



Kauno technologijos universitetas
Statybos ir architektūros fakultetas

Šildymo sistemos tipo įtaka mechaninio skersinio vėdinimo efektyvumui

Magistro baigiamasis projektas

Arnas Vasiliauskas
Projekto autorius

Lekt. dr. Laura Stasiulienė
Vadovė

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Šildymo sistemos tipo įtaka mechaninio skersinio vėdinimo efektyvumui

Magistro baigiamasis projektas

Darnūs ir energetiškai efektyvūs pastatai (6211EX006)

Arnas Vasiliauskas

Projekto autorius

Lekt. dr. Laura Stasiulienė

Vadovė

Lekt. dr. Rokas Valančius

Recenzentas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Arnas Vasiliauskas

Šildymo sistemos tipo įtaka mechaninio skersinio vėdinimo efektyvumui

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Arno Vasiliausko, baigiamasis projektas tema „Šildymo sistemos tipo įtaka mechaninio skersinio vėdinimo efektyvumui“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: DARNŪS IR ENERGETIŠKAI EFEKTYVŪS PASTATAI

Baigiamojo projekto tema (lietuvių k.): Eksperimentiniai ir skaitiniai oro sklaidos tyrimai patalpų vėdinimui naudojant tekstilinius ortakius

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.: V25-09-20

(lietuvių k.): Šildymo sistemos tipo įtaka mechaninio skersinio vėdinimo efektyvumui

(anglų k.): Effect of Heating System Type on the Efficiency of Mechanical Cross Ventilation

1.1.

Pradiniai duomenys darbui (pagal poreikį):

1. FEIST, W., SCHNIEDERS, J., DORER, V., HAAS, A.(2005). *Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept.*
2. ROJAS, G., PFLUGER, R., FEIST, W.(2015). *Cascade ventilation – air exchange efficiency in living rooms without separate supply air.*[žiūrėta 2020-05-04]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815001097>

Baigiamojo projekto dalys:

	Atlikti
Įvadas	x
Literatūros apžvalga	x
Metodologija	x
Eksperimentiniai tyrimai	x
Analitiniai tyrimai	<input type="checkbox"/>
Skaitiniai tyrimai	x
Ekonominė dalis	<input type="checkbox"/>
Išvados	x

Kita informacija (pagal poreikį), susitikimų su vadovu savaitės diena (-os) bei laikas:

Vadovas:

Laura Stasiulienė

(indėlis 100%)

pareigos, vardas, pavardė

parašas

Studentas:

Arnas Vasiliauskas

vardas, pavardė

parašas

Vasiliauskas, Arnas. Šildymo sistemos tipo įtaka mechaninio skersinio vėdinimo efektyvumui. Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovė lekt. dr. Laura Stasiulienė; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): inžinerijos mokslai, Statybos inžinerija (E05)

Reikšminiai žodžiai: šildymo sistemos, skersinis vėdinimas, vėdinimo efektyvumas, CFD, oro balansas

Kaunas, 2021. 51 p.

Santrauka

Baigiamajame magistro projekte „Šildymo sistemos tipo įtaka mechaninio skersinio vėdinimo efektyvumui“ tiriamos ir lyginamos įprasto bei skersinio vėdinimo sistemos, tikrinama šildymo sistemos įtaką jų efektyvumui bei palaikomai oro kokybei patalpoje.

Tiriant vėdinimų sistemų efektyvumą, naudoti eksperimentiniai ir skaitiniai metodai. Eksperimentiniai – tai laboratoriniai bandymai tyrimų kameroje taikant skirtingus vėdinimo tipus; skaitiniai – modeliavimai, atliekami naudojant skaitinės skysčių dinamikos programinę įrangą, jose kuriant identiško dydžio ir sąlygų tyrimų kamerą.

Žymūs skirtumai iš eksperimentinių ir skaitinių tyrimų tarp vėdinimo ir šildymo sistemos tipų nebuvo gauti, vėdinimo sistemos visais atvejais gautos efektyvios.

Tyrimo aktualumas apžvelgiamas literatūros apžvalgos skyriuje, po kurios, iškėlus galimas hipotezes, kuriama tyrimų metodologija. Pagal ją atlikus bandymus toliau aprašomi gauti rezultatai bei galimos jų priežastys, pateikiamos išvados.

Iš viso baigiamajame projekte yra 6 lentelės, 28 paveikslėliai, 42 literatūros šaltiniai, kuriais remtasi tiriant ir analizuojant pasirinktos temos parametrus.

Vasiliauskas, Arnas. Effect of Heating System Type on the Efficiency of Mechanical Cross Ventilation. Master's Final Degree / supervisor lect. dr. Laura Stasiulienė, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering Sciences, Civil Engineering (E05)

Keywords: heating systems, cascade ventilation, ventilation effectiveness, CFD, air balance

Kaunas, 2021. 51 pages.

Summary

There were studied and analyzed rooms which can be ventilated with normal ventilation or using cascade ventilation in masters degree final project „Influence of heating system to efficiency of mechanical cascade ventilation“. Also there were analyzed influence of heating systems in this project.

There were used experimental and numerical methods for Ventilation Effectiveness research. Research in laboratory was made in experimental method; Computational Fluid Dynamics (CFD) software was used for made models which are the same as in experimental method used.

Significant difference between experimental and numerical results were not received and every time ventilation effectiveness were good enough.

Relevance of the research were reviewed in literature review. After that hypothesis were made and methodology of research was made. After that results of experimental and numerical research are submitted.

There are 6 tables, 28 pictures, 42 literature sources in this masters degree final project. It was used for research and analyze parameters of this theme.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Literatūros apžvalga	11
1.1. Patalpų mikroklimatą lemiantys veiksniai.....	11
1.2. Dažniausiai naudojamos šildymo sistemos	11
1.3. Dažniausiai naudojamos vėdinimo sistemos	13
1.4. Oro kiekių balanso sudarymo būdai	15
1.5. Vėdinimo efektyvumas.....	16
2. Metodologija	20
2.1. Vėdinimo efektyvumo rodikliai ir tyrimų planas	20
2.2. Bandomasis skaitinis metodas hipotezės patikrai.....	21
2.3. Eksperimentinis metodas.....	22
2.4. Tyrimų kameros skaitinis modelis.....	24
2.5. Skaitinių modelių patikimumo vertinimas	26
2.6. Šildymo sistemos įtakos vėdinimo sistemos efektyvumui tyrimas	26
3. Rezultatai, diskusija	27
3.1. Bandomųjų skaitinių modelių rezultatai.....	27
3.2. Eksperimentinio ir skaitinio metodų rezultatai.....	30
3.3. Skaitinių modelių patikimumo įvertinimas	33
3.3.1. Oro judėjimo greitis.....	33
3.3.2. Temperatūriniai gradientai	34
3.3.3. CO ₂ koncentracijos	34
3.4. Šildymo sistemos įtaka vėdinimo efektyvumui.....	36
3.5. Ekonominis vėdinimo sistemų išlaidų vertinimas.....	45
Išvados	47
Literatūros sąrašas	48

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Šildymo sistemų ir vėdinimo schemų deriniai	21
2 lentelė. Bandomųjų CFD modelių rezultatai.....	29
3 lentelė. Eksperimento ir skaitinių modelių rezultatai.....	33
4 lentelė. Galutinių CFD modelių rezultatai	44
5 lentelė. Oro kiekių balansas naudojant įprastą ir skersinį vėdinimą	45
6 lentelė. Palyginamoji išlaidų lentelė naudojant įprastinį ir skersinį vėdinimą.....	46

Paveikslų sąrašas

1 pav. Vertikalūs temperatūriniai gradientai prie skirtingų šildymo būdų [10].....	13
2 pav. Sumaišomojo ir terminio vėdinimo efektyvumas prie skirtingų temperatūrų, greičių, koncentracijų [18].....	14
3 pav. a) standartinis oro balanso sudarymas b) skersinis oro balanso sudarymas.....	15
4 pav. Oro judėjimas prie skersinio vėdinimo [20].....	16
5 pav. CO ₂ pasiskirstymas skirtinguose pjūviuose ir aukščiuose [21].....	17
6 pav. Skirtingi patalpų išdėstymo variantai [25]	17
7 pav. Taršos kiekio priklausomybė nuo patalpų išdėstymo, naudojant skersinį vėdinimą [24].....	18
8 pav. Oro drėgmė ir CO ₂ koncentracija patalpose, kai nėra tiesioginio oro tiekimo [26].....	18
9 pav. Energijos sąnaudos prie skirtingų vėdinimo būdų [26].....	19
10 pav. Bandymo kameros modelis a) įprastinis vėdinimas b) skersinis vėdinimas	22
11 pav. Bandymų kamera a) įprastinis vėdinimas b) skersinis vėdinimas.....	22
12 pav. Bandymų kameros pjūvis a) įprastinis vėdinimas b) skersinis vėdinimas	24
13 pav. Tyrimų kameros CFD modelio izometrinis vaizdas ir vertikalus pjūvis.....	25
14 pav. Tyrimų kameros pjūviai rezultatams pateikti.....	25
15 pav. CO ₂ koncentracijos, kai įprastinis vėdinimas be šildymo, kai oro kaita 1h ⁻¹	27
16 pav. CO ₂ koncentracijos, kai skersinis vėdinimas be šildymo, kai oro kaita 1h ⁻¹	28
17 pav. Įprastas ir skersinis vėdinimas be šildymo, CO ₂ koncentracijos CFD modelyje ir eksperimento metu.....	31
18 pav. Įprastas ir skersinis vėdinimas be šildymo, temperatūriniai gradientai CFD modelyje ir eksperimento metu.....	32
19 pav. Oro judėjimo greičio palyginimas eksperimento ir skaitinio modeliavimo metu	33
20 pav. Temperatūriniai gradientai eksperimento ir skaitinio modeliavimo metu: A) įprastas vėdinimas B) skersinis vėdinimas	34
21 pav. CO ₂ eksperimento ir skaitinio modeliavimo metu: A) įprastas vėdinimas B) skersinis vėdinimas.....	35
22 pav. Įprastas ir skersinis vėdinimas su oriniu šildymu, CO ₂ koncentracijos.....	37
23 pav. Įprastas ir skersinis vėdinimas su oriniu šildymu, temperatūriniai gradientai	38
24 pav. Įprastas ir skersinis vėdinimas su radiatoriniu šildymu, CO ₂ koncentracijos	39
25 pav. Įprastas ir skersinis vėdinimas su radiatoriniu šildymu, temperatūriniai gradientai	40
26 pav. Įprastas ir skersinis vėdinimas su grindiniu šildymu, CO ₂ koncentracijos	41
27 pav. Įprastas ir skersinis vėdinimas su grindiniu šildymu, temperatūriniai gradientai	42
28 pav. Ortakių planas individualiame name suprojektavus įprastinį ir skersinį vėdinimą.....	46

Įvadas

Ieškant naujų būdų, kaip pastatus daryti kuo mažiau energijos naudojančius ir energetiškai efektyvius, ieškomi variantai, kaip galima sumažinti išlaidas jo išlaikymui. Tai galima padaryti gerinant pastato išorinių atitvarų šilumines savybes, imantis papildomų priemonių jo sandarumui, o taip pat ir reguliuojant šiluminį komfortą ir oro kokybę ją valdant pagal patalpų poreikius, nepastoviai, taikant inovatyvesnius, kintamus mikroklimato kokybės palaikymo sprendimus. Vienas iš variantų tam pasiekti gali būti vietoj įprasto vėdinimo, kai kiekvienoje patalpoje sukuriamas oro balansas, naudoti skersinį vėdinimą, kurio metu yra išskiriamos skirtingos zonos į kurias oras yra tiekiamas, o iš kurių ištraukiamas, taip sukuriant vienkryptę oro judėjimo schemą, kai iš švaresnių patalpų oras juda link labiau užterštų. Tokiu būdu galima sumažinti oro kiekį, tiekiamą į patalpas, medžiagas montuojant sistemą ir tuo pačiu elektros išlaidas, reikalingas vėdinimo įrenginio eksploatacijai.

Skersinis vėdinimas, kai oras tiekiamas ir ištraukiamas tik vienoje pastato vietoje neturi neigiamos įtakos mikroklimatui ir vertinant jo efektyvumą šalinant teršalus, kuriuos daugiausiai sukuria žmogus, kai iškvepia organizme susidariusį CO₂, yra panašus į įprastinį vėdinimą. Tačiau patalpos mikroklimato kokybė priklauso ne tik nuo vėdinimo sistemos – ją gali paveikti ir šildymo sistemos tipas. Šildymo tipai patalpoje (radiatorinis, grindinis, orinis), šilumą į ją perduoda skirtingai (laidumu, konvekcija, spinduliavimu), taip pat priklausomai nuo tipo susidaro nevienodi vertikalūs temperatūriniai gradientai, kuriantys skirtingą šiltų oro srautų judėjimą patalpoje. Tai gali paveikti ir teršalų judėjimą patalpoje, o tuo pačiu ir skersinio vėdinimo sistemos efektyvumą.

Skersinio vėdinimo efektyvumo priklausomybės nuo šildymo sistemos tipo tyrimų sritis nėra pakankamai ištirta.

Darbo tikslas: ištirti mechaninio skersinio vėdinimo efektyvumo priklausomybę nuo šildymo sistemos tipo.

Darbo uždaviniai:

1. Eksperimentiškai (laboratorinėmis sąlygomis) ištirti mechaninio įprastinio ir skersinio vėdinimo efektyvumą.
2. Sukurti įprastinio ir skersinio vėdinimo skaitinius modelius taikant skaitinės skysčių dinamikos (CFD) metodą ir įvertinti skaitinio modelio patikimumą.
3. Įvertinti šildymo sistemos įtaką mechaninio skersinio vėdinimo efektyvumui.
4. Palyginti įprastinio ir skersinio vėdinimo sistemų įrengimo ir eksploatacijos išlaidas.

2. Literatūros apžvalga

Literatūros analizėje išnagrinėti pagrindiniai, fundamentiniai veiksniai, nuo kurių priklauso šildymo ir vėdinimo sistemų efektyvumas naudojant skersinį vėdinimą. Pirmiausiai pristatyti pagrindiniai patalpų mikroklimatą lemiantys veiksniai, toliau aptartos dažniausiai naudojamos ir projektuojamos šildymo ir vėdinimo sistemos, jų tipai ir skirtumai, taip pat aptarti oro kiekių balansų sudarymo būdai bei vėdinimo sistemų efektyvumo tyrimai ir pastebėti tyrimų trūkumai.

2.1. Patalpų mikroklimatą lemiantys veiksniai

Žmonėms vis daugiau laiko praleidžiant uždarose patalpose (namuose, biuruose, automobiliuose) ir tik 10% viso savo laiko būnant lauke [1], ypatingai didelė dalis gyvenimo kokybės priklauso nuo komforto, kurį jie jaučia būdami patalpose. Komforto sąlygas, kurias reikia pasiekti, norint, kad žmonės jaustųsi gerai apibūdina patalpų mikroklimato sąvoka, kuri apima platų spektrą skirtingų parametru, galinčių daryti įtaką žmonių savijautai patalpoje.

Patalpų mikroklimatas – daug reikšmių turintis apibrėžimas, prie kurio galima pritaikyti daug skirtingų rodiklių, tačiau pagrindiniai, išskirti ir Europos šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo asociacijų federacijos (REHVA) [2] rekomendacijose, yra: apšvietimo kokybė, akustinis komfortas, šiluminis komfortas, oro kokybė ir paskirstymas. Kadangi parametru, pagal kuriuos vertinamas mikroklimatas patalpose suvokimas skirtingoms žmonių grupėms yra skirtingas, t. y. vieni geriau jaučiasi, kai patalpoje oro temperatūra yra žemesnė, kiti – kai aukštesnė ir t.t., todėl yra sunku nusakyti ar tinkamos sąlygos yra patalpoje. Nors dalis darančių įtaką rodiklių yra reglamentuota Lietuvos respublikos Higienos normose [3], tačiau vien teoriškai nustatytų temperatūrų, oro kiekių, drėgmės ir apšvietimo rodiklių nepakanka – naudojami ir kiti rodikliai, įvertinantys žmonių savijautą. Vienas tokių yra PMV rodiklis (angl. predicted mean vote). Jis nusako, kaip žmonės vertina šiluminę aplinką patalpoje skalėje nuo -3 (per karšta) iki 3 (per šalta) [4]. ISO 7730 [5] standarte reglamentuoto rodiklio reikšmė turėtų būti intervale nuo -0,5 iki 0,5, jei žmonės patalpoje jaučiasi komfortabiliai.

Pasitaiko atvejų, kai matuojami rodikliai atitinka visas reikalaujamas reikšmes, o žmonės patalpoje vis tiek jaučiasi blogai, nekomfortabiliai ir mikroklimatą vertina neigiamai. Toks atvejis vadinamas sergančio pastato sindromu, kai priežastys, dėl ko jaučiamasi blogai, yra nežinomos, nors tiek temperatūra, tiek oro kaita ir kiti rodikliai yra nustatyti pagal normas [6]. Taip gali įtakoti skirtingos pastato problemos, kurias ne visada galima išspręsti: nekeisti vėdinimo agregatų filtrai ar nepakankamai efektyvi vėsinimo sistema, elektromagnetinės bangos, sklindančios nuo įrangos [7].

Tačiau nors ir yra įvairių rodiklių, galinčių nusakyti mikroklimato kokybę patalpoje, labiausiai jį įtakojantys ir geriausiai jaučiami yra du – šiluminis komfortas ir oro kokybė. Šiluminis komfortas – tai derinys tarp oro temperatūros, greičio, santykinės drėgmės, taip pat žmogaus aktyvumo ir jo aprangos, kuris geriausiai pasiekiamas, kai dėl išvardintų sąlygų žmogaus organizmo pastangos šildytis ar vėsintis yra minimalios [8]. Oro kokybė – mikroklimato kokybę įvertinantis rodiklis, priklausantis nuo patalpos užimtumo, oro kaitos, esančių teršalų ir vėdinimo sistemos efektyvumo.

2.2. Dažniausiai naudojamos šildymo sistemos

Šiluminį komfortą patalpose labiausiai įtakoja šildymo ir vėsinimo sistemos efektyvumas. Didžiaja dalimi šios sistemos skirtos nustatytos temperatūros palaikymui, tačiau taip pat jos netiesiogiai valdo ir santykinę drėgmę patalpoje bei daro įtaką oro judėjimui, jo greičiui. Pačios šilumos srautų

judėjimas priklauso nuo jos atidavimo į patalpą būdo (per radiatorių, grindis ar orą) ir šilumos mainų schemos.

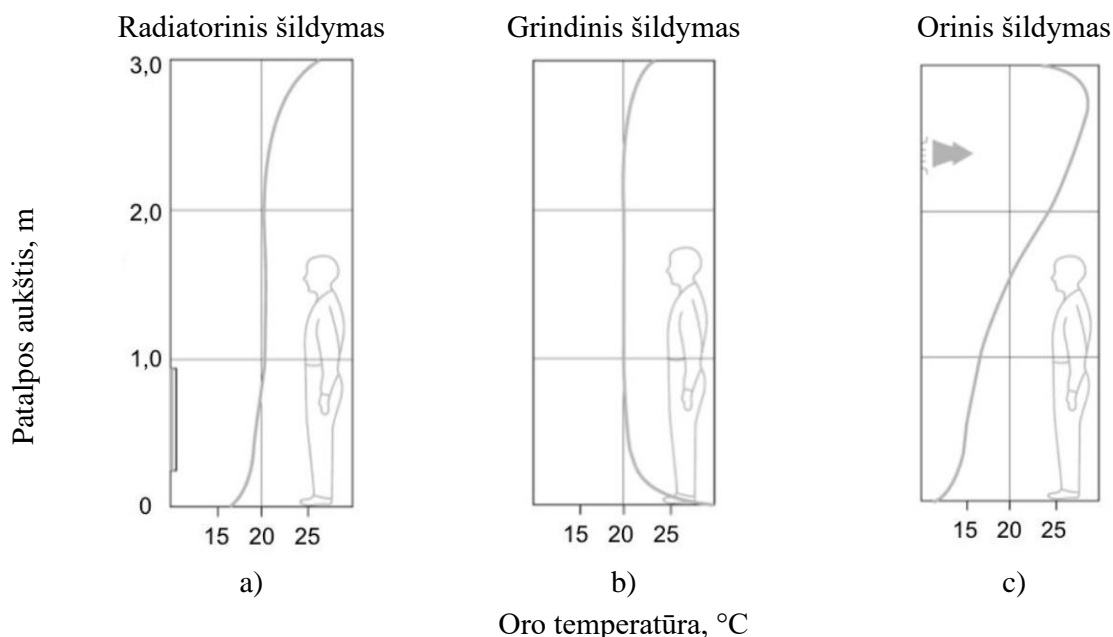
Šiluma patalpose gali skliti ir atlikti mainus su joje esančiais kūnais trimis būdais – laidumu, konvekcija ir spinduliavimu. Šilumos perdavimas laidumu yra laikomas tada, kai ji persiduoda susilietus kūno dalelėms vienai su kita. Šis būdas šildymo sistemose tiesiogiai beveik netaikomas, jį galima rasti nagrinėjant pačių šildymo prietaisų veikimo principus. Laidumo pavyzdys - kai radiatorius ir vamzdeliai jame, kuriais teka karštas šilumnešis, perduoda šilumą šaltesnėms plokštelėms. Taip pat šiluma gali būti perduota ir konvekcijos būdu, kai maišantis oro dalelėms, jos susimaišo su nuo šildymo prietaiso, pavyzdžiui, radiatoriaus, sklindančiu oru. Spinduliavimas – tai mainai, kuriuos į kito kūno daleles perneša elektromagnetinės bangos, esančios ore. Nors visi šilumos mainų būdai nėra panašūs, realiose sąlygose dažniausiai šiluma perduodama keliais būdais iš karto [9].

Tai, kad šiluma nėra atiduodama tik vienu iš būdu, galima pamatyti nagrinėjant populiariausius šildymo sistemų tipus, kuriuos galima išskirti į radiatorinį, grindinį ir orinį šildymą. Pirmasis patalpos temperatūrą palaiko visais trimis šilumos mainų būdais – laidumu perduoda šiluma į plokšteles, kurioms įšilus, susidaro konvekciniai srautai, susimaišantys su patalpos oru, kurio dalelės dar perduoda šilumą viena kitai spinduliuojant. Kai patalpoje įrengtas grindinis šildymas, nuo per visą plotą sumontuoti vamzdeliai laidumu perduoda šilumą betonui, per kurį į patalpą išspinduliuojamas šiltas oras, susimaišęs su jau joje esančio oro dalelėmis, pakelia temperatūra iki projektinės. Orinis šildymas taip pat didžiąja dalimi veikia spinduliuojant šilumą.

Skirtingi šių sistemų tipai tarpusavyje skiriasi ne tik šilumos perdavimo į patalpą būdu. Prie skirtingų sistemų patalpoje susidaro ir nevienodi vertikalūs temperatūriniai gradientai, kurie parodo koks temperatūros pokytis yra per 1 metrą patalpos aukščio [10]. Tai svarbus parametras vertinant šildymo efektyvumą ir šiluminį komfortą, kadangi pagal tai galima nuspręsti kokia temperatūra bus skirtinguose aukščiuose, pavyzdžiui žmogaus kulkšnių (0,1 metro nuo grindų) ir įkvėpimo (1,1 metro nuo grindų) lygyje. Remiantis ISO7730:2005 standartu, skirtumas tarp šių kūno dalių negali būti didesnis nei 3 °C [11].

Radiatorinis šildymas pasižymi didžiausiu temperatūriniu gradientu ir per 1 m patalpos aukščio temperatūra patalpoje keičiasi apie 3 °C. Šildant patalpą radiatoriais, pažemėje susidaro žemesnės temperatūros zona, kadangi visa šiluma susidaro ties prietaiso grotelėmis jo viršuje ir kyta į patalpos viršų (žr. 1a pav.). Dėl šios priežasties kyta rizika, kad susidarys šiltesnio ir šaltesnio oro zonos žemesnėje ir aukštesnėje patalpos dalyse. To galima išvengti patalpoje įrengus grindinį šildymą – nuo viso įšilusio patalpos grindų ploto temperatūra lygiai pasiskirsto kambarį, ir kildama po truputį vėsta, taip sudarant tolygų temperatūrinį patalpos gradientą per visą jos aukštį (žr. 1b pav.). Verta paminėti, kad norint išvengti diskomforto, grindų dangos temperatūra neturėtų viršyti 29 °C [12]. Taip pat, grindinis šildymas yra inertiškas ir lėčiau valdomas, kadangi vamzdeliams šilumą atidavus į betono masę, ji į patalpą atidavinėja ją palaipsniui, todėl net ir išjungus sistemą, kurį laiką bus jaučiama nuo grindų kylanti šiluma. Tai gali būti tiek privalumas, tiek trūkumas, priklausomai nuo patalpos paskirties, kadangi ten, kur reikia greito temperatūros kylimo, pavyzdžiui, ne visada gyvenamoje rezidencijoje, jo su grindiniu šildymu taip pat nepavyks pasiekti, nes pirmiausia turės įšilti visa betono masė [13]. Tokioje, retai gyvenamose patalpose, tinka orinis šildymas konvektoriais, oriniais šildytuvais ar per vėdinimo sistemą. Šis būdas veikia greitai, bet nėra pats komfortiškiausias, kadangi patalpoje gali jaustis didesnis oro judėjimas. Taip pat, šildant patalpą oru, kol jis nukrenta iki darbo

ar kvėpavimo zonos, per patalpos aukštį atvėsta, o palei grindis šilto oro beveik nebūna, dėl ko tarp žmogaus kulkšnių ir įkvėpimo zonos gali susidaryti didesnis nei 3 °C skirtumas, sukeliantis diskomfortą (žr. 1c pav.)



1 pav. Vertikalūs temperatūriniai gradientai prie skirtingų šildymo būdų [10]

2.3. Dažniausiai naudojamoms vėdinimo sistemoms

Oro kokybė – tai patalpų mikroklimatą įvertinantis rodiklis, priklausantis nuo veiksnių, apimančių patalpos užimtumą, joje esančias medžiagas ir labiausiai nuo vėdinimo sistemos, skirtos oro kokybei toje patalpoje palaikyti. Jos gali būti skirstomos į natūralias, mechanines ir hibridines vėdinimo sistemas.

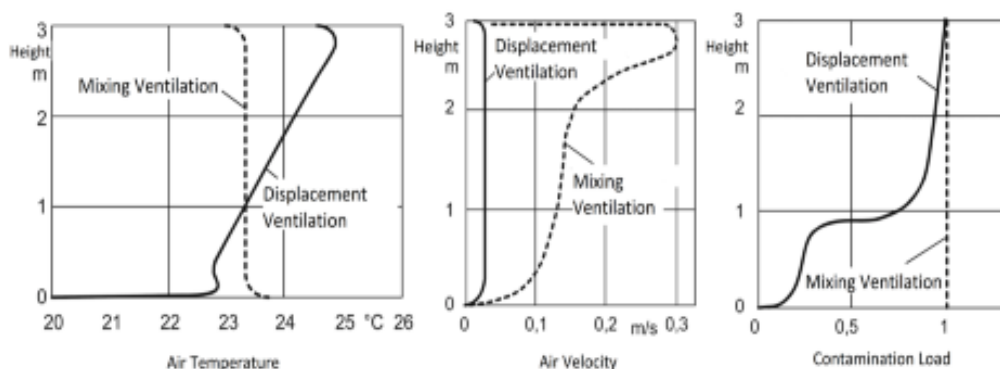
Natūralus vėdinimas – tai sukiamas dinaminių ir gravitacinių jėgų oro judėjimas patalpoje, kai į ją šviežias oras tiekiamas ir ištraukiamas per orlaides, deflektorius, pastato nesandarumus. Natūralus vėdinimas priklauso nuo slėgio skirtumo tarp patalpos ir lauko, vėjo, oro drėgmės, kadangi oras juda iš didesnio į mažesnio slėgio vietas, tai patalpos slėgiui esant didesniai nei slėgis lauke, šviežias oras netekės į pastatą (kol slėgių skirtumas vėl nepasikeis). Tačiau tai ganėtinai pigus ir paprastai įrengiamas vėdinimo būdas, kurį tinkamai suprojektavus, galima panaudoti ir pastato vėsinimui. Pagal 2017 metais Brisbane atliktą tyrimą, esant vėjo greičiui 2,5 m/s, sudarius skersvėjį, 70% laiko žmonės patalpoje jautėsi komfortabiliai, nors lauke temperatūra lauke buvo 30 °C [14]. Nors su tokiu vėdinimu galima pasiekti neblogus rezultatus atsižvelgiant į žmonių savijautą pastate, tačiau dėl sudėtingo valdymo ir reguliavimo, kuris didžiąja dalimi priklauso nuo lauko oro sąlygų, dėl nevalomo ir nerecuperuojamo tiekiamo ir ištraukiamo natūralaus oro judėjimo vėdinimo sistemos įrenginėjamos vis rečiau [15]. Taip pat, pagal STR 2.01.02:2016 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas“ A+ ir aukštesnės energinės klasės gyvenamieji pastatai turi turėti mechaninę vėdinimo sistemą su šilumograža [16], kuri taip pat padeda sumažinti ir šilumos nuostolius patalpose, kadangi į patalpas tiekiamas tokios pačios temperatūros oras.

Daug dažnesnis ir efektyvesnis vėdinimo būdas yra mechaninis, kai oro judėjimas ir kaita yra užtikrinama naudojant vėdinimo įrenginius. Juose esantys ventiliatoriai sukelia slėgį prijungtuose

prie agregato ortakiuose, kuris priverčia orą judėti ortakių tinklų iki oro paskirstymo įrenginių (grotelių, difuzorių). Vėdinimo įrenginiuose taip pat yra sumontuoti šilumogražos įrenginiai – rekuperatoriai, kuriuose dalis ištraukiamame ore esančios šilumos per šilumokaitį atiduodama į tiekiamą į patalpas orą, taip sumažinant išlaidas ir šilumos poreikį reikalingą temperatūrą pakelti iki projektinės patalpos temperatūros. Tai gana paprastai valdomas, efektyvus ir maksimaliai oro kokybę patalpoje pagerinantis vėdinimo būdas.

Hibridinis vėdinimas vyksta sukombinuojant natūralaus ir mechaninio vėdinimo savybes į vieną sistemą. Galimos kelios variacijos, kurių viena yra ištraukiant orą mechanškai, pavyzdžiui per buitinį, pagal laikmatį nepastoviai dirbantį ašinių ventiliatorių, o tiekiant orą per orlaides, atsidarančias tada, kai įsijungia ventiliatorius (padidėjus CO₂ koncentracijai ar drėgmei), taip palaikant minimalią oro kaitą ir užtikrinant, kad CO₂ norma neviršys maksimaliai leistinos 1000 ppm ribos [17]. Kiek retesnis variantas yra, kai oras mechanškai tiekiamas į patalpą, o ištraukiamas natūraliai. Tokiu būdu kylantis slėgis patalpoje per nesandarias vietas, kaminus, teka į lauką ten, kur slėgis yra žemesnis. Nors toks atvejis žmogui yra naudingesnis, nes galima tiekti didesnę šviežio oro kiekį, nei per orlaides, tačiau yra efektyviau mechanškai ištraukti orą iš drėgną, nešvarų iš san.mazgų, virtuvių, kad jis kuo trumpiau būtų patalpoje. Kitu atveju, įrengiant mechaninį oro tiekimą, atskirą natūralų ištraukimą ir papildomą mechaninį ištraukimą iš san.mazgų, ekonomiškai naudingiau įrengti yra mechaninę vėdinimo sistemą.

Taip pat patalpoms vėdinti naudojant mechanines sistemas, galima pasirinkti skirtingus oro paskirstymo būdus, iš kurių dažniausiai naudojami yra sumaišomasis ar terminis oro paskirstymas. Sumaišomasis vėdinimas yra kai oras tiekiamas ir ištraukiamas patalpos viršuje, orui „prasisukant“ per visą patalpą. Terminis (arba išstumiamasis vėdinimas) yra kai šviežias oras tiekiamas patalpos apačioje, per groteles ar lėto išpūtimo oro skirstytuvus, o ištraukiamas per patalpos viršuje esančias groteles. Taip oras pasiskirsto palei grindis ir tolygiai kyla link ištraukimo grotelių, darbo zonoje išvengiant didelio užterštumo zonos. Vienas iš didžiausių tokio vėdinimo pliusų yra tai, kad galima tiekti iki 8 °C vėsesnį orą į patalpą, kadangi jis sušyla nuo patalpos šildymo sistemos (radiatorių, grindų) (žr. 2 pav.) [18]. Lyginant sumaišomąjį ir išstumiamąjį vėdinimą tarpusavyje, galima išvelgti keletą skirtumų, iš kurių esminiai yra tiekiamo oro temperatūra ir greitis. Abu jie yra mažesni taikant terminį paskirstymo būdą, kadangi atstumas iki darbo zonos yra mažesnis ir orui reikia mažiau energijos pasiekti darbo zoni. Taip pat, terminis vėdinimas yra efektyvesnis nei sumaišomasis ir žiūrint pagal teršalų paskirstymą – tiekiant orą palei grindis, darbo zonoje nesusidaro užteršto oro srautas, o didžiausios koncentracijos susidaro virš darbo zonos.

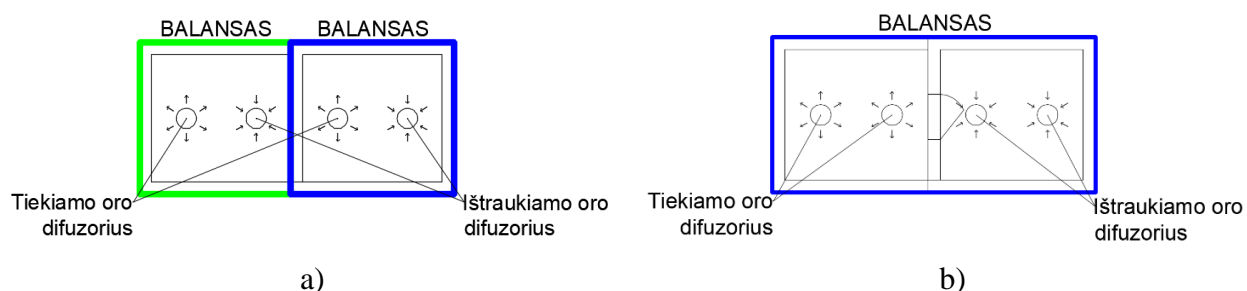


2 pav. Sumaišomojo ir terminio vėdinimo efektyvumas prie skirtingų temperatūrų, greičių, koncentracijų [18]

2.4. Oro kiekių balanso sudarymo būdai

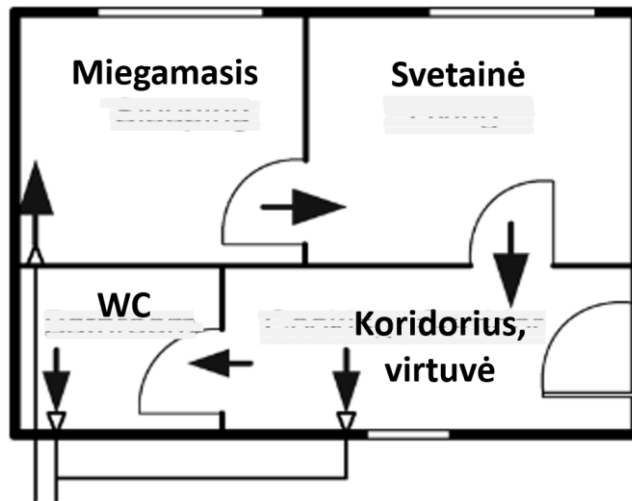
Oro kiekių balansas – parametras, reikalingas ne tik užtikrinti mikroklimatą patalpose nustatant oro kiekius į visas patalpas, tačiau ir naudojamas sistemų efektyvumui vertinti, oro pasikeitimui per valandą ar kitą laiko tarpą nustatyti. Jis sudaromas nustatant projektinius oro kiekius, kurie turi būti tiekiami ir ištraukiami į ir iš patalpų pagal jų paskirtį, remiantis galiojančiais reglamentais ir normomis. Neteisingai sudarius balansą, pavyzdžiui, parinkus didesnį ištraukiamo oro kiekį nei tiekiamo ar atvirkščiai, patalpoje gali jaustis slėgio skirtumas – sunkiai darinėtis durys, oras į patalpas gali skverbtis dideliu greičiu per visus įmanomus plyšius ir taip dėl didelių pasipriešinimų gali tekėti švilpdamas, todėl yra labai svarbu proporcingai ir apylygiai sudėlioti oro kiekius. Tačiau yra patalpų, kur galima sudaryti viršslėgį tam, kad teršalai nesiskverbtų į kitas erdves. Dažnai mažesnis slėgis yra palaikomas virtuvėse, persirengimo kambariuose, o šalia jų esančiuose koridoriuose oro slėgis palaikomas didesnis, kad susidarytų aerodinaminė užtvara atskirianti patalpas. Viršslėgių skaičiavimas ir parinkimas zonoms reglamentuotas EN12101-6 standarte [19].

Yra du populiariausi oro balanso sudarymo tipai – įprastinis ir skersinis (žr. 3 pav.). Įprastiniu laikomas vėdinimas, kai oras tiekiamas ir ištraukiamas toje pačioje patalpoje, taip visą oro apykaitos ratą sudarant joje. Toks vėdinimas dažniausiai naudojamas didesnėse patalpose, kur užimtumas gali būti didesnis ir vienodai reikia tiek tiekėti, tiek ištraukti orą tam, kad didesnio užterštumo zonos susidarytų kuo mažiau.



3 pav. a) įprastinis oro balanso sudarymas b) skersinis oro balanso sudarymas

Skersiniu vėdinimas (*angl. cascade ventilation*) vadinamas tada, kai oro balansas sudaromas per kelias patalpas, į vieną, švaresnę dalį, pavyzdžiui svetainė, miegamasis, šviežias oras yra tiekiamas, o per labiau užterštą zoną (pavyzdžiui virtuvė, sandėliukas, vonia) ištraukiamas, taip orui judant per kelias patalpas. Toks vėdinimas populiarus individualiuose, gyvenamuosiuose namuose, kur yra daugiau atvirų erdvių, laisvai susisiekančių patalpų, taip kur nėra montuojamos sandarios vidinių patalpų durys, trukdančios orui laisvai judėti per apatinius ir viršutinius plyšius (žr. 4 pav.). Taip yra sutaupoma dalis medžiagų, nes ortakių sistemos ilgis pastate sumažėja per pusę, į kiekvieną patalpą atvedant po vieną tiekimo ar ištraukimo ortakį. Dėl šios priežasties skersinis vėdinimas yra įvertintas ir Pasyvių namų asociacijos ir pateikiamas jų rekomendacijoje kaip efektyvus bei ekonomiškai naudingesnis vėdinimo būdas [20]. Vertinant skersinį vėdinimą, pasyvių namų vertintojai taip pat kaip privalumą prieš įprastinį vėdinimą įvardijo ir tai, kad norint taip užtikrinti oro kaitą pastate, nebūtina jokia papildoma įranga, kadangi orui judėti tarp patalpų užtenka 1-2 cm tarpo tarp durų ir grindų, kad per valandą ten pratekėtų 40 m³ oro, kai skirtumas tarp patalpų yra nedidesnis kaip 1 Pa ir tik esant poreikiui turėti sandarias duris tarp patalpų, galima įrengti pralaidas sienose.

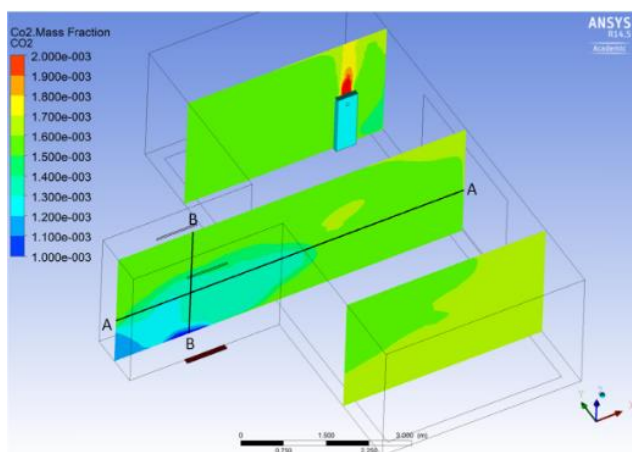


4 pav. Oro judėjimas prie skersinio vėdinimo [20]

2.5. Vėdinimo efektyvumas

Kadangi daugėja reikalavimų pastatų efektyvumui, o skersinis vėdinimas taip pat gali pagerinti energinį naudingumą, jis yra tiriamas ir moksliniuose tyrimuose. G. Rojas, R. Pfluger ir W. Feist ištyrė skaitinės dujų ir skysčių dinamikos metodu (toliau – CFD) individualaus namo su skersiniu vėdinimu variantą, kai oras tiekiamas ir ištraukiamas tik vienoje per vieną patalpą pastate (šviežias oras priteka per miegamąjį, o šalinamas yra per virtuvę) [21]. Sukūrus CFD modelį ir uždavus oro tiekimo ir ištraukimo taškus bei taršos šaltinius, buvo tiriamas variantas, kai oras perėjęs per visą pastatą nuo miegamojo iki virtuvės difuzorių, be atskiro tiekimo į šviesiąją namų zoną – svetainę. Tokiu būdu yra sutaupoma ne tik medžiagų ortakių tinklo įrengimui, bet ir atsiranda galimybė naudoti mažesnės galios vėdinimo įrenginį, kuris sunaudos mažiau elektros energijos bei prisidės prie mažai energijos vartojančių pastatų reikalavimų, kuriuose nustatyta, kad pasyvus, energijos beveik nenaudojantis namas per metus turi sunaudoti nedaugiau 65 kWh/m² [22]. Tyrimo rezultatams nustatyti buvo matuojama CO₂ koncentracija ties ištraukimo angomis, kuri pagal EN 13779-2008 [23] turėtų neviršyti 1000 ppm, bei oro kaita, kuri buvo palaikoma patalpose.

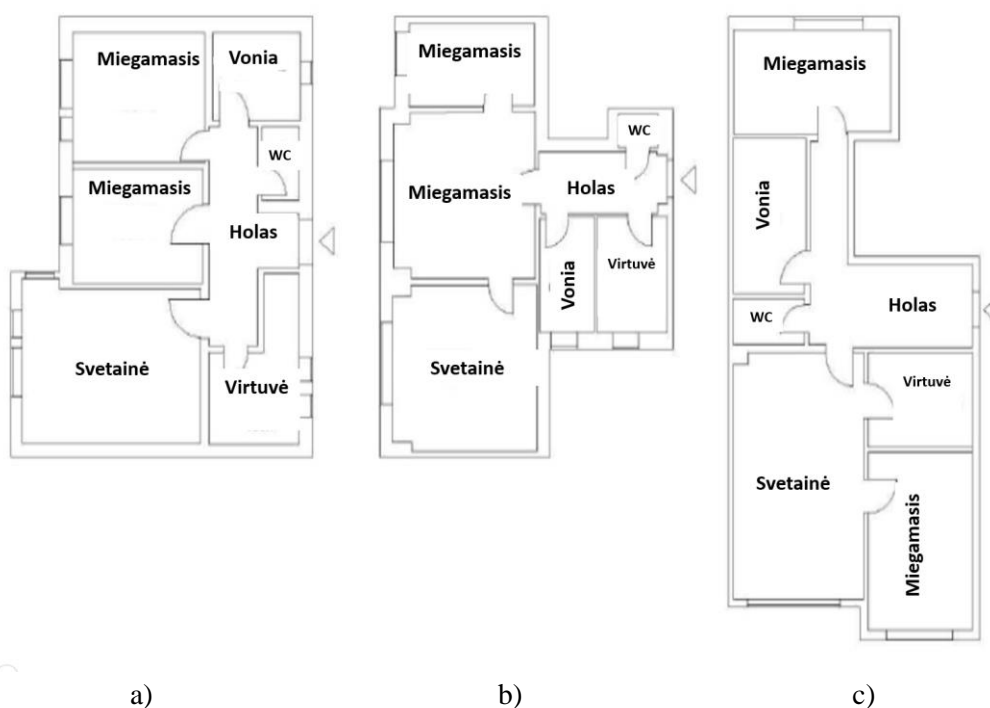
Tyrimo rezultatai rodo, kad toks skersinis vėdinimas gali būti tikrai efektyvus ir net leidžia sumažinti viso pastato oro kaitą iki 0,3- 0,4 h⁻¹ (pagal STR 2.09.02:2005 oro kaita turėtų būti nemažesnė nei 0,5 h⁻¹ [24]), kadangi oras, perėjęs per visą pastatą, ties ištraukimo angomis normą viršija 200 - 400 ppm (žr. 5 pav.) ir yra nuo 1200 ppm iki 1400 ppm. Kadangi modelis buvo skaičiuotas esant pilnam patalpų užimtumui, kai yra keli CO₂ šaltiniai, tai reiškia, kad tokia koncentracija bus retais atvejais ir to išvengti būtų galima su trumpalaikiais oro kaitos padidinimais. Verta paminėti, kad šie rezultatai gauti neatsižvelgiant į pastato šildymo sistemą ir oro judėjimo priklausomybę nuo jos.



5 pav. CO₂ pasiskirstymas skirtinguose pjūviuose ir aukščiuose [21]

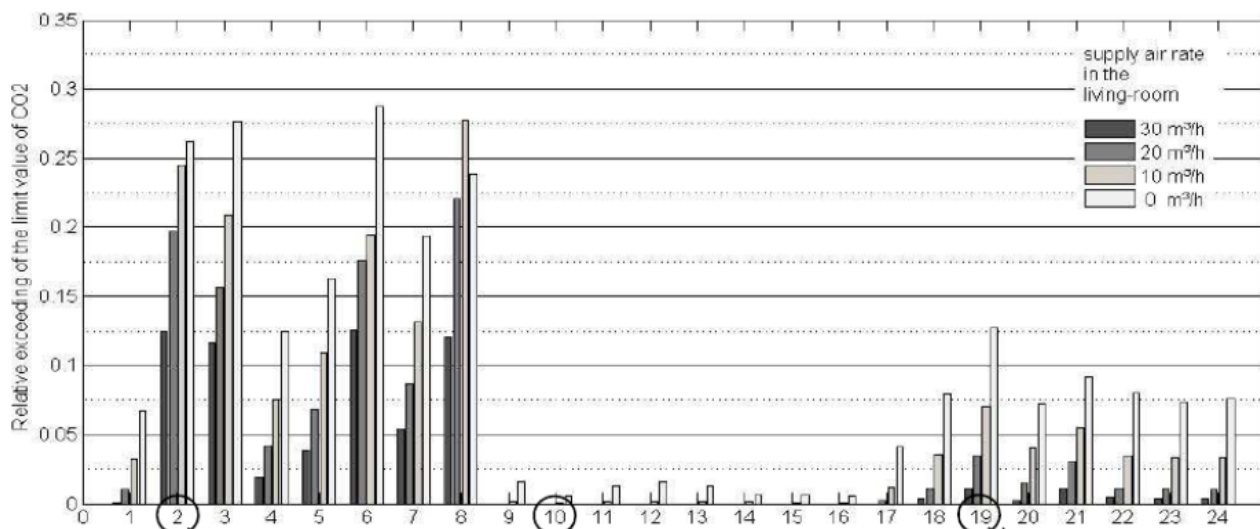
Tačiau neužtenka vien sumažinti oro kiekio norint, kad teršalų koncentracija nekeltų diskomforto patalpose. Siekiant pasiekti maksimaliai efektyvų rezultatą, reikia ir protingai sudėlioti patalpas pastate – neplanuoti svetainės toli nuo ištraukimo angų, nedaryti oro tiekimo difuzorių kitame namo gale nei yra švarioji – dažniau užimta pastato zona. G. Rojas skersinio vėdinimo tyrimo pagrindu [21] E. Sibille ir R. Pfluger išnagrinėjo priklausomybę nuo patalpų išdėstymo pastate ir CO₂ koncentracijos bei reikalingos oro kaitos, kad teršalų kiekis neviršytų normos [25], kai yra įrengta skersinio vėdinimo sistema.

Tyrimė atlikta 24 skirtingų variantų analizė panašaus dydžio individualiame name, keičiant svetainės, miegamųjų erdvių, virtuvės ar vonios vietas, atitinkamai taip pat keičiant ir oro tiekimo ir ištraukimo zonų vietas. Kadangi oras tiekiamas tik į miegamuosius ir svetainę, priklausomai nuo atstumo tarp šių dviejų patalpų ir oro ištraukimo vietų, keitėsi ir CO₂ koncentracija matavimo taškuose. Pagrindiniai trys patalpų išdėstymo variantai nurodyti 6 paveikslėlyje [25].



6 pav. Skirtingi patalpų išdėstymo variantai [25]

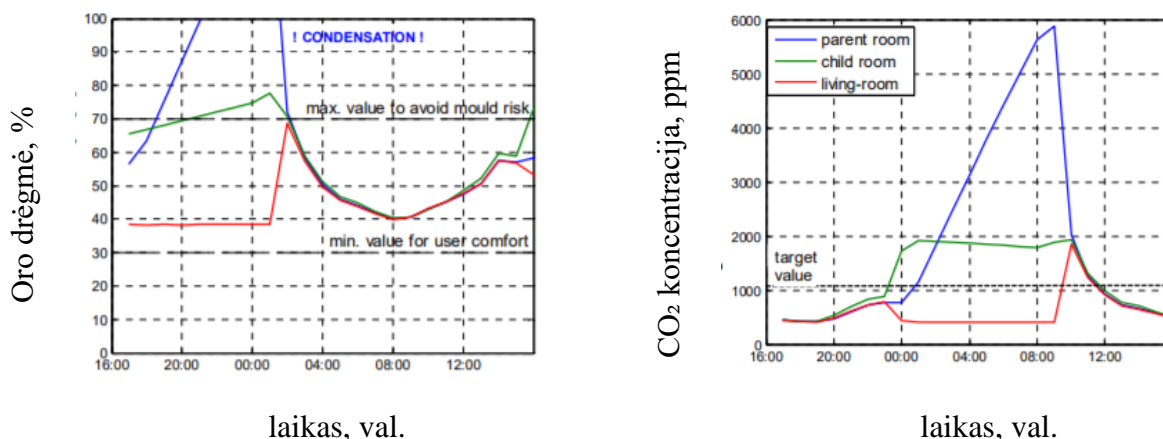
Priklausomai nuo švariųjų arba dažniau naudojamų zonų atstumo nuo tiekimo ir ištraukimo difuzorių, kilo ir teršalų kiekis labiausiai naudojamoje – svetainės zonoje. Nuo miegamųjų labiausiai nutolusioje svetainėje, tarp kurių oro judėjimas dar ir papildomai apribotas keliomis durimis (žr. 6a pav.), buvo didžiausia. Tuo tarpu (žr. 6b pav.) pavaizduotoje patalpų schemeje, kur iš abiejų pusių yra miegamieji, tarša svetainėje buvo mažiausia, kadangi atstumas nuo tiekimo zonos mažas. Koncentracijų vertės skirtingu paros metu, tiekiant skirtingą oro kiekį taip pat kinta pakankami stipriai priklausomai nuo patalpų užimtumo (žr. 7 pav.).



7 pav. Taršos kiekio priklausomybė nuo patalpų išdėstymo, naudojant skersinį vėdinimą [24]

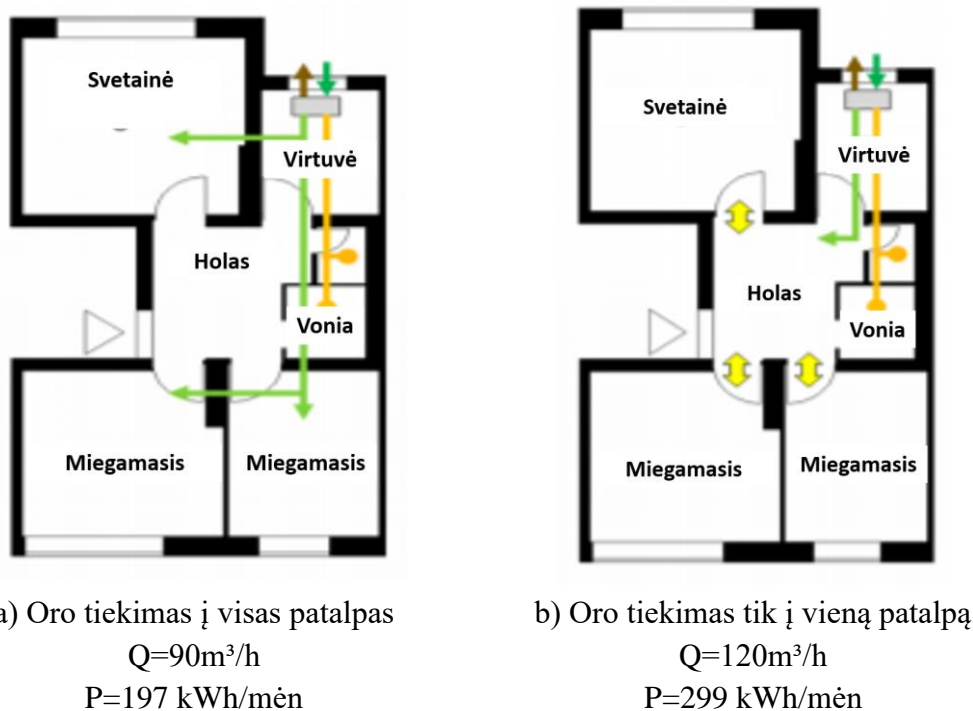
Galimas ir variantas, kai oras yra tiekiamas ne miegamajame ar svetainėje, o techninėje patalpoje ar koridoriuje. Ten padavus visą pastatui reikalingą šviežio oro kiekį, pavyzdžiui, 150 m³/h, jis į zonas, kuriose reikalingą tiekti šviežią orą, pereina tik per specialiai tam įrengtas pralaidas. Tokį bandymą savo tyrime atliko E. Sibille, F. Ochs ir R. Pfluger [26]. Tyrime iškelta hipotezė, kad tiekti orą galima tik vienoje pastato vietoje nepriklausomai nuo to, kaip patalpos išdėstytos. Taip sutaupoma medžiagų bei vietos, kurią užimtų sumontuoti ortakiai, kadangi šiuolaikinėje individualių namų interjero architektūroje yra labai populiari turėti kuo aukštesnes patalpas be lubų. Be to, aukštesnėse patalpose pagal naujausius tyrimus žmonės jaučiasi geriau [27].

Rodikliai, kurie buvo parinkti vėdinimo efektyvumo nustatymui – oro drėgmė ir CO₂ koncentracija (žr. 8 pav.) [26].



8 pav. Oro drėgmė ir CO₂ koncentracija patalpose, kai nėra tiesioginio oro tiekimo [26]

Galutiniame rezultate gauti skirtingų vėdinimo būdų palyginimai, priklausomai nuo pastato patalpų konfigūracijos. Tarp įprastinio ir skersinio vėdinimo didžiausi skirtumai matomi ties oro kiekiu, kuris vėdinant įprastai yra mažesnis, taip pat šiek tiek skiriasi elektros sąnaudos, kadangi vėdinimo įrenginys turi dirbti didesnėmis apšukomis ir sukelti didesnę slėgį norint, kad oras pritekėtų į visas patalpas be priverstinės cirkuliacijos, natūraliai (žr. 9 pav.) [26].



9 pav. Energijos sąnaudos prie skirtingų vėdinimo būdų [26]

Visuose nagrinėtuose, su skersiniu vėdinimu susijusiuose tyrimuose buvo nagrinėtos CO_2 koncentracijos, oro greičiai bei kiekiai, juose gauti rezultatai parodė, kad skersinis vėdinimas leidžia sumažinti oro kiekius, taip taupant medžiagas ir sąnaudas bei nedarant žalos žmogui ir jo sveikatai, savijautai pastate. Tačiau nepavyko rasti informacijos apie oro amžius tyrimus ir skaičiavimus, nors tai yra svarbu siekiant išnagrinėti kiek efektyvus ir nedarantis žalos žmogaus savijautai yra vėdinimas be atskirų tiekimo difuzorių svetainėje ar miegamajame. Oro amžius – tai laiko tarpas, per kurį nuo tiekimo angos jis pasiekia patalpos centrą. Tam išmatuoti, kartu su tiekiamu oru tiekiamos ir nenuodingos ir nesprogios dujos bei matuojama jų koncentracija. Taip, išmatavus per kiek laiko oras ateina iki matavimo taško ir per kiek laiko koncentracija ištraukiama iš patalpos, galima nustatyti oro amžių [28]. Kadangi skersinio vėdinimo atveju oras nuo tiekimo iki ištraukimo ortakių keliauja per beveik visą pastatą, realu, kad koncentracijos, nors ir neviršija leistinų, vis tiek per ilgai būna gyvenamojoje zonoje, o tai gali kenkti žmogaus sveikatai. Taip pat, žinant oro judėjimo priklausomybę nuo patalpos šildymo būdo, kuri nagrinėtuose tyrimuose taip pat nebuvo vertinta, realu, kad rezultatai šiek tiek skirtųsi nuo atliktų tyrimų – dėl šildymo keliamo oro judėjimo ir didesnio maišymosi, galimai tik dalis jo nueitų link ištraukimo difuzorių, o kita dalis pasiliktų toje patalpoje.

3. Metodologija

Skyriuje aprašomi pasirinkti metodai ir būdai, kurie buvo naudojami tikrinant hipotezę, kad šildymo sistemos tipas gali turėti įtakos skersinio vėdinimo efektyvumui. Taip pat aptariami naudoti efektyvumo rodikliai, jų apskaičiavimas bei tam reikalingų parametų nustatymas. Aprašyta pirminių bandomųjų skaitinių modelių kūrimo eiga, eksperimentinio metodo metu naudota laboratorija bei tyrimo eiga, identiško jai skaitinių skysčių dinamikos modelių pagrindiniai parametrai bei jų patikimumo tikrinimas.

3.1. Vėdinimo efektyvumo rodikliai ir tyrimų planas

Tiriant vėdinimo sistemas, galima nagrinėti tiekiamo oro temperatūrą, koncentracijas patalpoje, oro judėjimo greičius, jų pokyčius skirtingose vietose patalpoje, tačiau vien iš šių rodiklių sunku nusakyti ar vėdinimo sistema iš tiesų yra efektyvi. Dėl šios priežasties, panaudojant gautas koncentracijų, temperatūrų reikšmes, sistemų efektyvumas yra apskaičiuojamas, gaunant aiškesnes išraiškas, parodančias ar tinkamai veikia vėdinimo sistema. Tiriamajame projekte skaičiuojamas vėdinimo sistemos efektyvumas ε , įvertinantis santykį tarp tiekiamo ir ištraukiamo oro užterštumo ir pagal tai nusprendžiant ar pakankamai patalpoje yra šviežio oro.

Vėdinimo sistemos efektyvumas ε nurodo koncentracijų ar temperatūrų santykį tarp tiekiamo, ištraukiamo ir iškvepiamo oro. Pagal jį galima nuspręsti, kaip gerai teršalai yra šalinami iš patalpos ir atskiedžiami šviežiu oru. Tyrime šis rodiklis skaičiuojamas trimis skirtingais būdais, kurie leis įvertinti vėdinimo efektyvumą skirtingose zonose.

Pirmasis iš jų apskaičiuojamas naudojant ištraukiamo oro C_e ir oro, esančio patalpos centre, 1,1 m aukštyje, koncentracijų C_{oc} santykį, ir apskaičiuojama pagal formulę:

$$\varepsilon_{oc} = \frac{C_e}{C_{oc}} \quad (1)$$

čia C_e – teršalų koncentracija ištraukiamame ore;

C_{oc} – teršalų koncentracija patalpos viduryje, 1,1 m aukštyje.

Taip pat vėdinimo efektyvumas skaičiuojamas ir pagal ištraukiamo C_e ir įkvepiamo oro C_{in} koncentracijų santykį, naudojant formulę:

$$\varepsilon_{in} = \frac{C_e}{C_{in}} \quad (2)$$

čia C_{in} – teršalų koncentracija įkvepiame ore, 30 cm nuo žmogaus 1,1 m aukštyje.

Vertinant kaip efektyviai yra atskiedžiami teršalai taip pat vertinamas koncentracijų santykis tarp patalpos centro oro ir įkvepiamo oro koncentracijų:

$$\varepsilon_{oc}^{in} = \frac{C_{in}}{C_{oc}} \quad (3)$$

Gautos reikšmės nurodo efektyvumą ir teršalų atskiedimą. Jei gauta ε reikšmė yra lygi 1,0, tai reiškia, kad oras atskiedžiamas gerai. Jei ε vertė yra mažesnė už 1,0 – tai parodo, kad teršalai patalpoje kaupiasi ir ištraukiamame ore yra per daug CO₂ dalelių. Esant vertei didesnei už 1,0, oras atskiedžiamas idealiai [29]. Tiriant patalpą eksperimentiškai, realiomis sąlygomis, vėdinimo

efektyvumas apskaičiuojamas matuojant vertes prie oro tiekimo, ištraukimo angų bei prie teršalų šaltinio (žmogaus). Modeliuojant variantus skaitiniu metodu, tas pats atliekama naudojant matavimo taškų modelyje vertes.

Tyrimams atlikti sukurti deriniai tarp skirtingų šildymo ir vėdinimo sistemų, taip pat nustatytos pradinės sąlygos, reikalingos jiems (žr. 1 lentelę).

1 lentelė. Šildymo sistemų ir vėdinimo schemų deriniai

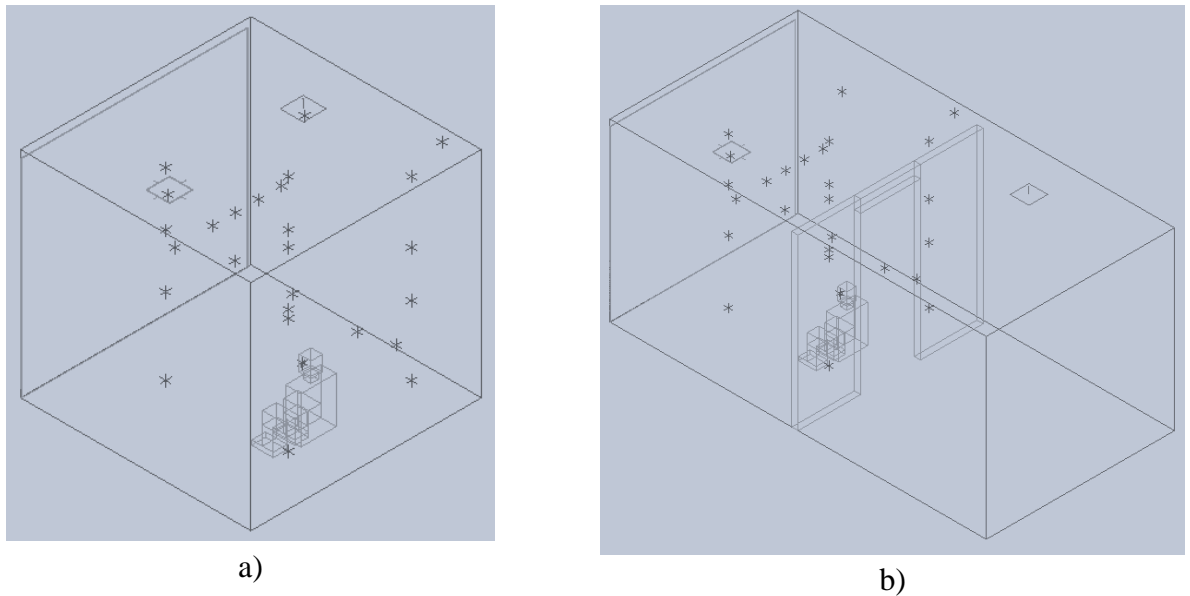
Šildymo būdas	Oro balanso tipas	Patalpos oro apykaita, h ⁻¹	Patalpos oro temp., °C	Taršos šaltinis	Patalpos išorės sienų temp., °C	Patalpos vidaus sienų temp., °C
Be šildymo	Įprastas	1 h ⁻¹	-	Žmogus, CO ₂	17	20
	Skersinis					
Radiatorinis	Įprastas		20 °C			
	Skersinis		25 °C (grindų temp.)			
Grindinis	Įprastas		25 °C (tiekiamo oro temp.)			
	Skersinis					
Orinis	Įprastas					
	Skersinis					

3.2. Bandomasis skaitinis metodas hipotezės patikrai

Siekiant patikrinti hipotezę, kad šildymo sistemos tipas daro įtaką skersinio vėdinimo efektyvumui, sukurti pirminiai skaitiniai modeliai. Modeliams sukurti panaudota skaitinės skysčių dinamikos modeliavimo programinė įranga *FloVENT* (*Siemens*, JAV).

Pirminiai modeliai yra dažnai kuriami ir kituose moksliniuose tyrimuose. Jų tikslas yra susikurti bazinį modelį, kuriame nesistengiant išgauti idealaus tikslumo, yra sukuriamos preliminarios, abstrakčios sąlygos, kurios leidžia gauti pirminius rezultatus ir parodo ar tikslinga eksperimentą tęsti toliau [28]. Pirminiuose modeliuose buvo nagrinėjami du patalpų variantai – 3x3x3 m patalpa, kurioje yra oro tiekimas, ištraukimas, žmogus, išskiriantis teršalus. Kitas variantas – tai patalpa 3x6x3 m, kurios viduryje yra 120 mm storio pertvara su 2x1 m anga viduryje, sukurta naudojant „cuboid“ funkciją. Abiejuose variantuose viena siena buvo modeliuojama „šalta“, kuri atliko išorinės sienos funkciją. Jos temperatūra buvo nustatyta 17 °C. Kitų sienų temperatūros – lygios patalpos temperatūrai (20 °C). Oro kiekis, kuris buvo tiekiamas ir ištraukiamas – 7,5 l/s (1 h⁻¹). CO₂ koncentracija tiekiamame ore buvo numatyta 400 ppm. Bandomajame modelyje buvo nagrinėti variantai tik su vėdinimu, keičiant tiekiamo oro temperatūrą, be atskiro šilumos šaltinio. Pagrindinis taršos šaltinis patalpoje – sėdintis žmogus, kurio matmenys tokie patys kaip modelio laboratorijoje. Jis išskiria 85 W šilumos, o 1,1 m aukštyje, kuriame sėdintis žmogus iškvepia orą, numatyta 40000 ppm CO₂ koncentracija (žr. 10 pav.).

Turbulencijos modelis, kuris buvo pasirinktas bandomojo modelio skaičiavimuose – K-epsilon. Tinklelio tankumas – 150000 celių.

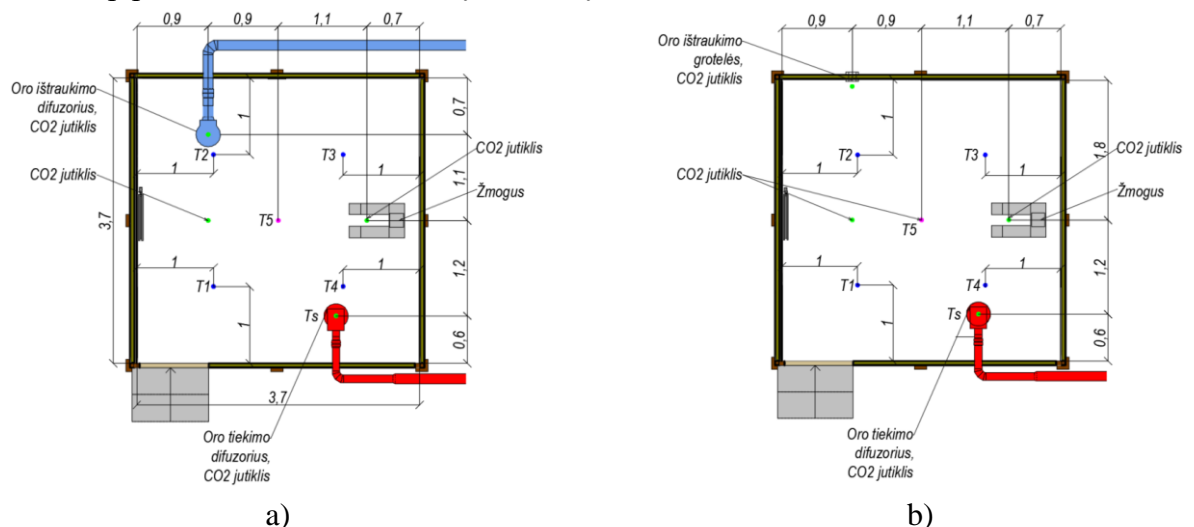


10 pav. Bandyto kameros modelis a) įprastinis vėdinimas b) skersinis vėdinimas

3.3. Eksperimentinis metodas

Eksperimentiniai tyrimai atlikti Pastatų energetikos ir mikroklimato laboratorija ir joje esančioje tyrimų kameroje. Laboratorijoje yra visa pagrindinė įranga patalpų mikroklimatui užtikrinti ir tirti: vėdinimo įrenginys *Swegon Gold 04*, ortakių tinklas ir difuzoriai, nedidelė uždara patalpa, oro srautų, koncentracijų, temperatūrų matuokliai, reguliavimo sklendės sistemai balansuoti.

Kameros plotis ir ilgis yra 3,6 m, aukštis yra 2,8 m. Kameros plotas – 12,96 m², tūris – 36,288 m³. Dvejomis patalpoms bei oro judėjimui tarp jų atvaizduoti, patalpos sienoje buvo įrengtos 200x250 mm dydžio grotelės, 150 mm pakeltos nuo grindų, per kurias užtikrinamas 1 - 2 m/s greitis bei pagal efektyvų jų plotą numatytas pratekantis 36m³/h oro kiekis. Taip imituotas oro judėjimas iš vienos patalpos į kitą per tarpus (durų, langų, sienų), kurio greitis turi būti toks pat kaip ir turėtų būti prie oro šalinimo grotelių. Įprasto vėdinimo atveju buvo naudojami difuzoriai, įrengti patalpoje – vienas skirtas oro tiekimui, kitas ištraukimui (žr. 11 pav.). Kadangi patalpoje buvo vienas žmogus, jam numatomas oro kiekis pagal EN15251 standartą – 10 l/s, kuris užtikrina A kategorijos oro kokybę [30]. Tai taip pat užtikrins ir vienkartinę oro kaitą.



11 pav. Bandyto kamera a) įprastinis vėdinimas b) skersinis vėdinimas

Taršos šaltinis eksperimento metu buvo žmogus, dirbantis IA kategorijos darbą, kuris, pagal HN69:2003, nereikalauja papildomos fizinės įtampos sėdint, bei kurį atliekant neišsiskiria didesnė šilumos ir teršalų kiekiai [31]. Šalia jo įkvėpimo ir iškvėpto oro pasisklaidymo zonos sustatyti CO₂ davikliai, kurie rinks duomenis apie oro kokybę žmogaus kvėpavimo zonoje. Kadangi remiantis tyrimais, iškvėpiamo oro koncentracija nusistovi iki panašios, kokį orą žmogus įkvėpia apie 25 cm nuo burnos [32], CO₂ daviklis statomas būtent tokiu atstumu. Davikliai taip pat numatomi patalpos centre, prie ištraukimo difuzoriaus ir grotelių (priklausomai nuo vėdinimo tipo), patalpos pakraštyje. Žmogaus paviršiaus temperatūra turėtų būti apie 35- 36 °C.

Prieš pradėdant eksperimentą, pirmiausiai nustatytos eksperimentinės sąlygos – subalansuojama vėdinimo sistema, nustatomi oro kiekiai, kurie turi būti tiekiami ir ištraukiami patalpoje. Laboratorijoje sumontuotos kelių tipų reguliavimo sklendės – įprastos, su cinkuotos skardos mentele, be išankstinio nustatymo ir matavimo antgalių bei sklendės su nustatymo padalomis (*Halton*, JAV), pagal kurias galima apskaičiuoti oro srautą, einantį per ortakį. Prie jų yra ir montavimo antgaliai, prie kurių prijungus slėgio matuoklį *Fluke 922* (JAV) su Pitot vamzdeliu, pagal slėgių skirtumą, gaunamą tarp patalpos ir ortakio, apskaičiuojamas oro kiekis:

$$Q_v = k * \sqrt{\Delta p_m} \quad (4)$$

čia Q_v – oro kiekis, m³/h;

k – K faktorius, nurodantis sklendės pralaidumą;

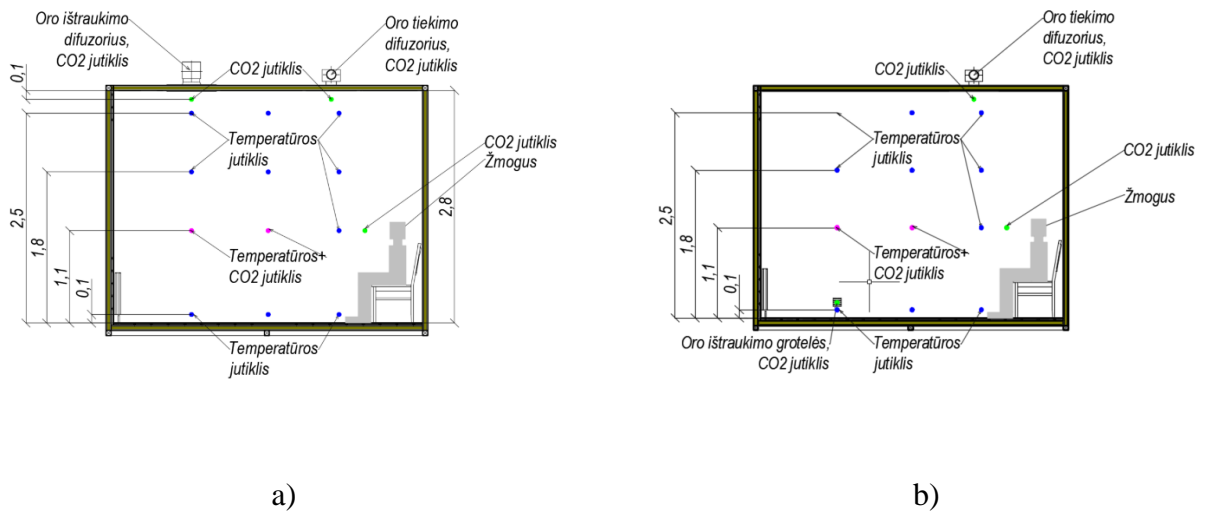
Δp – slėgio skirtumas tarp ortakio ir patalpos.

Taip pat vėdinimo sistema balansuojama ir per apvalius difuzorius, šiek tiek prispaudus ar atleidus difuzoriaus lėkštelę ir taip padidinat pasipriešinimą orui patekti į patalpą. Oro kiekis ties difuzoriumi matuojamas oro greičio ir srauto matuokliu *Testo 417* (JAV) su gaubtu, kurio matavimo ribos nuo 0,3 m/s iki 20 m/s. Priklausomai nuo tiriamo varianto, nustatoma ir tiekiamo oro temperatūra, keičiant ją padidinus vandeninio šildytuvo galią vėdinimo įrenginyje. Pradinė tiekiamo oro temperatūra matuojama naudojant termooanemometrą *Testo 425* (JAV), priglaidus jį prie difuzoriaus ir matuojant matavimo taškuose, esančiuose ortakiuose. Eksperimento metu temperatūra buvo matuojama su temperatūros jutikliu, įdėtu į difuzorių.

Tam, kad būtų gautos nusistovėjusios sąlygos, prieš eksperimento pradžią vėdinimo įrenginys buvo įjungiamas ir iš anksto nustatytu pajėgumu dirbo 4 valandas, kas 1 valandą patikrinant, ar per difuzorius tiekiamas oro kiekis ir jo temperatūra nekinta ir nesikeičia nuo balansavimo metu nustatyto srauto. Tokiu būdu išvengiama rezultatų šokinėjimo pradėjus eksperimentą, kadangi iškart yra gaunamos panašios srauto ir temperatūros reikšmės, o tai reiškia, kad ir patalpos temperatūra yra nusistovėjusi ir eksperimento metu galimai keisis tik dėl papildomo šilumos šaltinio (žmogaus) sukeltamų konvekcinį srautų.

Pradėjus eksperimentą, matuojamos temperatūros ir koncentracijos. Joms nustatyti bus naudojami CO₂ koncentracijų ir temperatūros jutikliai perduodantys signalus į duomenų talpyklą. CO₂ koncentracijų vertės bus gaunamos naudojant duomenų kaupiklius *DataLogger U3430* (*Comet*, JAV), kurių matavimo paklaida yra ± 50 ppm, o ribos, kuriose gali matuoti yra nuo 0 iki 5000 ppm. Jie buvo išdėstyti prie žmogaus kvėpavimo zonos, patalpos centre, prie ištraukimo difuzoriaus ir grotelių, 1,1 m aukštyje (žr. 11 pav.). Termodavikliai *DS18B20* (*Dallas Semiconductor*, JAV), kurių

paklaida yra ± 0.5 °C, matavimo ribos - 10 ÷ + 85 °C, matuos aplinkos temperatūrą. Jie išdėstyti ant stovų patalpos pakraščiuose, atitraukus nuo kraštų po 1 m, bei patalpos centre. Taip pat vienas daviklis pastoviai matavo tiekiamo oro temperatūrą. Aukščiai, kuriuose numatomi davikliai – 0,1 m (ties kulkšnimis); 1,1 m (sėdinčio žmogaus įkvėpimo zonoje); 1,8 m (stovinčio žmogaus įkvėpimo zonoje); 2,5 m (palei lubas) (žr. 12 pav.). Šie davikliai davė signalus apie temperatūros skirtinguose aukščiuose bei leido apskaičiuoti temperatūrų gradientus, kurie gali turėti įtaką koncentracijų pasiskirstymui, oro judėjimui.



12 pav. Bandymų kameros pjūvis a) įprastinis vėdinimas b) skersinis vėdinimas

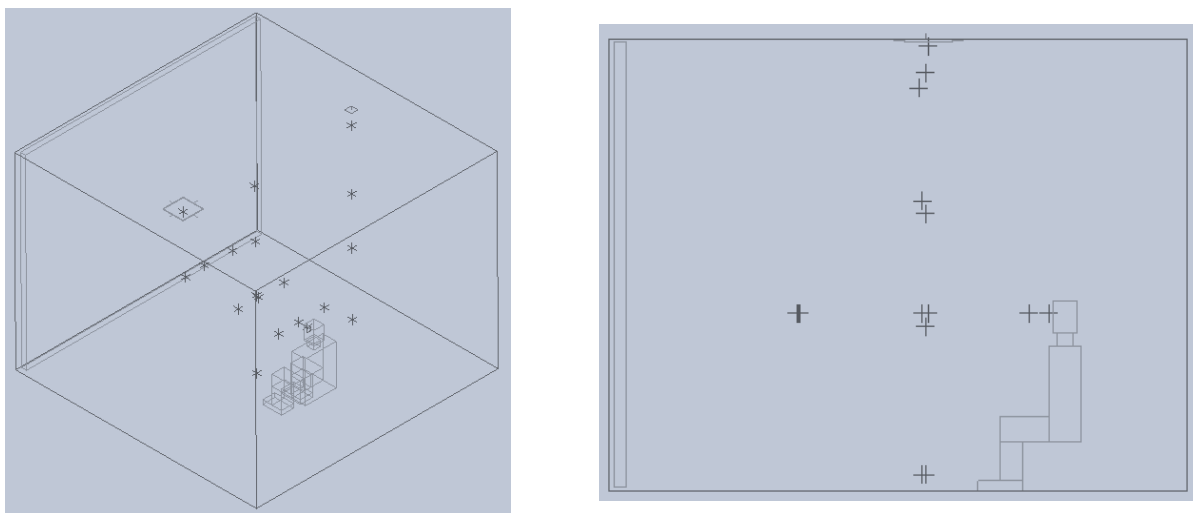
Eksperimento trukmė nusistovėjus sąlygoms numatoma 3 valandos, per kurias patalpoje pastoviai sėdėjo žmogus. Pasibaigus bandymo laikui, nuskaityti daviklių duomenys, suvedami į rezultatų lenteles, tuomet tikrinama, kuriuo metu rezultatai kito mažiausiai, t. y. rodiklių kreivės nebekilo ir nebekrito. Laikas, kurio įskaitinės vertės yra naudojamos, yra 20 minučių [34]. Iš gautų rezultatų vidurkio reikšmių apskaičiuojami reikalingi rodikliai. Eksperimentas kartojamas pritaikius kitas sąlygas patalpoje – pakeitus vėdinimo ar šildymo būdą, prieš tai pilnai atstačius pradines sąlygas.

3.4. Tyrimų kameros skaitinis modelis

Siekiant gauti modelį, kurio duomenys gali būti palygintas su eksperimento metu gautais rezultatais, *FloVENT* skaitinės skysčių dinamikos programine įranga sukuriama CFD modeliai, kurie atvaizduotų tiksliai sąlygas, kokios buvo nagrinėjamos ir eksperimentinio metodo metu. Gautus rezultatus galima lyginti su realiomis sąlygomis gautais duomenimis. Modeliams parinkti turbulencijos tipai K-epsilon, kadangi jie tiksliausiai nurodo oro judėjimą ir pasiskirstymą, bei sąlygomis, kai aplinkoje daugiausiai yra turbulentinis oro judėjimas, yra tiksliausias [33].

Tyrimų kameros CFD modelio matmenys atitinka eksperimento metu naudotos patalpos matmenis – 3,6 x 3,6 x 2,8 m, tūris – 36 m³. Tiek modeliuojant skersinį, tiek įprastinį vėdinimą, oro tiekimo ir ištraukimo difuzorių vietos – identiškos kaip ir realioje tyrimų kameroje, suformuotos naudojant fiksuoto oro srauto ir stačiakampio difuzoriaus detales. Skersinio vėdinimo metu oro ištraukimo grotelės modeliuotos kaip fiksuotas oro srautas, kuris imituoja tarpą tarp durų ir grindų. Žmogus patalpoje sukurtas naudojant „cuboid“ funkciją, jo išskiriama šiluma apie 85W, kūno temperatūra – 35-36 °C bei įkvėpimo zonoje numatant CO₂ koncentraciją, kurios dydis yra 40000 ppm. Matavimo

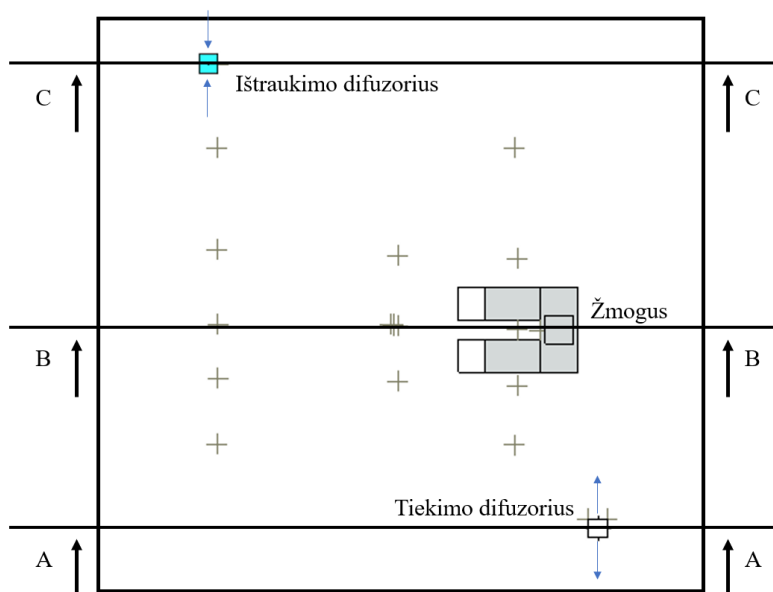
taškai, kaip ir eksperimentinio tyrimo metu, numatyti tose pačiose vietose – 0,1 m, 1,1 m, 1,8 m, 2,5 m patalpos centre, kraštuose atitrukus po 1 m nuo sienų, taip pat prie tiekimo, ištraukimo difuzorių, žmogaus kvėpavimo zonoje (žr. 13 pav.).



13 pav. Tyrimų kameros CFD modelio izometrinis vaizdas ir vertikalus pjūvis

Siekiant gauti kuo didesnio tikslumo modelį, buvo nuosekliai didinamas celių, kuriuose atliekami matavimai ir kurių skaičius nulemia rezultatų realistiškumą, skaičius. Celių skaičius buvo didinamas iki 140000-150000 vnt., kol rezultatai nusistovėjo ir vertės tuose pačiuose taškuose nebekito.

Norint pateikti kuo platesnius ir aiškesnius rezultatus, paremtus skaitinių modelių duomenimis, kameroje padaryti trys pjūviai (žr. 14 pav.) – per tiekimo difuzorių (pjūvis A-A), per žmogų (pjūvis B-B) ir per ištraukimo difuzorių (pjūvis C-C). Pjūviai pateikiami prie kiekvieno tyrimo varianto rezultatų. Matant reikšmes skirtinguose taškuose ir patalpos vietose pagrindiniuose aiškiau galima įsivaizduoti kaip teršalai bei temperatūros prie kiekvieno varianto sklaidosi ir juda patalpoje.



14 pav. Tyrimų kameros pjūviai rezultatams pateikti

3.5. Skaitinių modelių patikimumo vertinimas

Nors skaitinės skysčių dinamikos modeliai turėtų atvaizduoti realias sąlygas, tačiau daugelio mokslininkų tyrimų, kuriuose jų iškeltos hipotezės tikrinamos ir eksperimentiniu, ir skaitiniu metodu, metu, gautų rezultatų vertės tarpusavyje yra palyginamos, siekiant patikrinti CFD modelio patikimumą [35].

Dažniausiai patikimumas yra tikrinamas lyginant pagrindines tiriamąsias vertes, šiuo atveju tai yra CO₂ koncentracijos, vertikalus temperatūrinis gradientas, oro greitis prie tiekimo difuzoriaus. Priklausomai nuo tyrimo srities, gali būti nagrinėjamos ir kitos mikroklimato savybės – drėgmė, oro judėjimo patalpoje greitis [36].

CO₂ koncentracijų ir temperatūrinio gradiento vertės buvo lyginamos pagal ant identiškose vietose abiejų metodu metu numatytų temperatūros ir koncentracijų daviklių rodmenis. Oro greičio prie tiekimo difuzoriaus palyginimui bus sudaromas greičio ir oro judėjimo profilis, kuriam reikalingos vertės taip pat gaunamos eksperimento metu ir skaitiniame modelyje. Eksperimento metu oro greitis matuojamas naudojant termoanemometrą *Testo 425* (JAV), matuojant vertes nuo difuzoriaus keturiomis kryptimis, kas 5 centimetrus.

Verčių atitiktis apskaičiuojama naudojant procentinės neatitikties išraišką:

$$PE = \left| \frac{(x_e - x_{cfd})}{x_e} \right| * 100\% \quad (5)$$

čia: x_e - eksperimentiniu metodu gautos reikšmės;

x_{cfd} – skaitiniu metodu gautos reikšmės.

3.6. Šildymo sistemos įtakos vėdinimo sistemos efektyvumui tyrimas

Gavus rezultatus iš eksperimentinių ir skaitinių tyrimų, kuriuose nagrinėtas įprastas ir skersinis vėdinimas nenaudojant jokios šildymo sistemos ir tiekiant patalpos temperatūros orą, toliau naudojant skaitinės skysčių dinamikos modelius kuriami variantai keičiant vėdinimo sistemų tipus kameroje bei nagrinėjant jų įtaką efektyvumui.

Modeliuojami trys skirtingi šildymo tipai, pritaikomi abejoms vėdinimo schemoms – radiatorinis, grindinis ir orinis šildymas per vėdinimo sistemą. Radiatorinis šildymas atvaizduojamas sukuriant dėžę iš „cuboido“, kuris išskiria 400 W šilumos, bei kurio paviršiaus temperatūra 40 °C [37]. Grindinis šildymas modeliuojamas „low Y“ (grindų) paviršiui priskiriant 25 °C temperatūrą, bei nustatant, kad šiluma nuo paviršių perduodama ir spinduliavimu. Orinis šildymas modeliuojamas tiekiamo oro temperatūrą pakeliant iki 25 °C. Visais kitais šildymo atvejais, tiekiamo oro temperatūra nustatoma 19 °C.

Tiek žmogus, tiek matavimo taškai patalpoje numatyti tokie patys, kaip ir eksperimentiniame tyrime naudoti. Tai leidžia gauti reikšmes, kurių palyginimas parodys konkrečius skirtumus tarp vėdinimo ir šildymo sistemų skirtingų konfigūracijų naudojant įprastinį ir skersinį vėdinimą.

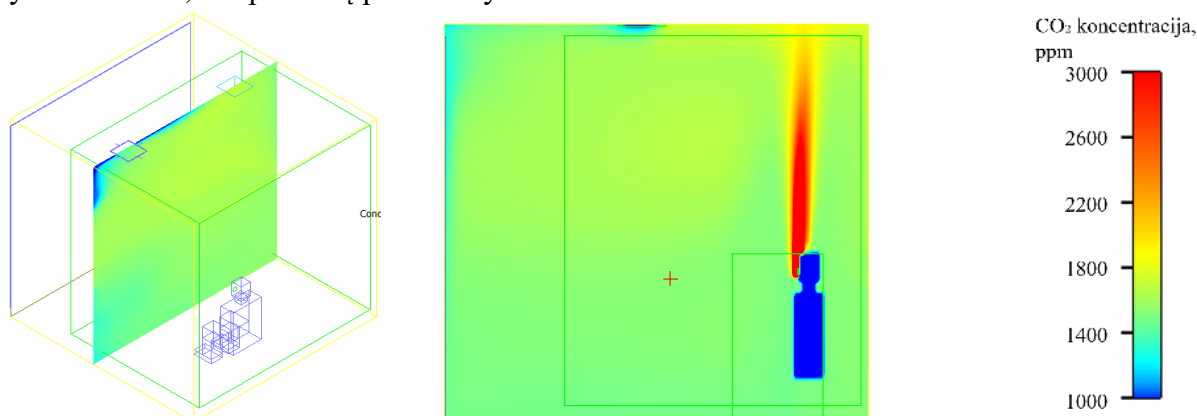
4. Rezultatai, diskusija

Pirmiausia pateikiami teršalų koncentracijų rezultatai ir temperatūriniai gradientai iš bandomųjų skaitinių modelių, kurie buvo skirti hipotezei patvirtinti arba atmesti. Po to pateikiami eksperimentinių ir skaitinių tyrimų laboratorijoje rezultatai, apskaičiuojami skaitinių modelių patikimumai. Modeliams taikant skirtingus šildymo sistemų būdus, gaunamos tendencijos dėl šildymo sistemos įtakos vėdinimo efektyvumui. Paskutiniame poskyryje pateikiamas ekonominis vėdinimo sistemų vertinimas.

4.1. Bandomųjų skaitinių modelių rezultatai

Bandamuosiuose skaitiniuose CFD modeliuose buvo gauti rezultatai iš keturių tiriamųjų variantų: vėdinimas be šildymo ir įprastinis oro balansas; vėdinimas be šildymo ir skersinis oro balansas; vėdinimas su šildymu ir įprastinis oro balansas; vėdinimas su šildymu ir skersinis oro balansas. Visų jų metu buvo tiriami koncentracijų pasiskirstymai, vertės, vėdinimo sistemos efektyvumas.

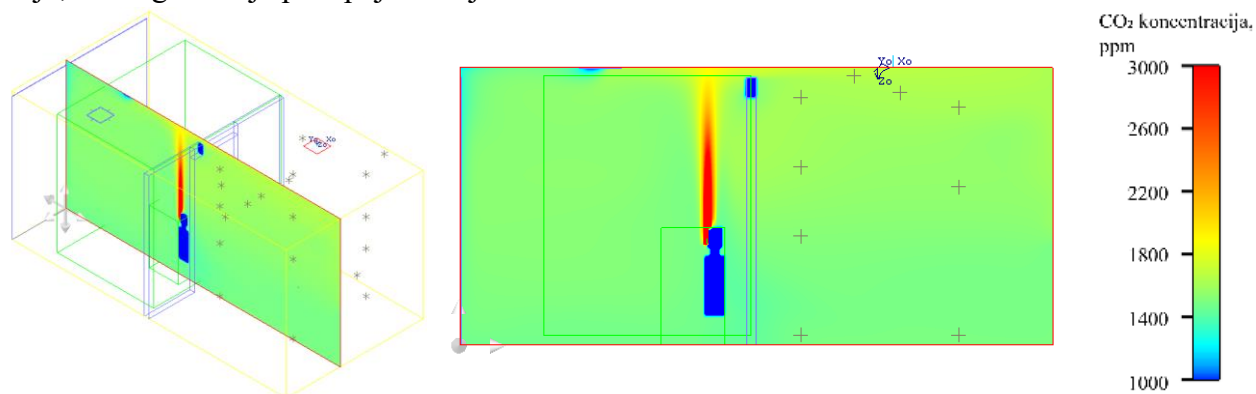
Nagrinėjant patalpą be šildymo sistemos ir naudojant įprastinį vėdinimą (žr. 15 pav.), CO₂ koncentracijos prie oro tiekimo ir ištraukimo angų buvo atitinkamai 400 ppm ir 2340 ppm. Vidutinė CO₂ 1,1 metro aukštyje žmogaus įkvėpimo zonoje buvo 2117 ppm, ir 2087 ppm patalpos centre. Nors vidutinės koncentracijų vertės vertinamame aukštyje yra dvigubai didesnės, tačiau vietinis vėdinimo sistemos efektyvumo rodiklis tarp ištraukiamo ir įkvepiamo oro (C_e/C_{in}) parodė, kad šviežio oro kiekis patalpoje yra pakankamas ir teršalai atskiedžiami efektyviai – gauta ϵ vertė – 1,11. Vietinis rodiklis, kuris lygina oro kokybę prie ištraukimo difuzoriaus ir darbo zonoje (C_e/C_{oc}) buvo 1,13. Tai reiškia, kad nors ir teršalų patalpoje yra per daug ir jų vertės galimai daro blogą įtaką žmogui, vėdinimas vis tiek yra pakankamai gerai veikiantis. Pagal tai padaryta išvada, kad oro kiekis į patalpą prie tokios oro taršos yra pakankamas ir didinti jo nereikia. Kadangi nagrinėjamas variantas yra be šildymo sistemos, temperatūrų pasiskirstymai nevertinami.



15 pav. CO₂ koncentracijos, kai įprastinis vėdinimas be šildymo, kai oro kaita 1 h⁻¹

Palyginimui sukurtas modelis, kai vėdinimo sistema be patalpos šildymo, tiekiamo oro temperatūra 20 °C, naudojant skersinį vėdinimą, kai oro padavimas ir ištraukiamas yra skirtingose patalpose ir oro kaita – 1 h⁻¹ (žr. 16 pav.). Šiuo atveju CO₂ koncentracija prie oro ištraukimo angos – 1640 ppm, vidutinė koncentracija įkvėpimo zonoje – 1188 ppm. Vietinis vėdinimo efektyvumo rodiklis (C_e/C_{oc}) gautas 1,38, ir jis yra geresnis už įprastą vėdinimą. Tai gali būti įtakota to, kad per didesnę patalpos tūrį teršalai pasiskirsto laisviau ir dėl to prie ištraukimo angų koncentracijos mažesnės. Taip pat įtaką

daro ir tai, kad teršalų kiekio ir patalpos tūrio santykis yra dvigubai mažesnis nei įprasto vėdinimo atveju, kadangi antroje patalpoje nėra jokio taršos šaltinio.



16 pav. CO₂ koncentracijos, kai skersinis vėdinimas be šildymo, kai oro kaita 1h⁻¹

Tiriant patalpas su oriniu šildymu ir oro temperatūrą pakėlus iki 25 °C, žymių pokyčių rezultatuose nebuvo gauta. Vėdinant patalpą įprastiniu ir skersiniu vėdinimu prie ištraukimo angos CO₂ koncentracija buvo atitinkamai 2280 ir 1390 ppm, vidutinė koncentracija įkvėpimo zonoje – 2040 ir 1171 ppm, o vertės panašios kaip ir įprastinio vėdinimo metu. Tendencija, kaip ir tiekiant 20 °C orą, liko ta pati ir vėdinimo efektyvumas gautas 1,11 ir 1,38, kas reiškia tinkamai veikiančią vėdinimo sistemą, bei efektyvesnį skersinį vėdinimą. Tai gali įtakoti, kad skirtumas tarp bandymų su ir be šildymo nėra didelis ir tiekiamo oro temperatūrų skirtumas yra tik 5 °C, taip pat ir temperatūriniai gradientai gauti panašūs, todėl galima daryti išvadą, kad orinis šildymas nedaro įtakos koncentracijų vertėms darbo, įkvėpimo zonoje, prie ištraukimo angų, nesukelia papildomo teršalų judėjimo patalpoje.

Galutinių rezultatų lentelėje nr. 2 pradeda matytis pirminės, taip pat ir kitų mokslininkų jau tirtos, tendencijos. Lyginant koncentracijas priklausomai nuo to, kur yra ištraukimo difuzorius, patalpoje esant vienam taršos šaltiniui, pavyzdžiui, žmogui, koncentracija prie oro šalinimo angos yra didesnė apie 300 ppm. Taip pat, matomas net geresnis vietinis vėdinimo sistemos efektyvumas patalpas vėdinant skersiniu vėdinimu. Nors tai gali būti įtakota to, kad bandomajame modelyje taršos šaltinis yra tik vienas ir jis yra kitoje patalpoje, nei ištraukimo difuzorius, tačiau tai vis tiek gali būti realus variantas. Lyginant su įprastiniu vėdinimu, šiuo atveju patalpos tūris yra didesnis du kartus, o koncentracija išlikusi ta pati, todėl per didesnę tūrį teršalai turi daugiau oro, su kuriuo gali atsiskiesti ir taip sumažinti taršos kiekį.

2 lentelė. Bandomųjų CFD modelių rezultatai

Vėdinimo sistemos tipas, oro kaita h ⁻¹	Šildymo būdas	Vertikalus gradientas	Bendrosios koncentracijos			Koncentracijos įkvėpimo zonoje				Koncentracijos užimtoje zonoje				Vėdinimo efektyvumas, kai teršalų vieta žinoma		
			C _s , ppm	C _e , ppm	C _i , ppm	C ₁ , ppm	C ₂ , ppm	C ₃ , ppm	C _{inh} , ppm	C ₁ , ppm	C ₂ , ppm	C ₃ , ppm	C _{oc} , ppm	C _e /C _{oc}	C _e /C _{inh}	C _{inh} /C _{oc}
Įprastinis, 1 h ⁻¹	Be šildymo	0,7	400	4000	2340	2080	2110	2160	2118	2080	2110	2070	2087	1,13	1,11	1,01
Skersinis, 1 h ⁻¹					1640	1130	1150	1240	1188	1140	1255	1179	1191	1,38	1,40	0,98
Įprastinis, 1 h ⁻¹	2280	2040			2020	2030	2040	2040	2055	2041	2045	1,11	1,12	0,99		
Skersinis, 1 h ⁻¹	1390	1220			1170	1160	1171	1200	1185	1210	1198	1,16	1,19	0,98		
	Orinis šildymas	0,96														

4.2. Eksperimentinio ir skaitinio metodų rezultatai

Eksperimentinio metodo metu gauti rezultatai iš dviejų variantų – įprasto ir skersinio vėdinimo bandymų be šildymo. Abiejų tyrimų metu gautos koncentracijos iš skirtingų zonų: įkvėpimo (C_{inh}), patalpos centro (C_{oc}) ir zonos prie ištraukimo difuzoriaus (C_{exh}), kurios naudojamos vėdinimo efektyvumui įvertinti. Skaitiniame kameros modelyje gauti rezultatai iš identiškų patalpos vietų.

Eksperimentinėmis sąlygomis įprasto vėdinimo metu, su vienkartinė oro kaita patalpoje (subalansavus sistemą tiekiamo ir ištraukiamo oro kiekis buvo $36\text{m}^3/\text{h}$), nusistovėjusi tiekiamo oro temperatūra gauta $19,3\text{ }^\circ\text{C}$. Temperatūrinis gradientas patalpos centre gautas $0,68$ (žr. 18 pav.), kuris atitinka kitų mokslininkų darbuose aprašytas reikšmes [38]. CO_2 koncentracijų vertės per 3 valandas eksperimento patalpos centre keitėsi nuo 696 iki 1067 ppm (žr. 17 pav.). Nusistovėjusiomis sąlygomis laikomi ir įskaitiniai rezultatai imami iš paskutinių 20 eksperimento minučių, kai CO_2 vertės kito minimaliai (nuo 1017 iki 1055 ppm). Tiekiamame ore anglies dvideginio koncentracija buvo 455 ppm. Įkvėpimo zonoje koncentracija buvo $C_{inh} = 1034$ ppm, patalpos centre $C_{oc} = 1027$ ppm. Vidutinė koncentracija patalpos ore ties ištraukimo difuzoriumi C_e buvo gauta 1081 ppm. Vėdinimo sistemos efektyvumas, kai patalpoje nėra atskiro šildymo prietaiso ir į ją tiekiamas $19,3\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros oras gautas $1,05$ (C_e/C_{in} ir C_e/C_{oc}), C_{in}/C_{oc} vertė gauta $1,01$, o tai reiškia, kad teršalai kameroje yra atskiedžiami labai gerai, tiekiamo ir ištraukiamo oro kiekio esamai taršai pašalinti ir atskiedžiami šviežiu oru pakankamai.

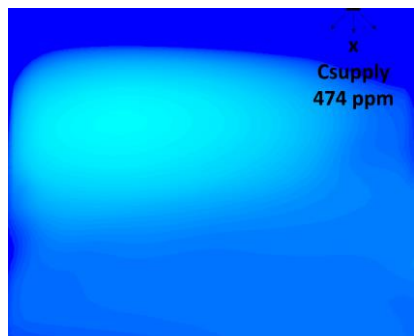
Atlikus CFD modeliavimus įprastam vėdinimui be atskiro patalpos šildymo identiškomis sąlygomis eksperimentui, gauti rezultatai ir tendencijos sutapo su gautomis realiomis sąlygomis (žr. 17 pav.). Tiekiamo oro temperatūra gauta $19\text{ }^\circ\text{C}$, temperatūrinis gradientas – $0,68$ (sutampa su eksperimento metu gautuoju). Tiekiamame ore tiriamo teršalo koncentracija gauta 474 ppm, C_{inh} CO_2 vertė gauta 958 ppm, C_{oc} buvo lygi 972 ppm, o gautas ištraukiamo oro užterštumas C_e gautas 1080 ppm. Vėdinimo efektyvumas C_e/C_{in} ir C_e/C_{oc} gautas $1,11$, įkvėpimo zonos patalpos centro koncentracijų C_{in}/C_{oc} vertė gauta $0,99$. Visais atvejais gauti rezultatai rodo, kad sistema veikia puikiai įprasto vėdinimo atveju.

Eksperimento metu tiriant skersinį vėdinimą, oro kaita ir tiekiamo oro temperatūra buvo išlaikyta ta pati kaip ir įprasto vėdinimo metu – $36\text{ m}^3/\text{h}$ ir $19,3\text{ }^\circ\text{C}$. Temperatūrinis gradientas patalpos viduryje taip pat gautas identiškas – $0,68\text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$. Patalpos centre per 3 valandas eksperimento koncentracijos svyravo nuo 1015 iki 1055 ppm. Tiekiamame ore CO_2 vidutinė koncentracija gauta 470 ppm. Įkvėpimo zonoje vidutinė koncentracija gauta 1110 ppm, patalpos centre – 1119 ppm, o prie ištraukimo angos teršalų kiekis gautas – 1158 ppm. Vėdinimo efektyvumas C_e/C_{in} ir C_e/C_{oc} su gautomis reikšmėmis gautas $1,03$, C_{in}/C_{oc} vertė gauta $0,99$, kas reiškia efektyvią vėdinimo sistemą.

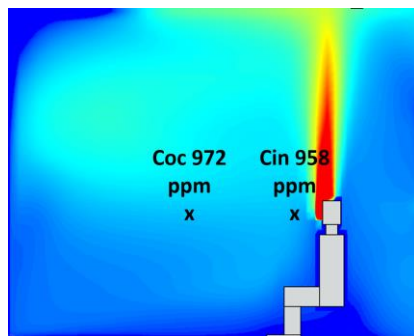
Skaitiniame modelyje gautos tendencijos panašios į eksperimento meto gautąsias. Tiekiamame ore esanti CO_2 koncentracija – 473 ppm, įkvėpimo zonoje – 1070 ppm, patalpos centre – 1100 ppm, prie ištraukimo angos – 1189 ppm. Vėdinimo efektyvumas C_e/C_{in} gautas lygus $1,08$, $C_e/C_{oc} = 1,11$, C_{in}/C_{oc} vertė gauta $0,97$.

ĪPRASTINIS

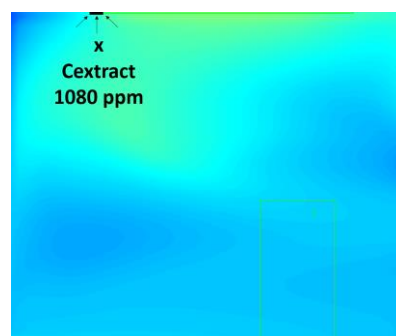
CFD| A-A



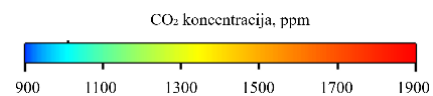
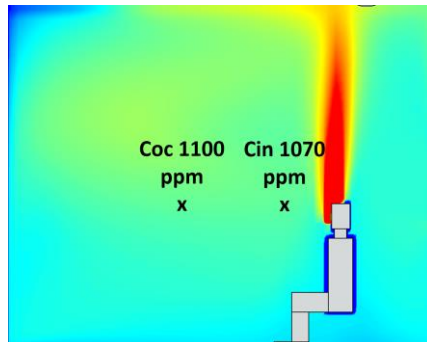
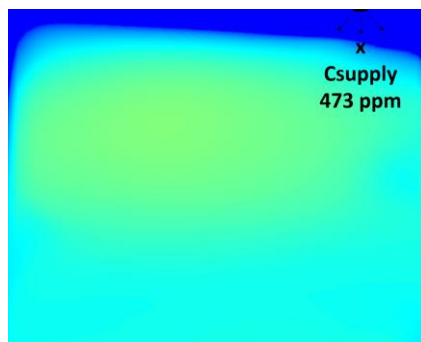
CFD| B-B



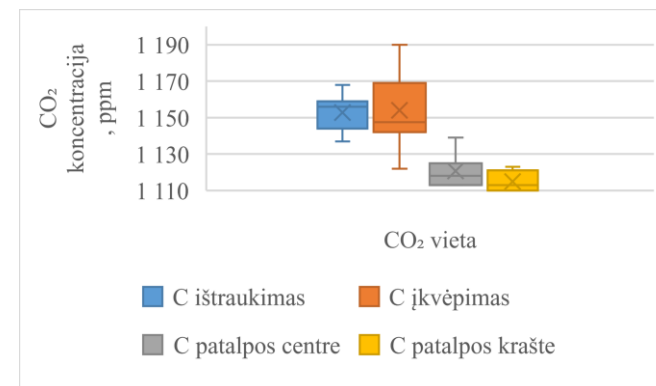
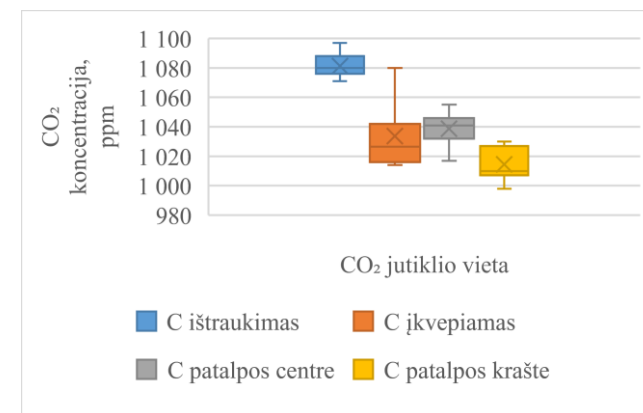
CFD| C-C



SKERSINIS



Eksperiments

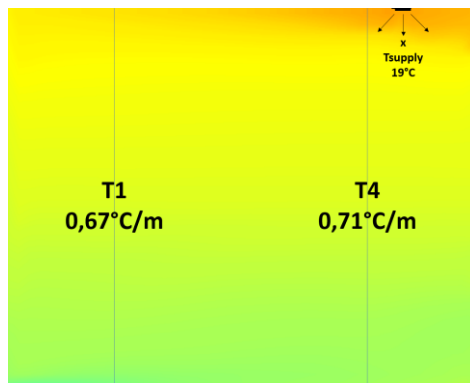


17 pav. Īprastais un skersinis vādināms be šildymo, CO₂ koncentrācijas CFD modelē un eksperimenta metu

ĮPRASTINIS

SKERSINIS

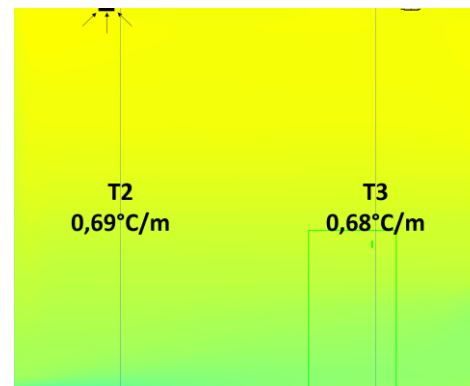
CFD| A-A



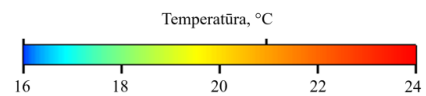
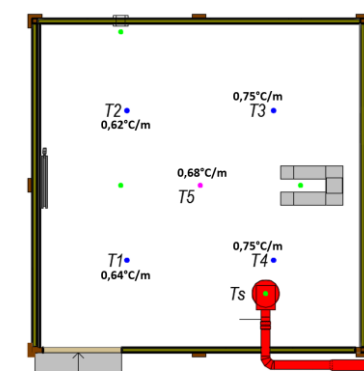
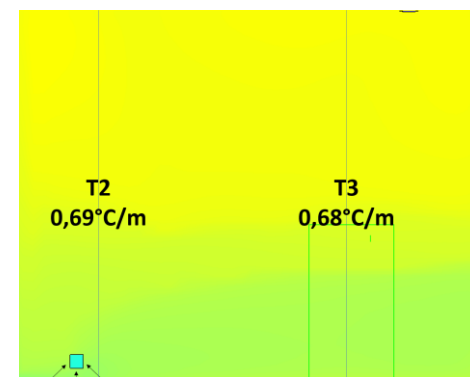
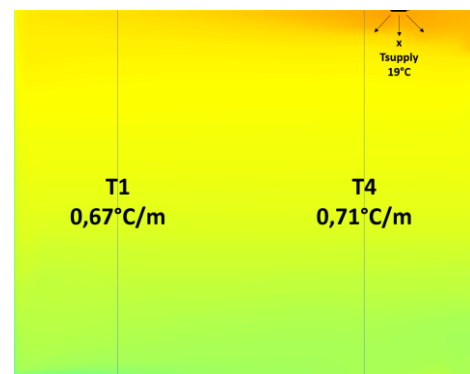
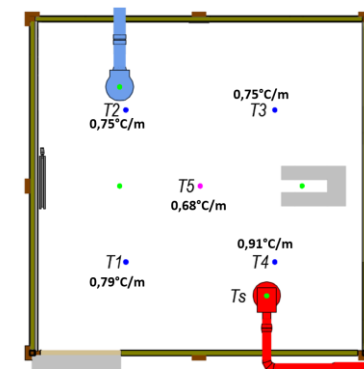
CFD| B-B



CFD| C-C



Ekspertas|



18 pav. Įprastas ir skersinis vėdinimas be šildymo, temperatūriniai gradientai CFD modelyje ir eksperimento metu

Iš gautų rezultatų matomos tendencijos, kurios buvo aptartos ir nagrinėjant kitų mokslininkų darbus – nors patalpas vėdinant skersiniu būdu koncentracijos gali būti nežymiai didesnės, vėdinimo efektyvumas vis tiek nenukrenta žemiau 1, kas reiškia efektyvią vėdinimo sistemą (žr. 3 lentelę). Taip pat, iš gautų rezultatų galima matyti, kad vėdinimo schema parinkta patalpai neįtakoja temperatūrų pasiskirstymo joje, temperatūriniai gradientais visais atvejais gauti identiški. Tačiau ištraukimo grotelių vieta šiek tiek keičia koncentracijų pasiskirstymą per patalpos tūrį. Tai gali būti nulemta kelių priežasčių – kadangi didesnė dalis oro nuo patalpoje esančių paviršių dėl jų konvekcijos kyla į viršų, o ištraukimo grotelės vis tiek yra apačioje, dėl to teršalų dalelės, pradėję kilti į viršų yra traukiamos atgal į apačią, link angos, taip didžiąją dalį laiko būdamos patalpos centre, kur ir yra fiksuojamas koncentracijų padidėjimas. Tokios tendencijos gautos tiek eksperimentinio, tiek skaitinio tyrimo metu.

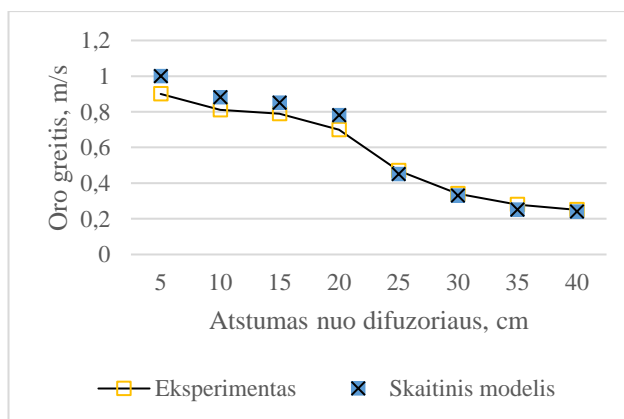
3 lentelė. Eksperimento ir skaitinių modelių rezultatai

Vėdinimo sistemos tipas, tyrimo etapas	Vertikalus temperatūrinis gradientas, °C/m	Tiekiamo oro C_{supply} , ppm	Koncentracijos			Vėdinimo efektyvumas		
			Ištraukiamo oro $C_{extract}$, ppm	Kvėpavimo zonoje C_{inh} , ppm	Patalpos centre C_{oc} , ppm	C_e/C_{in} , ppm	C_e/C_{oc} , ppm	C_{in}/C_{oc} , ppm
Įprastas, eks.	0,7	455	1081	1034	1027	1,05	1,05	1,01
Įprastas, skait.	0,7	474	1080	953	972	1,11	1,13	0,99
Skersinis, eks.	0,7	470	1158	1110	1119	1,03	1,04	0,99
Skersinis, skait.	0,7	473	1189	1070	1100	1,08	1,11	0,97

4.3. Skaitinių modelių patikimumo įvertinimas

4.3.1. Oro judėjimo greitis

Eksperimento metu gautos 8 reikšmės keturiomis skirtingomis kryptimis oro judėjimo greičių prie tiekimo difuzoriaus. Vidutinis greitis buvo gautas 0,56 m/s, greitis prie difuzoriaus gautas 0,98 m/s, o 40 cm nuo jo vidutiniškai oras judėjo 0,21 m/s greičiu. CFD modelyje vidutinis gautas greitis – 0,59 m/s, greitis prie difuzoriaus – 1,1 m/s, 40 cm atstumu nuo jo – 0,24 m/s. Naudojant šiuos duomenis, kiekvienos reikšmės patikrinama naudojant procentinės paklaidos formulę. Pagal ją vidutinė paklaida gauta 8%, kas rodo aukštą modelio patikimumą tikrinant eksperimentinius ir skaitinius oro greičių pasiskirstymo rezultatus. Panašiuose tyrimuose, kuriuose nagrinėjamos vėdinimo sistemos, taip pat gautos panašios paklaidos. [39]

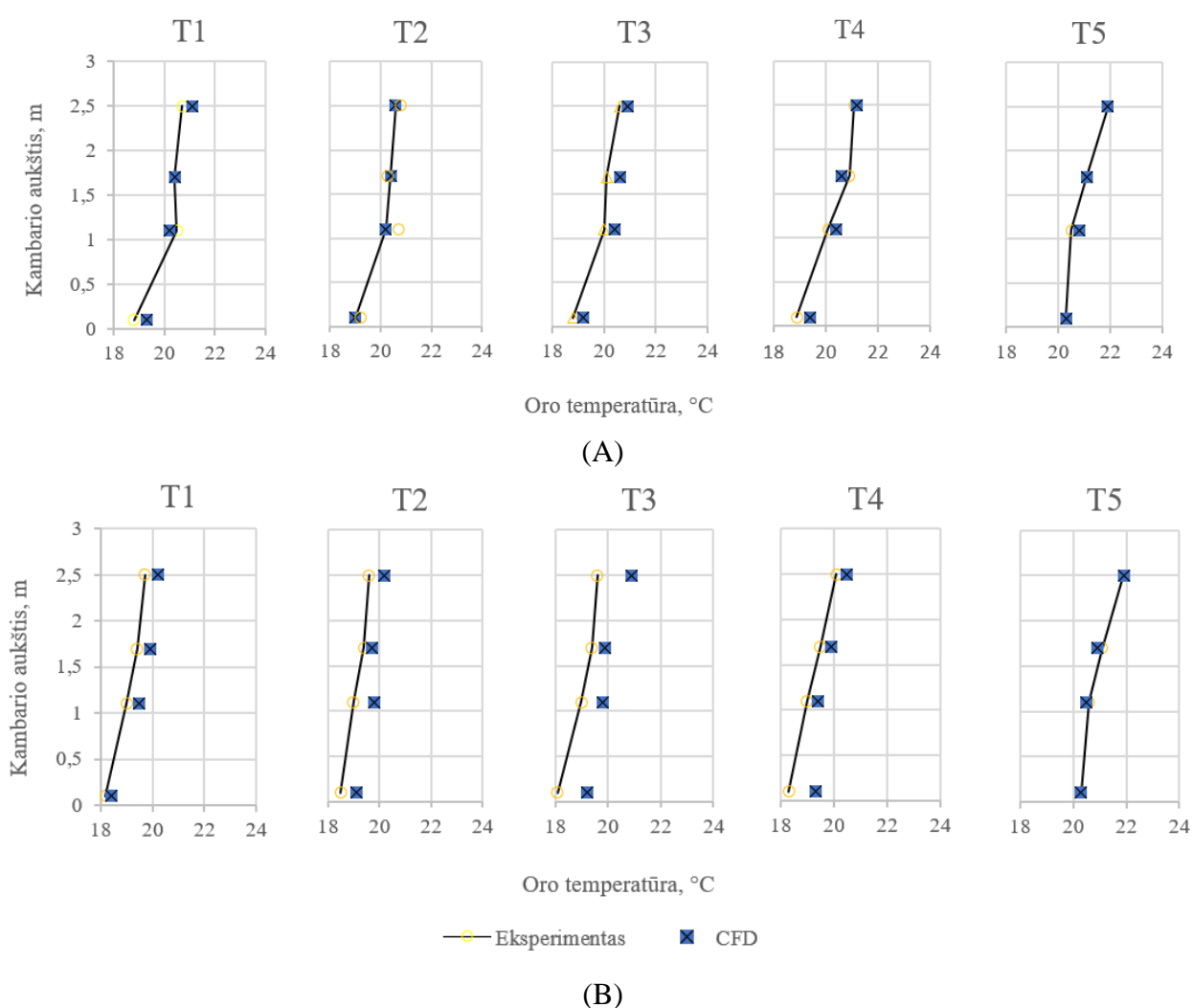


19 pav. Oro judėjimo greičio palyginimas eksperimento ir skaitinio modeliavimo metu

4.3.2. Temperatūriniai gradientai

Tiek eksperimentinio, tiek skaitinio tyrimo metu patalpoje matavimams naudoti 5 stovai (T1, T2, T3, T4, T5), kurie matavo temperatūrą tose pačiose vietose. Lyginami variantai įprastinio ir skersinio vėdinimo, kai atskiro šildymo sistemoje nėra ir į patalpą tiekiamas 19 °C temperatūros oras. Vidutinis įprastinio vėdinimo temperatūrinis gradientas patalpos centre eksperimento metu gautas 0,78 °C/m, skaitinio modeliavimo metu – 0,83 °C/m (žr. 20a pav.). Iš to gauta, kad procentinė temperatūrinio gradiento paklaida – 10%.

Lyginant skersinio vėdinimo rezultatus, gautas temperatūrinis gradientas eksperimentinių tyrimų metu – 0,85 °C/m, o skaitinio modeliavimo metu patalpos centre jis buvo 0,75 °C/m (žr. 20b pav.). Pagal tai gauta procentinė paklaida – 12%. Lyginant su kitų mokslininkų tyrimais, šios paklaidos yra pakankamai nedidelės ir tenkinančios sąlygas.



20 pav. Temperatūriniai gradientai eksperimento ir skaitinio modeliavimo metu: A) įprastas vėdinimas B) skersinis vėdinimas

4.3.3. CO₂ koncentracijos

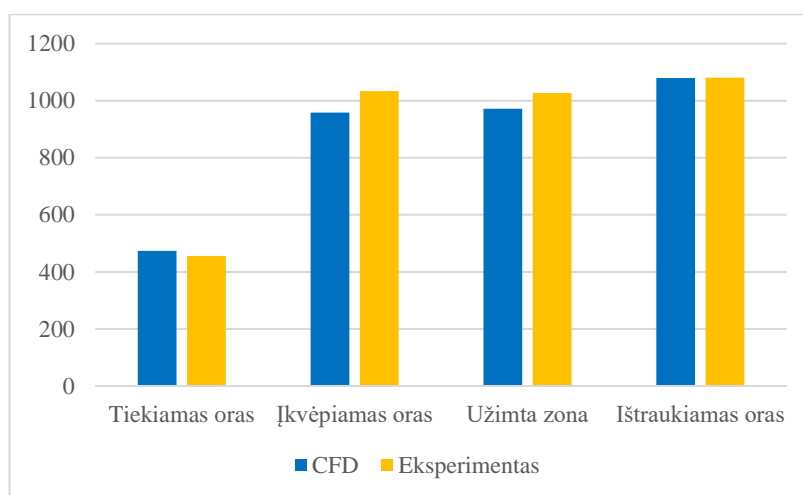
Nors tyrime labiau akcentuojamas vėdinimo efektyvumas, tačiau tai yra santykinis dydis, parodantys tik santykį tarp koncentracijų neatsižvelgiant į jų dydžius. Tikrinant modelių patikimumą naudojamos

CO₂ reikšmės. Lyginami 3 taškai – kvėpavimo zona, patalpos centras ir ištraukimo difuzoriaus koncentracija.

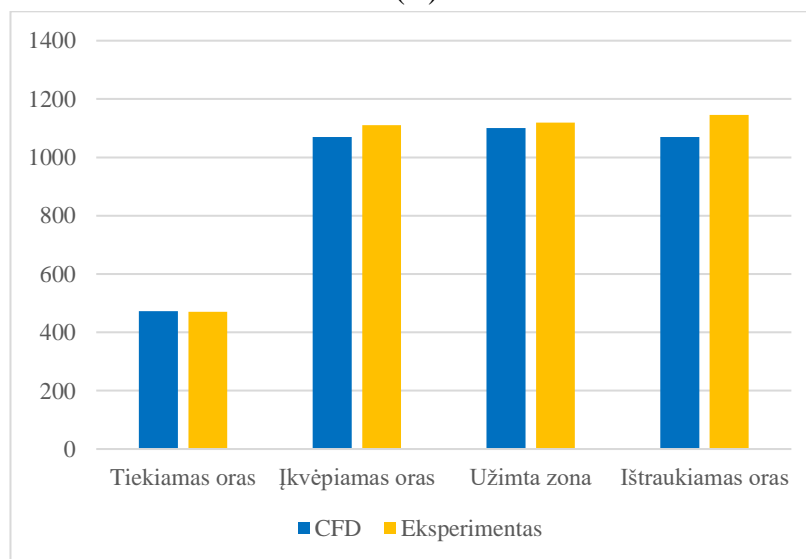
Įprastinio vėdinimo rezultatai tarp eksperimento skyrėsi nuo 5 iki 7%. CO₂ koncentracijos tiekiamame ore skyrėsi 5% (455 ppm ir 474 ppm), patalpos centre – 5% (1081 ppm ir 1030 ppm), įkvėpimo zonoje – 7% (1034 ppm ir 955 ppm) (žr. 21a pav.). Bendras įprastinio vėdinimo neatitikimas siekė 6%.

Skersinio vėdinimo tyrimų metu koncentracijų neatitikimas svyravo nuo 1 iki 9%. CO₂ koncentracijos tiekiamame ore skyrėsi 1% (470 ppm ir 474 ppm), patalpos centre – 2% (1119 ppm ir 1110 ppm), įkvėpimo zonoje – 4% (1110 ppm ir 1070 ppm) (žr. 21b pav.). Bendras įprastinio vėdinimo neatitikimas siekė 5%.

Gauti rezultatai iš dalies sutampa su kitų mokslininkų darbais, todėl galima laikyti, jog sukurtas modelis yra patikimas ir su juo galima tęsti tolimesnius modeliavimus keičiant patalpos sistemų konfigūracijas.



(A)



(B)

21 pav. CO₂ eksperimento ir skaitinio modeliavimo metu: A) įprastas vėdinimas B) skersinis vėdinimas

4.4. Šildymo sistemos įtaka vėdinimo efektyvumui

Atlikus eksperimentinį ir skaitinį tyrimus taikant įprastinį ir skersinį vėdinimą bei gavus pradines tendencijas iš jų, kuriami CFD modeliai, kurie atvaizduotų skirtingus šildymo sistemų tipus bei parodytų jų įtaką vėdinimo efektyvumui [39].

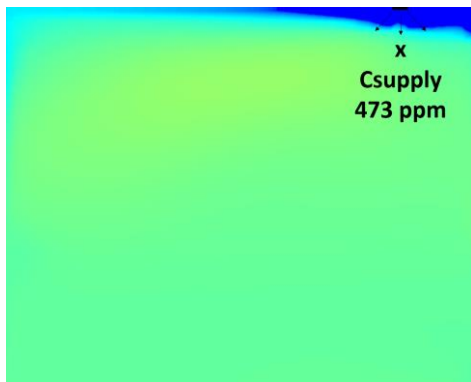
Tiekiamo oro temperatūrą pakėlus nuo 19 °C iki 25 °C, taip imituojant orinį šildymą per vėdinimo sistemą patalpoje, gauti rezultatai ženkliai nekito ir tendencija išliko ta pati – įprastinis vėdinimas efektyvesnis ($\epsilon=1,11$) nei skersinis ($\epsilon=1,09$). Skersinio vėdinimo metu įkvėpimo zonoje koncentracija gauta apie 100 ppm didesnė už įprastinio vėdinimo metu gautą (1127 ppm ir 1207 ppm) (žr. 24 pav.). Taip pat gautas 100 ppm padidėjimas abejais vėdinimo atvejais, kuris gali būti paveiktas šiltesnio tiekiamo oro didesnio judėjimo patalpoje, lyginant su variantu be šildymo. Temperatūrinis gradientas patalpos centre – 0,96 (žr. 25 pav.), jis beveik sutampa su literatūros analizėje nagrinėtomis orinio šildymo savybėmis ir tiek įprastinio, tiek skersinio vėdinimo atveju buvo vienodas, dėl ko galima teigti, jog vėdinimo tipas nedaro įtakos temperatūroms patalpoje [10].

Šildymo tipą pakeitus į radiatorinį, pradėjo matytis ryškesni skirtumai, kurie atsiranda priklausomai nuo šildymo būdo. Kadangi radiatorinis šildymas patalpoje sukėlė konvekcinius srautus, jie papildomai maišo ir judina orą. Įprastiniu būdu vėdinant patalpą, konveciniai srautai, veikiantys aukštesnėje patalpos dalyje (virš 1,1m), stumia CO₂ koncentracijas link ištraukimo difuzoriaus, todėl įkvėpimo zonoje vėdinimo efektyvumas yra geras ($\epsilon=1,05$), koncentracijos įkvėpimo zonoje vyrauja apie 841 ppm, prie ištraukimo difuzoriaus 880 ppm. Skersiniu vėdinimu vėdinant patalpą oras yra traukiamas link apatinės patalpos dalies, tačiau vėdinimo efektyvumas taip pat yra virš 1 ($\epsilon=1,03$). Koncentracijos įkvėpimo zonoje gautos apie 864 ppm, prie ištraukimo angos – 890 ppm, o tai yra beveik vienodos reikšmės vėdinant abiem metodais. Lyginant su oriniu šildymo, vėdinimo efektyvumas yra žemesnis, kadangi dėl papildomų konvekcinių srautų oras daugiau juda ir maišosi darbo zonoje bei sunkiau eina link ištraukimo grotelių (žr. 24 pav.). Tačiau verta paminėti, kad koncentracijos nagrinėjamuose taškuose taip pat buvo žemesnės lyginant su visais kitais šildymo būdais, ką taip pat galima paaiškinti konvekciniu srautu, kuris juda nuo radiatoriaus link patalpos viršaus ir sutraukia visus teršalus link savęs, kas matavimo taškuose sukuria mažesnes koncentracijų vertes.

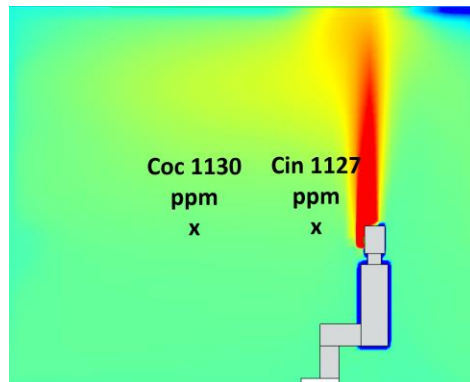
Patalpoje sumodeliavus grindinį šildymą, taip pat atsirado skirtumai, kurie gali būti paveikti dėl nuo šilto grindų paviršiaus susidarančių spinduliuojančių srautų. Jie tolygiai pasidalina per visą patalpos aukštį, dėl ko koncentracijos per visą patalpos aukštį taip pat yra panašios. Verta paminėti, kad matomas skirtumas prie skersinio vėdinimo ir šiuo atveju jis yra efektyvesnis ($\epsilon=1,1$), kadangi tolygiai kylantis srautas vienodai pasiskirsto per patalpą, o sunkesnės CO₂ dalelės, įtraukiamos į išspinduliuotą srautą, yra lengvai patraukiamos link ištraukimo grotelių palei grindis, taip daug neišsimašant į orą prie žmogaus įkvėpimo zonos, 1,1 m aukštyje. Skersinio vėdinimo metu gautos koncentracijos kvėpavimo zonoje – 993 ppm, prie ištraukimo angos – 1050 ppm. Įprasto vėdinimo efektyvumas - $\epsilon=1,04$, jo metu gauta CO₂ koncentracija kvėpavimo zonoje – 991 ppm, prie ištraukimo difuzoriaus – 1030 ppm (žr. 26 pav.)

ĪPRASTINIS

CFD| A-A



CFD| B-B

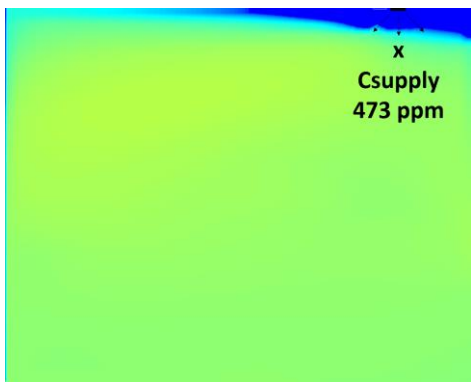


CFD| C-C

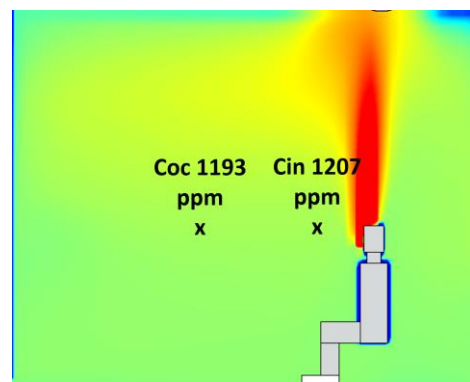


SKERSINIS

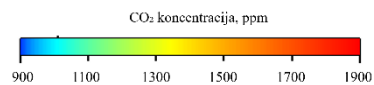
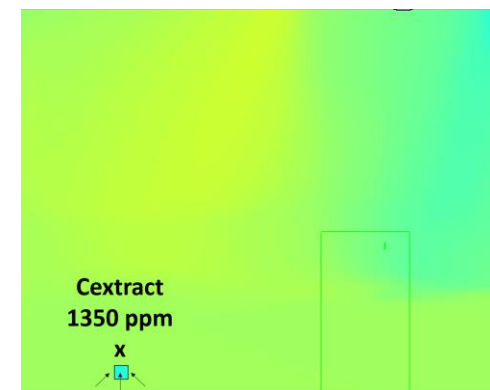
CFD| A-A



CFD| B-B



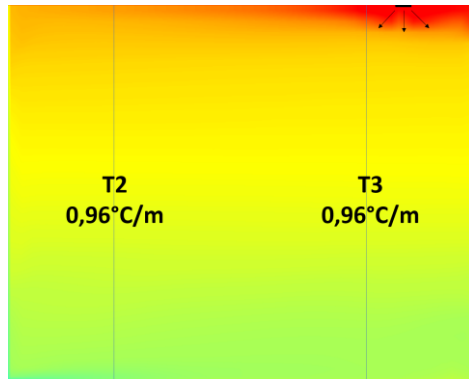
CFD| C-C



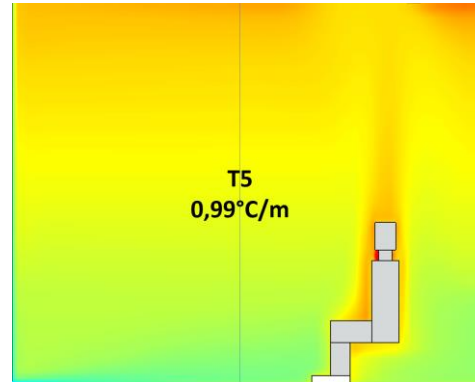
22 pav. Īprastais ir šķersinis vēdināšanas veids ar orīnu šildīšanu, CO₂ koncentrācijas

ĪPRASTINIS

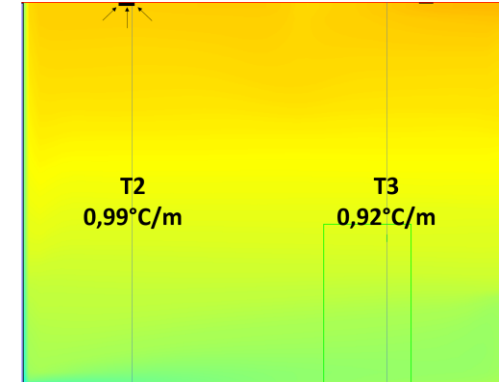
CFD| A-A



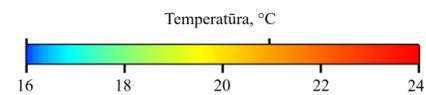
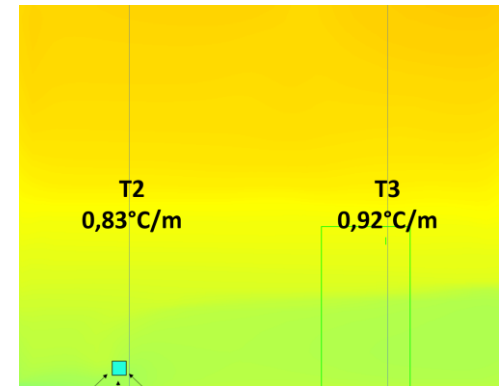
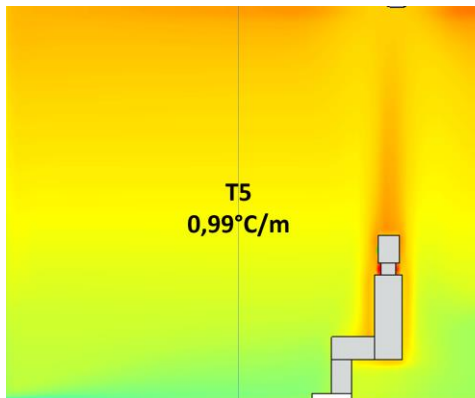
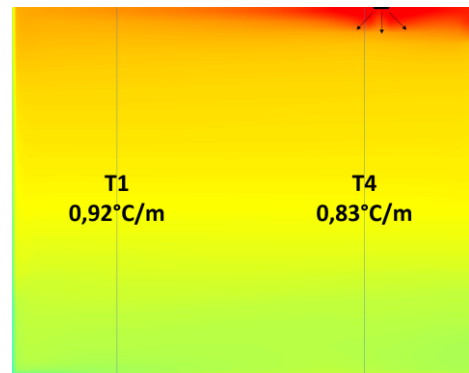
CFD| B-B



CFD| C-C



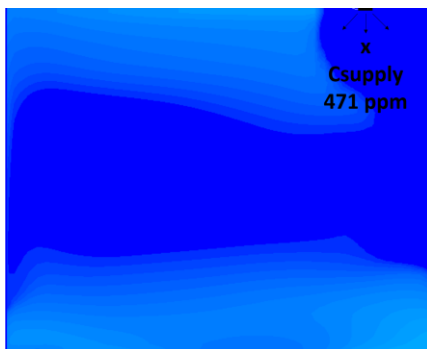
SKERSINIS



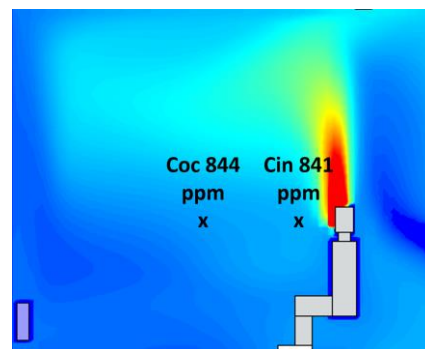
23 pav. Īprastas ir skersinis vēdināšanas veids ar orniem, temperatūrinie gradienti

ĮPRASTINIS

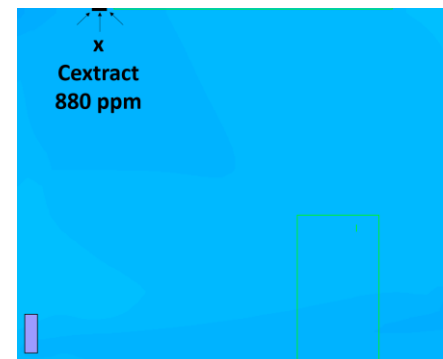
CFD| A-A



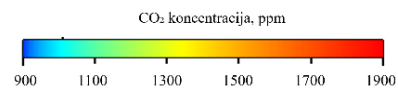
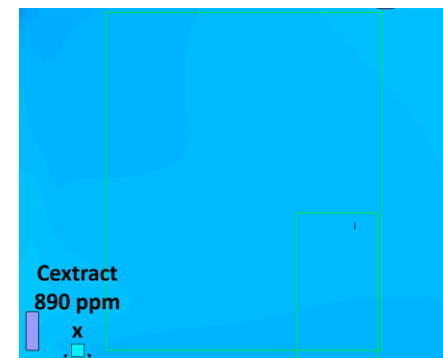
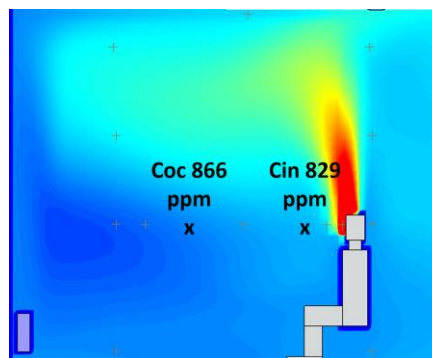
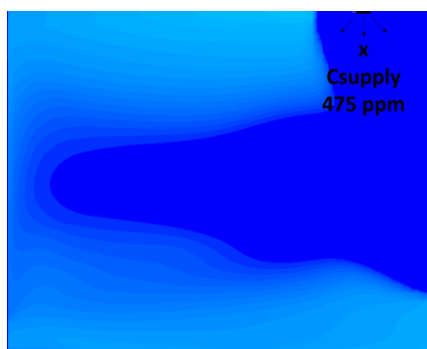
CFD| B-B



CFD| C-C



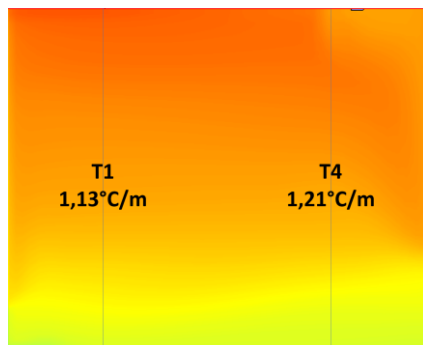
SKERSINIS



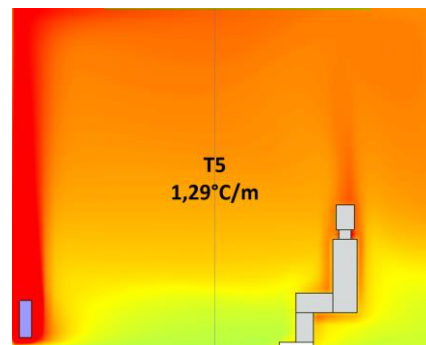
24 pav. Įprastas ir skersinis vėdinimas su radiatoriniu šildymu, CO₂ koncentracijos

ĪPRASTINIS

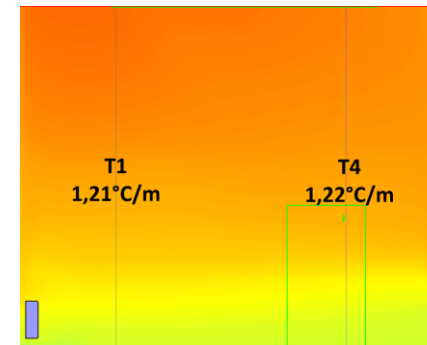
CFD| A-A



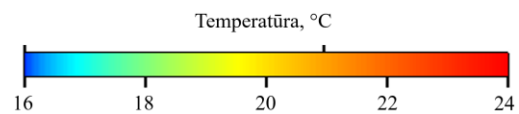
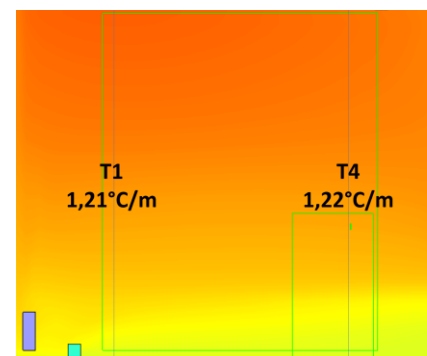
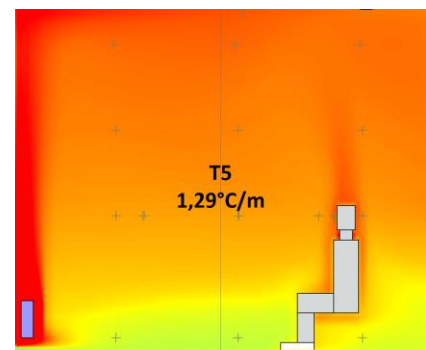
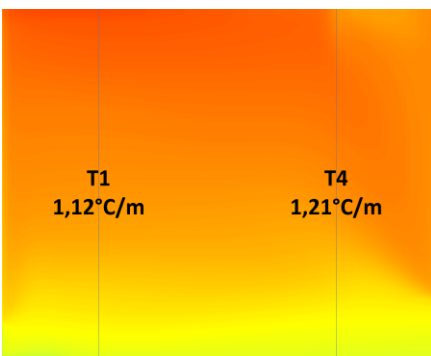
CFD| B-B



CFD| C-C



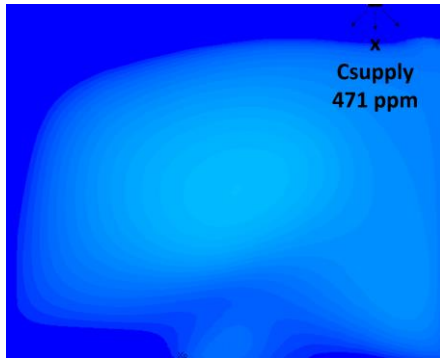
SKERSINIS



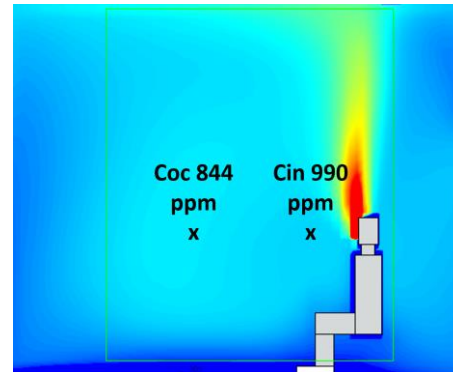
25 pav. Īprastas ir skersinis vēdināms su radiatoriniu šildymu, temperatūriniai gradientai

ĪPRASTINIS

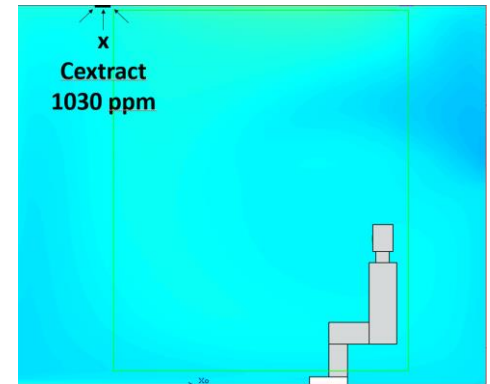
CFD| A-A



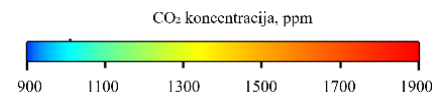
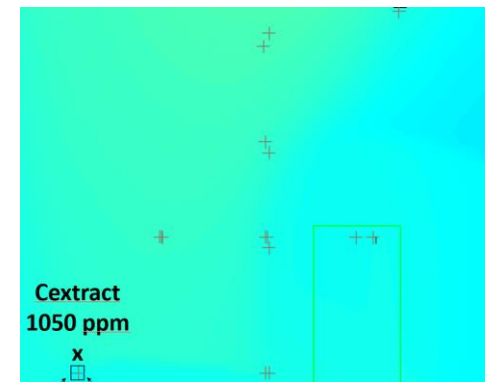
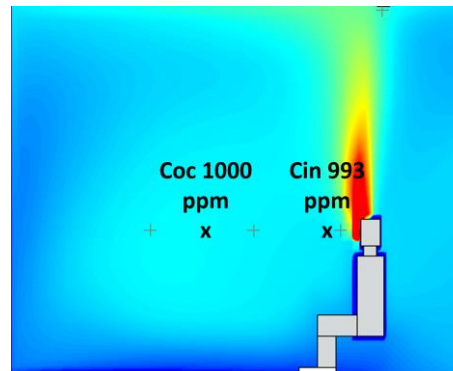
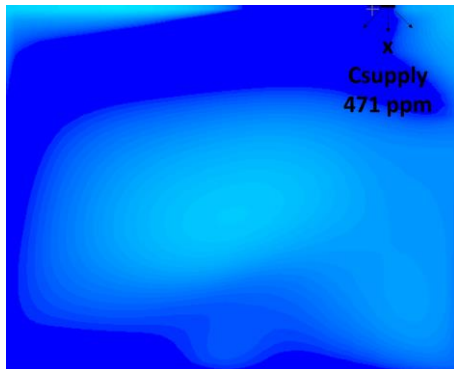
CFD| B-B



CFD| C-C



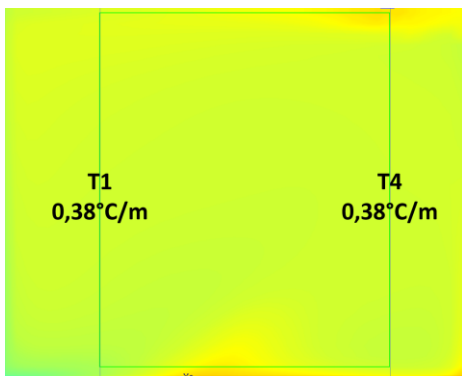
SKERSINIS



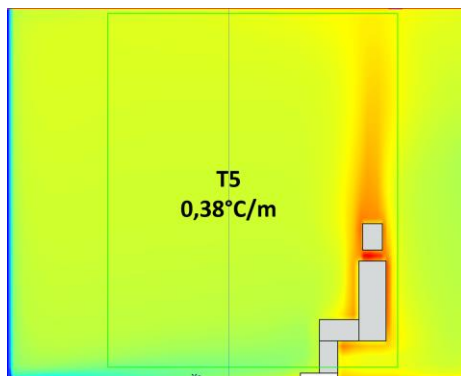
26 pav. Īprastas ir skersinis vēdināms ar grīdinu šildīmu, CO₂ koncentrācijas

ĪPRASTINIS

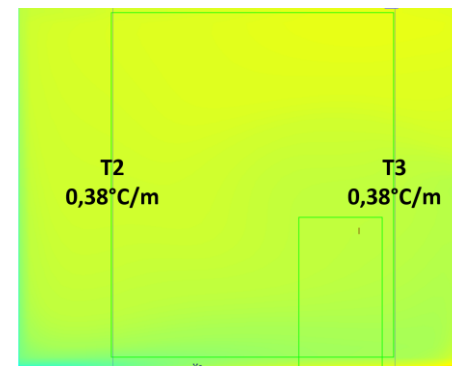
CFD| A-A



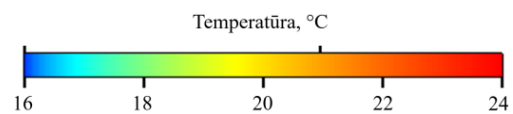
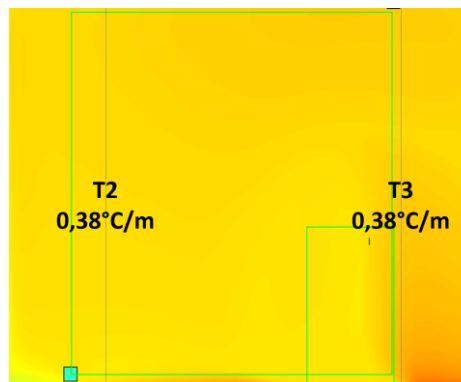
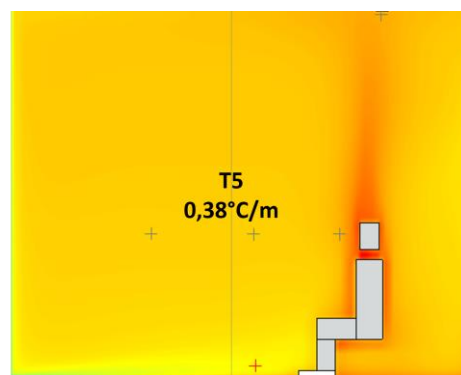
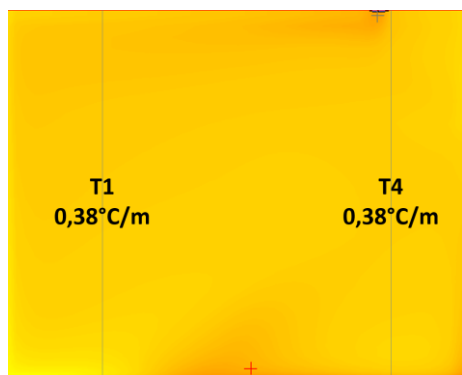
CFD| B-B



CFD| C-C



SKERSINIS



27 pav. Īprastas ir skersinis vĒdinimas su grindiniu ūildymu, temperatūriniai gradientai

Galutinių CFD modeliavimo rezultatų lentelėje nr. 4 matomi galutiniai modelių rezultatai bei pagrindiniai skirtumai tarp šildymo ir vėdinimo sistemų taikymo patalpoje ir jų įtakos vėdinimo efektyvumui.

Nors daugeliu atveju įprastinis vėdinimas nežymiai, bet yra efektyvesnis už skersinį vėdinimą (skirtumai nuo 0,02 iki 0,17), tačiau visais atvejais palaikant vienkartinę oro kaitą tyrimų kameros modelyje vėdinimo efektyvumas yra puikus (didesnis arba lygus 1). Kaip buvo galima matyti ir iš bandomųjų modelių, ϵ vertei įtaką galimai daro tai, kokius srautus ir oro judėjimą sukelia atskiros šildymo sistemos, o tai įtakoja teršalų pasisklaidymą bei susikontravimą į tam tikras patalpos dalis ar aukščius. Pavyzdžiui, grindinio šildymo sukiamas spinduliavimo srautas tolygiai kyla nuo patalpos apačios į viršų, tuo pačiu į save įtraukdamas ir teršalų daleles, o tai galimai duoda įtaką ir vėdinimo efektyvumui. Dėl to vėdinimo efektyvumas lyginant koncentracijas patalpos centre ir prie ištraukimo grotelių buvo didesnis naudojant skersinį vėdinimą ir žmogaus iškvepiamas CO₂ juda link patalpos centro, įsimašo į srautą ir yra traukiamas ištraukimo grotelių link, ir nėra keliamas aukštyn. Kitais atvejais, kai srautas yra labiau koncentruotas (pavyzdžiui, nuo radiatoriaus), šiltas konvekcinis srautas kyla link patalpos viršaus, į ištraukimo difuzorių, nepasiekdamas įkvėpimo zonos, į save įmaišydamas ir teršalus. Taip vėdinimo efektyvumas didesnis, o esant skersiniui vėdinimui, efektyvumas krenta, nes nuo radiatoriaus kylantis (pagal CFD rezultatus srautas kyla iki 1,3m aukščio), koncentruotas srautas į save įtraukia teršalus ir vėl krenta žemyn, taip užterštas oras juda patalpoje ilgiau ir daugiau būna įkvėpimo aukštyje (1,1 m).

Lyginant gautus rezultatus su kitų mokslininkų darbais, kuriuose taip pat buvo tiriamas vėdinimo efektyvumas naudojant skersinį vėdinimą, gauti rezultatai sutampa, taip pat išlaikytas pagrindinis ir svarbiausias aspektas – gera oro kokybė tiek šiuo darbu, tiek kitų mokslininkų tyrimais yra išlaikoma ir nėra žymiai prastesnė už rezultatą pasiekiamą įprastu vėdinimu. Vėdinimo efektyvumas visais atvejais gautas virš 1, koncentracijos kvėpavimo zonoje, patalpos centre, prie ištraukimo difuzoriaus beveik neviršija norminių 1000 ppm verčių [17], o šildymo sistemos tipas arba nepablogina, arba net padidina vėdinimo efektyvumą priklausomai nuo šiluminių srovių sukiamo papildomo oro judėjimo patalpoje.

Tęsiant tiriamąją veiklą, pirmiausia galima eksperimentiškai išnagrinėti tyrimų variantus keičiant šildymo sistemą. Taip pat galima sekti energijos sąnaudas, kurios susitaupo sukuriant oro balansą per kelias patalpas bei sutaupant oro kiekius, kas reiškia mažesnius poreikius orui pašildyti, atvėsinti. Naudojant skersinį vėdinimą galima nagrinėti ne tik koncentracijas prie pralaidos į kitą patalpą, bet ir vertinti kitoje patalpoje susidarancias koncentracijų reikšmes. Nors vėdinimo efektyvumo rodiklis yra pakankamai daug parodantis, ateities tyrimuose būtų galima įvesti dar vieną parametą, pagal kurią galima įvertinti oro kokybę patalpoje ir kaip naudingai vėdinimas veikia – apskaičiuoti oro amžių. Tyrimų metodams ir tiriamiems rodikliams praplėsti, reikėtų vertinti ir žmogaus savijautą. Todėl, kitame tyrimų etape būtų galima vertinti ir PMV rodiklį, nusakantį kaip žmonės jaučiasi patalpoje taikant skirtingas vėdinimo sistemas. Taip būtų įvertintos ne tik koncentracijos ir efektyvumai, o ir realūs duomenys, gauti iš pačių žmonių, kurie būna patalpose.

4 lentelė. Galutinių CFD modelių rezultatai

Vėdinimo sistemos tipas, oro kaita h ⁻¹	Šildymo būdas	Vertikalus gradientas	Bendrosios koncentracijos		Koncentracijos įkvėpimo zonoje				Koncentracijos užimtoje zonoje				Vėdinimo efektyvumas, kai teršalų vieta žinoma		
			C _s , ppm	C _e , ppm	C ₁ , ppm	C ₂ , ppm	C ₃ , ppm	C _{inh} , ppm	C ₁ , ppm	C ₂ , ppm	C ₃ , ppm	C _{oc} , ppm	C _e /C _{oc}	C _e /C _{inh}	C _{inh} /C _{oc}
Įprastinis, 1 h ⁻¹	Orinis šildymas	0,96	470	1250	1120	1130	1130	1127	1130	1130	1130	1130	1,11	1,11	1,00
Skersinis, 1 h ⁻¹				1300	1230	1190	1200	1207	1200	1190	1190	1193	1,09	1,08	1,01
Įprastinis, 1 h ⁻¹	Radiatorinis šildymas	1,3		880	841	841	841	841	816	816	816	816	1,08	1,05	1,03
Skersinis, 1 h ⁻¹				890	886	862	844	864	857	846	829	844	1,05	1,03	1,02
Įprastinis, 1 h ⁻¹	Grindinis šildymas	0,4		1030	989	990	991	990	982	985	985	984	1,05	1,04	1,01
Skersinis, 1 h ⁻¹				1050	1000	990	990	993	1010	990	1000	1000	1,1	1,1	1,05

4.5. Ekonominis vėdinimo sistemų išlaidų vertinimas

Darbe tirti vėdinimo sistemų tipai lengviausiai yra pritaikomi individualiuose gyvenamuosiuose namuose, kadangi juose, pagal dabartinius populiariausius projektus, yra daug atvirų erdvių ir oras gali vaikščioti laisvai. Vertinant vėdinimo efektyvumą ir naudingumą, reikia atsižvelgti ne tik į koncentracijas, temperatūras, tačiau taip pat svarbus aspektas yra ir ekonominis jo įvertinimas. Tam buvo suprojektuotos vėdinimo sistemos populiariausių dydžių individualiuose namuose (100-130m²) su įprastiniu ir skersiniu vėdinimu bei įvertinami jo įrengimo kaštai naudojant sustambintus įkainius.

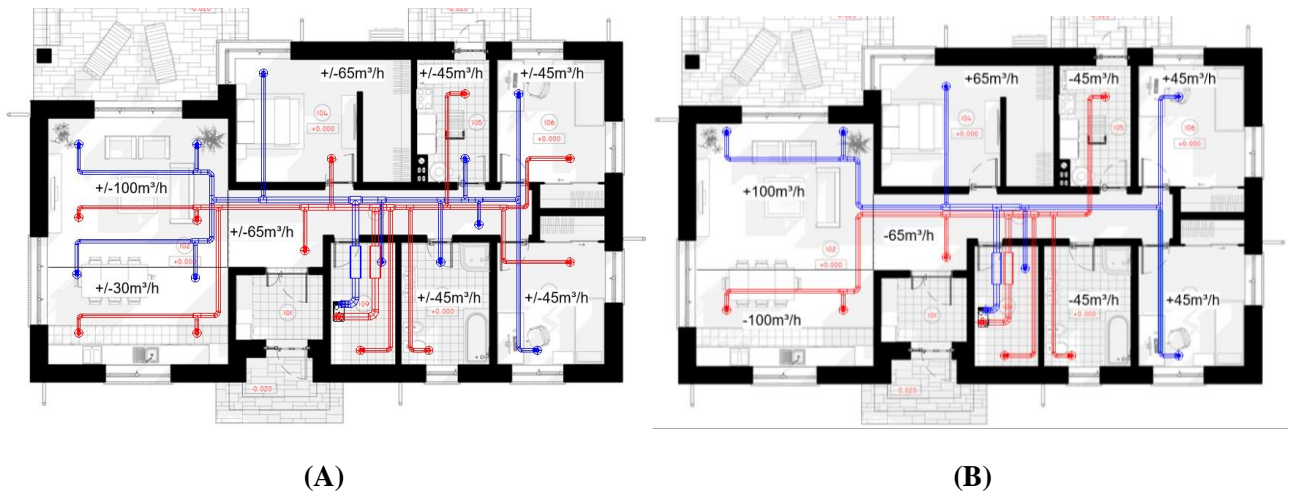
Pirmiausia lyginami variantai 130m² namo [40], kurio tūris 300m³/h ir jam taikomas įprastinis ir skersinis vėdinimas. Sudarius oro balansą abejiems atvejams, gauti oro kiekių skirtumai – taikant įprastinį vėdinimą reikiamas oro kiekis pastatui yra 467 m³/h arba 40 proc. didesnis, lyginant su skersiniu vėdinimu, o naudojant tam pačiam namui reiktų 290m³/h (žr. 5 lentelę).

5 lentelė. Oro kiekių balansas naudojant įprastą ir skersinį vėdinimą

Eil. nr	Patalpa	Plotas, m ²	Tūris, m ³	Paduodamo oro kiekis, m ³ /h, įprastas vėdinimas	Ištraukiamo oro kiekis, m ³ /h, įprastas vėdinimas	Paduodamo oro kiekis, m ³ /h, skersinis vėdinimas	Ištraukiamo oro kiekis, m ³ /h, skersinis vėdinimas
1.	Svetainė	30	105	100	100	100	-
2.	Virtuvė	10	35	35	35	-	100
3.	Koridorius	15	52,5	52	52	-	65
4.	Miegamasis	19	66,5	65	65	65	-
5.	San. mazgas	8	28	45	45	-	45
6.	Vaiko kambarys	13	45,5	45	45	45	-
7.	Vaiko kambarys	14	49	45	45	45	-
8.	San. mazgas	10	35	45	45	-	45
9.	Katilinė	10	35	35	35	35	35
	Suma:	129	451	467	467	290	290

Pagal sudarytus balansus sukurti preliminarūs planai su ortakių išvedžiojimu patalpose (žr. 28 pav.). Kadangi oro kiekiai naudojant skersinį vėdinimą yra mažesni, matosi aiškūs skirtumai dėl ortakių diametro. Taip pat, kadangi iš vienu patalpų oras yra traukiamas, o į kitas tiekiamas, tai ortakių ilgiai yra mažesni. Taip iš karto gaunami pradiniai sutaupymai sistemos instaliacijai. Be to, naudojant mažesnę vėdinimo įrenginį, energijos sąnaudos taip pat mažėja – silpnesnis ventiliatorius sunaudoja mažiau el. energijos, taip pat reikalingas mažesnis elektrinis šildytuvas oro pašildymui. Šiuo atveju 467 m³/h srauto vėdinimo įrenginys sunaudoja 150 W ventiliatoriui sukurti bei jam reikalingas 2 kW el. galios šildytuvas. Palyginimui 290 m³/h srauto vėdinimo įrenginys sunaudoja 70 W ventiliatoriui bei jam komplektuojamas 1 kW el. galios šildytuvas [40].

Suvestinėje palyginamojoje lentelėje nr. 6 įvardyti pagrindiniai sistemos elementai, o jų kainos naudojamos remiantis „Sistela“ sąnaudų normatyvinius dokumentus [41]. Galutinė įprastinio vėdinimo kaina pastatui – 3884 eurai arba 30 eur/m², skersinio vėdinimo kaina – 2652 eurai arba 20 eur/m². Tai reiškia, kad įprastinis vėdinimas gautas 30 procentų brangesnis.



28 pav. Ortakių planas individualiame name suprojektavus įprastinį (A) ir skersinį (B) vėdinimą

6 lentelė. Palyginamoji išlaidų lentelė naudojant įprastinį ir skersinį vėdinimą

Eil. nr.	Sąnaudos	Įprastinis vėdinimas	Skersinis vėdinimas
1.	Ortakių ilgis, m	98	47
2.	Ortakio kaina, iki d200, eur/m		4
3.	Ortakių kaina, eur	282	136
4.	Difuzorių kiekis, vnt	22	13
5.	Difuzorių kaina, eur/vnt		30
6.	Difuzorių kaina, eur	660	390
7.	Rekuperatoriaus kaina, eur	2000	1600
8.	Darbų kaina, eur	942	526
9.	Galutinė kaina, eur	3884	2652
10.	Kaina 1 kv. metrui, eur/m ²	30	20

Išvados

1. Eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad vėdinimo efektyvumo rodikliai skiriasi nežymiai patalpų vėdinimui taikant skirtingus vėdinimo tipus: skersinio vėdinimo atveju vėdinimo efektyvumas 1,03, įprastinio – 1,05.
2. Nustatytas aukštas sukurtų skaitinių modelių patikimumas: skirtumas tarp oro greičių išmatuotų eksperimentų metų ir nustatytų iš skaitinių modelių – 8 %, tarp temperatūrų – 11 %, tarp CO₂ koncentracijų – 6 %.
3. Nustatyta, kad šildymo sistemų sistemos įtaka skersinio vėdinimo efektyvumui – minimali. Skirtumas tarp skersinio ir įprastinio vėdinimo efektyvumo esant skirtingoms šildymo sistemos neviršija 5 %.
4. Atlikus pradinių skersinio ir įprastinio vėdinimo sistemų įrengimo investicijų palyginimą, nustatyta, kad pradinės investicijos skersinio vėdinimo sistemai yra 30 % mažesnės. Eksploatacijos išlaidos taikant skersinio vėdinimo sistemą mažesnės 20 %.

Literatūros sąrašas

3. TRISTAN ROBERTS (2016). *We spend 90% of Our time indoors. Says who?* [žiūrėta 2020-04-05]. Prieiga per internetą: <https://www.buildinggreen.com/blog/we-spend-90-our-time-indoors-says-who>
4. JAN BABIAK, BJARNE W. OLESEN, DUŠAN PETRAŠ (2009). *Low temperature heating and high temperature cooling*.
5. LIETUVOS RESPUBLIKOS SVEIKATOS APSAUGOS MINISTERIJA (2009). *Higienos norma HN42:2009 „Gyvenamųjų ir visuomeninių pastatų patalpų mikroklimatas“* [žiūrėta 2020-04-05]. Prieiga per internetą: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.362676>
6. DESIGNING BUILDINGS (2020). *Predicted mean vote* [žiūrėta 2020-04-06]. Prieiga per internetą: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Predicted_mean_vote PMV
7. INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARTIZATION (ISO). (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*. [žiūrėta 2020-04-06].
8. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Indoor Air Facts. Sick building syndrome*. [žiūrėta 2020-04-25]. Prieiga per internetą: https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-08/documents/sick_building_factsheet.pdf
9. SUMEDHA M. JOSHI (2008). *The sick building syndrome*. [žiūrėta 2020-04-08]. Prieiga per internetą: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2796751/>
10. HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE. *Temperature: the six basic factors*. [žiūrėta 2020-04-12]. Prieiga per internetą: www.hse.gov.uk/temperature/thermal/factors.htm
11. JAKUBČIONIS, MINDAUGAS (2011). *Šiluminės technikos pagrindai*. [žiūrėta 2020-04-12]. Prieiga per internetą: <https://www.ebooks.ktu.lt/eb/263/silumines-technikos-pagrindai/>
12. DWYER, T. (2014). *Radiant heating with low temperature hot water*. [žiūrėta 2020-04-12]. Prieiga per internetą: <https://www.cibsejournal.com/cpd/modules/2014-11/>
13. INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARTIZATION (ISO). *Ergonomics of the thermal environment — Methods for the assessment of human responses to contact with surfaces — Part 2: Human contact with surfaces at moderate temperature*. [žiūrėta 2020-04-15].
14. *Floor surface temperatures when fitting underfloor heating* [žiūrėta 2020-05-06]. Prieiga per internetą: https://underfloorheating1.co.uk/blog/article/Floor_surface_temperatures_when_fitting_underfloor_heating
15. *Thermal inertia of heating – an advantage or disadvantage?* [žiūrėta 2020-04-15]. Prieiga per internetą: www.neutec.com.de/en/thermal-inertia-of-heating-an-advantage-or-disadvantage
16. OMRANI, S., HANSEN, V., BIANCA, C., DROGEMULLER, R.(2017). *Effect of natural ventilation mode on thermal comfort and ventilation performance: Full-scale measurement*. [žiūrėta 2020-04-16]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778817307636>
17. NATIONAL CENTER OF BIOTECHNOLOGY INFORMATION, U.S.(2009). *Concepts and types of ventilation*. [žiūrėta 2020-04-16]. Prieiga per internetą: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK143277/?fbclid=IwAR1dgvSdf5El4RvOUz2wCsmvfWkDOVHfBSxr2knuT77dTUsYiiWMINY_N84

18. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA (2016). *Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas*. [žiūrėta 2020-05-01]. Prieiga per internetą: <http://eseimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/15767120a80711e68987e8320e9a5185>
19. NATIONAL COLLABORATING CENTRE FOR ENVIRONMENTAL HEALTH.(2010). *Carbon dioxide in indoor air*. [žiūrėta 2020-05-01]. Prieiga per internetą: <https://ncceh.ca/documents/practice-scenario/carbon-dioxide-indoor-air>
20. SAGHEBY, S.(2016). *Density effects of gaseous contaminants in low velocity indoor environments*. [žiūrėta 2020-05-01]. Prieiga per internetą: <https://depositonce.tu-berlin.de/handle/11303/5340>
21. LST EN 12101-6. *Dūmų ir šilumos kontrolės sistemos. Slėgio skirtumo sistemų techniniai reikalavimai*. [žiūrėta 2020-05-01].
22. FEIST, W., SCHNIEDERS, J., DORER, V., HAAS, A.(2005). *Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept*. [žiūrėta 2020-05-02]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778805001118>
23. ROJAS, G., PFLUGER, R., FEIST, W.(2015). *Cascade ventilation – air exchange efficiency in living rooms without separate supply air*. [žiūrėta 2020-05-04]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815001097>
24. PASSIPEDIA; THE PASSIVE HOUSE RESOURCE. (2016). *Energy efficiency of the Passive house standart* [žiūrėta 2020-05-03]. Prieiga per internetą: [https://passipedia.org/operation/operation and experience/measurement results/energy use measurement results](https://passipedia.org/operation/operation%20and%20experience/measurement%20results/energy%20use%20measurement%20results)
25. LST EN 13779. *Negyvenamųjų pastatų vėdinimas. Reikalavimai vėdinimo ir vėsinimo sistemoms*. [žiūrėta 2020-05-05]. Prieiga per internetą: [http://www.cres.gr/greenbuilding/PDF/prend/set4/WI_25_Pre-FV_version prEN_13779_Ventilation for non-residential buildings.pdf](http://www.cres.gr/greenbuilding/PDF/prend/set4/WI_25_Pre-FV_version_prEN_13779_Ventilation_for_non-residential_buildings.pdf)
26. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA (2005). *STR 2.09.02:2005 Šildymas, vėdinimas ir oro kondicionavimas*. [žiūrėta 2020-05-05]. Prieiga per internetą: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.257930/LXkwyJVROM>
27. SIBILLE, E., PFLUGER, R.(2013). *Optimization of dwelling floor-plan configuration for cascade ventilation*[žiūrėta 2020-04-24]. Prieiga per internetą: [https://www.researchgate.net/publication/255723189 Optimization of dwelling floor-plan configuration for cascade ventilation](https://www.researchgate.net/publication/255723189_Optimization_of_dwelling_floor-plan_configuration_for_cascade_ventilation)
28. SIBILLE, E., PFLUGER, R.(2017). *Planning Guidelines and Product Development for Air Supply Distribution using Active Overflow Elements in Apartment Buildings*[žiūrėta 2020-04-25]. Prieiga per internetą: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2017/BS2017_024.pdf
29. VARTANIAN, O., NAVARRETE, G., CHATTERJEE, A.(2015). *Architectural design and the brain: Effects of ceiling height and perceived enclosure on beauty judgments and approach-avoidance decisions* [žiūrėta 2020-05-01]. Prieiga per internetą: <http://www.tlu.ee/~arro/TT%DC%20Tallinna%20Kolle%FE%20ERIALASED%20PIIRID/architecture%20and%20brain.pdf>
30. MARINARI, R., PIAZZA, I., FORGIONE, I., MAGUGLIANI, F.(2017). *Pre-test CFD simulations of the NACIE-UP BFPS test section*. [žiūrėta 2020-05-14]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454917302566>

31. MUNDT, E., MATHISEN, H., NIELSEN, P., MOSER, A.(2004). *Ventilation Effectiveness*. [žiūrėta 2020-05-14]
32. OLESEN, B.(2011). *Standarts for Ventilation and Indoor Air quality in relation to the EPBD*. [žiūrėta 2020-05-14]
33. LIETUVOS RESPUBLIKOS SVEIKATOS APSAUGOS MINISTERIJA (2003). *Higienos norma HN69:2003 „Šiluminis komfortas ir pakankama šiluminė aplinka darbo patalpose. Parametru norminės vertės ir matavimo reikalavimai“* [žiūrėta 2020-11-03]. Prieiga per internetą: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.362676>
34. VILLAFRUELA J.M., OLMEDO, I., NIELSEN, P.V. (2013). *CFD analysis of the human exhalation flow using different boundary conditions and ventilation strategies*. [žiūrėta 2020-11-03]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132313000450>
35. MOEN, ALEXANDER, MAURI, LORENZO. (2018). *Comparison of k-ε models in gaseous release and dispersion simulations using the CFD code FLACS*. [žiūrėta 2020-11-08]. Prieiga per internetą: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0957582018309807?token=10F6A564B0ECE41D14B0709A73B00D1ED7CF3830CFA5F26E5DB9DEA66A95F3D1F5D0A646002F712CF34C80B6CF070911>
36. STASIULIENĖ, LAURA. (2018). *Combined impacts of indoor climate systems in buildings on occupant inhaled volatile organic compounds concentration*. [žiūrėta 2020-11-15].
37. BLANK, MARTINA, MANDL, CHRISTOPH, KNAUTZ, HOLGER. (2020). *Development of a transient CFD model for charcoal production in a batch reactor and validation with measurement data*. [žiūrėta 2020-11-15]. Prieiga per internetą: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0961953420303457?token=508641C0BAFFC04D35FF281F6943655BDFDEC66352A4C0AD230FB5EC16F238D9E66D7B0B7A8880664198CC831F5CE08A>
38. TONG, XINJIE, HONG, SE-WOON, ZHAO, LINGYING. (2018). *Using CFD simulations to develop an upward air flow displacement ventilation system for manure-belt layer houses to improve the indoor environment*. [žiūrėta 2020-11-15]. Prieiga per internetą: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1537511018302897?token=358D8D800D1319E5E27BBDB9E99C16359B5B1202AA17BF016FBDE0806AF66F84CFBBB3E0E96ECA87C1AA81D71B094307>
39. MANSELL, ROBIN. (2018) *What are the surface temperature limits for radiator covers?* [žiūrėta 2020-12-06]. Prieiga per internetą: <https://www.contourheating.co.uk/blog/temperature-limits-radiator-covers>
40. LOPEZ, GIL, NAVAS, JUAN CASTEJON. (2017). *Analysis of the influence of the return position in the vertical temperature gradient in displacement ventilation systems for large halls*. [žiūrėta 2020-12-06].
41. FANG, ZHIYU, GAO, RAN, YANG, ZHIGANG. (2017). *Numerical Simulation and Experimental Study of the Drag Reduction of 90° Elbows for Ventilation and Air Conditioning Tubes in An Arc Form*. [žiūrėta 2020-12-06]. Prieiga per internetą: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S187770581734417X?token=22CCB040AA9E471E9CC7C781150126474DDCCC534ED4CA09728FF223D1D42B3F2D5CBBD769B06563FD4E012601D9A047>

42. *Namo projektas Lėja*. [žiūrėta 2020-12-06]. Prieiga per internetą:
<http://www.namuprojektas.lt/lt/namu-projektai/vieno-auksto-namai-169/namo-projektas-leja-275>
43. „*Komfovent*“ *prekių katalogas 2020*. [žiūrėta 2020-12-06].
44. „*Sistela*“ *sąnaudų skaičiavimo katalogas 2020*. [žiūrėta 2020-12-06].