Koulujen ja päiväkotien sisäilman lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja hiilidioksidipitoisuuden mittaukset COMBI-hankkeessa

Anssi Laukkarinen[1], Antti Kauppinen[1], Eero Tuominen[1], Tuomas Raunima[1] ja Juha Vinha[1]
[1]Tampereen yliopisto, rakennetun ympäristön tiedekunta, rakennustekniikka, rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Tässä artikkelissa esitellään 24 palvelurakennuksen kenttämittausten tuloksia sisäilman lämpötilan, kosteusolosuhteiden ja hiilidioksidipitoisuuden osalta. Mittauspisteitä oli yhteensä 86 kpl, joista 55 kpl sisälsi kaikki kolme suuretta ja 31 kpl lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittauksen. Mittaukset toteutettiin vuosien 2016–2018 aikana. Kohteista 22 oli kouluja ja päiväkoteja. Tulosten perusteella noin puolessa mittauspisteistä mittaustulokset vastasivat melko hyvin tavanomaisia sisälämpötilan suunnitteluarvoja (talvella 20–22 °C, kesällä tätä korkeampi). Lopuissa mittauspisteissä mitatut lämpötilat poikkesivat tästä, millä perusteella useissa kohteissa voisi olla hyötyä energiatehokkuuden tai sisäolosuhteiden kannalta tarkistaa, että lämpötilaolot vastaavat haluttuja tavoitearvoja. Sisäilman kosteuslisä oli kohteissa keskimäärin pieni ja kesäaikana esiintyi myös runsaasti kosteusvajeen mukaisia ajanhetkiä. Rakennusfysikaalisia laskentatarkasteluja varten sisäilman kosteuslisänä on perusteltua käyttää talvella arvoa 3 g/m^3 ja kesällä 2 g/m^3. Sisäilman hiilidioksidipitoisuusmittauksista laskettiin vertailuaineistoksi tarkoitetut suureet, jotka ei kuitenkaan pitkän mittausaikavälin vuoksi tule käyttää sellaisenaan esimerkiksi Sisäilmastoluokituksen tavoitearvojen saavuttamisen arviointiin.

1. Johdanto ja menetelmät

Vuosina 2015—2018 toteutettiin Tampereen teknillisen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmän koordinoima COMBI-tutkimushanke [1], jossa selvitettiin turvallisia ja kustannustehokkaita keinoja parantaa julkisten palvelurakennusten energiatehokkuutta lähes nollaenergiatasolle. Yhtenä osana hanketta tehtiin sisäilman olosuhteiden jatkuvatoimisia mittauksia Pirkanmaan ja Helsingin kouluissa ja päiväkodeissa (22 kpl) sekä palvelutaloissa (2 kpl). Tämän artikkelin tarkoituksena on esitellä näiden mittausten keskeisiä tuloksia sisäilman lämpötilan, kosteusolosuhteiden ja hiilidioksidipitoisuuden osalta.

Uuden rakennuksen osalta sisäilman olosuhteiden tavoitearvoja on käsitelty esimerkiksi lähteissä [2,3] ja olemassa olevan rakennuksen osalta lähteissä [4,5]. Laajempia rakennusten sisäilman olosuhteiden kenttämittauksia on toteutettu esimerkiksi vuosina 2002—2008 pientalojen osalta [6,7]. Nyt mittauksia toteutettiin yhteensä 12 peruskorjatussa ja 12 uudiskohteessa. Suurin osa mittauksista tehtiin päiväkotien ryhmähuoneista ja koulujen luokkahuoneista, mutta näiden lisäksi mukana oli myös toimisto- ym. tiloja. Kohteet olivat tyypillisesti kaukolämpökohteita, joissa oli koneellinen ilmanvaihto. Aineistossa on mukana sekä jäähdytettyjä että jäähdyttämättömiä rakennuksia.

Laukkarinen, A., Kauppinen, A., Tuominen, E., Raunima, T. & Vinha, J. (2019) Koulujen ja päiväkotien sisäilman lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja hiilidioksidipitoisuuden mittaukset COMBI-hankkeessa. Julkaisussa: Vinha, J. & Raunima, T. (2019) Rakennusfysiikka 2019. Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut. 28.-30.11.2019 Tampere. Seminaarijulkaisu 6, osa 1(2).

Sisäilman lämpötilaa (T) ja suhteellista kosteutta (RH) mitattiin kenttämittauksia varten hankituilla Rotronic CL11 -dataloggereilla (55 kpl) sekä vanhemmilla Comark N2003/N2013 -dataloggereilla (31 kpl). Laitteiden toimivuus testattiin TTY:n rakennustekniikan laboratoriossa ennen kenttämittauksia. Ulkoilman olosuhdedatana käytettiin Ilmatieteen laitoksen lähimmän sääaseman mittausdataa.

2. Tulokset

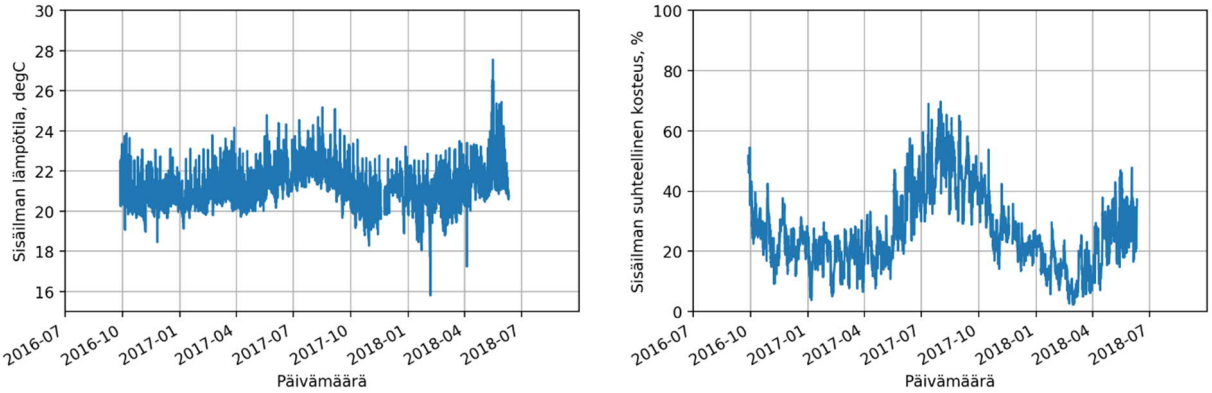
2.1 Sisäilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittaukset

Ulkoilman lämpötila ja suhteellinen kosteus lähimmällä Ilmatieteen mittausasemalla on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden tunnuslukuja mittausjaksolla Ilmatieteen laitoksen mittausasemilla (5 kpl).

Tilastollinen suure	T_e, °C	φ_e, % RH
Maksimi (100 % arvoista tätä pienempiä)	30,5 ± 1,4	99,2 ± 1,6
3. kvartiili (75 % arvoista tätä pienempiä)	11,9 ± 0,6	92,2 ± 2,4
Keskiarvo	5,1 ± 0,6	79,0 ± 2,2
1. kvartiili (25 % arvoista tätä pienempiä)	-0,6 ± 0,7	70,0 ± 3,0
Minimi (0 % arvoista tätä pienempiä)	-23,4 ± 2,1	16,2 ± 3,2

Sisäilman lämpötilan ja suhteellisen tavanomaista käyttäytymistä on havainnollistettu esimerkkikohteen avulla kuvissa 1a ja 1b.

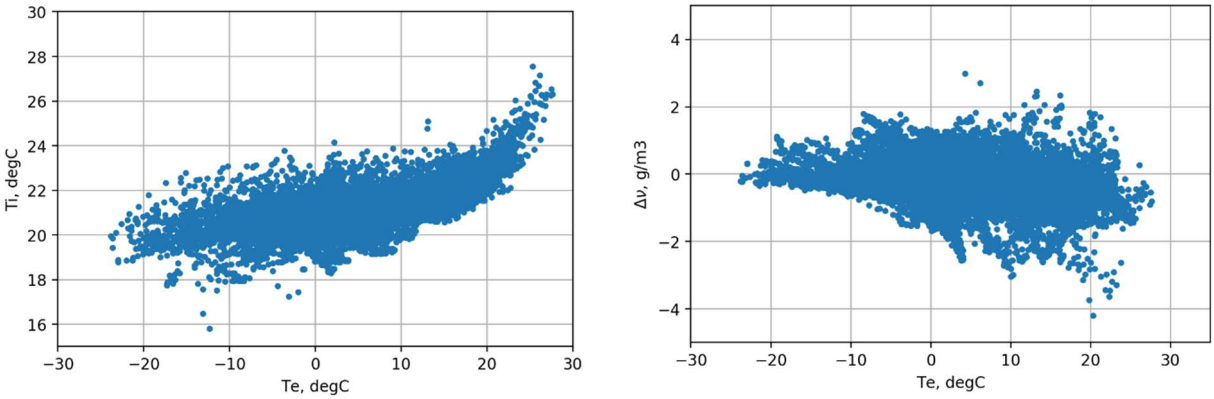


(a) (b)

Kuva 1. Esimerkki lämpötilan (a) ja suhteellisen kosteuden (b) tunnittaisista mittaustuloksista yksittäisestä mittauspisteestä. Mittauspiste oli Tampereella sijaitsevassa peruskorjatussa päiväkodissa.

Kuvan 1 mukaisessa tilanteessa sisäilman lämpötila liikkui noin 18…26 °C välillä. Pääosin lämpötilat olivat noin 19…25 °C. Sisäilman suhteellinen kosteus vaihteli vuodenaikojen mukaan ollen alhaisimmillaan talvella noin 10 % RH ja korkeimmillaan kesällä noin 60 % RH.

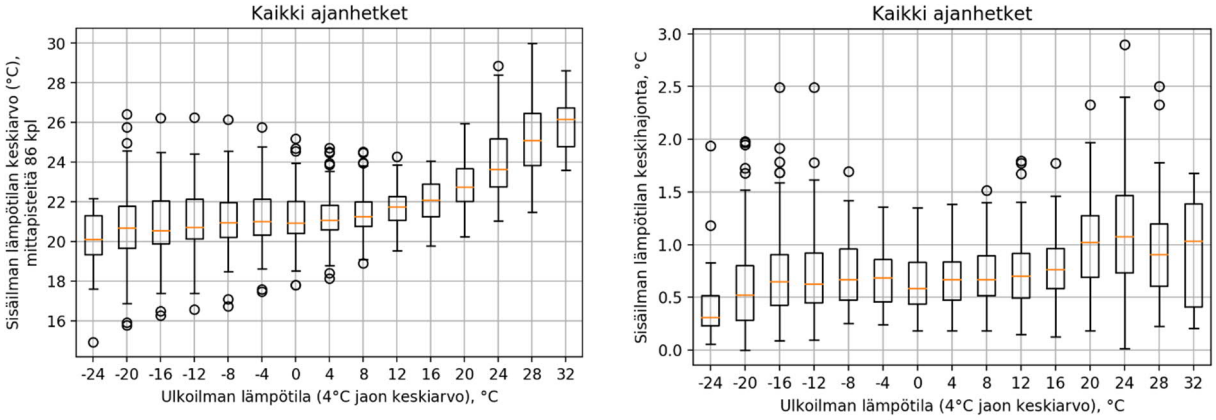
Kuvissa 2a ja 2b on esitetty sisäilman lämpötilan ja kosteuslisän arvot samasta mittauspisteestä ulkoilman lämpötilan funktiona. Tuloksissa on nähtävissä Sisäilman lämpötilan hajonnan kasvaminen kylmempiä ulkoilman lämpötila kohti siirryttäessä ja toisaalta sisäilman kosteuslisän hajonnan kasvu lämpimiä ulkoilman olosuhteita kohti siirryttäessä.



(a) (b)

Kuva 2. Sisäilman lämpötila (a) ja kosteuslisä (b) ulkoilman lämpötilan funktiona. Mittausdata on sama kuvan 1 kanssa.

Kuviin 3a ja 3b on kerätty tietoa samojen suureiden käyttäytymisestä koko mittausaineistossa. Yksittäisten mittauspisteiden tulosdata on jaettu kategorioihin ulkoilman lämpötilan mukaan, jonka jälkeen jokaisesta mittauspisteestä ja ulkoilmanlämpötila-alueesta on laskettu lämpötila- ja kosteuslisäarvojen keskiarvo ja keskihajonta. Tulokset on esitetty laatikko-janakuvaajien avulla, joissa laatikon ala- ja yläreuna kuvaavat kertymäfunktion 25 ja 75 %:n arvoja, laatikon keskellä oleva viiva mediaania (50 % arvo). Janat ulottuvat laatikon reunasta viimeiseen arvoon ennen etäisyyttä 1,5*<laatikon pituus>. Näiden alueiden ulkopuolelle jäävit pisteet on merkattu ympyröillä.



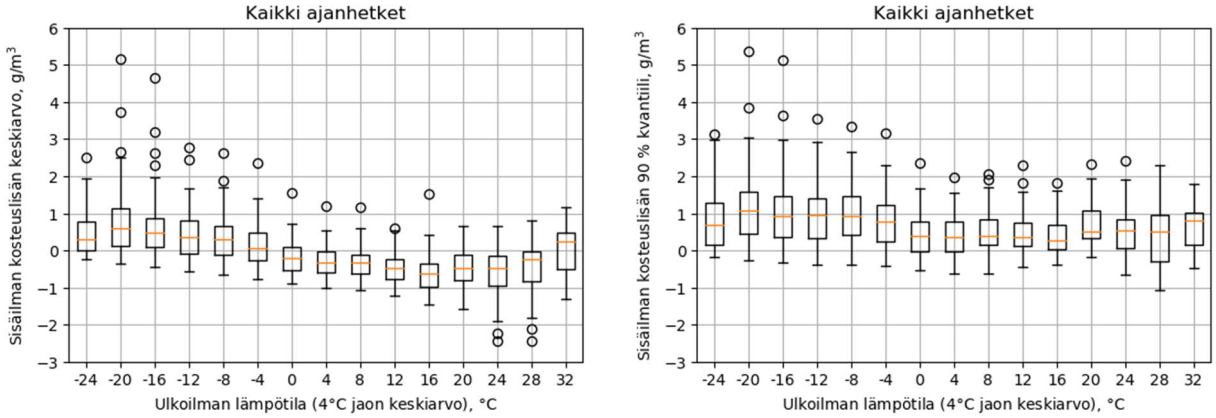
(a) (b)

Kuva 3. Sisäilman mittauspiteiden keskiarvojen ja keskihajontojen jakaumat eri ulkoilman lämpötila-arvoilla. Laatikko-janakuviot kuvaavat kaikkien mittauspiteiden lämpötilojen käyttäytymistä koko mittausaineistossa.

Molempien suureiden käyttäytymisessä on nähtävissä selkeä korrelaatio ulkoilman lämpötiloihin. Kuvan 3a perusteella ulkoilman lämpötilan ollessa -22…10 °C sisäilman lämpötilan keskiarvo oli puolessa kohteista 20…22 °C, vaikkakin kuvassa 3 näkyy pieni keskilämpötilojen nousu myös tällä alueella. Ulkoilman lämpötilan ollessa -26…-22 °C sisäilman lämpötilat laskivat tästä hieman, ollen noin 19…21 °C. Tämä voi kuitenkin johtua myös näiden olosuhteiden pienestä lukumäärästä aineistossa, verrattuna lämpimämpien ulkoilman olosuhteiden mukaisiin tilanteisiin. Ulkoilman lämpötilan ollessa 10 °C ja sitä korkeampi, sisäilman lämpötila nousi lähes lineaarisesti ulkoilman lämpötilan noustessa. Ulkoilman lämpötilan ollessa 26…30 °C, sisäilman lämpötilan keskiarvo oli puolessa mittauspisteistä noin 24…26 °C.

Kuvassa 3b sisäilman lämpötilan keskihajonta oli puolessa mittauspisteistä noin 0,5…1,0 °C, kun ulkoilman lämpötila oli -22…18 °C. Laatikko-janakuvioiden mukaan lämpötilan keskihajonta kasvoi kylmien ($T_e \leq$ -10 °C) ulkoilman olosuhteiden aikaan noin 25 %:ssa mittauspisteistä (laatikon yläpuolelle jäävä alue). Sisälämpötilan keskihajonta kasvoi myös ulkoilman lämpötilan noustessa yli 18 °C.

Edellä kuvatut tavanomaisesti esiintyvät lämpötila-arvot vastaavat melko hyvin nykyisiä sisälämpötilojen suunnitteluarvoja. Näiden lisäksi on kuitenkin tärkeää huomata, että kuvan 3 laatikko-janakuvioissa 25 % mittauspisteiden keskilämpötiloista asettui tavanomaisia suunnitteluarvoja kylmempiin ja toiset 25 % mittauspisteistä näitä lämpimämpiin arvoihin. Lisäksi kuvaajassa näkyy minimi- ja maksimikeskilämpötilojen erkanevan lämpötila-alueelta 20…22 °C sekä ylös, että alaspäin, kun ulkoilman lämpötila laskee arvosta noin 10 °C alaspäin. Mittauksissa noin 50 % mittauspisteistä oli siis sellaisia, joissa lämpötilan keskiarvoa voisi olla hyvä pyrkiä tarkistamaan ylös- tai alaspäin. Kuvissa 4a ja 4b on esitetty tietoa sisäilman kosteuslisän käyttäytymisestä koko mittausaineistossa.



(a) (b)

Kuva 4. Sisäilman kosteuslisän keskiarvon ja 90 % persentiilin laatikko-janakuvaajat eri ulkoilman lämpötila-alueilla. Tulokset kuvaavat kosteuslisän käyttäytymistä kaikissa mittauspisteissä.

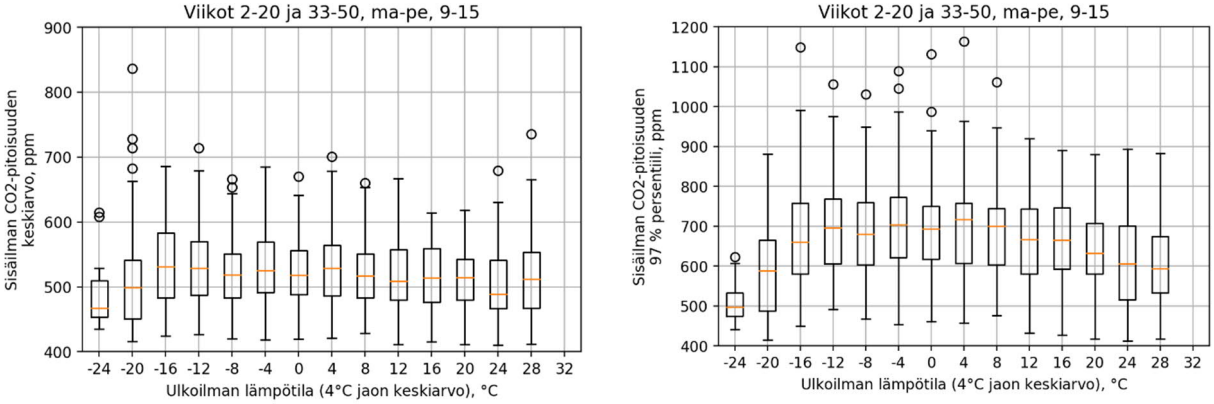
Kuvan 4 perusteella sisäilman kosteuslisän keskiarvot olivat tunnittaisesta datasta laskettuna puolessa mittauspisteistä noin 0…1 g/m^3, kun ulkoilman lämpötila oli -26…-6 °C ja -1…0 g/m^3, kun ulkoilman lämpötila oli -2…30 °C. Mittauspisteissä oli siis keskimäärin talvella pieni kosteuslisä ja kesällä pieni kosteusvaje ulkoilmaan nähden. Rakennusfysikaalisia mitoituslaskelmia ajatellen 25 %:ssa mittauspisteistä talvella sisäilman kosteuslisän keskiarvo oli talvella noin 1…2,5 g/m^3 ja 90 % persentiili noin 1,5…3 g/m^3. Näiden tulosten perusteella mitatut koulut ja päiväkodit kuuluivat siis pääosin kosteusluokkaan 3 [8], mutta kesäajan kosteuslisää olisi myös perusteltua kasvattaa koulujen ja päiväkotien tapauksessa arvosta 1 g/m^3 arvoon 2 g/m^3.

2.2 Hiilidioksidipitoisuus

Kuvassa 5 on esitetty sisäilman hiilidioksidipitoisuuden tunnittaisten mittaustulosten keskiarvo sekä 97 % persentiili kaikissa mittauspisteissä. Kuvaajiin on valittu käyttötilanteen ajanhetkiä kuvaavat ajankohdat, joiksi valittiin viikot 2-20 ja 33-50, viikonpäivät maanantaista perjantaihin ja kellonajat 9-15.

Hiilidioksidipitoisuuden keskiarvolle ei ole annettu rakennuksia koskevissa asetuksissa vaatimustasoja, mutta se kuvaa hiilidioksidipitoisuuden käyttäytymistä mittausaineistossa ja voi antaa tietoa tilojen keskimääräisestä käyttöasteesta. Sisäilman hiilidioksidipitoisuuden keskiarvot olivat kuvan 5a perusteella puolessa mittauspisteistä noin 480…550 ppm. Lisäksi 25 %:ssa mittauspisteistä hiilidioksidipitoisuuden keskiarvo oli noin 420…480 ppm ja viimeisissä 25 %:ssa mittauspisteistä noin 550…680 ppm.

Kuvassa 5b on esitetty hiilidioksidipitoisuuden 97 % persentiilit ulkoilman lämpötila-alueittain kaikissa mittauspisteissä. Valittu persentiili vastaa hiilidioksidipitoisuutta, jota suurempia arvoja esiintyi tunnittaisessa datassa keskimäärin noin tunnin viikossa (1 h / 37 h ≈ 3 %). Ulkoilman lämpötilan ollessa -18…+22 °C korkeimmissa 25 % tapauksista pitoisuudet olivat noin 750…950 ppm. Yksittäisissä mittauspisteissä esiintyi noin 1000…1200 ppm pitoisuuksia. Tulokset on laskettu tunnin välein mitatusta datasta, mutta hiilidioksidipitoisuuden arvot ovat voineet vaihdella huomattavasti tunnin mittausvälin sisällä. Hiilidioksidipitoisuuden kuvissa 5a ja 5b esitettyjä arvoja tulee ilman tarkempaa selvitystä käyttää ensisijaisesti vertailuaineistona, ei arviointina tilojen määräystenmukaisuudesta.



(a) (b)

Kuva 5. Sisäilman hiilidioksidipitoisuuden tunnittaisten mittausten a) keskiarvot ja b) 97 % persentiilit kaikissa aineiston mittauspisteissä. Pystyakseleiden asteikot poikkeavat toisistaan.

Kuvan 5a perusteella hiilidioksidipitoisuuden keskiarvot eivät juurikaan riippuneet ulkoilman lämpötilasta. Sen sijaan kuvassa 5b esitetyissä 97 % persentiilien arvoissa sisäilman hiilidioksidipitoisuudet putoavat voimakkaasti ulkoilman lämpötilan ollessa alle -18 °C. Tämä voi kuitenkin johtua myös hyvin kylmien ja kuumien olosuhteiden mukaisten ajankohtien pienestä lukumäärästä verrattuna kuvaajan keskialueen mukaisiin olosuhteisiin. Kuvassa 5b hiilidioksidipitoisuuden 97 % persentiilien arvot ovat korkeimmillaan maltillisten pakkasten aikaan talvikaudella ja laskevat hitaasti ulkoilman lämpötilan noustessa. Sisälämpötilojen tapaan myös hiilidioksidipitoisuudessa on nähtävissä tulosten suuri eroavaisuus eri mittauspisteiden välillä, jossa esimerkiksi 97 % persentiileissä matalin 25 % oli välillä noin 400…600 ppm ja korkein 25 % välillä 700…1000 ppm, ulkoilman lämpötilasta riippuen.

3. Yhteenveto

Tässä artikkelissa esitettiin COMBI-tutkimushankkeen osan tehtyjen koulujen ja päiväkotien sisäilman lämpötilan, kosteusolosuhteiden ja hiilidioksidipitoisuuden mittaustuloksia. Tulosten perusteella sisäilman lämpötila oli puolessa mittauspisteistä keskimäärin noin 20…22 °C, kun

ulkoilman lämpötila oli ≤ 10 °C. Ulkoilman lämpötilan noustessa tätä korkeammalle, nousi samalla myös sisäilman lämpötila. Lopuissa toisessa 50 %:ssa mittauspisteistä esiintyi tilanteita, joissa lämmityskaudella sisäilman lämpötila poikkesi edellä mainitusta lämpötilavälistä joko ylöspäin tai alaspäin. Vaikka keskimäärin lämpötilaolosuhteet vastasivat tavanomaisia suunnitteluarvoja, oli aineistossa kuitenkin siis myös huomattava määrä tilanteita, joissa sisälämpötilojen tarkempi seuranta voisi auttaa joko sisäilman olosuhteiden tai energiatehokkuuden parantamisessa.

Sisäilman kosteuslisä oli mitatuissa kohteissa pääosin melko pieni ja kesäkaudella kohteissa esiintyi myös kosteusvajetta ulkoilmaan nähden. Rakenteiden kosteusteknistä toimintaa arvioitaessa sisäilman kosteuslisänä voidaan käyttää talvella ($T_e \leq 0$ °C) arvoa +3 g/m^3 ja kesällä ($T_e \geq 0$ °C) arvoa 2 g/m^3.

Hiilidioksidipitoisuus voi vaihdella koulu- ja päiväkotikohteiden sisäilmassa hyvin nopeasti ja tätä taustaa vasten sisäilman hiilidioksidipitoisuuksien mittauksia olisi suositeltavaa tehdä riittävän tiheällä aikaresoluutiolla ja pidentää mittausväliä vasta mittausdatan sen salliessa. Nyt tehtyjen tunnittaisten mittausten tuloksia voidaan käyttää ensisijaisesti vertailuaineistona ja niissä sisäilman hiilidioksidipitoisuuden keskiarvot olivat matalimmassa 25 %:ssa mittauspisteistä noin 420…580 ppm, keskimmäisissä 50 %:ssa mittauspisteistä 480…580 ppm ja korkeimmissa 25 %:ssa 580…700 ppm. Vastaavat arvot 97 % persentiileille olivat 420…600 ppm, 600…750 ppm ja 750…1000 ppm, ulkoilman lämpötilasta riippuen.

Lähdeluettelo

[1] Vinha, J, Laukkarinen, A, Kaasalainen, T, Pihlajamaa, P, Teriö, O, Jokisalo, J, Annila, P, Harsia, P, Hedman, M, Heljo, J, Kallioharju, K, Kauppinen, A, Kero, P, Kivioja, H, Lehtinen, T, Marttila, T, Moisio, M, Mäkinen, A, Paatero, J, Raunima, T, Ruusala, A, Sankelo, P, Sekki, P, Sirén, K, Tuominen, E, Tuominen, O, Uotila, U & Uusitalo, S 2019, Comprehensive development of nearly zero-energy municipal service buildings (COMBI). Tutkimushankkeen johdanto- ja yhteenvetoraportti. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laboratorio. Rakennetekniikka. Tutkimusraportti, no. 168, Tampereen teknillinen yliopisto.

[2] Ympäristöministeriön asetus 1009/2017 uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta.

[3] RT 07-11299 Sisäilmastoluokitus 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Rakennustietosäätiö RTS sr. 24 s.

[4] Sosiaali- ja terveysministeriön asetus 545/2015 asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista.

[5] Sosiaali- ja terveysalan lupa- ja valvontavirasto Valvira 2016. Asumisterveysasetuksen soveltamisohje. Osa I, asumisterveysasetus § 1-10. Ohje 8/2016. 20 s.

[6] Vinha, J, Korpi, M, Kalamees, T, Eskola, L, Palonen, J, Kurnitski, J, Valovirta, I, Mikkilä, A & Jokisalo, J 2005, Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpöolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan osasto, talonrakennustekniikan laboratorio, Tutkimusraportti, vol. 131.

[7] Vinha, J, Korpi, M, Kalamees, T, Jokisalo, J, Eskola, L, Palonen, J, Kurnitski, J, Aho, H, Salminen, M, Salminen, K & Keto, M 2010, Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Rakennetekniikka. Tutkimusraportti, vol. 140.

[8] RIL 107-2012 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohje. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.