

TOIMISTOJEN ILMANVAIHDON JA LÄMPÖOLOSUHTEIDEN MALLINTAMINEN SUHTEESSA TUOTTAVUUTEEN

Samy Clinchard, Salvatore della Vecchia, [Rick Aller](#), Ulla Haverinen-Shaughnessy

Sisäilmastoseminaari 15.3.2018

TAUSTAA

- Sisäilman laatua voidaan monitoroida reaaliajassa
- Sisäilman laatua kuvaavia tekijöitä ovat mm. lämpötila (T), suhteellinen kosteus (RH) ja hiilidioksidipitoisuus (CO₂), joiden avulla voidaan arvioida lämpöolosuhteita ja ilmanvaihdon riittävyyttä
- Em. tekijöiden vaikutuksista lämpötyytyväisyyteen¹ sekä sairaspöissaoloihin ja työn tuottavuuteen² on paljon tutkittua tietoa ja valmiita malleja

¹ Fanger P. (1970) Thermal Comfort: Analysis and applications in environmental engineering.

² Seppänen O, Fisk W. (2006) Some quantitative relations between indoor environmental quality and work performance or health. [HVAC&R Research 12\(4\): 957-973.](#)

AINEISTO

- Analysoitavana Suomalaisista toimistorakennuksista vuoden 2016 aikana kerättyä T, RH ja CO₂ dataa
- Sensorit on asennettu kiinteästi valittujen työtilojen oleskeluvyöhykkeelle
- Keskimäärin 5 sensoria / rakennus (min 1 – max 12)
- Sensoreiden tarkkuudet: T $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$, RH $\pm 3\%$, CO₂ ± 100 ppm.
- Mittausresoluutio 15 s

MENETELMÄT (1/2)

- T ja RH datasta laskettiin päivittäiset keskiarvot (arkisin klo 9-16), joiden perusteella estimoitiin Fangerin (1970) mallien mukaiset päiväkohtaiset Predicted Mean Vote' (PMV) ja 'Predicted Percentage of Dissatisfied' (PPD)
 - Oletusarvoin käytetty ilman virtausnopeutena 0.1 m/s ja aineenvaihdunnan tasona 1.4 met³
 - Vaatteiden eristysarvot laskettiin käyttämällä dynaamista ennustavaa vaatetusmallia perustuen ulkoilman lämpötilaan klo 6 aamulla ⁴
- Lisäksi laskettiin Seppänen & Fisk (2006)² malliin perustuva suhteellinen tuottavuus suhteessa päivittäiseen sisälämpötilaan
 - Maksimi (100%) tuottavuus saavutetaan lämpötilassa 21.6°C
 - Esimerkiksi 30°C lämpötilassa suhteellinen tuottavuus on 90%

³ Persily A, de Jonge L. (2017). Carbon dioxide generation rates for building occupants. Indoor Air 27:868–879.
<https://doi.org/10.1111/ina.12383>

⁴ Schiavon S, Ho Lee K H. (2013) Dynamic predictive clothing insulation models based on outdoor air and indoor operative temperatures, Building and Environment 59: 250-260.

MENETELMÄT (2/2)

- CO₂ datasta laskettiin ensin ilmanvaihdon määrä työntekijää kohti [l/s·hlö] tasapaino / huippuarvomenetelmällä⁵ niille päiville, joiden min ja max arvojen välinen ero oli yli 100 ppm
- CO₂ tuoton arvona käytettiin 0.0048 l/s·hlö vastaten toimistoa / kokoustilaa (ol. 50% miehiä, ikä 21 to 60 v, 5 hlö / 100 m², 1.4 met)³
- Päiväkohtaisia ilmanvaihtoestimaatteja käytettiin sairauspoissaolojen ja tuottavuuden mallintamiseen Seppänen & Fisk (2006) mukaisesti ²
- Tuloksena saadaan 1. suhteellinen sairauspoissaoloprevalenssi (verrattuna tilaan jossa ei ole ilmanvaihtoa) sekä 2. suhteellinen tuottavuus (verrattuna tilaan jonka ilmanvaihto on 6.5 l/s·hlö)
 - 1) Suhteellinen sairauspoissaoloprevalenssi 0.5 vastaa 50% alhaisempaa määrää sairauspoissaoloja verrattuna tilaan jossa ei ilmanvaihtoa
 - 2) Tuottavuus kasvaa tilastollisesti merkitsevästi kunnes ilmanvaihto ylittää 15 l/s·hlö

⁵ ASTM. (2012) ASTM D6245-07, Standard Guide for using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.

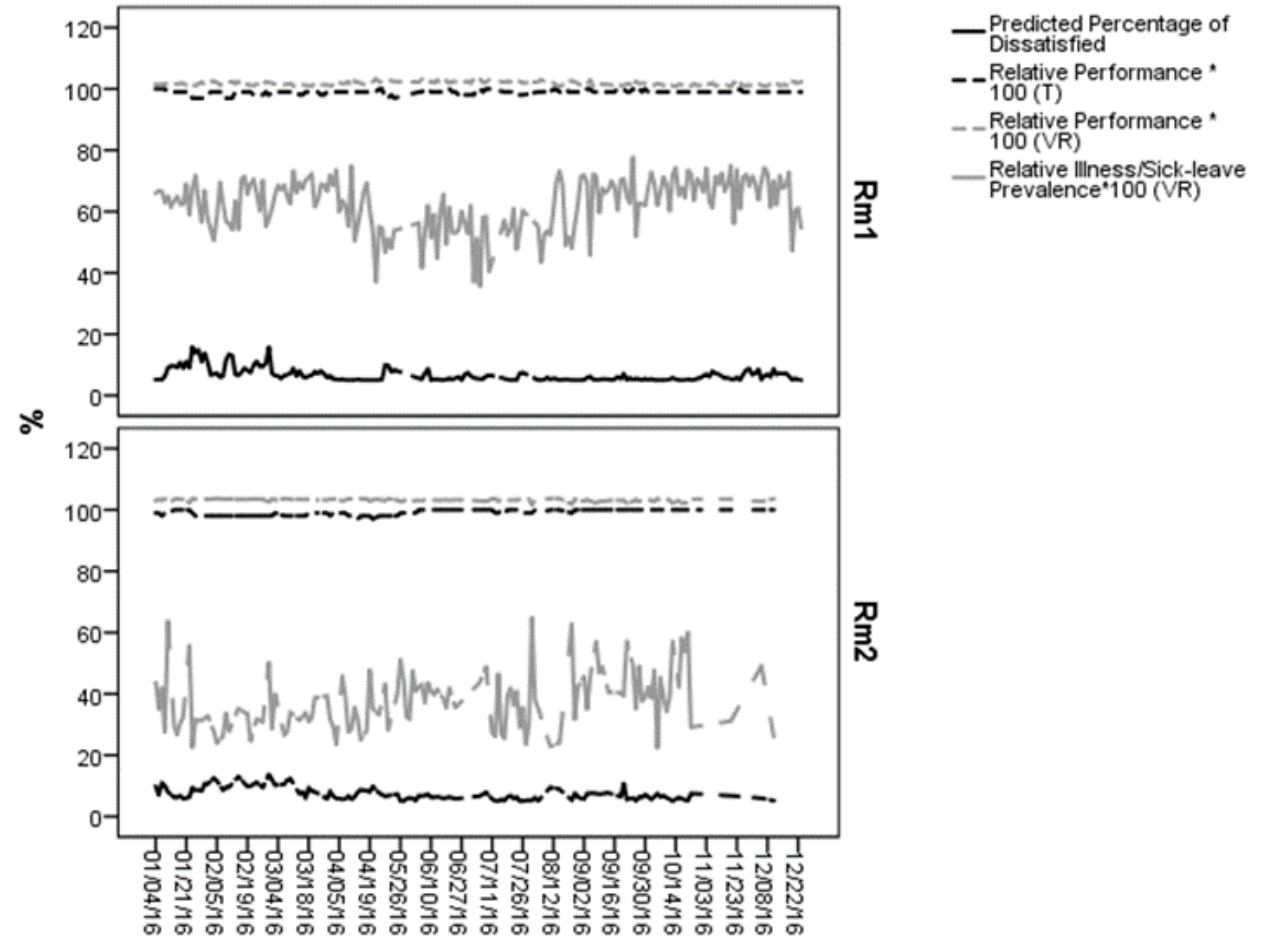
TULOKSET (1/5)

Taulukko 1. Mallien avulla arvioidut kahden Helsingiläisessä toimistorakennuksessa olevan toimistohuoneen lämpöviihtyvyys, suhteellinen tuottavuus ja sairauspoissaoloprevalenssi

	Huone 1		Huone 2	
	N	k-a (Min-Max), SD	N	k-a (Min-Max), SD
Ulkoilman T, °C	216	6.4 (-23.2-22.7), 9.3	234	7.2 (-23.8-24.2), 9.9
Sisäilman T, °C	216	23.4 (20.2-25.8), 0.9	234	22.9 (20.4-26.1), 1.3
Sisäilman RH, %	216	24.3 (2.0-46.8), 11.2	234	25.4 (0.6-48.5), 13.1
Max CO ₂ , ppm	199	886 (460-2550), 184	164	616 (460-2550), 291
Tulosestimaatit				
PMV (T)	216	-0.1 (-0.6-0.7), 0.2	234	0.0 (-0.6-0.6), 0.3
PPD (T), %	216	6.6 (5.0-16.0), 2.1	234	7.4 (5.0-13.7), 2.1
Suhteellinen tuottavuus (T)	216	0.99 (0.97-1.00), 0.01	234	0.99 (0.96-1.00), 0.01
Ilmanvaihto l/s·hlö	197	16.1 (7.8-40.7), 5.8	129	42.5 (14.2-89.4), 16.1
Suhteellinen tuottavuus (IV)	197	1.02 (1.01-1.03), 0.01	129	1.03 (1.02-1.04), 0.00
Sairauspoissaoloprevalenssi (IV)	197	0.62 (0.36-0.78), 0.08	129	0.37 (0.22-0.65), 0.10

TULOKSET (2/5)

- Näissä huoneissa PPD hieman koholla talvikuukausina
- Suhteellinen tuottavuus lähes vakio läpi vuoden (lämpötila aiheuttaa hienoisen tuottavuuden laskun; ilmanvaihdon nostaessa sitä)
- Eniten vaihtelua sairauspoissaoloprevalenssissa



Kuva. Kahden toimistohuoneen päiväkohtaiset PPD, suhteellinen tuottavuus ja sairauspoissaoloprevalenssi

TULOKSET (3/5)

92 toimistorakennuksen otoksessa arvioitiin lämpötilamittausten perusteella:

- 6 (7%) rakennusta oli suositellun PMV välin ulkopuolella
- Suhteellinen tuottavuus (T) oli keskimäärin 99%
- Em. 6. rakennusta erosivat tuottavuuskeskiarvosta 2-24%

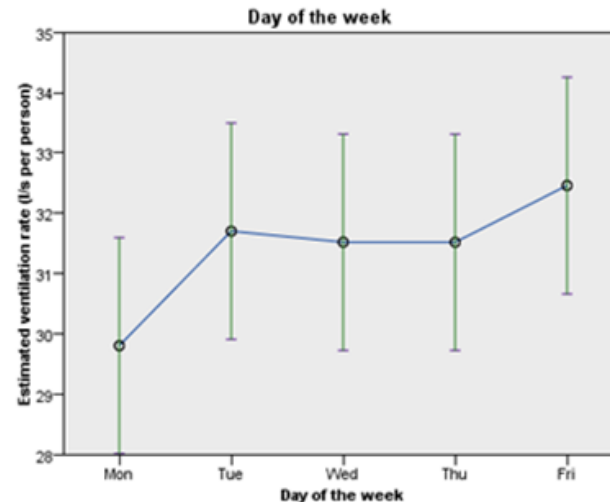
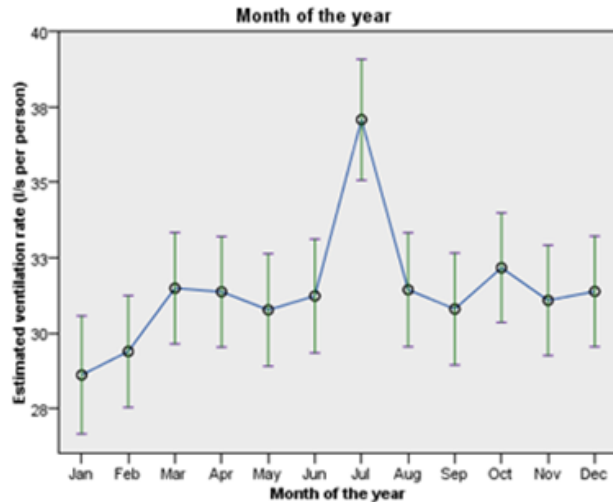
Jopa 1% lisäys tuottavuudessa olisi taloudellisesti kannattavaa

- Vuositasolla 1% vastaa 2.3 työpäivää/hlö, joka maksaa työnantajalle keskimäärin 435 €^{6,7}
- Koko vuoden lämmityskustannus 12 m² toimistohuoneelle on luokkaa 80 – 100 €

⁶ Tilastokeskus 2015. https://tilastokeskus.fi/index_en.html

⁷ Suomen yrittäjät, <https://www.yrittajat.fi/palkkalaskuri>

TULOKSET (4/5)



- 76 toimistorakennuksen saatiin estimoitua ilmanvaihdon määrä
- Ilmanvaihto on yleisesti ottaen korkealla tasolla
 - Arviointiin liittyvä epävarmuus voi selittää osan tästä, mutta tutkimuksissa havaittu samansuuntaisia tuloksia⁸
- Keskimäärin alhaisin ilmanvaihto tammi-helmikuussa, heinäkuussa nähtävissä lomien vaikutus
- Viikottasolla ilmanvaihto henkilöä kohti alhaisin maanantaisin ja korkein perjantaisin

⁸ Bluysen P, De Oliveira Fernandes E, Groes L, Clausen G, Fanger PO, Valbjørn O, Bernhard CA, Roulet C. (1996) European Indoor Air Quality Audit Project in 56 Office Buildings. Indoor Air 6, 221–238.

TULOKSET (5/5)

	Rakennuskohtainen mean (min-max), SD	Tilakohtainen mean (min-max), SD
Max CO ₂ , ppm	715, (554-1144), 118	700, (526-1699), 157
Ilmanvaihto, l/s·hlö	32, (15-52), 8	33, (8-64), 11
Suhteellinen sairaspöissaoloprevalenssi·100% ^c	47, (37-67), 8	46, (27-78), 11
Suhteellinen tuottavuus·100% ^d	103, (102-103), 1	103, (100-104), 1

^c Suhteessa rakennukseen, jossa ei ilmanvaihtoa; ^d Suhteessa rakennukseen, jonka ilmanvaihto 6.5 l/s·hlö

- Ilmanvaihdon suhteen Sisäilmaluokka 1 täyttyy rakennustasolla; myös tilakohtaiset arvot täyttävät määräykset
- Jos oletetaan maksimi sairaspöivien lukumääräksi 10 (ei ilmanvaihtoa), olisi tässä otoksessa niitä keskimäärin 4.7
- Suhteellinen tuottavuus keskimäärin +3% verrattuna vähimmäismääräyksen täyttäviin rakennuksiin

POHDINTAA

- Lämpöolosuhteet yleensä hyvällä tasolla, mutta pienikin parannus on kustannustehokasta
- Ilmanvaihtoon ja sairauspoissaoloihin liittyviin estimaatteihin liittyy enemmän epävarmuutta
 - Keskimääräinen ilmanvaihto suhteellisen korkealla tasolla, lisää tuottavuutta vaikea saavuttaa
 - Tilakohtainen vaihtelu on suurempaa, osalla työntekijöistä alhaisempi ilmanvaihto
 - Monitorointia voidaan käyttää optimoinnin tukena, huomioiden erilaiset käyttöajat ja -tarpeet

JOHTOPÄÄTÖKSET

- Edellä kuvattu analyttinen prosessi perustuu jatkuvatoimiseen sisäilman laatutekijöiden (T, RH, CO₂) mittaamiseen ja analysointiin tieteellisessä kirjallisuudessa esitettyjen mallien avulla.
- Saadut estimaatit lämpötyytyväisyydestä, suhteellisesta tuottavuudesta ja sairauspoissaoloista voivat palvella kiinteistöjen omistajia ja ylläpitäjiä päätöksenteossa pitkällä aikavälillä.