} ilman virtausnopeutta ja $\beta = 1/T_r$ lämmön levittäytymistä.

Tässä tutkimuksessa käytetyt sisäilman parametrien tutkimisen menetelmät sisältävät kokeellisia menetelmiä. Mittaustuloksia hyödynnettiin ilmanjakotavan laadulliseen ilmaamiseen. Näiden määrällisten tasojen arvioinnit riippuvat mittausten parametreista, kuten virtausnopeudesta, lämpötilasta ja termisestä viihtyvyydestä sekä oleskeluvyöhykkeen ja lähivyöhykkeen ilmavirran visualisoinnista.

Kaikki mittaukset suoritettiin vakaisissa olosuhteissa. Lämpökuvaa käytettiin kokonaisilmavirtauksen ja tuloilmalaitteen lähellä olevan lämpökentän kuvaamiseksi. Infrapunatermografia on ilman lämmönjako- ja virtausmallien visualisointitekniikka, jolla voidaan tallentaa kuvaa esineiden lähettämästä säteilystä [2]. Kuvassa jonka emissiivisyys on 0,91 asetettiin ilmavirran suuntaisena tuloilmalaitteen keskikohdalle. Kamerana käytettiin modernia infrapunakameraa, jonka infrapunaisen säteilyn sensitiivisyys on 7.5-13 μ m, Agema S60 (FLIR system) ja jonka kameraresoluutio perustuu kuvaruudun lämpötilaan $\pm 0.2^\circ$ C sekä 320x240 pikselin optiseen tarkkuuteen. Useita lämpötila-antureita käytettiin huoneen pintalämpötilojen (seinät, lattia ja katto), tuloilman, poistoilman sekä lämpötilagradientin mittaukseen. Kaikki lämpötila-anturit oli kytketty tietokoneeseen, jota ohjasi Agilent 34970 dataloggeri. Lämpötila-anturin tarkkuus on $\pm 0.1^\circ$ C lämpötiloissa, jotka vaihtelevat 10 ja 30 $^\circ$ C:n välillä. Kaikki seinien pinnassa olevat lämpötila-anturit oli peitetty teipillä säteilyvaikutusten eliminoimiseksi. Lämpötila-anturit mittasivat lämpötilaa keskimäärin runsaan 60 sekunnin välein.



Kuva 1. a) Kokeilutilan kaaviokuva, b) ilmavirtaus tuloilmalaitteen alapuolella, c) mittauspisteiden sijainti oleskeluvyöhykkeissä.

Tärkeät virtausnopeudet on kirjattu lähivyöhykkeessä ja oleskeluvyöhykkeessä kahdella eri anemometreilla. Kuumalanka- (Dantec 55P15) ja lämpötilatermistori tuloilmalaitteen lähelle. Kuumalanka mittasi piennopeustuloilman nopeuden 100 Hz 30000:n näytemäärällä. Kalibrointi oli tehty tuulitunnelin avulla 0.2-4.0 m/s nopeudella. 28 monisuuntaisella termistori-anemometrilla (type CTA), katso piirustus /3/ jota käytettiin mittaustarkkuuden täsmentämiseksi oleskeluvyöhykkeellä.

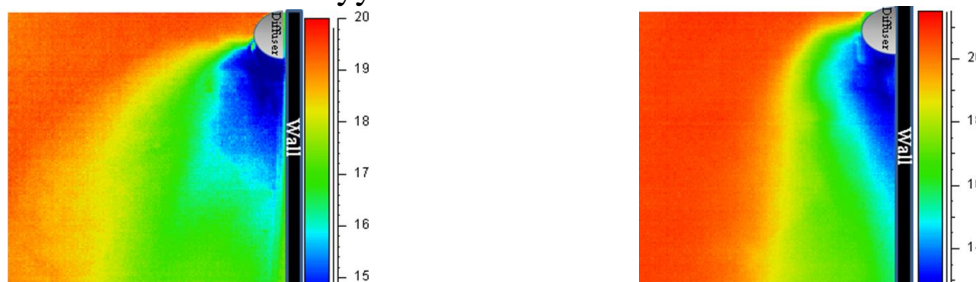
Nopeutta mitattiin 3 sekunnin välein ja mittausten määrä oli 100. Näillä laitteilla pystytään tekemään piennopeustuloilman nopeuden mittauksia $\pm 5\%$ tai 0.05 m/s:n tarkkuudella.

Innova lämpötila-antureilla ja CTA-laitteilla on tutkittu sekä termistä viihtyvyyttä että DR (veto-) lukemia ISO 7730 mukaan /4/. Lämpöviihtyvyyssindeksejä ilmaisevan sensorin pintalämpötila on sama kuin sen simuloiman henkilön, jonka vaatetus vastaa laitteisiin säädettyä lämpökapasiteettia. Lämpöhäviö vastaa siis todellisen tilan termistä viihtyvyyttä. Lämpötila-anturit mittaavat ilman lämpötilan ja operatiivisen lämpötilan $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$:n tarkkuudella sekä vastaavasti 5-40 $^{\circ}\text{C}$. Jokaisessa pisteessä mittauksia tehtiin 1200 sekunnin ajan sekä samalla nytkin muutellen mittauspisteen sijaintia kunnes sensori oli lämpötilatasapainossa ympäristönsä kanssa. Innova kosteusanturi mittasi kohtilan ilman absoluuttisen ilmankosteuden. Mittalaippa mittasi ilmavirtauksen $\pm 5\%$:n tarkkuudella eri tapauksissa.

TULOKSIA

Infrapunakuva

Ilmavirran kuvio ja sekoittuminen saatiin selville infrapunakameran kuvan avulla. Kuvissa 2a ja 2b infrapunakamera kuvaa tehokkaasti ilman sekoittumisen tuloilmalaitteen läheisyydessä.



a)

Kuva 2 Infrapunakameran kuvia 8A) Virtausnopeus on $0.040 \text{ m}^3/\text{s}$, $T_{\text{in}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, ja

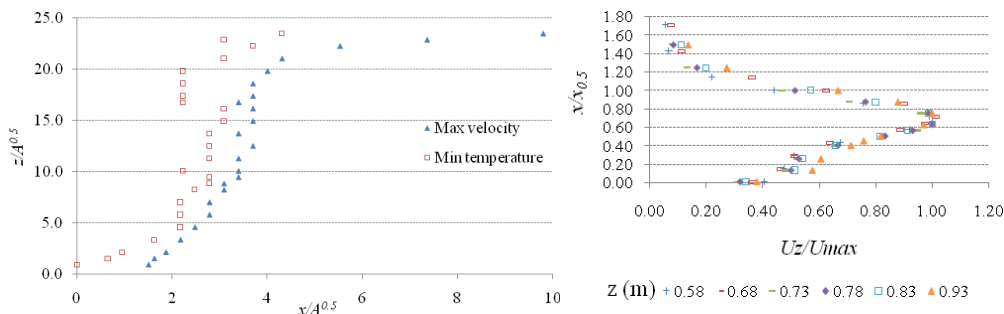
(b) virtausnopeus $0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $T_{\text{in}} = 12.5 \text{ }^\circ\text{C}$

b)

Lähivyoöhykkeen tutkimus

Kuten tässä kohdassa näkyy, mitattiin virtausnopeudet ja lämpötilat tuloilmalaitteen keskikohdalta ja seinävyöhykkeen kohdalta.

Kuumalankamittauksella saatiin keskilämpötilat ja vakiopoikkeamat tuloilmalaitteen lähivyoöhykkeessä. Kuvassa 3a on käyttämällä suurinta nopeutta ja alhaisinta lämpötilaa saatu ilmasuihkun kuva samoissa tuloilmaolosuhteissa kuten tapauksessa A, jossa tutkitaan liikkuvaa ilmasuihkua tulolaitteen lähellä. Virtausnopeus hidastuu nopeasti lähellä seinää ja ilmasuihku täyttyy (paksunee) kun etäisyys kasvaa ilmavirran suunnassa alaspäin z , tuloilmalaitteen tasolta. Nopeus on muuttumaton eri korkeuksissa, $z/A0.5$, at, $x/A0.5$, suurempi kuin 3. Suurin nopeus, $1,2 \text{ m/s}$ on mitattu seinän tuntumassa ja alhaisin nopeus on 0.2 m/s 0.05 metrin korkeudessa lattiasta lähivyoöhykkeessä tapauksessa A. Kuva 3b näyttää keskinopeutta ja lämpötilakuvioita eri pisteissä ilmavirran suunnassa tuloilmalaitteesta A-tapauksessa. Tiedot on normalisoitu jakamalla ilmavirran nopeutta, U_z , saman pisteen suurimmalla nopeudella, U_{max} . Etäisyyttä seinästä, x , on niin ikään normalisoitu $x0.5$:llä, eli pisteellä, jonka kohdalla nopeus on hidastunut puoleen suurimmasta lukemastaan.



Kuva 3. (a) Nopeus- ja lämpötiläkäyrä ja (b) keskinopeuden ja nopeuden käyrät normaalisuunnassa seinää kohti, ilmavirran eri pisteissä tapauksessa A.

Oleskeluvyöhyke

Keskinopeusarvot u_1 , ilmenevät seitsemän erikorkuisen vyöhykkeen keskikohdassa tehdyistä anturimittauksista. Ilmanopeus vaihtelee oleskeluvyöhykkeellä tuloilmalaitteen ilmamäärästä ja lämpötilasta riippuen. Nämä mittaukset tehtiin istuvan ja seisovan henkilön nilkkojen, vyötärön ja niskan korkeudella, ks.

taulukko 2. Kaikkien termistori- anemometri CTA tyypillä mitattujen vyöhykkeiden keskikohdan, T₁, ilman lämpötila sisältyy taulukko 2:een. Tilan suhteellinen kosteus on niin ikään mitattu ja esitetty taulukossa 2.

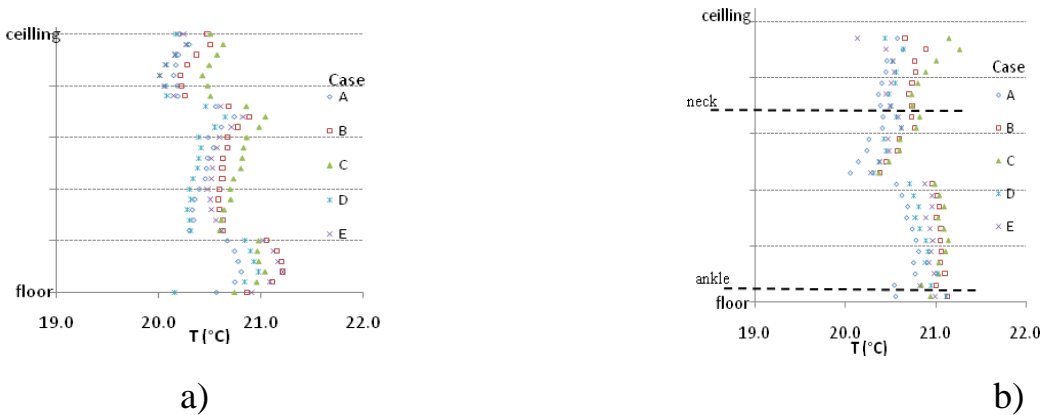
Taulukko 2. Oleskeluvyöhykkeessä mitattu nopeus, turbulenssiaste, ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus.

	Mittauspiste	Tapaus				
		A	B	C	D	E
u_1 (m/s)	I*	0.18	0.15	0.15	0.17	0.14
	II*	0.1	0.1	0.06	0.1	0.1
	III*	0.07	0.08	0.06	0.08	0.08
	IV*	0.09	0.08	0.07	0.09	0.08
Tu (%)	I	29	31	31	30	30
	II	36	40	37	40	40
	III	37	39	37	41	41
	IV	34	37	34	40	39
T_1 (°C)	I	20.9	21.2	20.9	20.9	21.1
	II	21.1	21.3	21.3	21.1	21.2
	III	21.1	21.3	21.4	21.1	21.2
	IV	21.1	21.2	21.3	21.0	21.1
RH (%)	Huone	28	32	21	29	27

I* istuva henkilö nilkat (0.1 m), II** istuva henkilö vyötärö (0.6 m)
 III** istuva henkilö niska (1.1 m), IV* seisova henkilö niska(1.7 m)

Lämpötilan mittaus

Lämpösäteilyä vastaan suojaavilla lämpötila-antureilla kuvattiin nilkkojen ja niskan välistä pystysuorassa mitattua lämpötilaeroa, ks. kuva 4. Tulokset ovat hyväksyttävää tasoa istuvalle henkilölle istumatyössä ISO 7730:n mukaan /4/.



a)

b)

Kuva 4. Lämpötilagradientti, a) seinä, b) huone

Terminen viihtyvyys

Termistä viihtyvyyttä on arvioitu mittaamalla lämpötiloja, suhteellista kosteutta ja virtausnopeutta tuloksena korotetut PMV-arvot. PMV-arvot laskettiin eri korkeuksista huoneen keskikohdassa lämpöviihtyvyyden vaihtelujen kuvaamiseksi, ks. kuva 3. PPD:n PMV:n C- ja E- tapausten väliset erot eivät näytä merkittäviltä. Istuvan henkilön vyötärön ja niskan korkeuden PPD-indeksi eri tuloilmaoloissa vyöhykkeessä 4, kuten kuva 4:ssä näytetään, jää ISO 7730:n hyväksymien normien puitteisiin. Erot ovat vähäisiä. Nilkan kohdalla on pieni poikkeama luultavasti johtuen lattialämmityksestä, ks. Kuva 1 c, tilan vyöhykkeiden sijainti.

Taulukko 3. Lämpöviihtyvyyksindeksit ja vetoindeksi (DR) eri korkeudessa vyöhyke 4:ssä.

	Tapaus C			Tapaus E		
	Nilkka	Vyötärö	Niska	Nilkka	Vyötärö	Niska
PMV (-)	-0.4	-0.3	-0.5	-0.5	-0.3	-0.7
PPD (%)	8	7	9	10	7	14
DR (%)	14	3	5	13	9	6

Nilkka = 0.1 m lattiasta, Vyötärö = 0.6 m lattiasta, Niska = 1.7 m lattiasta

Taulukko 4. PMV, PPD ja DR indeksit vyöhykkeellä 4.

	Ar (0) = 0.04			Ar (0) = 0.09			Ar (0) = 0.15		
	Nilkka	Vyötärö	Niska	Nilkka	Vyötärö	Niska	Nilkka	Vyötärö	Niska
PMV (-)	-0.4	-0.3	-0.5	-0.5	-0.3	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6
PPD (%)	9	7	10	10	7	10	12	10	13
DR (%)	17	9	7	13	9	6	17	8	8

LOPPUPÄÄTELMÄ

Ei-isotermisten olosuhteiden vallitessa on tutkittu seinäpuhalluksen ominaisuuksia suutintekniikalla. Oleskeluvyöhykkeen nopeuskäyrä ja termien viihtyvyys näyttävät puhalluskuvion kerrostavan ilmanjakotavan tuloilmalaitteesta toimistohuoneessa, jossa on yksi työpiste. Lähivyöhykkeen tutkimuksessa tutkittiin ei-isotermisen ilmasuihkun nopeus- ja lämpötilakäyrää pistemittaustekniikalla. Ilmavirtaa ohjasi alussa suutinvirtaus jota sen jälkeen

ohjasi alipaineiden täyttäminen. Termiset viihtyvyyksindeksit esitettiin Arkimedeen luvun funktiona. Terminen viihtyvyyden arvot vastasi hyvin ISO 7730: normeja. Ilman keskilämpötila, ilmannoisuus ja turbulenssiaste kaikissa 7 vyöhykkeessä sekä tilan termiset viihtyvyyksindeksit vyöhykkeissä 4 ja 6 osoittivat kerrostavan ilmanjakotavan tuloilmalaitteen toimivan vedottomasti luoden tasalämpöisen oleskelualueen. Tuloksista voidaan päätellä, että oleskeluvyöhykkeen ilmavirran nopeus, nilkkakorkeutta lukuun ottamatta, on alhaisempi kuin 0,1 m/s. Ilmavirran suurempi keskinopeus istuvan henkilön nilkkakorkeudella voi johtua lattialämmityksestä.

TEKIJÄN KIITOKSET

Tekijät haluavat kiittää KK Foundation (Tukholma, Ruotsi) ja Gävlen yliopistoa (Gävle, Ruotsi) rahallisesta tuesta sekä Hans Lundström'iä Gävlen yliopistosta hänen teknisestä myötävaikutuksesta kokeellisen tutkimustyön aikana sekä Stravent Oy'ta kerrostavan ilmanjakotavan tuloilmalaitteen antamisesta käyttöömmme (malli S-55).

LÄHTEET

1. Mattsson M., On the efficiency of displacement ventilation, ISBN 91-628-3674-9 (1999).
2. 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.
3. Lundstrom H., Blomqvist C., Jonsson, Pettersson. A microprocessor- based anemometer for low air velocities, the National Swedish Institute for Building Research Gavle, Sweden (1990).
4. EN ISO 7730, Ergonomics of the thermal environment-analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria (2005).