



LAURA STASIULIENĖ

**KOMPLEKSINIS PASTATŲ
MIKROKLIMATO SISTEMŲ
POVEIKIS LAKIŲJŲ
ORGANINIŲ JUNGINIŲ
KONCENTRACIJAI ŽMOGAUS
ĮKVEPIAMAME ORE**

DAKTARO DISERTACIJOS
SANTRAUKA

TECHNOLOGIJOS
MOKSLAI, STATYBOS
INŽINERIJA (02T)

Kaunas
2018

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

LAURA STASIULIENĖ

**KOMPLEKSINIS PASTATŲ MIKROKLIMATO SISTEMŲ
POVEIKIS LAKIŲJŲ ORGANINIŲ JUNGINIŲ
KONCENTRACIJAI ŽMOGAUS ĮKVEPIAMAME ORE**

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, Statybos inžinerija (02T)

2018, Kaunas

Disertacija rengta 2013–2017 metais Kauno technologijos universiteto, Statybos ir architektūros fakultete. Mokslinius tyrimus rėmė Lietuvos mokslų taryba.

Mokslinis vadovas:

Prof. dr. Andrius JURELIONIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija, 02T), 2014–2017.

Prof. dr. Viktoras DOROŠEVAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija, 09T), 2013–2014.

Redagavo:

Virginija Stankevičienė (Kauno technologijos universiteto Užsienio kalbų centras)

Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Dr. Karolis BANIONIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija, 02T) – **pirmininkas**;

Doc. dr. Gabriel BEKÖ (Danijos technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija, 02T);

Dr. Algis DŽIUGYS (Lietuvos energetikos institutas, energetika ir termoinžinerija, 06T);

Prof. dr. Linas KLIUČININKAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija, 04T);

Prof. dr. Danutė VAIČIUKYNIENĖ (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija, 02T).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2018 m. birželio 19 d. 14 val. Kauno technologijos universiteto Rektorato salėje.

Adresas: K. Donelaičio g. 73–402, 44249 Kaunas

Tel. (370) 37 300 042; faks. (370) 37 324 144; el. paštas: doktorantura@ktu.lt.

Disertacijos santrauka išsiųsta 2018 m. gegužės 18 d.

Su disertacija galima susipažinti internetinėje svetainėje <http://ktu.edu> ir Kauno technologijos universiteto bibliotekoje (K. Donelaičio g. 20, 44239).

ĮVADAS

Temos aktualumas

Šiuolaikinių pastatų mikroklimatas ir jo poveikis žmonėms priklauso nuo įvairių veiksnių: oro kaitos, ore esančių teršalų, atstojamosios temperatūros, oro paskirstymo būdo, oro judėjimo greičio ir t. t. Šiluminis komfortas pastatuose dažniausiai priklauso nuo šildymo, vėsinimo ir vėdinimo sistemų derinio. Siekiant užtikrinti aukštą pastatų oro kokybės lygį svarbu arba sumažinti teršalų emisijas iš taršos šaltinių arba užtikrinti efektyvų šių teršalų šalinimą. Vieni iš svarbiausių oro taršos šaltinių šiuolaikiniuose pastatuose yra buitinė chemija, apdailos medžiagos ir baldai.

Norint tiksliai įvertinti oro taršos šaltinių įtaką žmogui, ypatingas dėmesys turi būti skiriamas izoterminiams teršalams, išsiskiriantiems grindų lygyje, nes jų koncentracija įkvėpiamame ore gali būti didesnė dėl aplink žmogų susidarancio konvekcinio oro srauto. Dažniausiai tokių teršalų šaltiniai – grindų dangos, valymo priemonės ir kitos medžiagos, išskiriančios lakiuosius organinius junginius.

Lakieji organiniai junginiai susidaro garuojant medžiagoms kambario temperatūroje ir yra priskirtini izoterminiams teršalams. Jų tankis ir temperatūra reikšmingai nesiskiria nuo patalpos oro tankio ir temperatūros, todėl jų sklaidą patalpoje sąlygoja mikroklimato parametrai (oro temperatūra ir oro judėjimo greitis), oro paskirstymo būdas bei konvekciniai oro srautai.

Izoterminių teršalų (lakiųjų organinių junginių), išsiskiriančių grindų lygyje patekimas į žmogaus kvėpavimo zoną esant skirtingiems šildymo sistemos ir oro paskirstymo deriniams yra nepakankamai ištirtas.

Tyrimo tikslas

Identifikuoti veiksnius, lemiančius oro teršalų patekimą į žmogaus kvėpavimo zoną pastatuose ir ištirti grindų lygyje išsiskiriančių lakiųjų organinių junginių sklaidos priklausomybę nuo patalpų šildymo sistemos ir oro paskirstymo derinio.

Tyrimo uždaviniai:

- eksperimentiškai (laboratorinėmis sąlygomis) ištirti grindų lygyje susidaranciu teršalų patekimą į kvėpavimo sluoksnį, veikiant skirtingiems šildymo sistemų ir oro paskirstymo deriniams;
- sumodeliuoti teršalų sklaidą taikant skaitinės skysčių dinamikos metodą;
- įvertinti skaitinių teršalų sklaidos rezultatų patikimumą ir įvardinti veiksnius, turinčius įtaką teršalų sklaidai;
- pateikti rekomendacijas šildymo ir vėdinimo sistemų pasirinkimui siekiant sumažinti teršalų iš grindų lygio patekimą į kvėpavimo zoną.

Mokslinis naujumas

Nustatyti kiekybiniai lakiųjų organinių junginių koncentracijų skirtumai žmogaus kvėpavimo zonoje esant skirtingiems šildymo sistemų ir oro paskirstymo deriniams. Tyrimų kokią įtaką daro šildymo sistemos ir oro paskirstymo derinys grindų lygyje išsiskiriančių izoterminių teršalų patekimui į kvėpavimo zoną nebuvo rasta.

Praktinis pritaikomumas

Įvertinus kiekybinius lakiųjų organinių junginių koncentracijų skirtumus žmogaus kvėpavimo zonoje esant skirtingiems šildymo sistemų ir oro paskirstymo deriniams, nustatyta, kuris derinys užtikrina geresnę oro kokybę žmogaus kvėpavimo zonoje. Geresnė oro kokybė kvėpavimo zonoje užtikrinama naudojant žemos temperatūros paviršinio šildymo (t. y. grindinio šildymo) ir sumaišomojo vėdinimo sistemos derinį.

Svarbu paminėti, kad šiuo metu sumaišomojo vėdinimo sistemos dažniausiai yra projektuojamos neįvertinant konvekcinio srautų, atsiradusių dėl žmonių, šildymo prietaisų ar įrangos (pavyzdžiui, kompiuterių ar šviestuvų). Projektuojant sumaišomojo vėdinimo sistemas daroma prielaida, kad oro temperatūra ir teršalų koncentracija ore bus tolygiai pasiskirsčiusi visoje patalpoje. Dėl didesnio pastatų energinio naudingumo, šildymo sistemų ir elektros prietaisų sukuriama konveciniai oro srautai mažėja. Todėl susidarantys dėl žmonių konveciniai oro srautai, būdami panašaus tūrio kaip ir vėdinimo sistemų oro srautai, tampa vis svarbesniu veiksniumi, lemiančiu oro pasiskirstymą patalpose. Disertacijos rezultatai atskleidė šildymo sistemų ir oro paskirstymo derinių įtaką oro kokybei žmogaus kvėpavimo zonoje.

Mokslinių tyrimų metodika

Disertacijoje panaudoti eksperimentiniai ir skaitiniai modeliavimo metodai. Lakiųjų organinių junginių išsiskiriančių grindų lygyje sklaida, esant skirtingiems šildymo sistemų ir oro paskirstymo deriniams, ištirta eksperimentiškai mikroklimato tyrimų kameroje ir taikant skaitinę skysčių dinamikos programinę įrangą. Statistiniai skirtumai tarp išmatuotų koncentracijų reikšmių įvertinti taikant neparametrinę statistiką. Veiksniams, turintiems įtaką teršalų sklaidai, įvertinti, panaudota skaitinė skysčių dinamikos programinė įranga.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema išspausdinti du moksliniai straipsniai periodiniuose žurnaluose, įrašytuose į „Clarivate analytics“ duomenų bazę ir turinčiuose citavimo indeksą. Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai skelbti dviejose tarptautinėse konferencijose.

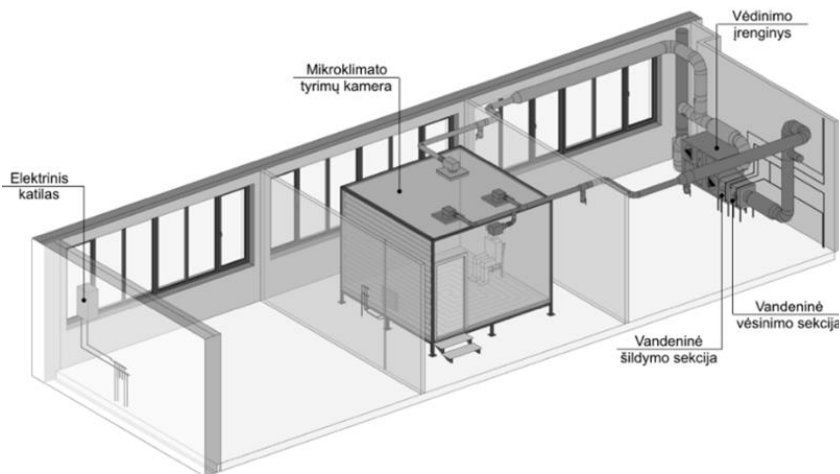
1. METODAI

1.1. Eksperimentinis metodas

1.1.1. Mikroklimato tyrimų kamera

Eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti mikroklimato tyrimų kameroje, esančioje Kauno technologijos universiteto Pastatų energetikos ir mikroklimato (PEM) laboratorijoje. Ši mikroklimato tyrimų kamera daugiausia naudojama tiriant oro kokybę, šiluminį komfortą ir darbuotojų darbingumą.

PEM laboratorijoje yra vėdinimo įrenginys (Gold04, Swegon, Švedija) su filtrais, ventiliatoriais, rotaciniu šilumokaičiu ir vandenine šildymo bei vėsinimo sekcija. Vėdinimo įrenginys naudojamas tiekti ir šalinti orą iš mikroklimato tyrimų kameros. Karštas vanduo ruošiamas elektriniame katile ir tiekiamas į šildymo sekciją prie vėdinimo įrenginio, taip užtikrinant tiekiamą į kamerą oro temperatūrą. Karštas vanduo taip pat tiekiamas į radiatorių, esantį kameroje. Vandens vėsinimo sistema naudojama vienai kameros sienai vėsinti. Eksperimentų metu laboratorijoje naudota įranga pavaizduota 1.1 paveiksle.

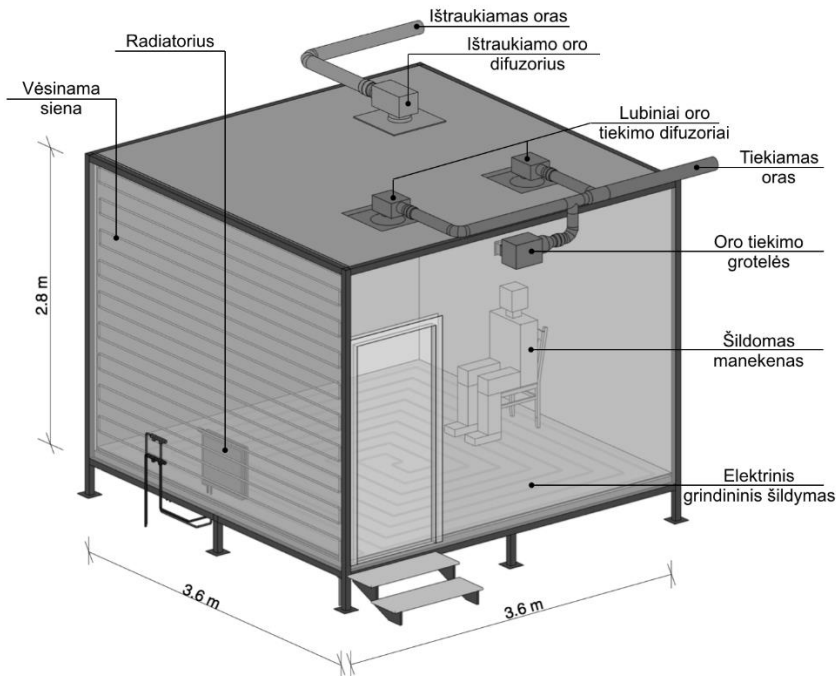


1.1 pav. PEM laboratorijos įranga naudota eksperimentų metu

Mikroklimato tyrimų kameros (žr. 1.2 pav.) matmenys – $3,6 \times 3,6 \times 2,8$ m, grindų plotas – 13 m^2 , tūris – 36 m^3 . Kamera sukonstruota naudojant įprastas statybines medžiagas: sienos iš dažytų gipso kartono plokščių, grindys iš medienos plaušų plokščių ir PVC dangos, lubos iš gipso kartono plokščių ir lubinių plokščių.

Kamera apšviečiama dviem florescensiniais įleidžiamais šviestuvais, kurie eksperimentų metu buvo išjungti, kad būtų išvengta papildomų šilumos pritekėjimų.

Viena kameros siena eksperimentų metu buvo vėsinama vandenine vėsinimo sistema ir imitavo išorinę pastato sieną šildymo sezono metu bei užtikrino, kad kamera nebūtų peršildoma. Be to, nuo vėsių paviršių gali susidaryti oro srautai, veikiantys oro judėjimą patalpoje [1, 2].



1.2 pav. Eksperimentinė mikroklimate tyrimų kamera ir įranga

Kamera gali būti šildoma trimis šildymo sistemomis: grindinio, radiatorinio ir orinio šildymo. Grindinio šildymo sistemoje grindų temperatūrai palaikyti naudojamas elektros kabelių kilimėlis. Radiatorinio šildymo sistemoje naudojamas plieninis profiliuotų plokščių radiatorius (500-600×11, Henrad, Belgija), kuris sumontuotas ant vėsinamos kameros sienos. Radiatoriaus matmenys – 0,5 × 0,6 m, atstumas nuo grindų – 0,1 m. Orinio šildymo sistema yra sutapdinta su sumaišomojo vėdinimo sistema. Oras gali būti tiekiamas pro du lubinius skirstytuvus su sukamaisiais diskais (0,5 × 0,5 m) arba pro sienines grotelės (0,3 × 0,1 m) kameros palubėje. Tiek skirstytuvai, tiek grotelės yra su

pajungimo dėžėmis. Skirstytuvai ir grotelės užtikrina dvi skirtingas sumaišomojo vėdinimo oro judėjimo schemas. Nors abi oro judėjimo schemas priskiriamos sumaišomajam vėdinimui, jos pasižymi skirtingu oro tiekimo momentu, t. y. skiriasi tiekiamo oro greitis. Skirstytuvai orą tiekia keturiomis kryptimis, todėl oro judėjimo greičiai darbo zonoje mažesni. Pro groteles visas oro kiekis tiekiamas didesniu greičiu, todėl oro judėjimo greičiai darbo zonoje didesni. Tai gali lemti teršalų sklaidą patalpoje. Eksperimentų metu buvo naudojami arba skirstytuvai arba grotelės, prieš tai atjungiant tą oro tiekimo prietaisą, kuris tam tikru atveju nereikalingas. Orui ištraukti iš kameros buvo naudotas vienas lubinis oro ištraukimo skirstytuvai.

1.1.2. Taršos šaltinis

Šiems tyrimams reikėjo pasyvaus taršos šaltinio, išskiriančio lakiųjų organinių junginių (LOJ) mišinį, nes kilimai ar grindų dangos išskiria ne vienos rūšies LOJ. Dėl šios priežasties teršalų emisijos grindų lygyje buvo imituojamos panaudojant skystus poliuretano pagrindo klijus (TOTALSEAL 34B, Le Joint Francais, Prancūzija), išskiriančius aromatinių angliavandenilių klasei priskiriamas medžiagas, tokias kaip 1,2,4-trimetilbenzenas, naftalenas, ksilenas [3].

Eksperimentams supaprastinti panaudotas taškinis taršos šaltinis, t. y. *Petri* lėkštelė, užpildyta klijais. Ji buvo statoma kameros viduryje (žr. 1.4 pav.). Pradinių eksperimentų metu nustatyta, kad teršalų sklaida iš taškinio šaltinio yra panaši kaip ir iš šaltinio, užimančio didesnę plotą, tačiau skiriasi išskiriamų teršalų kiekiai.

1.1.3. Šildomas manekenas

Siekiant eksperimente imituoti žmogų, iš paprastų geometrinių formų buvo sukurtas šildomas manekenas, turintis galvą ir tarpą tarp kojų, nes tai turi įtaką konvekciniam srautui, vykstančiam aplink žmogų [4, 5]. Manekeno paviršius buvo padengtas tekstilės medžiaga, imituojančia drabužius ir didinančią paviršiaus šiurkštumą. Sėdinčio manekeno aukštis – 1,2 m, o paviršiaus plotas – 1,7 m² yra panašus į vidutinio žmogaus paviršiaus plotą [6]. Manekeno šiluminė galia – 85 W, tai atitinka fizinius žmogaus kūno šilumos nuostolius [7]. Manekeno paviršiaus temperatūra buvo palaikoma +31 – +34 °C (panaši į žmogaus kūno paviršiaus temperatūrą). Paminėtina tai, kad eksperimentui naudotas manekenas neturėjo kvėpavimo funkcijos, tačiau nustatyta, kad kvėpavimo funkcijos buvimas neturi didelės įtakos sukuriama konvekciniame srauto formai [8].

1.1.4. Eksperimentų nustatymai ir matavimo įranga

Siekiant iširti LOJ išsiskiriančių grindų lygyje sklaidą, esant skirtingoms šildymo sistemoms, oro paskirstymo schemoms bei šildomo manekeno padėtims iš viso buvo atlikta 18 eksperimentų.

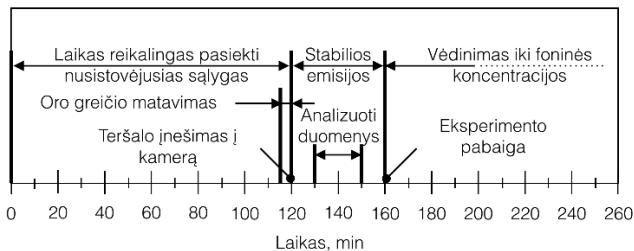
Eksperimentų metu palaikoma vėsinamos sienos temperatūra buvo $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ žemesnė nei kitų atitvarų. Kitų sienų ir lubų temperatūra buvo tokia pat kaip laboratorijos patalpos, kurioje yra mikroklimato tyrimų kamera (eksperimentų su grindinio ir radiatorinio šildymo sistemomis metu – $+22\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; su orinio šildymo sistema – $+20\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Buvo naudojamos trys šildomo manekeno padėties taršos šaltinio atžvilgiu (A, B ir C) (žr. 1.4 pav.). Siekiant išvengti manekeno konvekcinio srauto sutrikdymo, manekenas buvo atitrauktas nuo sienos $0,2\text{ m}$ atstumu.

Eksperimentų su grindinio šildymo sistema metu palaikoma grindų paviršiaus temperatūra buvo $+25\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kitais bandymo atvejais grindų temperatūra buvo apie $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Eksperimentų su radiatoriniu šildymu metu palaikoma radiatoriaus paviršiaus temperatūra buvo apie $+40\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Orinio šildymo sistemos atveju tiekiamo oro temperatūra buvo $+25\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kitais atvejais tiekiamo oro temperatūra buvo $+21,5\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (apytiksliai lygi kameros temperatūrai).

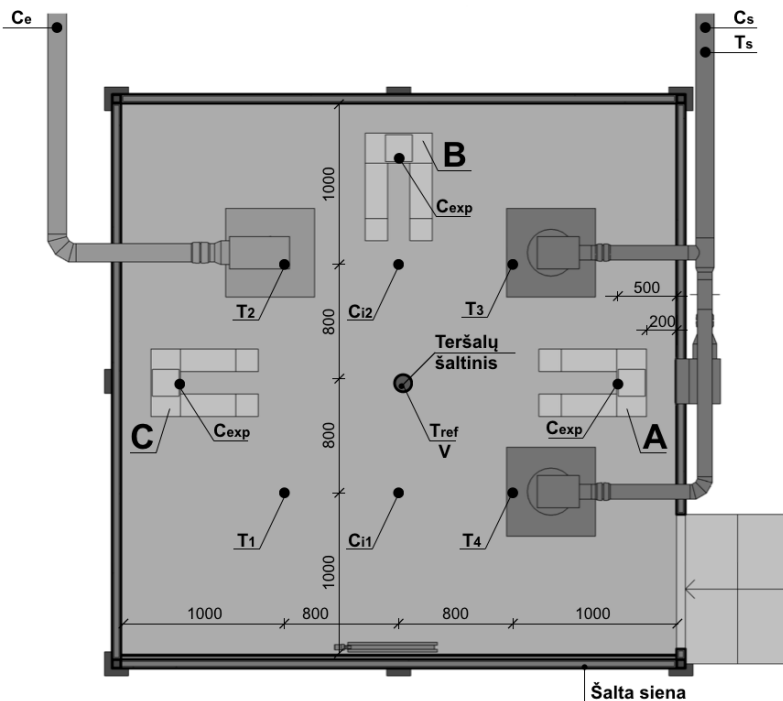
Oro kaita kameroje visų eksperimentų metu buvo 2 h^{-1} , tai sudaro 20 l/s ($72\text{ m}^3/\text{h}$). Tokia oro kaita užtikrina pakankamą šviežio oro kiekį žmonėms ir teršalų, išsiskiriančių iš statybinių medžiagų bei baldų, pašalinimą [6]. Tiekiamo ir šalinamo oro kiekiai kameroje buvo nustatomi panaudojant oro srauto matuoklį / mikromanometrą (Fluke 922, Fluke Corporation, JAV) (matavimo tikslumas $\pm 1\text{ } \% + 1\text{ Pa}$). Tiekiamų oro srovių trajektorijos buvo nustatomos reguliuojant sukamuosius diskus skirstytuvuose ir mentes grotelėse. Oro paskirstymo schemos prieš eksperimentus patikrintos naudojant dūmus. Reikia paminėti, kad šiuose bandymuose buvo tiriama atvejais tik su sumaišomuoju vėdinimu. Išstumiamasis (terminis) vėdinimas nebuvo taikytas, nes nėra tinkamas orui šildyti.

Visi eksperimentai buvo atliekami esant nusistovėjusioms sąlygoms. Pradinių eksperimentų metu esant visoms įjungtomis sistemoms (šildymo, vėdinimo, šiluminio manekeno, sienos vėsinimo) nustatyta, kad nusistovėjusios sąlygos (t. y. pastovi temperatūra) kameroje pasiekiamos per 2 val. Esant nusistovėjusioms sąlygoms, LOJ išsiskyrimai išlieka nepakitę apie 40 minučių . Todėl taršos šaltinis eksperimentų metu į kamerą buvo įnešamas prieš pradėdamas eksperimentą. Matavimų planas pateiktas 1.3 paveiksle. Pateikiant eksperimentų rezultatus remtasi 20 minučių duomenimis. Tarp eksperimentų kamera buvo išvėdinama iki foninio LOJ koncentracijų lygio.



1.3 pav. Matavimų planas

Trys pagrindiniai parametrai, kurie buvo matuojami eksperimentų metu yra oro judėjimo greitis, oro temperatūra ir LOJ koncentracijos. Matavimo įrangos išdėstymo planas pateikiamas 1.4 paveiksle.



1.4 pav. Matavimo įrangos ir šiluminio manekeno padėties mikroklimato tyrimų kameroje

Oro judėjimo greitis buvo matuojamas likus 5 minutėms iki eksperimento pradžios (kamos centre 1,1 m aukštyje virš grindų) su šiluminio komforto matavimo sistema (Lumasence Innova 1221, Lumasence, Danija) ir anemometru *MM0038* (tikslumas $\pm 0,1$ m/s).

Vertikalios temperatūros gradiento matavimui panaudoti keturi stovai (T_1, T_2, T_3 ir T_4) su temperatūros matuokliais. Oro temperatūra buvo matuojama keturiuose aukščiuose (0,1; 1,1; 1,7 ir 2,5 m) virš grindų su skaitmeniniais jutikliais (DS18B20, Dallas Semiconductor, JAV). Atstojamoji temperatūra buvo matuojama 1,1 m aukštyje virš grindų, kameros centre. Temperatūros jutiklių tikslumas $\pm 0,5$ °C.

Teršalų koncentracijoms matuoti buvo panaudoti penki oro kokybės jutikliai veikiantys pagal mikro-mašinų metalų oksidų puslaidininkų (MOS) technologiją (iAQ2000, AMS Sensor Solutions Germany GmbH) [9].

Šie jutikliai pasirinkti todėl, kad gali matuoti įvairius, ne metano angliavandenilius, taip pat alifatinius ir aromatinius angliavandenilius, alkoholius, ketonus, organines rūgštis, aminorius (t. y. parodo tam tikrą LOJ suminę koncentraciją). Teršalai, išsiskiriantys iš skystų klijų, priskiriami aromatinių angliavandenilių klasei. Jutikliai LOJ koncentracijų kiekybines reikšmes konvertuoja į CO₂ ekvivalento ppm vertes pagal specialią gamintojų sukurtą technologiją [10]. Jutiklių rodmenų tikslumas tarpusavyje buvo išbandytas lyginant jais išmatuotas vertes. Variacijos koeficientas tarp išmatuotų verčių nebuvo didesnis kaip 7 %.

LOJ koncentracijos buvo matuojamos tiekiamo oro sraute (C_s), ištraukiamo oro sraute (C_e), darbo zonoje (1,1 m virš grindų) (C_{i1}, C_{i2}). Vienas LOJ jutiklis (C_{exp}) buvo pritvirtintas šiluminio manekeno kvėpavimo zonoje. Darbo zona yra erdvė nuo grindų iki 1,1 m aukštyje esančios horizontalios plokštumos. Kvėpavimo zona – erdvė prieš manekeno veidą.

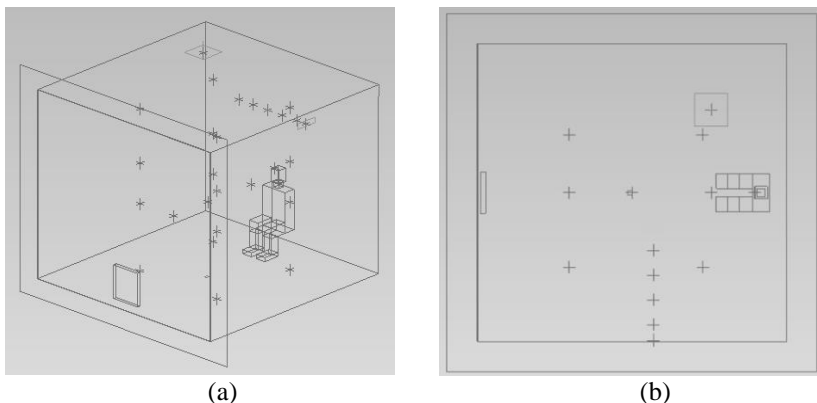
Temperatūros ir LOJ koncentracijos matuotos 1 s intervalu. Iš per 20 minučių analizuotų duomenų gauta 1200 verčių.

1.2. Skaitinis metodas

Skaitinės skysčių dinamikos (CFD) komercinė programinė įranga *FloVENT* (Mentor Graphics, JAV) panaudota teršalų sklaidai prognozuoti ir vizualizuoti. Pasirinkta programinė įranga taikoma tiriant oro srautų judėjimą, šilumos perdavimą ir teršalų sklaidą patalpose ir pastatuose. Nusistovėjusių sąlygų modeliavimui buvo pasirinktas *K-epsilon* turbulencijos modelis (*LVEL K-epsilon*), kadangi šis modelis gerai prognozuoja oro srautų, oro temperatūrų ir oro teršalų sklaidą pastatuose [11–14]. Pasirinktas dvigubo tikslumo sprendiklis (DPS) [15].

Skaitiniame teršalų sklaidos modelyje buvo atkartota realios mikroklimato tyrimų kameros bei šiluminio manekeno geometrija. Kraštinės sąlygos parinktos pagal eksperimento metu gautas parametrų vertes. Oro

tiekimu skirstytuvai buvo modeliuojami kaip keturių kryptių tolygios oro srovės pagal „Dėžės metodą“ [16]. Oro tiekimo grotelės ir oro ištraukimo skirstytuvai buvo sumodeliuoti kaip fiksuoto oro srauto angos. Radiatorius ir grindinis šildymas buvo sukurtas panaudojant stačiakampio gretasienio formas ir šilumos atributus. Teršalų šaltinis buvo modeliuojamas kaip maža izoterminė oro srovė su 80000 ppm benzeno koncentracija. Buvo padaryta prielaida, kad benzeno sklaida bus panaši į LOJ mišinio sklaidą eksperimento metu, nes benzeno ir teršalų išsiskiriančių iš klijų tankiai panašūs. Parinkta benzeno koncentracija užtikrino, kad koncentracijos visame kameros tūryje būtų panašios kaip ir eksperimento metu. Stebėjimo taškai panaudoti temperatūros, oro judėjimo greičio ir teršalų koncentracijoms stebėti modelyje, atitiko eksperimento metu naudotų matavimo prietaisų padėtis. Kameros geometrijos naudotos skaitiniame modelyje pavyzdys pateiktas 1.5 pav.



1.5 pav. Kameros geometrijos pavyzdys (izometrinis vaizdas (a) ir planas (b)): atvejis su radiatoriniu šildymu, oro tiekimo grotelėmis ir šiluminiu manekenu B padėtyje. „+“ rodo parametrų stebėjimo vietas

Kameros geometrijos padalinimui į skaičiuojamąsias celes panaudotas Dekarto tinklelis. Tinklelio tankis buvo padidintas prie oro tiekimo angų, šildomų grindų, radiatoriaus, vėsios sienos ir šiluminio manekeno. Aplink manekoną panaudotas lokalizuotas tinklelis. Kadangi tinklelio kokybė CFD modeliavime yra svarbus veiksnys, lemiantis rezultatus, atlikta tinklelio jautrumo analizė [14, 16, 17], kurios metu nustatyta, kad apytiksliai 150000 celių tinklelis yra tinkamas šiems tyrimams. Toliau didinant tinklelio tankį rezultatai kito nežymiai, o modeliavimas užtruko ilgiau. Buvo padaryta prielaida, kad rezultatai gauti su 100 000–200 000 celių tinkleliu bus nepriklausomi nuo tinklelio tankio.

1.3. Vėdinimo sistemos efektyvumo ir asmeninio poveikio rodikliai

Vėdinimo sistemos gebėjimui pašalinti teršalus ir oro kokybei įvertinti, buvo apskaičiuoti vėdinimo sistemos efektyvumo ir du asmeninio poveikio rodikliai.

Vėdinimo sistemos efektyvumui įvertinti pasirinktas teršalų pašalinimo efektyvumo rodiklis ε^c . Šis rodiklis parodo, kaip greitai teršalai pašalinami iš patalpos. Rodiklis naudojamas tais atvejais, kai žinoma tiksli informacija apie taršos šaltinį, pavyzdžiui, teršalų šaltinio vietą. Teršalų pašalinimo efektyvumo rodiklis apskaičiuojamas 1 formule [18]:

$$\varepsilon^c = \frac{C_e}{\langle C_{oc} \rangle}, \quad (1)$$

čia ε^c – teršalų pašalinimo efektyvumas, C_e – teršalų koncentracija ištraukiamame ore ir $\langle C_{oc} \rangle$ – vidutinė teršalų koncentracija darbo zonoje (šiuose tyrimuose 1,1 m aukščio erdvė virš grindų).

Oro kokybei kvėpavimo zonoje įvertinti pasirinktas asmeninio poveikio rodiklis ε^c_{exp} . Šis rodiklis parodo tikrąjį vėdinimo sistemos efektyvumą, kurį patiria žmogus vėdinamoje patalpoje. Asmeninio poveikio rodiklis apskaičiuojamas pagal 2 formulę [19]:

$$\varepsilon^c_{exp} = \frac{C_e}{C_{exp}}, \quad (2)$$

čia ε^c_{exp} – asmeninio poveikio rodiklis, C_e – teršalų koncentracija ištraukiamame ore ir C_{exp} – teršalų koncentracija kvėpavimo zonoje.

Jeigu teršalų koncentracijos darbo zonoje arba kvėpavimo zonoje bus lygios teršalų koncentracijoms ištraukiamame ore, vėdinimo sistemos efektyvumas (ε^c) bei asmeninio poveikio rodiklis (ε^c_{exp}) bus lygus 1,0. Kuo didesnės šių rodiklių vertės, tuo geriau veikia vėdinimo sistema tose vietose, kurioms šie rodikliai buvo apskaičiuoti. Šie rodikliai rodo oro kokybės lygį, kurį patiria žmogus ir vidutinį oro kokybės lygį darbo zonoje.

Oro kokybė kvėpavimo zonoje įvertinta ir papildomu asmeninio poveikio rodikliu ε^*_{exp} , kuris parodo oro kokybę kvėpavimo zonoje lyginant ją su oro kokybe darbo zonoje. Šis asmeninio poveikio rodiklis apskaičiuojamas pagal 3 formulę:

$$\varepsilon^*_{exp} = \frac{C_{exp}}{\langle C_{oc} \rangle}, \quad (3)$$

čia: ε^*_{exp} – asmeninio poveikio rodiklis, C_{exp} – teršalų koncentracija kvėpavimo zonoje ir $\langle C_{oc} \rangle$ – vidutinė teršalų koncentracija darbo zonoje.

Kuo mažesnės šio rodiklio vertės, priešingai nei asmeninio poveikio rodiklio ε^c_{exp} , tuo geresnė oro kokybė toje vietoje, kuriai buvo skaičiuojamas rodiklis.

1.4. Statistinė analizė

Išmatuotų LOJ koncentracijų apibendrinimui ir vizualizavimui panaudotas aprašomosios statistikos metodas.

Hipotezės apie LOJ koncentracijų pasiskirstymo normalumą patikrinimui buvo panaudotas Shapiro-Wilk'o testas [20]. Shapiro-Wilk'o testo nulinė hipotezė (H_0) – pasiskirstymas yra normalusis, alternatyvi hipotezė (H_A) – pasiskirstymas nėra normalusis. Pasirinktas reikšmingumo lygmuo 0,05. Shapiro-Wilk'o testas buvo atliktas panaudojant *STATISTICA 10.0* (StatSoft, JAV) programinę įrangą. Shapiro-Wilk'o testo nulinė hipotezė buvo atmesta visais atvejais, todėl buvo pasirinkta alternatyvioji hipotezė, kuri parodė, kad išmatuotų LOJ koncentracijų pasiskirstymas nėra normalusis ($p < 0,001$).

Kadangi išmatuotų LOJ koncentracijų pasiskirstymas nebuvo normalusis, skirtumams tarp LOJ koncentracijų, esant skirtingiems šildymo sistemų ir oro paskirstymo deriniams įvertinti, pasirinktas neparametrinės statistinės analizės metodas (Kruskal-Wallis testas). Kruskal-Wallis testo nulinė hipotezė (H_0) – tarp LOJ koncentracijų esant skirtingiems šildymo sistemų ir oro paskirstymo deriniams skirtumo nėra, alternatyvi hipotezė (H_A) – skirtumas yra. Pasirinktas reikšmingumo lygmuo 0,05. Kruskal-Wallis testas buvo atliktas panaudojant *STATISTICA 10.0* (StatSoft, JAV) programinę įrangą. Jeigu apskaičiuota p vertė buvo mažesnė nei pasirinktas reikšmingumo lygmuo, nulinė hipotezė buvo atmetama ir priimama alternatyvioji hipotezė.

1.5. Skaitinio modelio patikimumo įvertinimas

Jeigu tyrimuose naudojama skaitinės skysčių dinamikos programinė įranga, yra rekomenduojama įvertinti sukurtų modelių patikimumą palyginant iš modelio nustatytas parametrų vertes su vertėmis iš eksperimento [16]. Pagrindiniai parametrai, kurie yra lyginami vertinant skaitinio modelio patikimumą yra: oro judėjimo greitis, oro temperatūra ir teršalų koncentracija ore [21–24]. Šios disertacijos tyrimuose skaitinio modelio patikimumas buvo įvertintas lyginant oro judėjimo greičius tiekiamo oro srovėse [22], oro temperatūras ir vėdinimo sistemos efektyvumo ir asmeninio poveikio rodiklius.

Skirtumas tarp skaitinio modelio ir eksperimento buvo įvertintas apskaičiuojant procentinę santykinę paklaidą:

$$PE = \left| \frac{(x_e - x_{cfd})}{x_e} \right| \times 100 \%, \quad (4)$$

čia PE – procentinė santykinė paklaida, x_e – eksperimento metu išmatuoto dydžio vertė ir x_{cfd} – dydžio vertė nustatyta iš skaitinio modelio.

2. REZULTATAI

2.1. Eksperimentiniai ir skaitiniai teršalų sklaidos rezultatai

LOJ koncentracijos išmatuotos ištraukiamame ore (C_e), darbo zonoje 1,1 m aukštyje virš grindų (C_{i1} , C_{i2}) ir šiluminio manekeno kvėpavimo zonoje (C_{exp}) buvo konvertuotos į santykinės koncentracijas pagal didžiausią išmatuotą koncentraciją, per dvidešimt eksperimento minučių. LOJ koncentracijos darbo zonoje buvo matuojamos dviejose vietose, tačiau rezultatų skiltyje pateikiama kaip vidutinė koncentracija darbo zonoje $C_{i,1.1}$. Kiekvieno eksperimento metu išmatuotų koncentracijų verčių medianos, kvartilų intervalai, mažiausios bei didžiausios vertės pateikiamos 2.1b–2.6b paveiksluose. CFD modeliavimo rezultatai pateikiami 2.1a–2.6a paveiksluose. 2.1a–2.6a pav. pateikiami CFD modelių pjūviai 0,1 m aukštyje virš grindų ir per šildomą manekoną.

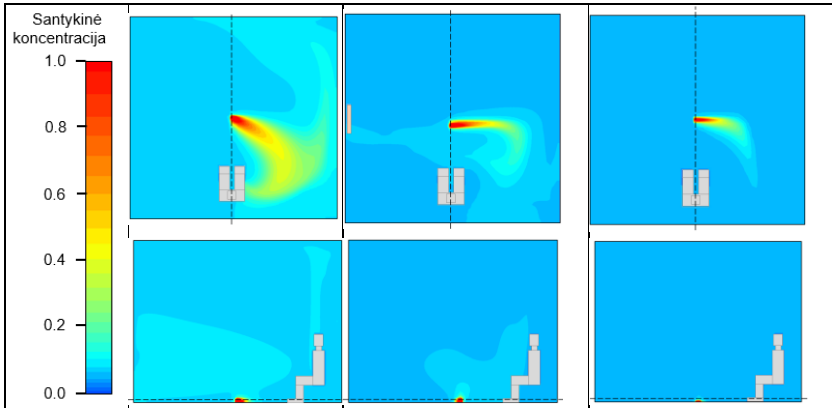
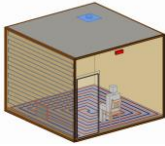
Kiekviename iš 2.1–2.6 pav. pateikiami rezultatai iš eksperimentų, atliktų su skirtingomis šildymo sistemomis. 2.1, 2.3 ir 2.5 pav. pateikiami rezultatai, kai oras tiekiamas pro sienines groteles, o 2.2, 2.4 ir 2.6 pav. – kai oras tiekiamas pro lubinius skirstytuvus. Rezultatai iš eksperimentų su šildomo manekeno padėtimis A, B, C pateikiami paveikslėlių 2.1 ir 2.2, 2.3 ir 2.4, 2.5 ir 2.6 porose.

Vertikalus oro temperatūros gradiento vertės, apskaičiuotos pagal eksperimento metu išmatuotas temperatūras, pateikiamos 2.1 lentelės ketvirtame stulpelyje, pagal CFD modeliavimo rezultatus – 2.2 lent. ketvirtame stulpelyje. Temperatūros pasiskirstymo vizualizacijos iš CFD modelių pateikiamos 2.7–2.12 paveiksluose.

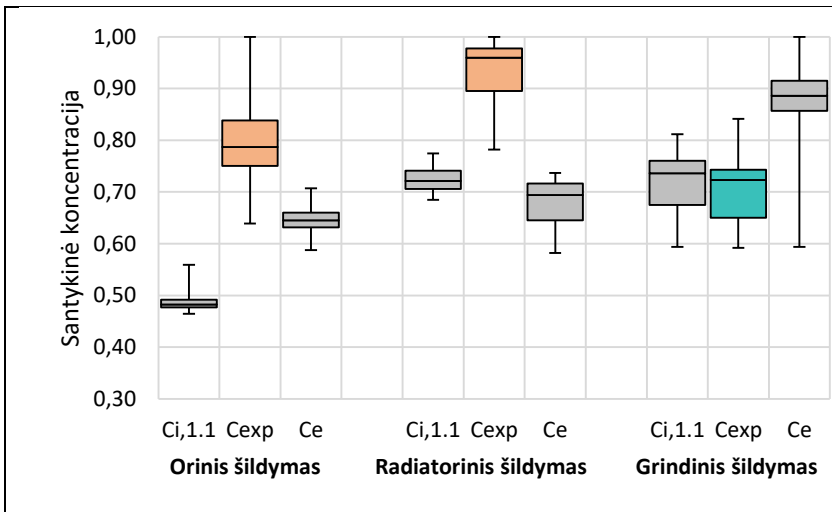
Vėdinimo efektyvumo rodiklis ε^c ir asmeninio poveikio rodikliai ε^c_{exp} , ε^*_{exp} , apskaičiuoti pagal eksperimento metu gautas LOJ vertes, pateikti 2.1 lentelėje, pagal CFD modeliavimo rezultatus – 2.2 lentelėje. Rodikliai apskaičiuoti naudojant vidutines santykinų koncentracijų (C_e , C_{exp} ir $C_{i,1.1}$) vertes iš 20 minučių eksperimento.

Vidutinis oro judėjimo greitis išmatuotas kameros viduryje 1,1 m aukštyje virš grindų buvo žemesnis nei rekomenduojama pagal ISO 7730 [25]. Oro judėjimo greitis kito nuo 0,02 iki 0,06 m/s visų eksperimentų metu.

Vertikalus oro temperatūros gradientas, vertinant eksperimentų metu išmatuotas temperatūros vertes, orinio šildymo atveju buvo apie 0,9 °C/m, radiatorinio šildymo apie 0,7 °C/m ir grindinio šildymo atveju apie 0,1 °C/m. Rezultatai gauti iš CFD modelių buvo panašūs. Vertikalus oro temperatūros gradientas pagal CFD modeliavimo rezultatus metu apskaičiuotas temperatūros vertės buvo 0,8 °C/m, 0,6 °C/m ir 0,2 °C/m. Vertikalus temperatūros gradientas nežymiai skyrėsi eksperimentuose, atliktuose su skirtingomis oro paskirstymo schemomis ir buvo mažesnis, apytiksliai 0,1 °C/m, kai orui tiekti buvo naudojami lubiniai skirstytuvai.

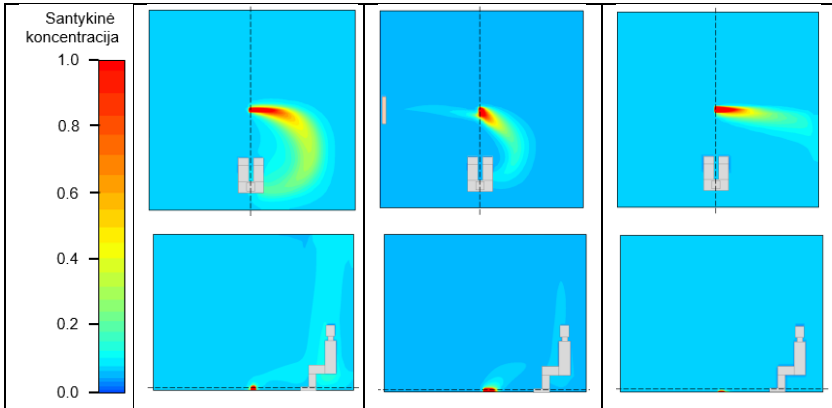
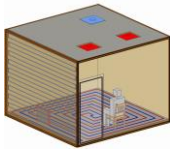


(a)

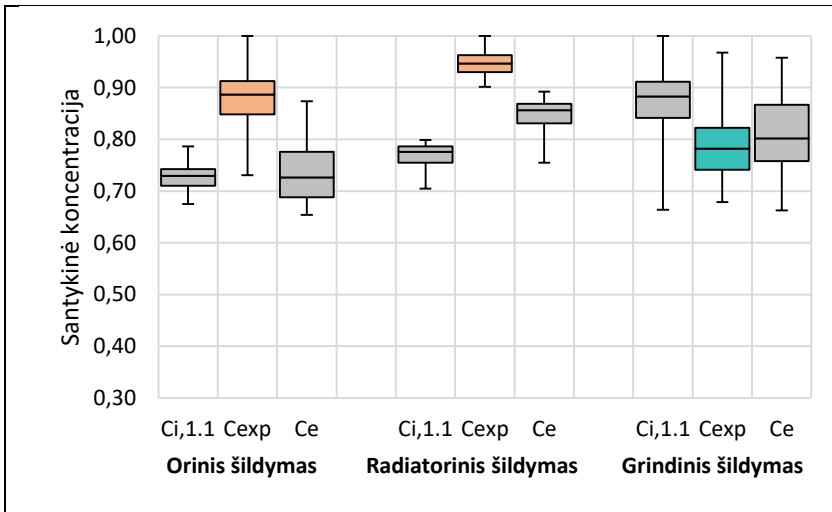


(b)

2.1 pav. Santykinės teršalų koncentracijos, kai šildomo manekeno padėtis A ir oras paskirstomas pro sienines groteles patalpos palūbėje: (a) skaitinio modeliavimo rezultatai (viršuje – CFD modelio pjūvis 0,1 m aukštyje nuo grindų, apačioje – pjūvis pro manekoną); (b) eksperimento rezultatai ($C_{i,1.1}$ – santykinė teršalų koncentracija darbo zonoje; C_{exp} – santykinė teršalų koncentracija kvėpavimo zonoje, C_e – santykinė teršalų koncentracija ištraukiamame ore)

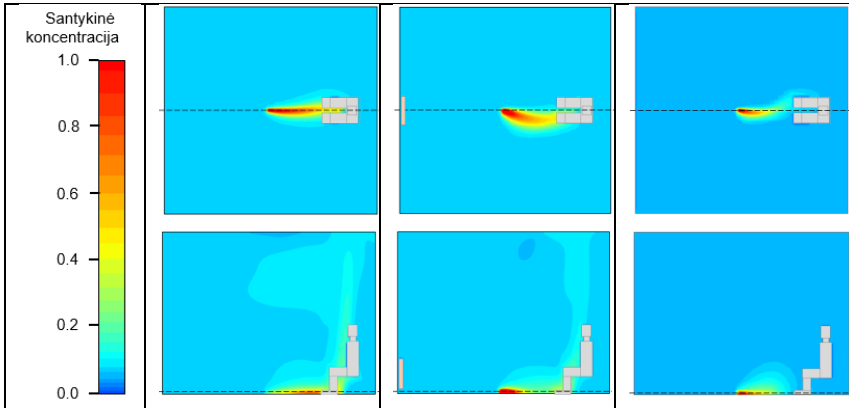
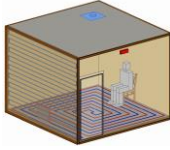


(a)

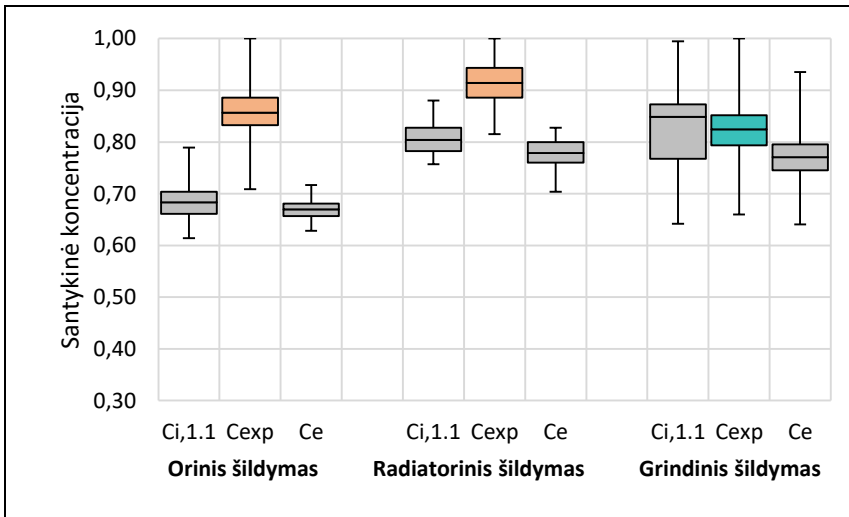


(b)

2.2 pav. Santykinės teršalų koncentracijos, kai šildomo manekeno padėtis A ir oras paskirstomas pro keturių krypčių skirstytuvus lubose: (a) skaitinio modeliavimo rezultatai (viršuje – CFD modelio pjūvis 0,1 m aukštyje nuo grindų, apačioje – pjūvis pro manekoną); (b) eksperimento rezultatai ($C_{i,1}$ – santykinė teršalų koncentracija darbo zonoje; C_{exp} – santykinė teršalų koncentracija kvėpavimo zonoje, C_e – santykinė teršalų koncentracija ištraukiamame ore)

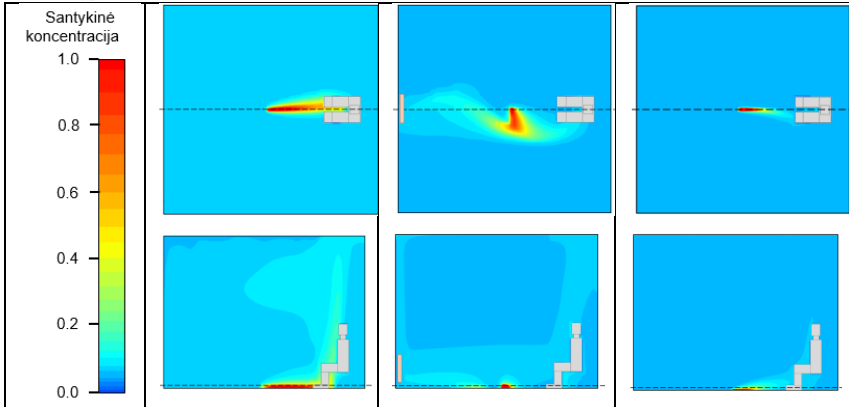
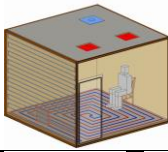


(a)

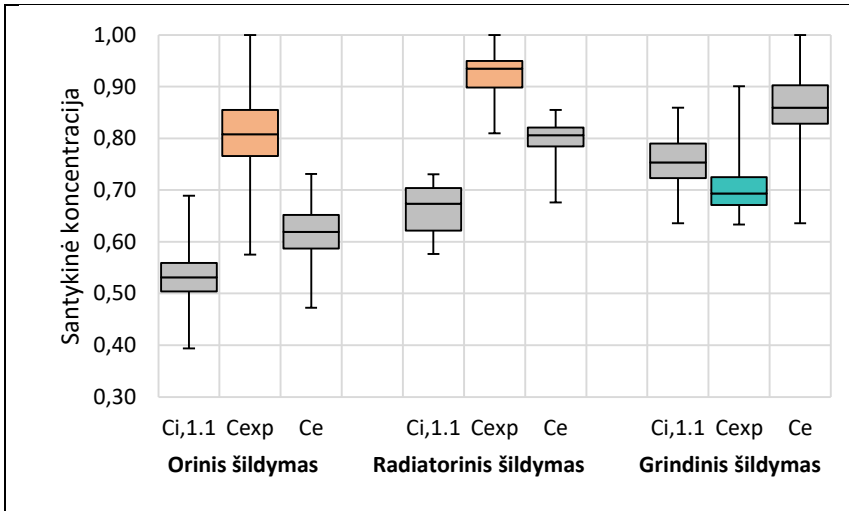


(b)

2.3 pav. Santykinės teršalų koncentracijos, kai šildomo manekeno padėtis B ir oras paskirstomas pro sienines groteles patalpos palubėje: (a) skaitinio modeliavimo rezultatai (viršuje – CFD modelio pjūvis 0,1 m aukštyje nuo grindų, apačioje – pjūvis pro manekoną); (b) eksperimento rezultatai ($C_{i,1}$ – santykinė teršalų koncentracija darbo zonoje; C_{exp} – santykinė teršalų koncentracija kvėpavimo zonoje, C_e – santykinė teršalų koncentracija ištraukiamame ore)

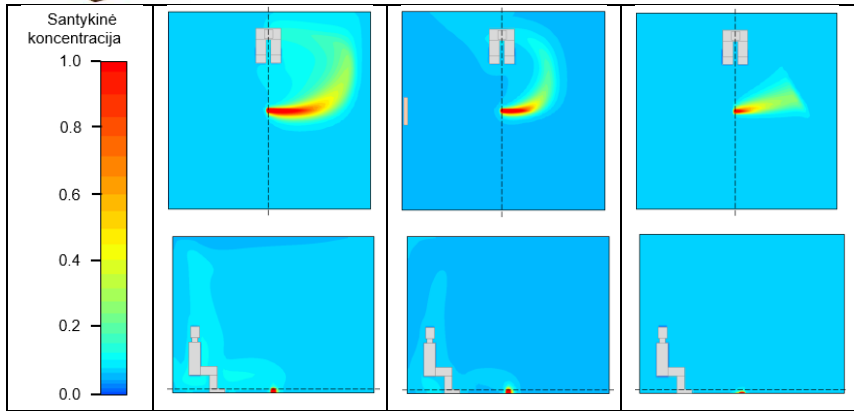
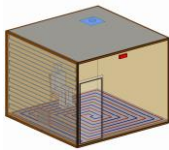


(a)

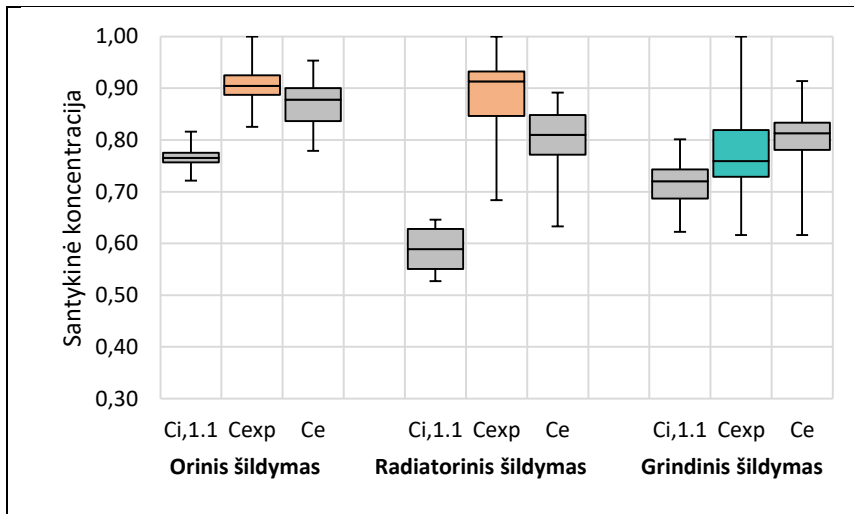


(b)

2.4 pav. Santykinės teršalų koncentracijos, kai šildomo manekeno padėtis B ir oras paskirstomas pro keturių kryptių skirstytuvus lubose: (a) skaitinio modeliavimo rezultatai (viršuje – CFD modelio pjūvis 0,1 m aukštyje nuo grindų, apačioje – pjūvis pro manekoną); (b) eksperimento rezultatai ($C_{i,1}$ – santykinė teršalų koncentracija darbo zonoje; C_{exp} – santykinė teršalų koncentracija kvėpavimo zonoje, C_e – santykinė teršalų koncentracija ištraukiamame ore)

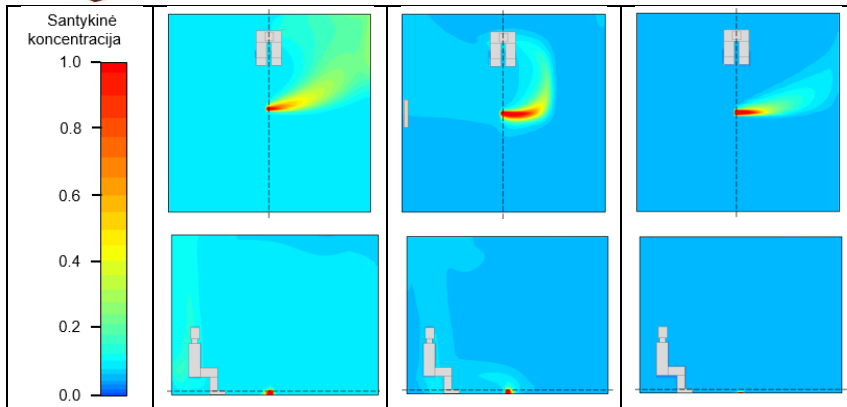
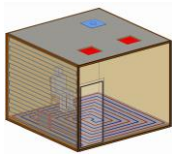


(a)

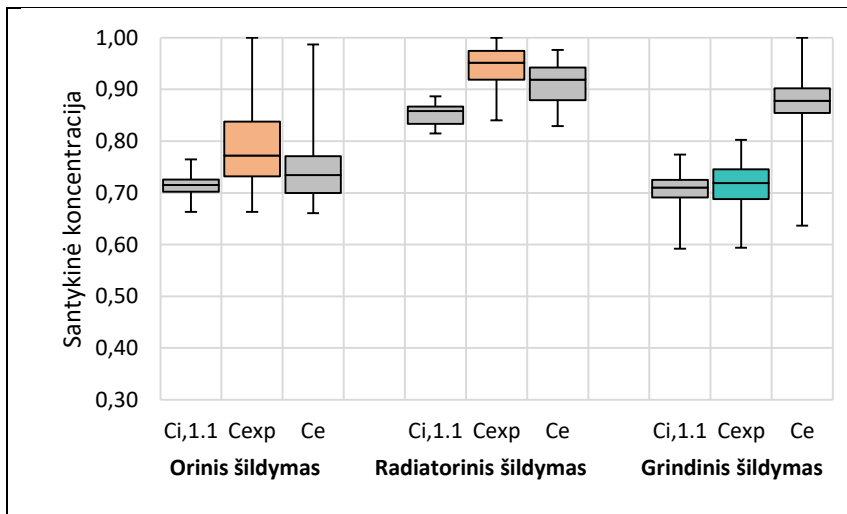


(b)

2.5 pav. Santykinės teršalų koncentracijos, kai šildomo manekeno padėtis C ir oras paskirstomas pro sienines groteles patalpos palubėje: (a) skaitinio modeliavimo rezultatai (viršuje – CFD modelio pjūvis 0,1 m aukštyje nuo grindų, apačioje – pjūvis pro manekoną); (b) eksperimento rezultatai ($C_{i,1.1}$ – santykinė teršalų koncentracija darbo zonoje; C_{exp} – santykinė teršalų koncentracija kvėpavimo zonoje, C_e – santykinė teršalų koncentracija ištraukiamame ore)

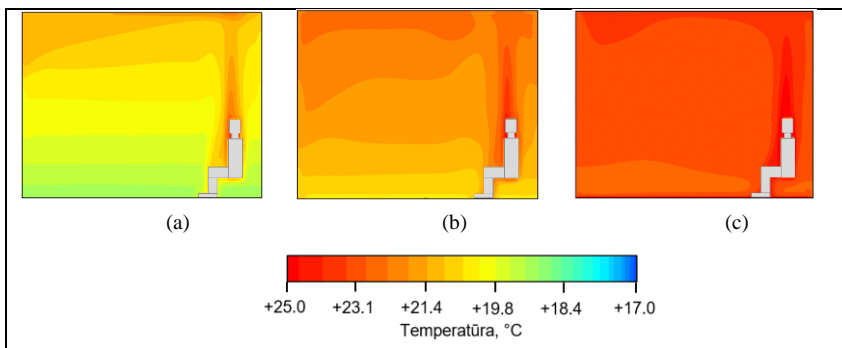


(a)

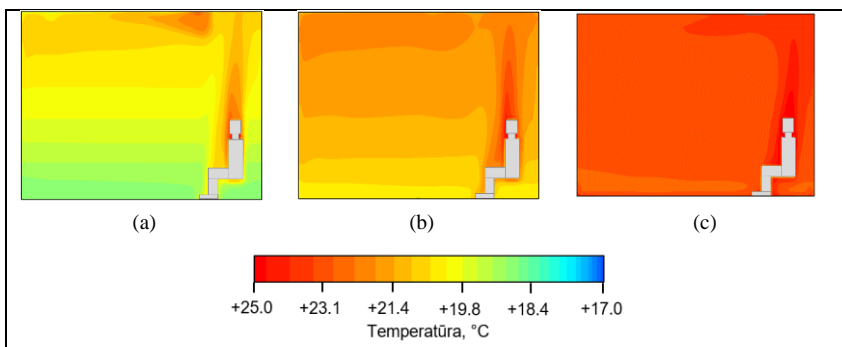


(b)

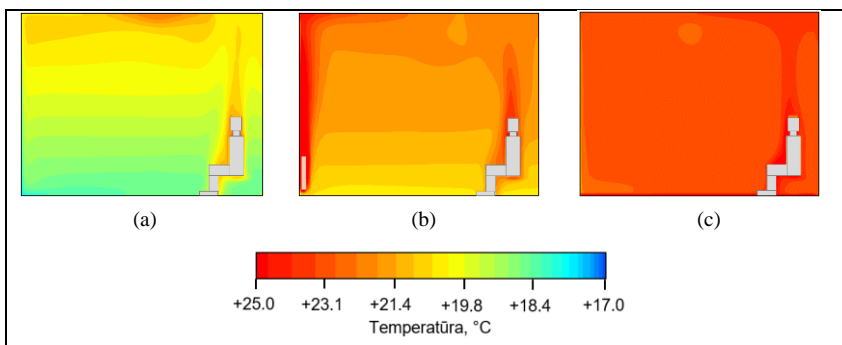
2.6 pav. Santykinės teršalų koncentracijos, kai šildomo manekeno padėtis C ir oras paskirstomas pro keturių krypčių skirstytuvus lubose: (a) skaitinio modeliavimo rezultatai (viršuje – CFD modelio pjūvis 0,1 m aukštyje nuo grindų, apačioje – pjūvis pro manekoną); (b) eksperimento rezultatai ($C_{i,1}$ – santykinė teršalų koncentracija darbo zonoje; C_{exp} – santykinė teršalų koncentracija kvėpavimo zonoje, C_e – santykinė teršalų koncentracija ištraukiamame ore)



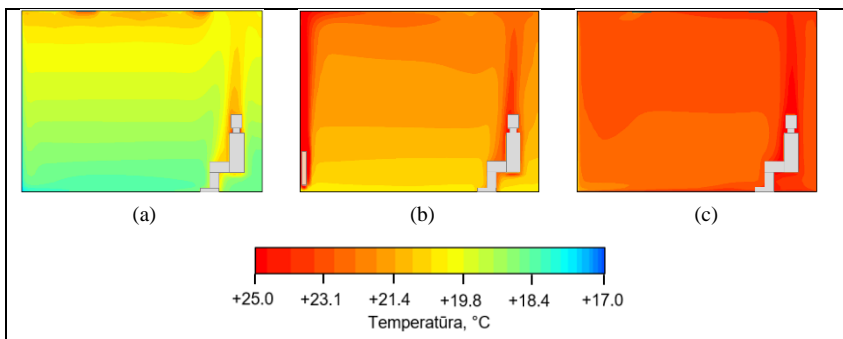
2.7 pav. Temperatūros pasiskirstymas, kai šildomo manekeno padėtis A ir oras paskirstomas pro sienines groteles patalpos palūbėje: (a) orinis šildymas; (b) radiatorinis šildymas; (c) grindinis šildymas



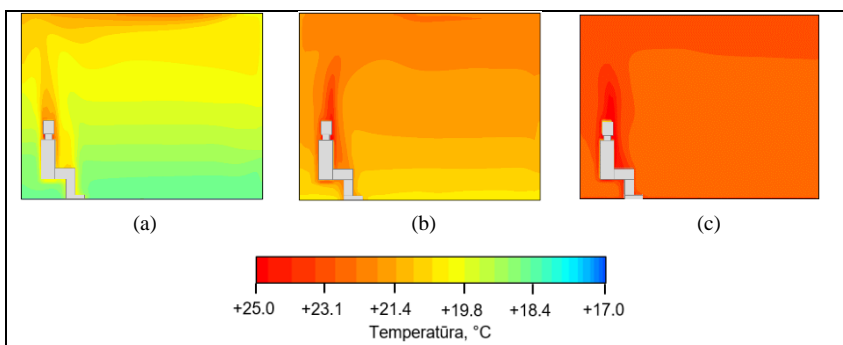
2.8 pav. Temperatūros pasiskirstymas, kai šildomo manekeno padėtis A ir oras paskirstomas pro keturių krypčių skirstytuvus lubose: (a) orinis šildymas; (b) radiatorinis šildymas; (c) grindinis šildymas



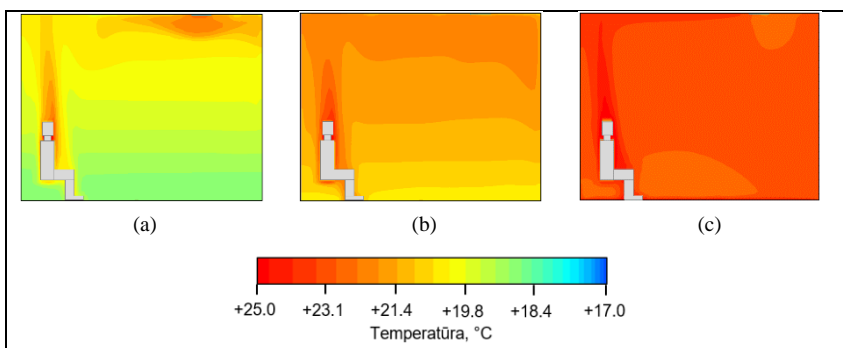
2.9 pav. Temperatūros pasiskirstymas, kai šildomo manekeno padėtis B ir oras paskirstomas pro sienines groteles patalpos palūbėje: (a) orinis šildymas; (b) radiatorinis šildymas; (c) grindinis šildymas



2.10 pav. Temperatūros pasiskirstymas, kai šildomo manekeno padėtis B ir oras paskirstomas pro keturių krypčių skirstytuvus lubose: (a) orinis šildymas; (b) radiatorinis šildymas; (c) grindinis šildymas



2.11 pav. Temperatūros pasiskirstymas, kai šildomo manekeno padėtis C ir oras paskirstomas pro sienines groteles patalpos palubėje: (a) orinis šildymas; (b) radiatorinis šildymas; (c) grindinis šildymas



2.12 pav. Temperatūros pasiskirstymas, kai šildomo manekeno padėtis C ir oras paskirstomas pro keturių krypčių skirstytuvus lubose: (a) orinis šildymas; (b) radiatorinis šildymas; (c) grindinis šildymas

2.1 lentelė. Teršalų pašalinimo efektyvumo ir asmeninio poveikio rodikliai tyrimų kameroje eksperimento metu

Ekspri- mento numeris	Oro paskirstymo schema ^{a)}	Šiluminio manekeno padėtis	Šildymo sistemos tipas ^{b)}	Vertikalus temperatūros gradientas $^{\circ}C/m$	Vėdinimo sistemos efektyvumas ϵ^c	Asmeninio poveikio rodiklis $(C_c / C_{exp}) \epsilon_{exp}$	Asmeninio poveikio rodiklis $(C_{exp} / C_i) \epsilon_{exp}$
<i>I</i>	2	3	4	5	6	7	8
1			AH	1,07	1,32	0,81	1,63
2	GR	A	RH	0,72	0,94	0,73	1,29
3			FH	0,06	1,20	1,22	0,98
4			AH	0,94	0,98	0,78	1,26
5	GR	B	RH	0,75	0,96	0,85	1,13
6			FH	0,06	0,94	0,93	1,01
7			AH	0,91	1,13	0,96	1,18
8	GR	C	RH	0,81	1,35	0,89	1,51
9			FH	0,12	1,12	1,04	1,08
10			AH	0,98	1,01	0,83	1,21
11	M4	A	RH	0,52	1,10	0,87	1,23
12			FH	0,04	0,94	1,03	0,91
13			AH	0,75	1,17	0,77	1,52
14	M4	B	RH	0,81	1,20	0,86	1,39
15			FH	0,04	1,14	1,22	0,93
16			AH	0,94	1,05	0,95	1,10
17	M4	C	RH	0,63	1,07	0,96	1,11
18			FH	0,08	1,25	1,23	1,01

a) GR – sieninės grotelės palubėje; M4 – keturių krypčių lubiniai skirstytuvai;

b) AH – orinis šildymas; RH – grindinis šildymas; FH – šildymas radiatoriumi.

2.2 lentelė. Teršalų pašalinimo efektyvumo ir asmeninio poveikio rodikliai apskaičiuoti pagal CFD modeliavimo rezultatus

Eksperi- mento numeris	Oro paskirstymo schema ^{a)}	Šiluminio manekeno padėtis	Šildymo sistemos tipas ^{b)}	Vertikalus temperatūros gradientas °C/ <i>m</i>	Vėdinimo sistemos efektyvumas ξ^c	Asmeninio poveikio rodiklis ($C_{e,exp}/$ C_e) ^{d,exp}	Asmeninio poveikio rodiklis ($C_{exp}/$ C_e) ^{d,exp}
<i>I</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
1			AH	0,76	0,88	0,93	0,94
2	GR	A	RH	0,65	0,98	0,97	1,01
3			FH	0,11	0,97	0,96	1,01
4			AH	0,91	0,95	0,58	1,63
5	GR	B	RH	0,62	0,97	0,59	1,63
6			FH	0,13	1,09	1,06	1,02
7			AH	0,87	0,86	0,74	1,16
8	GR	C	RH	0,64	1,01	0,86	1,18
9			FH	0,14	0,86	0,91	0,95
10			AH	0,79	0,96	0,68	1,41
11	M4	A	RH	0,61	1,01	0,88	1,15
12			FH	0,18	1,00	1,00	1,00
13			AH	0,86	1,01	0,57	1,75
14	M4	B	RH	0,65	1,02	0,90	1,13
15			FH	0,22	1,02	0,86	1,19
16			AH	0,75	0,93	0,85	1,09
17	M4	C	RH	0,65	1,13	0,84	1,35
18			FH	0,21	1,02	1,01	1,00

a) GR – sieninės grotelės palubėje; M4 – keturių krypčių lubiniai skirstytuvai;

b) AH – orinis šildymas; FH – grindinis šildymas; RH – šildymas radiatoriumi.

Didžiausios santykinės LOJ koncentracijos ištraukiamame ore (C_e) buvo grindinio šildymo atvejais, žemiausios – orinio šildymo atvejais. Išimty matomos 2.2, 2.3 ir 2.6 paveiksluose. Šiais atvejais didžiausios santykinės LOJ koncentracijos buvo esant radiatorinio šildymo sistemai. Vidutinė santykinė LOJ koncentracija darbo zonoje ($C_{i,1,1}$) orinio, radiatorinio ir grindinio šildymo atvejais buvo atitinkamai 0,65; 0,73 ir 0,76.

Žemesnės arba nežymiai aukštesnės santykinės LOJ koncentracijos darbo zonoje ($C_{i,1,1}$) nei ištraukiamame ore (C_e) lėmė tai, kad vėdinimo efektyvumo rodiklis (ε^c) buvo apytiksliai lygus 1,0. Tai rodo, kad vėdinimo sistema visais atvejais efektyviai šalino LOJ iš kameros. Lyginant duomenis su skirtingomis šildymo sistemomis, didelių skirtumų tarp ε^c nebuvo. Vėdinimo efektyvumo rodiklio vertės apskaičiuotas pagal CFD modeliavimo rezultatus buvo panašios į eksperimentinius rezultatus.

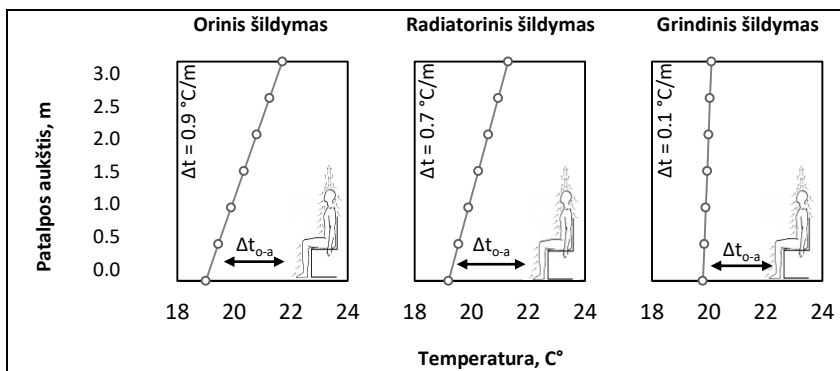
Mažiausios santykinės LOJ koncentracijos kvėpavimo zonoje (C_{exp}) išmatuotos visais atvejais, kai buvo naudojamas grindinis šildymas, vidutinė santykinė LOJ koncentracija 0,75. Radiatorinio šildymo eksperimento metu santykinės LOJ koncentracijos buvo didesnės 24 %, o orinio šildymo – 12 %.

Aukščiausios asmeninio poveikio rodiklio ε_{exp}^c vertės apskaičiuotos atvejams su grindinio šildymo sistema. ε_{exp}^c šiais atvejais buvo apie 1,11. Aukštos šio rodiklio vertės rodo, kad oro kokybė kvėpavimo zonoje yra geresnė. Aukštos šio rodiklio vertės gaunamos, kai kvėpavimo zonoje yra žemos LOJ koncentracijos, o ištraukiamame ore yra aukštos LOJ koncentracijos. Vidutinės asmeninio poveikio rodiklio vertės orinio ir radiatorinio šildymo atvejais buvo 0,85 ir 0,86. ε_{exp}^c rodiklis šiais atvejais buvo apytiksliai 30 % mažesnis nei grindinio šildymo atveju. Asmeninio poveikio rodiklio vertės apskaičiuotos pagal CFD modeliavimo rezultatus buvo panašios, aukščiausios rodiklio vertės buvo grindinio šildymo metu.

Žemiausios asmeninio poveikio rodiklio ε_{exp}^* vertės apskaičiuotos su grindinio šildymo sistema, ε_{exp}^* vidutiniškai lygios 0,99. Apie 30 % aukštesnės šio rodiklio vertės apskaičiuotos su orinio ir radiatorinio šildymo sistemomis. Šiems atvejams rodiklio vertės buvo 1,32 ir 1,28. Žemesnės šio rodiklio vertės rodo, kad oro kokybė kvėpavimo zonoje yra geresnė lyginant su darbo zona. Panaši tendencija matyti ir iš CFD modeliavimo rezultatų.

Apibendrinat visus tirtus atvejus tiek eksperimentiškai, tiek panaudojant CFD modeliavimą, galima teigti, kad santykinės LOJ koncentracijos buvo didesnės kvėpavimo zonoje negu darbo zonoje, išskyrus atvejus su grindinio šildymo sistema. Eksperimentuose su grindinio šildymo sistema santykinės LOJ koncentracijos kvėpavimo zonoje buvo žemesnės ir kartais sutapo su santykinėmis koncentracijoms darbo zonoje. Tokie rezultatai gali būti paaiškinami lyginant temperatūrų skirtumus tarp manekeno ir aplinkos oro (Δt_{o-a}), nes šis temperatūrų skirtumas veikia konvekcinių manekeno srautą [26–28]. Didesnės Δt_{o-a} vertės, lemia intensyvesnius šilumos mainus tarp manekeno ir

aplankos bei didesnius konvekcinio oro srauto greičius. 2.13 pav. pateikiami vertikalūs temperatūros gradientai patalpose su sumaišomuoju vėdinimu ir skirtingomis šildymo sistemomis apskaičiuoti pagal eksperimentų rezultatus. Matoma, kad grindų lygyje Δt_{o-a} skiriasi esant skirtingoms šildymo sistemoms. Jeigu manekeno paviršiaus temperatūra yra $+34\text{ }^{\circ}\text{C}$, orinio ir radiatorinio šildymo atveju Δt_{o-a} apytiksliai lygus $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, grindinio šildymo atveju $14\text{ }^{\circ}\text{C}$. Didesnis Δt_{o-a} grindų lygyje lemia intensyvesnį teršalų įtraukimą į konvekcinių manekeno srautą. Kadangi konvekcinis srautas turi savybę pakelti teršalus į kvėpavimo zoną [28], didesnės teršalų koncentracijos įtrauktos į konvekcinį srautą lemia žemesnę oro kokybę kvėpavimo zonoje.



2.13 pav. Sumaišomojo vėdinimo ir šildymo sistemų derinio vertikalūs temperatūrinis gradientas. Δt – vertikalūs temperatūrinis gradientas, $^{\circ}\text{C}/\text{m}$, Δt_{o-a} – skirtumas tarp aplinkos oro manekeno paviršiaus temperatūros, $^{\circ}\text{C}$

Eksperimentų ir CFD modeliavimo rezultatai rodo, kad oro paskirstymo būdas teršalų sklaidą veikia mažiau nei šildymo būdas. Nepaisant to, kad buvo tirti du oro paskirstymo būdai (oro tiekiamas pro sienines grotelės ar lubinius skirstytuvus), oro pasiskirstymas kameroje buvo panašus, nes abu paskirstymo būdai užtikrina sumaišomąjį vėdinimą. Oro tiekimo pro grotelės atvejais, santykinės koncentracijos buvo nežymiai mažesnės, nes šiuo atveju užtikrinami didesni oro judėjimo greičiai darbo zonoje. Be to, analizuota ir manekeno pozicijos įtaka teršalų sklaidai. Apibendrinant oro paskirstymo schemas ir manekeno pozicijos įtaką, esminių skirtumų tarp santykinų koncentracijų nenustatyta. Apskaičiuota, kad skirtumai yra apie 10 %. Tikėtina, kad esant kitokiems skirstytuvams ar grotelėms bei jų vietai, oro pasiskirstymas ir teršalų sklaida bus panašūs.

Analizuojant CFD modeliavimo rezultatus nustatyta vėsios sienos ir radiatoriaus (šilto paviršiaus) įtaka (2.1a–2.6a pav.). Šalti paviršiai sukuria žemyn nukreiptą šalto oro srautą [2]. Vėsios sienos poveikis matomas visuose

CFD modeliavimo rezultatuose. Teršalai iš patalpos vidurio yra transportuojami į priešingą vėsiai sienai pusę. Tačiau visais atvejais, manekeno konvekcinis srautas buvo pakankamai stiprus, kad įtrauktų teršalus ir pakeltų juos į kvėpavimo zoną, nepriklausomai nuo padėties. CFD atskleidė ir radiatoriaus, kaip šilto paviršiaus, poveikį. Pastatuose, šildomuose radiatorinio šildymo sistemomis (ypač didesnės šildymo galios), radiatoriai gali būtų pagrindinis konvekcinių srautų šaltinis, kurie gali traukti teršalus iš grindų lygio ir paskirstyti po visą patalpos tūrį.

2.2. Statistinės analizės rezultatai

Aprašomosios statistikos rezultatai (santykinų LOJ koncentracijų vidurkis, mažiausios ir didžiausios LOJ koncentracijų vertės) pateikti stačiakampėse diagramose 2.1–2.6 paveiksluose.

Statistinės analizės metu, panaudojant Kruskal-Wallis testą suranguotoms santykinų LOJ koncentracijų vertėms, buvo tikimasi nustatyti ar LOJ koncentracijos kvėpavimo zonoje (C_{exp}) statistiškai reikšmingai skiriasi esant skirtingiems šildymo sistemų ir oro paskirstymo deriniams. Nustatyta, kad santykinės LOJ koncentracijos kvėpavimo zonoje (C_{exp}), esant skirtingiems šildymo sistemų ir oro paskirstymo deriniams, reikšmingai skiriasi ($p > 0,05$). Keliuose atvejuose buvo nustatytos statistiškai panašios LOJ koncentracijos ištraukiamame ore (C_e) ir darbo zonoje ($C_{i,1.1}$) ($p < 0,05$).

2.3. CFD modelių patikimumo įvertinimas

Vidutinė santykinė paklaida tarp eksperimento metu išmatuotų ir iš CFD modelių nustatytų oro judėjimo greičių, tiekiant orą pro sienines groteles, buvo 4,24 %, tiekiant orą pro lubinius skirstytuvus – 25,13 %. Tiesinė regresinė analizė parodė stiprų ryšį tarp eksperimento metu išmatuotų ir iš CFD modelio nustatytų oro judėjimo greičių ($R^2 > 0.8$). Vidutinė santykinė paklaida tarp eksperimento metu išmatuotų ir iš CFD modelių nustatytų oro temperatūros verčių buvo 6 %. Vidutinė santykinė paklaida, lyginant vėdinimo sistemos efektyvumo ir asmeninio poveikio rodiklius, apskaičiuotus pagal eksperimento metu išmatuotas ir iš CFD modelių nustatytas teršalų koncentracijas, buvo < 30 %.

2.4. Veiksnių turinčių įtaką oro kokybei žmogaus kvėpavimo zonoje analizės rezultatai

Kadangi CFD modelių patikimumas buvo priimtinas (vidutinė santykinė paklaida tarp eksperimento ir skaitinio modelio buvo < 30 %) [29], CFD modelis buvo panaudotas veiksniams, turintiems įtaką oro kokybei žmogaus kvėpavimo zonoje, analizuoti. Panaudojant CFD modelius, buvo įvertinta oro kaitos ir

kameros tūrio bei atstumo tarp taršos šaltinio ir šiluminio manekeno įtaka oro kokybei žmogaus kvėpavimo zonoje.

Nustatyta, kad padidinus oro kaitą arba kameros aukštį (t. y. tūrį) oro kokybė kvėpavimo zonoje kinta nežymiai, išskyrus atvejus su orinio šildymo sistema. Didinant oro kaitą, oro kokybė kvėpavimo zonoje pagerėja, kai orinio šildymo sistemoje oras tiekiamas pro sienines groteles. Didinant kameros aukštį, oro kokybė kvėpavimo zonoje mažėja, teršalai iš grindų lygyje esančio taršos šaltinio intensyviau pasiurbiami į manekeno konvekcinių srautą. Proporcingai didinant kameros matmenis (t. y. keičiant tūrį ir atstumą tarp teršalų ir šiluminio manekeno), oro kokybė kvėpavimo zonoje gerėja, išskyrus atvejį, kai orinio šildymo sistemoje oro tiekimui naudojami lubiniai skirstytuvai.

3. IŠVADOS

1. Eksperimentų metu nustatyta, kad teršalų, išsiskiriančių grindų lygyje, įtraukimas į žmogaus konvekcinių srautą priklauso nuo šildymo sistemų ir oro paskirstymo derinio. Esant 2 h^{-1} oro kaitai, šis reiškinys yra reikšmingai silpnesnis veikiant grindinio šildymo sistemai ($P < 0,05$). Santykinė teršalų koncentracija kvėpavimo zonoje, veikiant grindinio šildymo sistemai, yra 12 % ir 24 % mažesnė, nei veikiant orinio ir radiatorinio šildymo sistemoms.

2. CFD modeliavimo rezultatai rodo, kad teršalų judėjimo kryptis yra priešinga vėsią sienai. Nepaisant šios tendencijos, teršalai sklinda šildomo manekeno link, nepriklausomai nuo jo padėties.

3. Su nustatytu CFD modelių patikimumu (vidutinė santykinė paklaida < 30 %), galima teigti, kad reikšmingos įtakos oro kaitos padidėjimas teršalų koncentracijoms kvėpavimo zonoje neturi. Tačiau didesnis kameros tūris ir atstumas tarp taršos šaltinio ir šiluminio manekeno sumažina teršalų įtraukimą į konvekcinių srautą.

4. Patalpose, kurioms būdingas sėdimas darbas ir yra grindų lygyje išsiskiriančių oro teršalų, renkantis mikroklimato palaikymo sistemas didesnis dėmesys turėtų būti kreipiamas į šildymo sistemos tipą, nes oro paskirstymas turi mažesnę įtaką teršalams transportuoti į kvėpavimo zoną.

4. TOLIMESNI TYRIMAI

Disertacijos tyrimai orientuoti į sumaišomojo vėdinimo ir įvairių šildymo sistemų derinių įtaką teršalų, išsiskiriančių grindų lygyje, sklaidą. Išstumiamojo (terminio) vėdinimo sistemos nebuvo tiriamos. Šios sistemos nėra tinkamos orui šildyti. Išstumiamojo vėdinimo sistemų teršalų šalinimo efektyvumas yra didesnis, kai patalpose dominuoja šilti teršalų šaltiniai, pavyzdžiui, žmonės arba

technologiniai įrengimai išskiriantys didelius šilumos kiekius [27]. Izoterminių teršalų, išsiskiriančių grindų lygyje, sklaida, esant išstumiamojo vėdinimo ir radiatorinio ar grindinio šildymo deriniams, galėtų būti tiriama ateityje.

Verta paminėti, kad disertacijos tyrimuose kameros vėdinimą užtikrino tiek oro tiekimo, tiek oro ištraukimo skirstytuvai. Toks oro paskirstymo įrenginių išdėstymas būdingesnis visuomeninių pastatų patalpoms. Be to, tirta oro kaita buvo 2 h^{-1} . Nors ir buvo nustatyta, kad oro kaita turi nedidelę įtaką teršalų sklaidai [30], tokia oro kaita yra būdingesnė visuomeniniams pastatams. Gyvenamuosiuose pastatuose vėdinimo sistemos projektuojamos užtikrinant mažesnę oro kaitą ir oro tiekimą į švaresnes patalpas (miegamuosius ir poilsio patalpas), o ištraukimą iš užterštų patalpų (sanitarinių mazgų, virtuvių, sandėliukų). Tolimesniuose tyrimuose galėtų būti analizuojama disertacijos rezultatų pritaikomumas gyvenamųjų pastatų mikroklimatui.

Taip pat tyrimus būtų galima tęsti vertinant baldų įtaką teršalų sklaidai, nes baldai turi įtaką oro srautams patalpose [31] ir tai yra papildomas lakiųjų organinių junginių šaltinis [32].

LITERATŪRA

1. HEISELBERG, P. Draught risk from cold vertical surfaces. *Building and Environment* [online]. 1994, 29(3): 297-301 [viewed 2018-01-03]. Available from: [doi.org/10.1016/0360-1323\(94\)90026-4](https://doi.org/10.1016/0360-1323(94)90026-4)
2. JURELIONIS, A., and E. ISEVIČIUS. CFD predictions of indoor air movement induced by cold window surfaces. *Journal of civil engineering and management* [online]. 2008, 14(1): 29–38 [viewed 2018-01-03]. Available from: [doi:10.3846/1392-3730.2008.14.29-38](https://doi.org/10.3846/1392-3730.2008.14.29-38)
3. EC No 1907/2006. *TS34B – TOTALSEAL 34 B safety data sheet, Version 1*. Bezons, France: Le Joint Francais, 2009.
4. BROHUS, H. and P. V. NIELSEN. Personal exposure in displacement ventilated rooms. *Indoor Air* [online]. 1996, 6: 157–67 [viewed 2018-01-03]. Available from: [doi:10.1111/j.1600-0668.1996.t01-1-00003.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1996.t01-1-00003.x)
5. TOPP, C., et al. Influence of geometry of thermal manikins on room airflow. In: *Healthy Buildings 2003 - Proceedings 7th International Conference (7th-11th December 2003) - National University of Singapore*. 2003, Vol. 2, pp. 339-344.
6. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 15251:2007. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. Brussels, Belgium: CEN, 2007.
7. ZUKOWSKA, D., A. MELIKOV, and Z. POPIOLEK. Impact of personal factors and furniture arrangement on the thermal plume above a sitting occupant. *Building and Environment* [online]. 2012, 49: 104–16 [viewed 2018-01-03]. Available from: doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.09.015
8. ZUKOWSKA, D., Z. POPIOLEK and A. MELIKOV. Determination of the integral characteristics of an asymmetrical thermal plume from air speed/velocity and temperature measurements. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2010, 34: 1205-1216 [viewed 2018-03-23]. Available from: [doi:10.1016/j.expthermflusci.2010.04.009](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.04.009)
9. iAQ-200 *Indoor air quality (VOC) sensor*. [online]. [viewed 2018-01-03]. Available from: <https://www.co2meter.com/products/iaq-2000-indoor-air-quality-sensor>
10. HERBERGER, S. and H. ULMER. New IAQ sensor for demand controlled ventilation. *REHVA Journal* [online]. August 2012, 37-40 [viewed 2018-01-03]. Available from: http://www.rehva.eu/fileadm_in/hvac-dictio/04-2012/new-iaq-sensor_rj1204.pdf
11. CHANG, K. C., W. D. HSIEH, and C. S. CHEN. A modified low-Reynolds-number turbulence model applicable to recirculating flow in pipe expansion. *Journal of Fluids Engineering* [online]. 1995, 117: 417–423 [viewed 2018-01-03]. Available from: [doi:10.1115/1.2817278](https://doi.org/10.1115/1.2817278)

12. HE, Q., et al. CFD study of exhaled droplet transmission between occupants under different ventilation strategies in a typical office room. *Build Environ* [online]. 2011, 46: 397-408 [viewed 2018-01-03]. Available from: doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.08.003
13. Nielsen, P. V. Fifty years of CFD for room air distribution. *Building and Environment* [online]. 2015, 91: 78-90 [viewed 2018-01-03]. Available from: doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.035
14. SØRENSEN, D. N. and P. V. NIELSEN. Quality control of computational fluid dynamics in indoor environments. *Indoor Air* [online]. 2003, 13: 2–17 [viewed 2018-01-03]. Available from: [doi:10.1111/j.1600-0668.2003.00170.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2003.00170.x)
15. *FloVENT User Guide, V10.1*. Mentor Graphics Corporation, 2014.
16. NIELSEN, P. V., et al. *Computational fluid dynamics in ventilation design. Rehva guidebook No.10*. REHVA, Federation of European Heating and Air-conditioning Associations, 2007. ISBN(s):2960046897.
17. CHEN, Q. and J. SREBIC. A Procedure for Verification, Validation, and Reporting of Indoor Environment CFD Analyses. *HVAC&R RESEARCH* [online]. 2002, 8(2): 201-216 [viewed 2018-01-03]. Available from: doi.org/10.1080/10789669.2002.10391437
18. MUNDT, E., et al. *Ventilation Effectiveness: Rehva Guidebook No 2*. REHVA, Federation of European Heating and Air-conditioning Associations, 2004. ISBN-10 2960046803.
19. BROHUS, H. *Personal exposure to contaminant sources in ventilated rooms: doctoral thesis*. Denmark: Kolding Trykcenter, 1997. ISSN 0902-7953-7953 R9741.
20. GHASEMI, A. and S. ZAHEDIASL. Normality Tests for Statistical Analysis: A Guide for Non-Statisticians. *Int J Endocrinol Metab*[online]. 2012, 10(2): 486-489 [viewed 2018-01-03]. Available from: [doi: 10.5812/ijem.3505](https://doi.org/10.5812/ijem.3505)
21. VILLAFRUELA, J. M., et al. CFD analysis of the human exhalation flow using different boundary conditions and ventilation strategies. *Building and Environment* [online]. 2013, 62: 191-200 [viewed 2018-01-03]. Available from: doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.01.022
22. ZHANG, Z. and Q. CHEN. Experimental measurements and numerical simulations of particle transport and distribution in ventilated rooms. *Atmospheric Environment* [online]. 2006, 40: 3396–3408 [viewed 2018-01-03]. Available from: doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.01.014
23. HE, G., X. YANG, and J. SREBIC. Removal of contaminants released from room surfaces by displacement and mixing ventilation: modeling and validation. *Indoor Air* [online]. 2005, 15: 367-380 [viewed 2018-01-03]. Available from: [doi:10.1111/j.1600-0668.2005.00383.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00383.x)

24. CHIANG, W-H., C-Y. WANG, and J-S. HUANG. Evaluation of cooling ceiling and mechanical ventilation systems on thermal comfort using CFD study in an office for subtropical region. *Building and Environment* [online]. 2012, 48: 113-127 [viewed 2018-01-03]. Available from: [doi:10.1016/j.buildenv.2011.09.002](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.09.002)
25. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN ISO 7730:2005. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Brussels, Belgium: CEN, 2005.
26. LICINA, D., et al. Experimental investigation of the human convective boundary layer in a quiescent indoor environment. *Building and Environment* [online]. 2014, 75: 79-91 [viewed 2018-01-03]. Available from: doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.016
27. SKISTAD, H., et al. *Displacement ventilation in non-industrial premises. Rehva Guidebook No 1*. REHVA, Federation of European Heating and Air-conditioning Associations, 2002. ISBN 82-594-2369-3.
28. LICINA, D., et al. Transport of gaseous pollutants by convective boundary layer around a human body. *Science and Technology for the Built Environment* [online]. 2015, 21(8): 1175-1186 [viewed 2018-01-03]. Available from: doi.org/10.1080/23744731.2015.1060111
29. ZHANG, Z., et al. Evaluation of Various Turbulence Models in Predicting Airflow and Turbulence in Enclosed Environments by CFD: Part 2— Comparison with Experimental Data from Literature. HVAC&R Research [online]. 2007, 13(6): 871-886 [viewed 2018-01-03]. Available from: doi.org/10.1080/10789669.2007.10391460
30. JURELIONIS, A., et al. Combined air heating and ventilation increases risk of personal exposure to airborne pollutants released at the floor level. *Energy and buildings* [online]. 2016, 116: 263-273 [viewed 2018-01-03]. Available from: doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.011
31. ZUKOWSKA, D., A. MELIKOV, and Z. POPIOLEK. Impact of personal factors and furniture arrangement on the thermal plume above a sitting occupant. *Building and Environment* [online]. 2012, 49: 104–16 [viewed 2018-01-03]. Available from: doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.09.015
32. KIM, K., et al. Emissions of amides (N,N-dimethylformamide and formamide) and other obnoxious volatile organic compounds from different mattress textile products. *Ecotoxicology and Environmental Safety* [online]. 2015, 114, 350–356 [viewed 2018-01-03]. Available from: doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.07.008

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Dalis disertacijos rezultatų publikuota šiuose mokslinės informacijos instituto (Clarivate Analytics) duomenų bazių leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą:

- I. Jurelionis, Andrius; **Stasiulienė, Laura**; Prasauskas, Tadas; Martuzevičius, Dainius. Dispersion of indoor air pollutants emitted at near-floor levels in rooms with floor heating and mixing ventilation // Indoor and built environment. London: Sage Publications. ISSN 1420-326X. 2017, vol. 26, iss. 00, p. [1-14]. doi:10.1177/1420326X16669975 [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Scopus; Environment Complete; Academic OneFile]. [IF: 0,943; AIF: 2,733; IF/AIF: 0,345; Q3; 2015 Journal Citation Reports® Science Edition (Thomson Reuters, 2017)].
- II. Jurelionis, Andrius; **Gagytė, Laura**; Šeduikytė, Lina; Prasauskas, Tadas; Čiužas, Darius; Martuzevičius, Dainius. Combined air heating and ventilation increases risk of personal exposure to airborne pollutants released at the floor level // Energy and buildings. Lausanne: Elsevier. ISSN 0378-7788. 2016, vol. 116, p. 263-273. doi:10.1016/j.enbuild.2016.01.011 [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Science Direct; Academic Search Complete; Academic Search Elite; Academic Search Premier; Academic Search Research & Development; Environment Complete]. [IF: 2,973; AIF: 2,666; IF/AIF: 1,115; Q1; 2015 Journal Citation Reports® Science Edition (Thomson Reuters, 2017)].

ir recenzuojamuose konferencijų pranešimų medžiagos leidiniuose:

- III. **Gagytė, Laura**; Jurelionis, Andrius; Martuzevičius, Dainius; Prasauskas, Tadas. Experimental study of personal exposure to pollutants released at floor level: floor heating vs air heating // Indoor Air 2016: the 14th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 3-8 July 2016, Ghent, Belgium. Ghent: ISIAQ, 2016. p. [1-8].
- IV. **Stasiulienė, Laura**; Jurelionis, Andrius. Dispersion of pollutants released at floor level under three types of heating systems: A CFD study. // Healthy Buildings Europe 2017: the 2nd International Conference on Healthy Building in Europe, 2-5 July 2017, Lublin, Poland. Lublin: ISIAQ, 2017. P0188.

INFORMACIJA APIE DISERTACIJOS AUTORE

Disertacijos autorė:	Laura (Gagyte) Stasiulienė
Kontaktai:	laura.stasiuliene@ktu.lt, laura.stasiuliene@gmail.com
Išsilavinimas:	
2007-2011	Statybos inžinerijos bakalauras (pastatų inžinerinių sistemų specializacija) Kauno technologijos universitete, Statybos ir architektūros fakultete
2011-2013	Pastatų inžinerinių sistemų magistras Kauno technologijos universitete, Statybos ir architektūros fakultete
2013-2017	Statybos inžinerijos krypties studijos doktorantūroje, Kauno technologijos universitete, Statybos ir architektūros fakultete
Darbo patirtis:	
2013-2015	jaunesnioji mokslo darbuotoja projekte “Oro kokybės valdymas mažai energijos naudojančiuose pastatuose (IAQSmart)”
2013-2017	asistentė Kauno technologijos universitete, Statybos ir architektūros fakultete
2017-dabar	lektorė Kauno technologijos universitete, Statybos ir architektūros fakultete
Mokslinių interesų sritys:	pastatų oro kokybė, šiluminis komfortas, ŠVOK sistemos, energijos vartojimo efektyvumas, pastatų informacinis modeliavimas

PADĖKA

Norėčiau padėkoti Andriui Jurelionui, mano mokslinių tyrimų vadovui ir mentoriui. Jo konstruktyvūs pasiūlymai, profesionalumas, darbo etika ir svarbiausiai teigiamas požiūris bei humoras buvo labai vertinami doktorantūros studijų metu. Taip pat visiems kolegoms ir techniniam personalui iš Pastatų energinių sistemų katedros už pagalbą tyrimų metu. Ypatingai noriu padėkoti Valdui Klimavičiui už pagalbą laboratorijoje. Dėkoju Dainiui Martuzevičiui, su jo pagalba disertacijos tyrimai buvo iš dalies finansuojami Europos socialinio fondo lėšomis (projektas Nr. VP1-3.1-ŠMM-07-K-02-075). Dėkoju tėvams, taip pat vyrui Vaidui bei draugams iš KTU Doktorantų draugijos už palaikymą ir paskatinimą studijų metu.

RESUME

Background and motivation

The indoor climate in modern buildings depends on a variety of factors, such as air change rates, a presence of air pollutants, operative temperature, air distribution scheme, air velocity etc. Thermal comfort and indoor air quality in buildings are mostly influenced by the combination of heating, cooling and ventilation systems. To ensure high indoor air quality levels, it is important to either reduce emissions from pollutant sources or ensure effective removal of these emissions. The most significant air pollution sources in modern buildings are household chemicals, finishing materials and furnishings.

To accurately assess the impact of air pollutant sources on occupants, particular attention should be paid to the isothermal pollutants released at the near-floor level, because of the human convective boundary layer ability to elevate pollutants to breathing level. The most frequent sources of such pollutants are floor coverings, cleaning products, varnishes and others that emit volatile organic compounds.

Volatile organic compounds are produced by evaporation of materials at room temperature, and therefore they can be classified as isothermal pollutants. Furthermore, their density and temperature are not significantly different from the indoor air density and temperature. Therefore, the dispersion of such pollutants is influenced by indoor climate parameters (air temperature and air velocity), air distribution scheme and convective flows in rooms.

No reported results of the combined impact of heating systems and air distribution scheme on occupant inhaled pollutant concentrations were found, especially concerning isothermal pollutants (volatile organic compounds) released by evaporation at near-floor level.

The aim of the dissertation

The aim of this dissertation is to identify the factors that influence air pollutants transportation into the breathing zone in modern buildings and explore the dispersion of volatile organic compounds released at a near-floor level under different combinations of heating systems and air distribution schemes.

Objectives of dissertation

To achieve the aim of the dissertation, the following objectives are addressed:

- To investigate near-floor level emitted pollutant transportation to occupant breathing level in rooms with different combinations of heating systems and air distribution schemes under laboratory conditions;

- To perform simulations of pollutant dispersion by means of computational fluid dynamics (CFD);
- To assess the reliability of results from CFD simulations, as well as to identify factors influencing contaminant dispersion;
- To provide recommendations for the selection of heating system and air distribution scheme to ensure lower entrainment of near-floor level emitted pollutants into the breathing zone.

Scientific novelty

Quantitative differences in volatile organic compounds relative concentrations in the occupant breathing zone under different heating and air distribution conditions were identified. No studies were found reporting the combined impact of heating and mixing ventilation systems to occupant inhaled pollutant concentrations, especially regarding isothermal pollutants, such as volatile organic compounds released at near-floor level.

Practical implications

It has been determined which combination of heating system and air distribution scheme provides better air quality in the breathing zone. Better air quality in the breathing zone can be ensured by combining mixing ventilation with low-temperature surface heating (i.e. underfloor heating).

It is important to emphasise that more often than not, mixing ventilation systems are designed without consideration of convective flows from occupants, heating devices or appliances (e.g. computers or lighting), assuming that temperature and pollutant concentrations will be evenly distributed in the premises. Less intense convection flows from heating devices and appliances are expected due to the energy performance of buildings as well as appliances. Therefore, convective flows from occupants, being of similar magnitude as ventilation airflow, will play an important role in room air distribution. The findings of this dissertation support the latter statements from the perspective of air quality experienced by the occupant.

Methods

The dissertation is based on experimental and numerical simulation methods. Dispersion of volatile organic compounds released at a near-floor level under different combinations of heating systems and air distribution schemes was investigated experimentally in the full-scale test chamber and simulated using computational fluid dynamics software. Statistical differences in relative concentration values were assessed employing non-parametric statistics. The computational fluid dynamics software was used to assess the effects of different factors influence on contaminant dispersion.

Structure of the dissertation

The dissertation consists of the following sections: introduction, literature review, methods, results, conclusions, discussion, references and a list of publications.

The volume of the dissertation is 96 pages. The dissertation contains thirty-seven figures, fourteen tables and provides one hundred and fifty-one reference.

Conclusions

1. Experiments under laboratory conditions have shown that pollutant entrainment into the human convective boundary layer depends on the heating system type and air distribution scheme. At air change rate 2h⁻¹, this phenomenon appears to be significantly weaker with underfloor heating ($P < 0.05$). Relative pollutant concentrations in the occupant breathing zone are lower with underfloor heating by 12% and 24% compared to warm air heating and radiator heating, respectively.

2. CFD analysis has shown that pollutants are transported in an opposite direction from the cooled wall. Nevertheless, their path drifts towards the dummy with a minor influence of the heated dummy position.

3. With the accuracy of the numerical model at an acceptable level (relative percentage error $< 30\%$) it can be concluded that the increase in air change rate has a minor influence on air quality in the breathing zone, while increased chamber volume and distance between pollutant and occupant decreases the effect of the human convective boundary layer; resulting in higher air quality in the breathing zone.

4. It was determined that a combination of heating and air distribution schemes should be carefully considered in cases where sedentary activities are carried out in buildings and the presence of near-floor level emitted pollutants cannot be avoided. The focus should be on the heating system type, as the effect of air distribution is comparatively minor. Entrainment of such pollutants into the convective boundary layer is less intense with underfloor heating compared to warm air and radiator heating, especially if the distance between the source and the occupant increases.

UDK 628.8 + 613.6] (043.3)

SL344. 2018-04-16, 2,5 leidyb. apsk. I. Tiražas 50 egz.

Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas