



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**

**Paulius Zdanys**

**ORO UŽTVARŲ TIPO PARINKIMAS MODELIAVIMO BŪDU**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. Saulius Sušinskas

**PANEVĖŽYS, 2017**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**

**ORO UŽTVARŲ TIPO PARINKIMAS MODELIAVIMO BŪDU**

Baigiamasis magistro projektas  
Statyba (kodas 621J80001)

**Vadovas**

(parašas) Doc. dr. Saulius Sušinskas  
(data)

**Recenzentas**

(parašas) Doc. dr. Dainius Vaičiulis  
(data)

**Projektą atliko**

(parašas) Paulius Zdanys  
(data)

PANEVĖŽYS, 2017



## KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

(Fakultetas)

**Paulius Zdanys**

(Studento vardas, pavardė)

**Statyba, kodas 621J80001**

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Oro užtvarų tipo parinkimas modeliavimo būdu“

### AKADEMINIO SAŽNINGUMO DEKLARACIJA

20 \_\_\_\_ m. \_\_\_\_\_ d.  
Panevėžys

Patvirtinu, kad mano, **Pauliaus Zdanio**, baigiamasis projektas tema „Oro užtvarų tipo parinkimas modeliavimo būdu“ 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)

**BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS**Išduota studentui: Pauliui Zdaniui Grupė PMS-5**1. Darbo tema:**Lietuvių kalba: Oro užtvarų tipo parinkimas modeliavimo būduAnglų kalba: Selection of Air Barrier Types using the Modelling Method

Patvirtinta 2016 m. spalio mėn. 17 d. dekanu potvarkiu Nr. V25-13-26

**2. Darbo tikslas:**

Kompleksiškai išanalizuoti pastato įėjimo tambūro įtaką patalpų mikroklimato sistemų energijos poreikiams ir modeliavimo būdu parinkti tinkamą oro užsklandą įėjimui.

**3. Reikalavimai ir sąlygos:**

1. Sukurti du skirtingus visuomeninių pastatų teorinius modelius ir paskaičiuoti šių pastatų skaičiuojamąsias suminės energijos sąnaudas esant skirtingiems įėjimo į pastatą projektavimo sprendiniams.
2. Teoriniams pastatų modeliams atlikti įėjimo patalpų matematinius skaičiavimus DesignBuilding CFD programa bei remiantis skaičiavimais parinkti tinkamą oro užsklandų tipą.
3. Apdoroti modeliavimo rezultatus ir atlikti pastatų įėjimo tambūrų įtakos mikroklimato sistemų energijos poreikiams analizę.

**4. Projekto struktūra.** Turinys konkretizuojamas kartu su vadovu, atsižvelgiant į BP pobūdį.

Baigiamasis magistro projektas turi turėti šias privalomas dalis: titulinį ir antraštinius lapus, akademinio sąžiningumo deklaraciją, projekto užduotį, turinį, santrauką (lietuvių ir anglų kalbomis), įžangą.

Baigiamajame projekte turi būti aprašytas tyrimo objektas, atlikta trumpa mokslinių darbų tyrimo tema apžvalga, supažindinama su tyrimui taikyta metodika ir programomis.

Aprašoma tyrimo eiga, pateikiami tyrimo metu atliktų modeliavimų rezultatai, atlikta rezultatų analizė.

Darbo pabaigoje pateikiamos išvados bei naudotos literatūros ir kitų informacijos šaltinių sąrašas, pridedami priedai.

**5. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo projekto dalis.****6. Projekto pateikimo gynimui kvalifikacinėje komisijoje terminas**

Užduotį gavau:

Paulius Zdanys*(studento vardas, pavardė, parašas)*2017-01-11*(data)*2016-09-02*(data)*

Vadovas:

Doc. dr. Saulius Sušinskas*(pareigos, vardas, pavardė, parašas)*2016-09-02*(data)*

## Turinys

SANTRAUKA .....	6
ĮŽANGA.....	8
1. TYRIMO OBJEKTAS.....	11
1.1. Įėjimo tambūro paskirtis.....	11
1.2. Alternatyva tambūrai – oro užtvara .....	11
1.3. Oro užtvary atliktų tyrimų apžvalga .....	13
2. TYRIMO METODIKA .....	18
2.1 Pastatas kaip sistema ir jame vykstantys šiluminiai reiškiniai .....	18
2.2. Modeliavimas DesignBuilder CFD aplinkoje .....	20
3. TYRIMO EIGA .....	24
3.1. Tyrimui naudojamos skaičiavimo ir modeliavimo programos.....	24
3.2. Skaičiavimo modelių sukūrimas.....	24
3.3. Modeliavimo eiga .....	27
3.3.1 Įėjimo tambūro įtaka pastato metiniams energijos poreikiams .....	27
3.3.2 Įėjimo oro užsklandų CFD modeliavimas.....	32
4. MODELIAVIMO REZULTATŲ ANALIZĖ.....	49
4.1 Pastato metinių energijos poreikių skaičiavimo analizė.....	49
4.2. Oro užsklandų skaičiavimo analizė .....	52
IŠVADOS.....	58
PRIEDAI .....	61
AUTORIAUS PUBLIKACIJA MAGISTRO BAIGIAMOJO PROJEKTO TEMA.....	

Zdanys Paulius. ORO UŽTVARŲ TIPO PARINKIMAS MODELIAVIMO BŪDU. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Saulius Sušinskas; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Technologijos mokslai, statybų technologijos

Reikšminiai žodžiai: *įėjimo tambūras, atriumas, oro užsklanda, skaičiuojamosios suminės energijos sąnaudos, dinaminiai detalaus modeliavimo metodai.*

Panevėžys, 2017. 61 p.

## SANTRAUKA

Magistro baigiamajame projekte pastatas apibrėžiamas kaip sudėtinga sistema su daugybe jame vykstančių fizikinių reiškinių, supaprastintai pavaizduojami pagrindiniai patalpos oro parametrus veikiantys procesai, kurie sukuria sudėtingą, glaudžiu ryšiu tarp lauko oro sąlygų, pastato konstrukcinių elementų, inžinerinių sistemų bei žmonių veiklos sistemą.

Projekte, taikant dinaminį pastatų energijos poreikių modeliavimą, nagrinėjamos visuomeninės paskirties pastatų energetinio efektyvumo problemos. Pagrindinis tyrimo objektas – visuomeninio pastato įėjimo tambūro įtaka pastato energijos poreikiams. Kompiuterinėmis programomis DesignBuilder ir EnergyPlus atliktas energetinis modeliavimas pastato energijos reikmėms nustatyti. Visuomeninių pastatų teoriniams modeliams atlikti skirtingų įėjimų į pastatą oro užtvartų tipų CFD skaičiavimai bei jų parinkimas. Pateikiama tyrimo rezultatų analizė ir išvados.

Magistro baigiamąjį projektą sudaro įžanga, tyrimo objekto apibūdinimas, tyrimo metodikos aprašymas, realaus pastato kompiuterinis modeliavimas, modeliavimo rezultatų pateikimas ir jų analizė, išvados, literatūros ir informacijos šaltiniai, priedai ir magistro baigiamojo projekto autoriaus publikacija tarptautinėje konferencijoje projekto tema.

Zdanys Paulius. *SELECTION OF AIR BARRIER TYPES USING THE MODELLING METHOD*. Master's thesis in technologies / supervisor doc. dr. Saulius Sušinskas.

Panevėžys Faculty of Technologies and Business, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Technological Sciences, Building Technology

Key words: entrance vestibule, atrium, air barrier, calculated total energy consumption, dynamic methods of detailed simulation.

Panevėžys, 2017. 61 p.

## SUMMARY

Building is a complex system with many physical phenomena taking place in it. Structural elements, engineering systems and people who are in the building are exposed to outdoor weather conditions. In turn, the quantity of heat (cold) accumulated in the building envelopes is dependent on the amount of internal heat inflows that occur from the energy supplied to the building by people and engineering systems.

The article addresses the issues of energy efficiency of public buildings through application of dynamic simulation of the building energy demand. The main object of the Research is the influence of the entrance vestibule of the public building on the building's energy demand. By means of the computer programs DesignBuilder and EnergyPlus, the energetic simulation has been done in order to determine the energy demand. Public buildings theoretical models in different entrances to the building air barrier types of CFD calculations and their selection. We have presented the Research results and conclusions.

Master's degree consists of introduction, description of the object, research methodology, computer simulation/modeling of an actual building, presentation of simulation/modeling results and their analysis, conclusions, literature, appendixes and Master's degree author's publication in an international conference related to this topic.

## IŽANGA

Klimato kaita yra viena svarbiausių XXI amžiaus pasaulinių problemų. Pasaulyje didėjant šiltnamio dujų, tokių kaip CO<sub>2</sub>, emisijai, kyla temperatūra, kuri gali pakeisti aplinką.

Kioto protokolas [1], perimantis Jungtinių Tautų bendrosios klimato kaitos konvencijos nuostatas, yra vienas svarbiausių tarptautinių teisinių dokumentų, skirtų kovai su klimato pokyčiais. Jame numatyti įsipareigojimai, kuriuos prisiima industrinės šalys, siekdamos sumažinti tam tikrų šiltnamio efektą sukeliančių dujų, prisidedančių prie planetos klimato atšilimo, išmetimą.

Šiltnamio efektą sukeliančios dujos - tai visos dujos, kurios dėl tam tikros molekulinės struktūros gali absorbuoti infraraudonuosius spindulius (šilumą). Atmosferoje jos atlieka labai svarbų vaidmenį sulaikydamos Žemę pasiekusią šilumą ir tokiu būdu pakeldamos žemesniųjų atmosferos sluoksnių temperatūrą. Jei ne šios dujos, Žemės paviršiaus temperatūra būtų apie 30°C žemesnė, tačiau didėjant jų koncentracijoms, atmosferos temperatūra kyla.

Viena svarbiausių klimato kaitos priežasčių – atmosferos tarša šiltnamio efektą sukeliančiomis dujomis. Pagrindinės šiltnamio efektą sukeliančios dujos yra: anglies dioksidas (CO<sub>2</sub>) – sudarantis 76 % visų šiltnamio efektą sukeliančių dujų. Antras pagal svarbą elementas, dėl kurio susidaro sustiprintas šiltnamio efektas, yra metanas (CH<sub>4</sub>), toliau azoto dioksidas (N<sub>2</sub>O) – sudarantis 6 %, bei fluoruotos dujos (5 %) joms priskiriami hidrofluorangliavandeniliai (HFCs), naudojami šaldiklių ir oro kondicionierių gamyboje, sieros heksafluoridas (SF<sub>6</sub>), naudojamas, pvz., elektronikos pramonėje, perfluorangliavandeniliai (PFCs), išsiskiriantys gaminant aliuminį ir taip pat naudojami elektronikos pramonėje.

Lietuvoje per metus išmetamų šiltnamio dujų kiekis sudaro tik 0,05 % pasaulinio kiekio. Didžiausia dalis tenka JAV (20 %) ir Kinijai (15 %). Padalinus išmetamų dujų kiekį iš šalies gyventojų skaičiaus kiekvienam JAV gyventojui tektų 25 tonos, ES gyventojui 10 tonų, o Lietuvos gyventojui 4 tonos.

Energijos taupymas ir vartojimo efektyvinimas [2] yra labai svarbus aspektas orientuotas į išlaidų bei emisijų mažinimą. Įvertinus visą energijos taupymo potencialą, svarbiausias energetikos efektyvumo srities strateginis tikslas yra iki 2020 metų kiekvienais metais energijos suvartoti po 1,5 procento mažiau. Tuo tarpu bendras energijos taupymo potencialas iki 2020 siekia net 17% (lyginant su 2009 metų duomenimis). Labai daug prie neefektyvaus energijos naudojimo prisideda seni, prasta šilumine bei garsine izoliacija pasižymintys pastatai.



Energijos taupymas ir šilumos išsaugojimas gali būti reguliuojamas šiais penkiais būdais [3]: - nustatant atitvaroms naudojamų statybos produktų reikalavimus (jų šiluminę varžą, vandens garų sklidimo varžą, infraraudonuosius spindulius atspindinčio sluoksnio emisiją);

- nustatant atitvarų ir statinio inžinerinių sistemų įrenginių charakteristikų reikalavimus (pvz., sienų, stogų, durų ir langų šilumos laidumo, durų ir langų sandarumo, katilų, ventiliatorių, aušinimo įrenginių efektyvumo);

- nustatant statinio ar statinio inžinerinių sistemų naudojimo charakteristikų reikalavimus (pvz., savitųjų šilumos nuostolių, statinio laidumo orui, oro apykaitos, šildymo ar aušinimo sistemos bendro efektyvumo);

- nustatant statinio inžinerinių sistemų energetinės galios reikalavimus (pvz., metinį šiluminės energijos kiekį, reikalingą pastato patalpoms šildyti ir (ar) aušinti iki numatytos temperatūros, atsižvelgus į vidaus šilumos išsiskyrimus ir patenkantį saulės energijos kiekį);

- nustatant tiekiamos statinio inžinerinėms sistemoms energijos galios reikalavimus, siekiant įvertinti sistemų naudojimo savybes ir nustatyti jų efektyvumą (pvz., šildymo ir (arba) aušinimo energijos suvartojimą), atsižvelgus į energijos šaltinio ypatybes ir jo kainą.

Energijos taupymas ir šilumos išsaugojimas reguliuojamas aukščiau išvardytais pavieniais būdais ar jų kombinacijomis, arba įvertinus bendrą suvartojamos energijos kiekį. Energijos taupymo ir šilumos išsaugojimo reikalavimai turi būti užtikrinami statinio projektavimo, statybos ir naudojimo metu. Juos su tam tikromis išlygomis būtina užtikrinti per ekonomiškai pagrįstą statinio naudojimo laikotarpį.

Efektyvus energijos vartojimas – tai sugebėjimas gauti kuo daugiau naudos iš kiekvieno energijos vieneto: racionalus energijos vartojimas, taupiai naudoti energiją padedančių technologijų taikymas, atsinaujinančių energijos išteklių naudojimas. Taip pasiekama aukštesnė kokybė, aukštesnis komforto lygis, sukuriama daugiau darbo vietų, padidinamas produktyvumas, taupomos lėšos, mažinama tarša. Energijos taupymas ir apgalvotas naudojimas kelia ekonomiką, saugo aplinką, didina nacionalinį saugumą, mažina priklausomybę nuo importuojamo kuro tiekėjų. Efektyvus energijos vartojimas pastate – tai kompleksinio įvairių priemonių diegimo rezultatas.

Tyrimo objektas, tikslas ir uždaviniai.

Tyrimo objektas – pastato įėjimo tambūrai ir oro užtvaros ir jų įtaka pastato energijos sąnaudų poreikiams

Darbo tikslas – kompleksiskai išanalizuoti pastato įėjimo tambūro įtaką patalpų mikroklimato sistemų energijos poreikiams ir modeliavimo būdu parinkti tinkamą oro užsklandą įėjimui.

Tyrimo uždaviniai:

1. Sukurti du skirtingus visuomeninių pastatų teorinius modelius ir paskaičiuoti šių pastatų skaičiuojamąsias suminės energijos sąnaudas esant skirtingiems įėjimo į pastatą projektavimo sprendiniams.

2. Teoriniams pastatų modeliams atlikti įėjimo patalpų matematinius skaičiavimus DesignBuilding CFD programa bei remiantis skaičiavimais parinkti tinkamą oro užsklandų tipą.

3. Apdoroti modeliavimo rezultatus ir atlikti pastatų įėjimo tambūrų įtakos mikroklimato sistemų energijos poreikiams analizę.

## 1. TYRIMO OBJEKTAS

### 1.1. Įėjimo tambūro paskirtis

Įėjimo tambūras – nešildoma patalpa prie išorinių pastato durų, tarnaujanti šliuzu tarp lauko ir šiltų pastato patalpų. Tambūras tai ir buferinė zona prieš įeinant į pastato šildomą tūrį, ir architektūrinis akcentas. Atriumas – patalpa su viršutiniu apšvietimu, kuri gali būti projektuojama per du ar keletą aukštų. Atriumas yra architektūrinis, kuris atlieka ir pastato įėjimo tambūro funkciją.

Įėjimo tambūro projektavimo ir įrengimo pastatuose privalomumas numatytas tik statybos techniniame reglamente STR 2.02.01:2004 „Gyvenamieji pastatai“ [4]. Kitos paskirties pastatams įėjimo tambūro įrengimas pastatuose nėra reglamentuotas. Pastato prieangis (tambūras) turi būti tokio dydžio, kad, varstant duris, laisvas liktų ne mažesnis kaip 1 400 mm x 1 400 mm durų varčių nekliudomas plotas [5].

### 1.2. Alternatyva tambūrai – oro užtvara

Nuolat darinėjamos durys sudaro galimybę šaltam lauko orui patekti į patalpas, tuo tarpu viduje esantis šiltas oras eina lauk. Tokiu atveju susiformuoja skersvėjai, o patalpose esantis oras atšąla. Be viso to, į patalpas dar patenka ir dulkių bei įvairių vabzdžių. Oro užtvaros sukuria oro barjerą (užtvaramą), kuris apsaugo šildomas ar vėsinamas patalpas nuo šalto ar šilto lauko oro skverbimosi pro atviras duris (1.1 pav.)



1.1 pav. Oro užtvara

Oro užtvaros dažniausiai naudojamos atskirti vieną aplinką nuo kitos. Oro užtvaros užkerta kelią šalto ar užteršto oro patekimui į patalpą durų atidarymo metu. Oro srautą suformuoja ventiliatorius [6].

Paprastai oro užtvaros įrengiamos prie pastato lauko vartų, angų tarp cechų, prie pastatų įėjimo durų, technologinių įrengimų atvirų angų, kad šaltas arba užterštas oras nekenktų patalpoje esantiems žmonėms.

Pagal veikimo principą gali būti užtveriamojo ir maišomojo tipo oro užtvaros. Uztveriamojo tipo užtvaros pučiamo oro srovės nustumia besiveržiantį aplinkos oro srautą. Jos įrengiamos prie įvažiavimo vartų, technologinių angų. Visuomeninių pastatų įėjimo duryse toks pūtimas ne visada būtų malonus, todėl juose galima įrengti maišomąsias užtvaras. Į tambūrą pučiamas šiltas oras. Didelis slėgis tambūruose kliudo lauko orui veržtis į pastatą, o įsiveržęs jis susimaišo su šiltu užsklandos oru, todėl vestibulyje lieka norminė temperatūra.

Pagal darbo režimą oro užsklandos skirstomos į periodinio ir nuolatinio veikimo. Periodiškai veikia oro užtvaros prie vartų. Uztvaros ventiliatorius įjungiamas automatiškai vartų atsidarymo pradžios metu. Išjungiamas, kai vartus uždarius temperatūra darbo vietose prie vartų priartėja prie norminės. Maišomojo tipo užtvaros yra nuolatinio veikimo, jos veikia visą darbo dieną.



1.2 pav. Besisukančios durys su oro užtvara

Kokybiška, teisingai parinkta bei sumontuota oro užuolaida šilumos nuostolius per atviras angas gali sumažinti net 70-90%, taip pat apriboti galimybę į patalpą patekti vabzdžiams, dulkėms, vėjo gūsiams ir pan. Parenkant oro užsklandą būtina užtikrinti, kad oro užuolaida nebūtų siauresnė už angą, kurią turi izoliuoti, bei koks užuolaidos pučiamo oro srauto greitis bus prie grindų. Jei jis bus mažesnis nei 2m/s, oro užuolaida nesudarys užtvaros ir šaltas oras pateks į patalpą.

Teisingai parinktos ir sumontuotos oro užuolaidos apsaugo nuo skersvėjų, sumažina šilumos ar atvėsinto oro praradimus per atviras angas, o durų zonoje užtikrina komfortiškas sąlygas, kas leidžia kur kas efektyviau išnaudoti patalpos plotą.

### **1.3. Oro užtvarų atliktų tyrimų apžvalga**

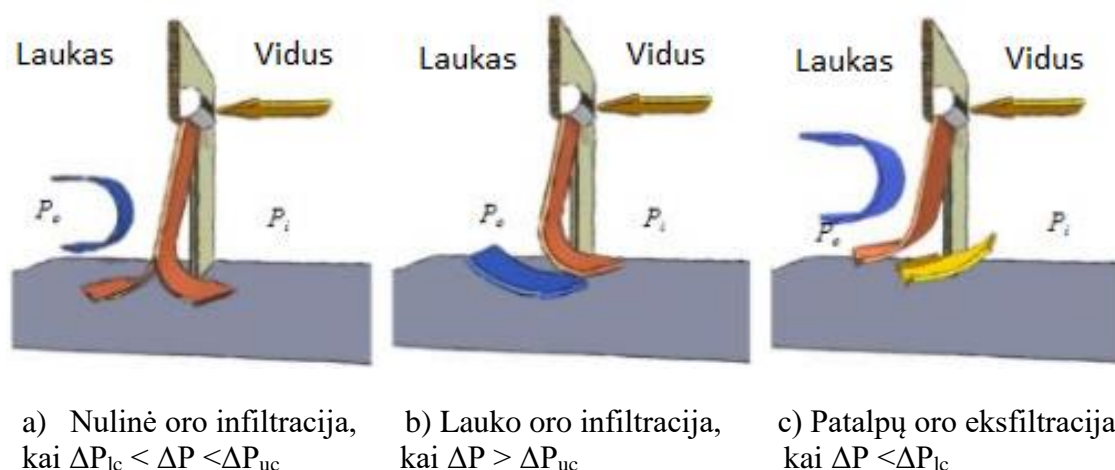
Pastaruju metu vis aktualesnė problema tampa mikroklimato patalpų, kuriose žmogus praleidžia didelę dalį dienos, kokybė. Sveiko būsto ir darbui palankios aplinkos klausimai gvildenami tiek specialistų, tiek viešojoje erdvėje. Patalpų oro kokybė griežtai vertinama kontroliuojančių institucijų, siekiant užtikrinti energetinių šalies išteklių saikingą vartojimą ir žmonių sveikatingumo lygį. Oras, esantis gyvenamosiose, administracinėse ir gamybinėse patalpose, naudojamas veikiant įvairiems faktoriams, priklausomai nuo patalpų paskirties. Užterštas oras tampa kenksmingas ar net pavojingas gyventojams, pastatų konstrukcijai ir įrangai. Todėl reikia užtikrinti nuolatinį oro cirkuliavimą.

Pagrindinė šildymo, ventiliacijos ir oro kondicionavimo (ŠVOK) sistemų užduotis ir yra padaryti patogią, sveiką aplinką žmonėms, eikvojant mažiausiai sąnaudų ir minimaliai teršiant gamtą. Įprastas patalpos vėdinimas gali sukelti per didelį ir per staigų oro judėjimą, kenksmingą sveikatai skersvėjų, prarandant didelį šilumos kiekį. ŠVOK sistemose optimaliai kontroliuojamas oro drėgnumo lygmuo, temperatūra ir oro judėjimas, t. y. pastatų vidaus aplinkos parametrai. Nekontroliuojami oro srautai, netinkamas jų paskirstymas didina energijos sąnaudas, gali sukelti neigiamų padarinių darbuotojų sveikatai ir aplinkoje esančiai įrangai.

Pasaulyje atlikta nemažai mokslinių tyrimų, siekiant išsiaiškinti įėjimo oro užsklandų energetinį efektyvumą, jų pritaikomumą visuomeninės paskirties ir pramonės objektuose. Dėl ko tai svarbu? Statybos sektorius (gyvenamieji, pramonės ir visuomeniniai pastatai) sunaudoja apie 41% pirminės energijos. Šias sąnaudas pastatų sektoriuje sudaro patalpų šildymas (37%), patalpų aušinimas (10%), vandens šildymas (12%) ir apšvietimas (9%). Visuomeniniuose pastatuose oro infiltracija gali būti tokia didelė, kad sudarytų 18% visos šilumos nuostolių. Pastato sandarumui didelę įtaką turi pastato išorės atitvaros. Oro infiltracija per durų angas tampa reikšminga, kai durys yra dažnai naudojamos, pavyzdžiui prekybos centruose, biuruose, ligoninėse ir pan. [7].

Oro užsklandų sandarumą nagrinėjo L. Wang ir Z. Zhong [8]. Mokslininkai savo tyrimuose pažymėjo, kad durų angų sandarumas gali būti nustatomas pagal lygčių modelį, kada infiltracijos dydis tiesiogiai priklauso nuo oro slėgio skirtumo abiejose durų pusėse. Savo moksliniuose darbuose jie vadovavosi Yuill atliktų eksperimentinių tyrimų medžiaga, kurioje autorius modeliavo įėjimo į pastatą su tambūro durimis ir be tambūro durų variantus, atsižvelgdamas į durų naudojimo dažnumą, jų vietą pastato geometrijoje, išorės ir vidaus slėgio skirtumus. Bandymams naudota hermetiška 2,44 x 2,44 x 1,30 m dėžė, kurioje buvo įmontuotos 0,61 x 0,71 m išmatavimų durys. Tambūro įrengimui buvo sukonstruota mažesnė dėžutė (0,91 x 1,22 x 0,94 m), kuri patalpinta bandymų dėžės viduje.

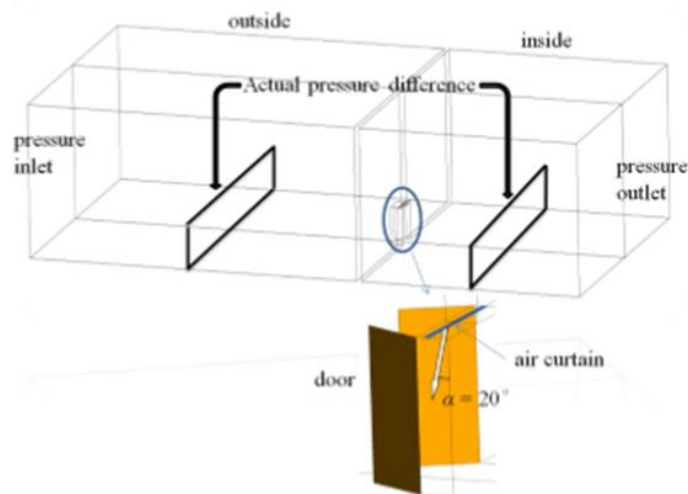
Mokslininkai L. Wang ir Z. Zhong [8] nagrinėdami oro užsklandų sandarumo požymius, naudojo CFD (Computational Fluid Dynamics) skysčių dinamikos skaičiavimus. Pažymėtina, kad sandarumo skaičiavimas per oro užsklandą nėra paprastos lygties dėl slėgių skirtumo skaičiavimas, būtina įvertinti ir oro užsklandos srovės įtaką. Oro srovės srautas gali būti apibūdinamas trimis atvejais (1.3 pav.). Pirmuoju atveju (1.3a pav.), kai lauko ir vidaus slėgių skirtumas ( $\Delta P$ ) yra mažas, oro srovė pasiekia grindis ir sėkmingai blokuoja lauko orą, infiltracija yra lygi nuliui. Išorės oro infiltracija į patalpas atsiranda (1.3b pav.), kai  $\Delta P$  pakyla virš ribinės vertės (viršutinės kritinės slėgio ribos,  $\Delta P_{uc}$ ). Trečiuoju atveju (1.3c pav.), kai patalpų oro slėgis ( $\Delta P_{lc}$ ) yra didesnis nei lauko oro slėgis ( $\Delta P < 0$ ) ir  $\Delta P$  pasiekia kitą ribinę vertę (apatinę kritinę slėgio ribą,  $\Delta P_{lc}$ ), prasideda patalpos oro eksfiltracija. Apibendrinant galima teigti, kad yra trys oro srautų scenarijai oro užsklandai: nulinė infiltracija ( $\Delta P_{lc} < \Delta P < \Delta P_{uc}$ ) (1.3a pav.), infiltracija ( $\Delta P > \Delta P_{uc}$ ) (1.3b pav.) ir patalpų oro eksfiltracija ( $\Delta P < \Delta P_{lc}$ ) (1.3c pav.).



1.3. pav. Oro užsklandų oro infiltracijos ir eksfiltracijos charakteristikos esant skirtingiems oro aplinkos slėgiams

L. Wang ir Z. Zhong [8], siekdami nustatyti oro užsklandų sandarumą, CFD modeliavimo erdvėje sukūrė vidaus patalpų (20 m x 24 m x 10 m) ir išorės (50 m x 24 m x 10 m) erdves (2.4

pav.). Įėjimui į pastatą suprojektuotos automatinės dvipusės durys (2 m × 2,4 m) (plotis × aukštis) . Oro užsklanda yra sumontuota horizontaliai virš durų su 0,08 m × 2 m oro tiekimo anga ir 0,2 m × 2 m oro padavimo anga. Oro tiekimo temperatūra yra 21 ° C žiemos režimu ir 24 ° C vasarą, oro tiekimo greitis 15 m / s, 20 ° kampu į išorę (1.4 pav). Slėgio skirtumas tarp durų buvo matuojamas prie įėjimo ir tambūre, kad nustatyti aplinkos vėjo poveikį vidaus patalpų slėgio ribinėms vertėms. Nustatytas slėgio skirtumas  $\Delta P_{oi} = P_o - P_i$  svyruoja nuo 40 iki -20 Pa, lauko temperatūros diapazonas - tarp -40 ° C ir 40 ° C. CFD modeliavimą tyrėjai atliko, parinkdami lauko temperatūrą -40 ° C, -20 ° C ir 10 ° C žiemos režimu ir 25 ° C, 30 ° C ir 40 ° C vasaros režimu. Patalpų temperatūra buvo nustatyta 24 ° C vasarą ir 21 ° C žiemą. CFD modeliavimas atliekamas standartiniu k-ε modeliu. K-ε modelis čia naudojamas, nes jis yra vienas iš labiausiai paplitusių modelių patalpų aplinkos modeliavimui.



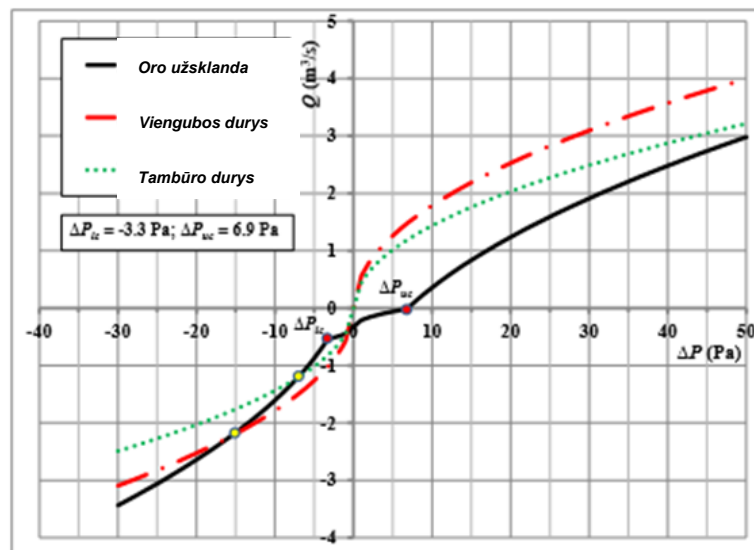
1.4 pav. Pastato patalpų sekcijos CDF modelis su oro užskalanda

Atlikę oro užsklandų CFD modeliavimą nurodytiems atvejams, L. Wang ir Z. Zhong [8] savo tyrime nustatė, kad:

- Apatinė kritinė slėgio riba  $\Delta P_{lc} = -3,3$  Pa, viršutinė kritinė slėgio riba  $\Delta P_{uc} = 6,9$  Pa. Oro eksfiltracija atsiranda, kai  $\Delta P < \Delta P_{uc}$ , o oro infiltracija atsiranda, kai  $\Delta P > \Delta P_{uc}$ .
- Lyginant patalpas be tambūro ir patalpas su tambūru, kuriose įrengtos varstomos durys, oro užsklandos ženkliai padidina šių patalpų sandarumą, esant tiems patiems slėgio skirtumo parametrų.
- Oro užsklanda užtikrina mažesnę oro nutekėjimą nei tambūro durys, esant neigiamam slėgio skirtumui  $-7,0 < \Delta P < 0$  Pa, bet turi didesnę oro nutekėjimą, kai  $\Delta P < 7,0$  Pa.
- Kai slėgių skirtumas  $\Delta P < -15$  Pa, oro užuolaidos turi didesnę oro nutekėjimą nei vienos durys.

Oro užtvartos sandarumo tyrimo duomenų grafinis atvaizdavimas pateikiamas 1.5

pav.



1.5. pav. Oro užsklandos ir durų charakteristikų palyginimas

A. Bertašienė [9] straipsnyje „Patalpų oro srauto tyrimo būdai ir matavimo priemonės, užtikrinančios komfortinių sąlygų parametrus“ pažymi, kad patalpų klimatą nusako eilė parametrų, kurie parodo šiluminio komforto ir oro kokybės lygmenį. Oro srauto tėkmės ir jos kokybės reguliavimas uždaroje patalpoje tapo svarbiu klausimu ne tik susidomėjusiems savo gyvenamąja aplinka pavieniams žmonėms, tačiau ir visuomenei, ko pasekoje sukurti nauji kokybės standartai statyboms ir darbo vietoms, kuriais siekiama minimalių energijos sąnaudų ir minimalaus aplinkos poveikio. Įvykdyti šiuos uždavinius, būtinos žinios ir supratimas apie aerodinamiką, slėgio laukus bei teršalų kelią patalpoje. Sutelkiant dėmesį į konkretų asmens buvimo patalpoje lygmenį, reikalinga daug išsamesnė mažos erdvės apie jį informacija, t.y. būtinas mikroklimato pažinimas. Oro debito pokytis, jo įtekėjimo ir ištekėjimo sąlygos makromasteliuose (visos patalpos lygmenyje) nesuteikia pakankamai informacijos, kad įvertintume mikroklimatą. Vėdinimo ir šildymo sistemų efektyvumui būtina žinoti srauto struktūrą, kuri kartu įtakoja ir lokales šilumines sąlygas. Visa tai apibrėžti ir nuspėti padeda išsami patalpų oro srauto struktūros analizė eksperimentiniu būdu bei naudojant matematinį modeliavimą CFD (computational fluid dynamics) sekti srauto formą ir tėkmę, temperatūros ir dalelių pasiskirstymą ar CONTAM grupės (imituoti srauto pokyčius veikiančias jėgas skirtingoms vėdinimo sistemoms ir nustatyti srauto infiltracijos poveikį) programomis. Matematinis modeliavimas vizualizuoja procesą ir jo eigą, tačiau dažnai be išsamių tyrimų ir matavimų negali egzistuoti, kadangi dažnai naudojami konkretūs modeliai neatspindi praktinių problemų. Kartu konkrečios situacijos nustatymo analizės rezultatai negali būti tinkami



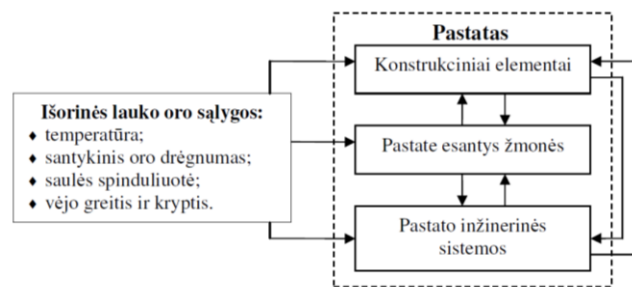
skaitiniams modeliams, nes neaiškios ribinės sąlygos ir nėra konkretaus visuminio srauto tyrimo. Tad pilnam supratimui būtini abu būdai, norint maksimaliai išgauti informacijos apie srautą.

A. Bertašienė [9] atkreipia dėmesį, kad oro srauto tėkmei būtinos tam tikros sąlygos - slėgio skirtumas bei erdvė jam tekėti. Pagrindiniai skirtuminio slėgio šaltiniai patalpose yra vėjas, natūralioji konvekcija (temperatūrų ir tankio skirtumai) arba mechaninis įtaisas. Mechaniniai įtaisai gali sukurti dideles neigiamo slėgio vertes ir tokiu atveju daugiau oro išteka iš patalpos nei jo patiekama. Praktikoje naudojami pastovaus oro debito įrenginiai, kurie įgalina didesnę sistemų efektyvumą, tuo pačiu ir geresnę temperatūros bei drėgmės kontrolę, kartu padidinant komforto lygį. Vis daugiau tyrimų atliekama įvertinti iš išorės į HVAC sistemas patenkančio oro srautus. Tačiau tai atlikti techniškai labai sudėtinga ir dažnai nenustatomas minimalus vėdinimo laipsnis. Ne visur ištiriamas ir oro srauto nutekėjimas į išorę. Tai smarkiai apsunkina patalpų oro rodiklių atitikties kokybės reikalavimams nustatymą.

## 2. TYRIMO METODIKA

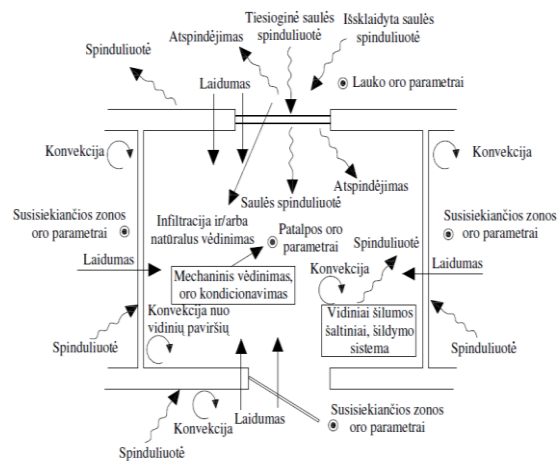
### 2.1 Pastatas kaip sistema ir jame vykstantys šiluminiai reiškiniai

Pastatas yra sudėtinga sistema su daugybe jame vykstančių fizikinių reiškinių. Pastato konstrukciniai elementai, inžinerinės sistemos ir pastate esantys žmonės yra veikiami lauko oro sąlygų. Savo ruožtu atitvarose akumuliuojamas šilumos (šalčio) kiekis priklausomas ir nuo vidinių šilumos pritekėjimų, kurie atsiranda nuo žmonių ir inžinerinių sistemų tiekiamos į pastatą energijos [10].



2.1 pav. Pastatas kaip sistema

Remiantis Clarke [11], 2.1 paveiksle supaprastintai pavaizduoti pagrindiniai patalpos oro parametrus veikiantys procesai. Dėl to atsiranda sudėtinga, glaudžiu ryšiu tarp lauko oro sąlygų, pastato konstrukcinių elementų, inžinerinių sistemų bei žmonių sistema (2.2 pav.). Nepaisant tikimybinės oro judėjimo patalpoje reiškinių prigimties, įmanoma sukonstruoti įvairaus sudėtingumo oro judėjimo patalpoje modelius, kurie gali būti pagrįsti tiek viso pastato parametru regresija pagrįstais matavimo duomenimis, tiek naudojant skaitinius lygčių sprendimo metodus, kai sprendžiamos tolydumo, judėjimo, energijos tvermės ir difuzijos lygtys. Visiems šiems ryšiams įvertinti turi būti naudojami dinaminiai detalus modeliavimo metodai [10].



2.2 pav. Patalpos energijos srautai

Tolydumo lygtis sudaroma remiantis aplinkos masės tvėrmės dėsnium (masė=tankis×tūris):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2.1)$$

judėjimo lygtis:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \rho g \beta (\theta_\infty - \theta) \quad (2.2)$$

energijos lygtis:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i H) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{k}{C_p} \frac{\partial H}{\partial x_i} \right] + S_H \quad (2.3)$$

difuzijos lygtis:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j C) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho D \frac{\partial C}{\partial x_j} \right] + S_C \quad (2.4)$$

Tai yra pagrindinės lygtys, kuriomis galima aprašyti patalpoje vykstančius procesus. Išskleidus komponentus, kurie taip pat kinta laike, šios lygtys tampa sudėtingos ir reikalauja žinių apie pačią energiją ir pagrindinius energijos mainų procesus – konvekciją, laidumą, spindulinius mainus bei masės mainus [10].

Prieš modeliuojant skysčių tekėjimą labai svarbu yra suprasti skysčių fizikines savybes, nes pagal jas kuriami matematiniai modeliai, kuriuos naudojant, modeliuojamas skysčių tekėjimas. Tekėjimas, tai materijos srautas ir deformacija laiko atžvilgiu. Skystis tai medžiaga, kurios laikui bėgant juda ir tarpusavyje sąveikauja bei keičia poziciją. Tekėjimas kaip reiškinys yra labai svarbus ir dažnai sutinkamas: oro tėkmė gyvenamajame kambaryje, atmosferos masių judėjimas, vandenyno srovės ir t.t. Materija, kuri laikui bėgant deformuojasi, tokia kaip oras ar vanduo, vadinami skysčiu arba fluidu.

Diferencialines lygtys, aprašančios klampaus nespūdaus skysčio tekėjimą, buvo išvestos daugiau kaip prieš 180 metų. Jas 1821 metais užrašė prancūzų inžinierius K. Navje, remdamasis tam tikru molekulinio dėsnium. Gana greitai paaiškėjo, kad kai kurioms medžiagoms postuluotas K. Navje molekulių sąveikos dėsnis netinka. Po 20 metų jaunas anglų mokslininkas G. Stoksas gavo

analogiškas lygtis, remdamasis kontinumo mechanikos principais. Todėl ši lygčių sistema vadinama Navje ir Stokso vardu (Navier - Stokes system).

Daugelis kitų reiškinių įtakoja skysčių tekėjimą, kaip pavyzdžiui temperatūrų skirtumas sukelia šilumos pasidalijimą ir tirštumo skirtumai iššaukia plūdrumą. Taigi lygtys tampa pakankamai sudėtingos ir joms spręsti naudojami skaitiniai metodai ir algoritmai. Dažniausiai šias lygtis sprendžia kompiuteriai, kurie atlieka milijonus skaičiavimų.

Naudojant šiuos metodus modeliuojamos atskiros sistemos dalys – sprendžiamos atskiros diferencialines lygtys, ir po to reikia mokėti visus šiuos uždavinius susieti į vieną - taip sumodeliuojama nauja sistema. Šiam tikslui pasiekti naudojami atskiri algoritmai, tokie kaip pavyzdžiui Zeidelio ( Gauss–Siedel) metodas.

## **2.2. Modeliavimas DesignBuilder CFD aplinkoje**

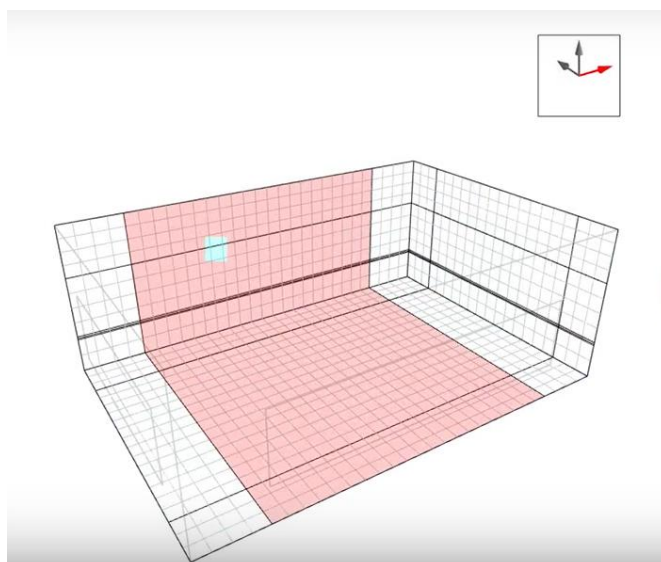
Kompiuterinė DesignBuilder CFD programa [12] gali būti naudojama pastato išorės ir vidaus modeliavimams atlikti. Išoriniai tyrimai nurodo oro slėgio pasiskirstymą aplink pastatą dėl vėjo poveikio ir ši informacija gali būti naudojamas įvertinti vidaus komfortą, vidaus slėgiui apskaičiuoti. Vidaus tyrimai leidžia nustatyti oro greičio pasiskirstymą, slėgį ir temperatūrą visose pastato erdvėse, o ši informacija gali būti naudojama siekiant įvertinti vidaus šildymo, vėdinimo, kondicionavimo sistemų efektyvumą ir užtikrinti interjero komfortines sąlygas.

Pirmas žingsnis skysčių tekėjimo modeliavime yra apibrėžti ir sukurti skysčio tėkmės geometriją. Geometrija iš esmės aprašo kokių kontūru tekės skystis, taip pat dažnai braižant geometriją jau žinoma ir tekėjimo kryptis – į ką atsižvelgiama jau braižant geometriją – ją atitinkamai optimizuojant. Svarbu, kad modeliuojamas paviršius būtų pakankamai didelis, kad skysčių dinamikos procesai spėtų pilnai susiformuoti.

Apskaičiavimo metodas reikalauja, kad geometrinė erdvė, kurioje skaičiavimai turi būti atliekami pirmiausia, yra padalijama į ląsteles, kurios dar vadinamos baigtinių tūrių tinkleliu.

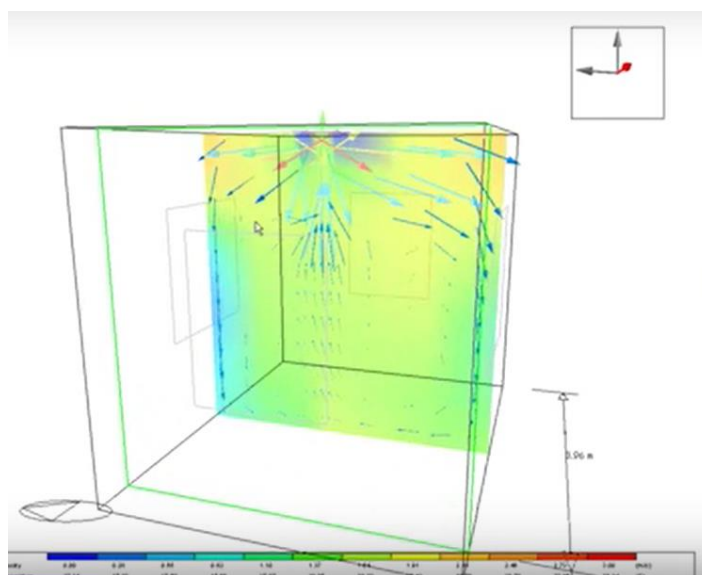
Sekantis labai svarbus žingsnis yra kontūro generavimas, nes skysčių dinamikos modeliavime reikalinga, kad paviršius, kuriuo arba kuriame teka skystis, būtų suskaidytas į daugelį nepersidengiančių mažų dalių. Šio proceso metu yra sugeneruojamas kontūras arba atskiros celės. Skaidant paviršių svarbu atsižvelgti į dalinimo tankį, nes per tankus sudalijimas gali įtakoti ilgą skaičiavimą, nors rezultatai nebus ypatingai tikslūs, o per retas sudalijimas – gali įtakoti dideles skaičiavimų paklaidas.

Gautas tinklelis, sukurtas su 0,3 m numatytojo tinklo tarpais pavaizduotas 2.3 paveiksle.

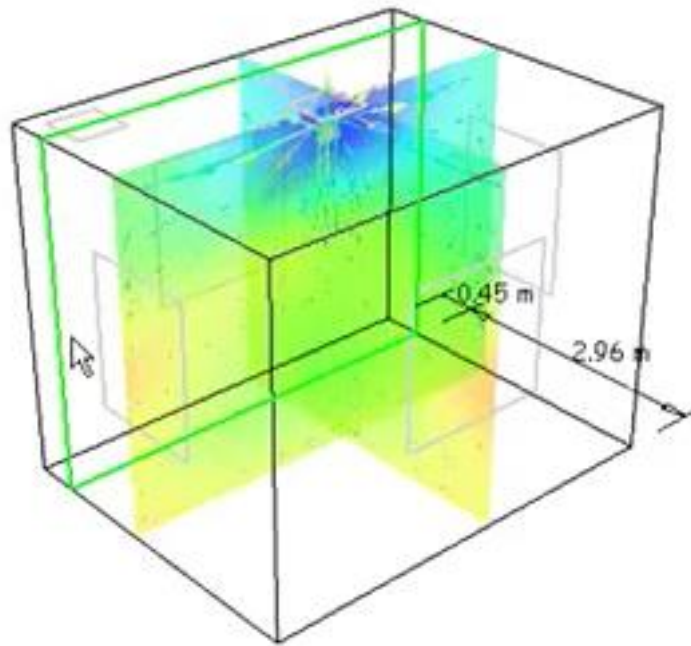


2.3 pav. CFD tyrimo modelio tinklelis

Nustatomos aplinkybės ir pradinės sąlygos, apibūdinančios skysčių tekėjimą. Dažnai šie ribojimai ir aplinkybės yra susijusios su skysčio įtekėjimo ir ištekėjimo į modeliруемą zoną arba tam tikras sritis modeliujamoje zonoje (2.4 pav.). Įvedami skysčio įtekėjimo ir ištekėjimo kraštai, su šiomis sąlygomis galima įvesti ir papildomus parametrus tokius, kaip slėgis, temperatūra, kurie dažniausiai įvedami per naudotojo grafinę sąsają. Galima įvesti ir kitas sąlygas, tokias kaip simetrijos plokštumos, apie kurias vyksta modeliavimas – tai pagreitina modelio sprendimą (2.5 pav.).

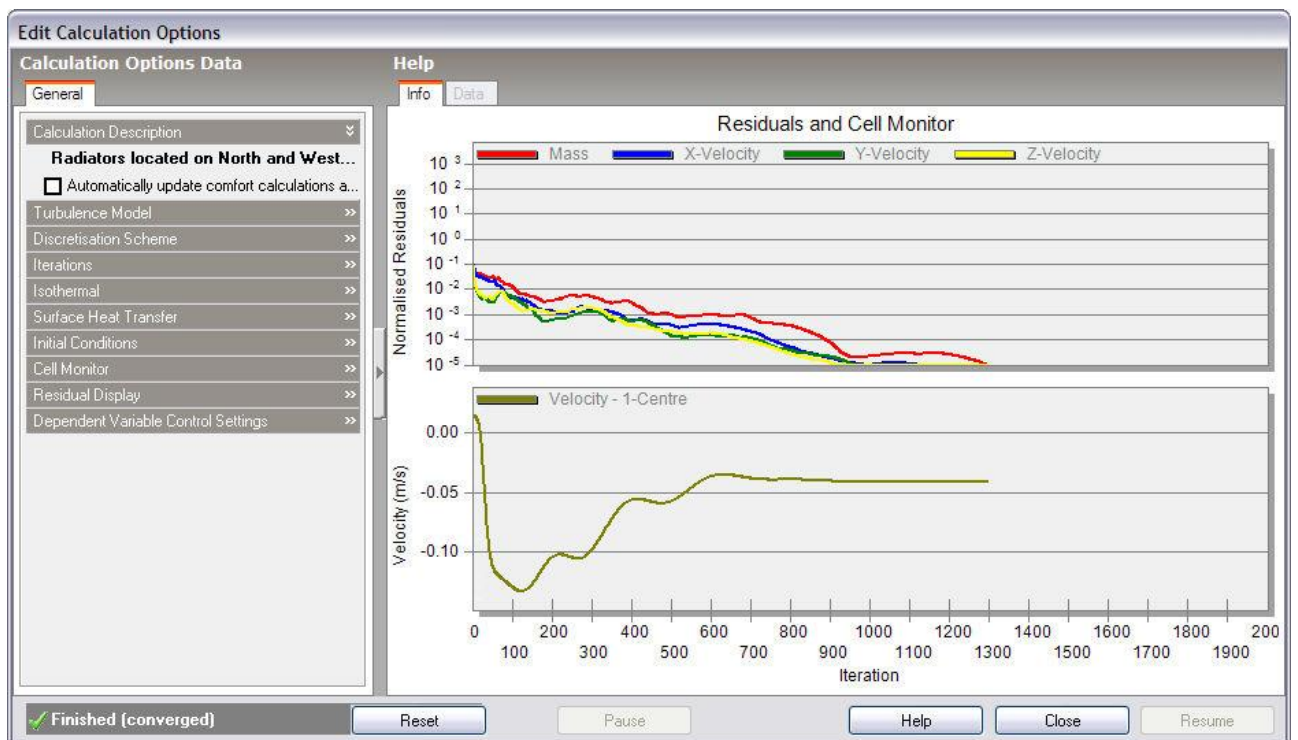


2.4. pav. Oro srauto padavimo vieta CFD modeliavimo lange



2.5. pav. Modeliavimo plokštumos CFD aplinkoje

CFD matematiniams skaičiavimams [12] dažniausiai naudojamas standartinis k-ε turbulencijos modelis (2.6 pav.). Šis modelis pakeičia momentinį greitį į Navje-Stokso ir energijos lygtis.



2.6 pav. CFD matematinių skaičiavimų aplinkos langas

DesignBuilder CFD modelis minėtoms lygtims spręsti naudoja primitivų kintamą metodą (DesignBuilder Modeliavimas + CFD mokymo vadovas), kurio lygtys turi bendrą formą [12] :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + (\rho U_j \varphi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) + S_\varphi \quad (2.5)$$

čia  $t$  – laikas (s),

$\rho$  - tankis ( $\text{kg/m}^3$ ),

$\varphi$  - oro greičio temperatūra,

$x_j$  - poslinkis  $j$  kryptimi (m),

$U_j$  - greitis  $j$  kryptimi (m/s),

$\Gamma_\varphi$  - apibendrintas oro srauto difuzijos koeficientas,

$S_\varphi$  - oro srauto šaltinis.

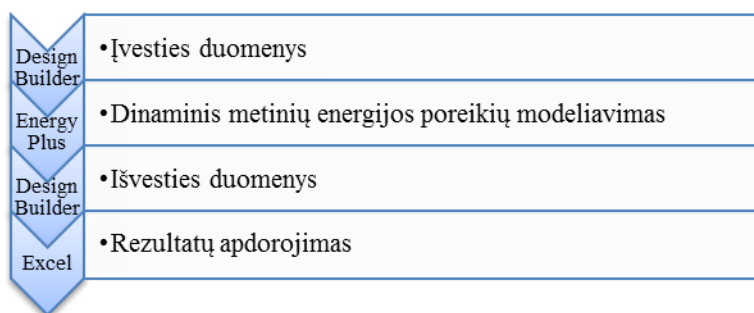
### 3. TYRIMO EIGA

#### 3.1. Tyrimui naudojamos skaičiavimo ir modeliavimo programos

Tyrimui, kurio metu nustatomos pastato skaičiuojamosios suminės energijos sąnaudos, pasirinkta kompiuterinė EnergyPlus programa [13], kuri atlieka integruotą modeliavimą. Tai reiškia, kad pastato elementai, pastatas ir jo sistemos sprendžiami vienu metu. Tokiu būdu kiekviename laiko tarpsnyje kondicionuojamoje erdvėje įvertinama, kaip vieno parametro pasikeitimas daro įtaka kitam. Norint gauti fiziškai realų modeliavimą, elementai turi būti tarpusavyje susieti. Kontūrai dalijami į vartojimo ir tiekimo puses, o sprendimo schema priklauso nuo tinkamo tiekimo ir vartojimo pusių susiejimo [13].

Kompiuterinei EnergyPlus programai atliekant sprendimą persidengimo su zonos šilumine talpa metodu, informacija iš ankstesnių laiko žingsnių naudojama numatyti sistemos atsaką ir atnaujinti zonos temperatūrą esamu laiko žingsniu.

Modeliavimui naudojama kompiuterinė programa DesignBuilder [14]. Naudojant šią programą sukuriamas pastato teorinis modelis bei įvedami reikalingi duomenys. Pastato energinį modeliavimą atlieka programa EnergyPlus, matematinį modeliavimą - CFD (computational fluid dynamics) modulis, o išeities duomenys pateikiami DesignBuilder programoje. Duomenų apdorojimas atliekamas Microsoft Excel programa. Pasirinkto pastato skaičiavimo ir modeliavimo schema pateikiama 3.1 paveiksle.



3.1 pav. Skaičiavimui naudotų programų schema

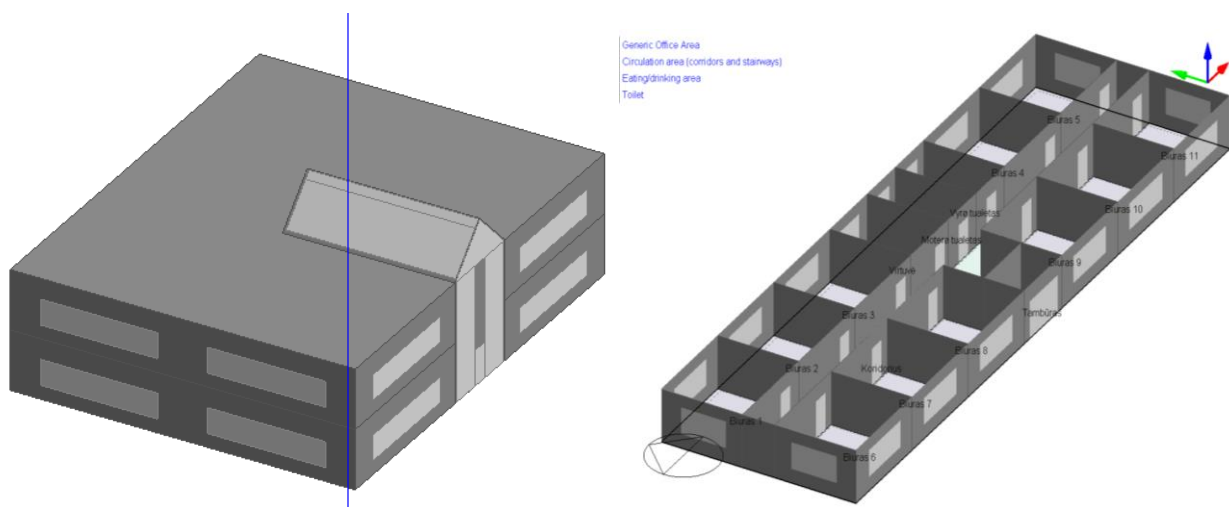
#### 3.2. Skaičiavimo modelių sukūrimas

Remiantis tipiniais pastatų planais, DesignBuilder programa sukurti teoriniai pastato modeliai dviem pastatams – biurų pastatui su suprojektuotu įėjimo atriumu ir biuro pastatui su įėjime suprojektuotu tambūru (3.2 pav., a, b).



Biurų pastatas su atriumu, bendras plotas 900,59 kv. m. Pastatas yra dviejų aukštų, jame įrengti atskiri biurų blokai su tam blokui skirtomis pagalbinėmis patalpomis (virtuvės, sanitariniai mazgai). Atriumas – patalpa su viršutiniu apšvietimu, kuri projektuojama per abu aukštus bei atlieka ir pastato įėjimo tambūro funkciją.

Kitas modelis – biurų pastatas su tambūru, kurio bendras plotas yra 399,46 kv. m. Pastatas vieno aukšto, jame įrengtos biurų patalpos, kurias jungia bendras koridorius, visų biurų darbuotojai naudojami bendra virtuvėle ir sanitariniais mazgais. Įėjime į pastatą suprojektuotas tambūras.



a) Biurų pastato su atriumu modelis

b) Biurų pastato su įėjimo tambūru aukšto modelis

### 3.2 pav. Geometriniai pastatų (a ir b) modeliai DesignBuilder programoje

Kuriant kompiuterinius modelius išskirtos šios žmonių aktyvumo (veiklos) zonos: biuro patalpos, bendro naudojimo patalpos, virtuvės ir sanitariniai mazgai; žmonių skaičius zonose parinktas pagal projektavimo normas. Modeliuojamiems pastatams parinktos vienodos pastato atitvarų konstrukcijos su STR 2.05.01:2013 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas“ [15] reikalaujamais A energetinio naudingumo klasės pastatams taikomais atitvarų šilumos perdavimo koeficientais (1 lentelė).

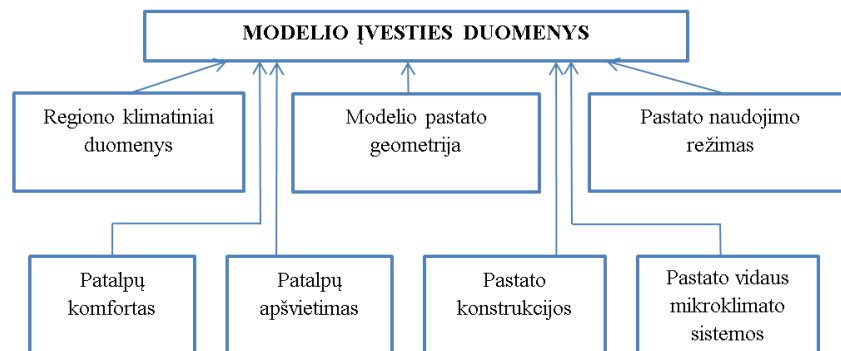
1 lentelė

#### Pastatų teorinio modelio duomenys

Pastato charakteristikos	Pastato charakteristikų apibūdinimas
Klimatiniai duomenys	Pastato energiniam modeliavimui panaudoti Kauno tipinių meteorologinių metų klimatiniai duomenys, įvesti į tarptautinio meteorologijos duomenų tinklo IWEC (angl. International Weather for Energy Calculations) [17] duomenų bazę.
Pastato atitvarinės konstrukcijos	A energetinio naudingumo klasės pastatams taikomi

Pastato charakteristikos	Pastato charakteristikų apibūdinimas
	atitvarų šilumos perdavimo koeficientai $U$ , $W/(m^2K)$ : išorės sienos – 0,15; stogai, pertvaros – 0,11; grindys ant grunto – 0,16; langai – 1,3; durys – 1,4. Norminės oro apykaitos $n_{50,N}$ (1/h) vertės esant 50 Pa slėgių skirtumui – 1.
Patalpų vidaus charakteristikos	Priimta, kad žiemą patalpose žmonių buvimo metu palaikoma 20 °C temperatūra, ne darbo metu palaikoma 12 °C temperatūra. Vėsinimo sistema vasarą palaiko 24 °C temperatūrą, ne darbo metu sistema išjungiamą. Patalpose palaikomas 500 lux apšvietos lygis.
Patalpų mikroklimato sistemų parametrai	Pastate naudojama vandeninė radiatorinė šildymo sistema, šilumos šaltinis – dujinis katilas, kurio efektyvumas 85 proc. Vėdinimui naudojama mechaninė vėdinimo sistema su pašildyto oro grąžinimo 0,65 proc. efektyvumu, o rekuperatoriaus ventiliatoriaus naudojamas elektros energijos kiekis neviršija 0,75 Wh/m <sup>3</sup> . Patalpoms vėsinti naudojama elektros energija, vėsinimo sistemos naudingumo koeficientas – 1,8. Pagalbinėse patalpose veikia natūralios ventiliacijos sistema.

Pastato energiniam modeliavimui būtini įvesties duomenys. Ankstesniame skyriuje buvo akcentuojama, kad pastatas yra sudėtinga sistema. 2.1 pav. supaprastintai pavaizduoti pagrindiniai patalpos oro parametrus veikiantys procesai, todėl parenkant įvesties duomenis juos galima suskirstyti į šias grupes: regiono klimatiniai duomenys, pastato geometrija, pastato naudojimo režimas, pageidaujamos (ar reikalavimais apibrėžtos) komforto sąlygos, apšvietimo parametrai, patalpų mikroklimatą palaikančios sistemos [16], pastato statybai naudotos (naudotinos) konstrukcijos. Modelio įvesties grupės pavaizduotos 3.3 pav.

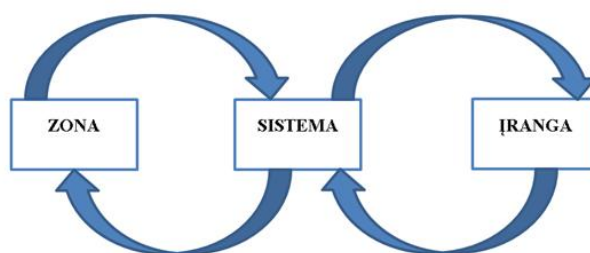


3.3 pav. Teorinio modelio įvesties duomenys

Atliekant teorinį modeliavimą, modelio įvesties duomenys gali būti koreguojami bet kuriame modelio kūrimo etape. Ši galimybė leidžia analizuojant modeliavimo rezultatus rasti optimalius sprendimus parenkant atitvarinių konstrukcijų parametrus ir pan.

### 3.3. Modeliavimo eiga

Iėjimo tambūro įtakos pastato metiniams energijos poreikiams tyrimui pasirinkta kompiuterinė EnergyPlus programa, kuri atlieka integruotą modeliavimą. Tai reiškia, kad pastato elementai, pastatas ir jo sistemos modeliuojami vienu metu. Tokiu būdu kiekviename laiko tarpsnyje kondicionuojamoje erdvėje įvertinama, kaip vieno parametro pasikeitimas daro įtaka kitam. Norint gauti fiziškai realų modeliavimą, elementai turi būti tarpusavyje susieti [13]. EnergyPlus programoje yra keli funkciniai elementai, kurie tarpusavyje sujungti kontūrais.



3.4 pav. Vienalaikio sprendimo schema EnergyPlus Engineering Referece

Kontūrai dalijami į vartojimo ir tiekimo puses, o sprendimo schema priklauso nuo tinkamo tiekimo ir vartojimo pusių susiejimo. Kompiuterinei EnergyPlus programai atliekant sprendimą persidengimo su zonos šilumine talpa metodu, informacija iš ankstesnių laiko žingsnių naudojama numatyti sistemos atsaką ir atnaujinti zonos temperatūrą esamu laiko žingsniu.

Patalpose mikroklimatą lemia trys pagrindiniai oro veiksniai [9] – oro temperatūra (T), drėgmė (Rh) ir judėjimas (v). Kompleksinis jų veikimas suformuoja žmogaus šiluminę savijautą patalpose. Oro judėjimą patalpose gali sukelti tiek natūralios konvekcinės srovės, tiek mechaninė ventilacija. Oro judėjimo greitis patalpose turėtų būti iki 0,3 m/s, tai sąlygoja mus supančio oro kaitą ir galimybę kvėpuoti švaresniu oru. Žmogaus organizmas pradeda jausti oro judėjimą, kurio greitis yra 0,15 m/s.

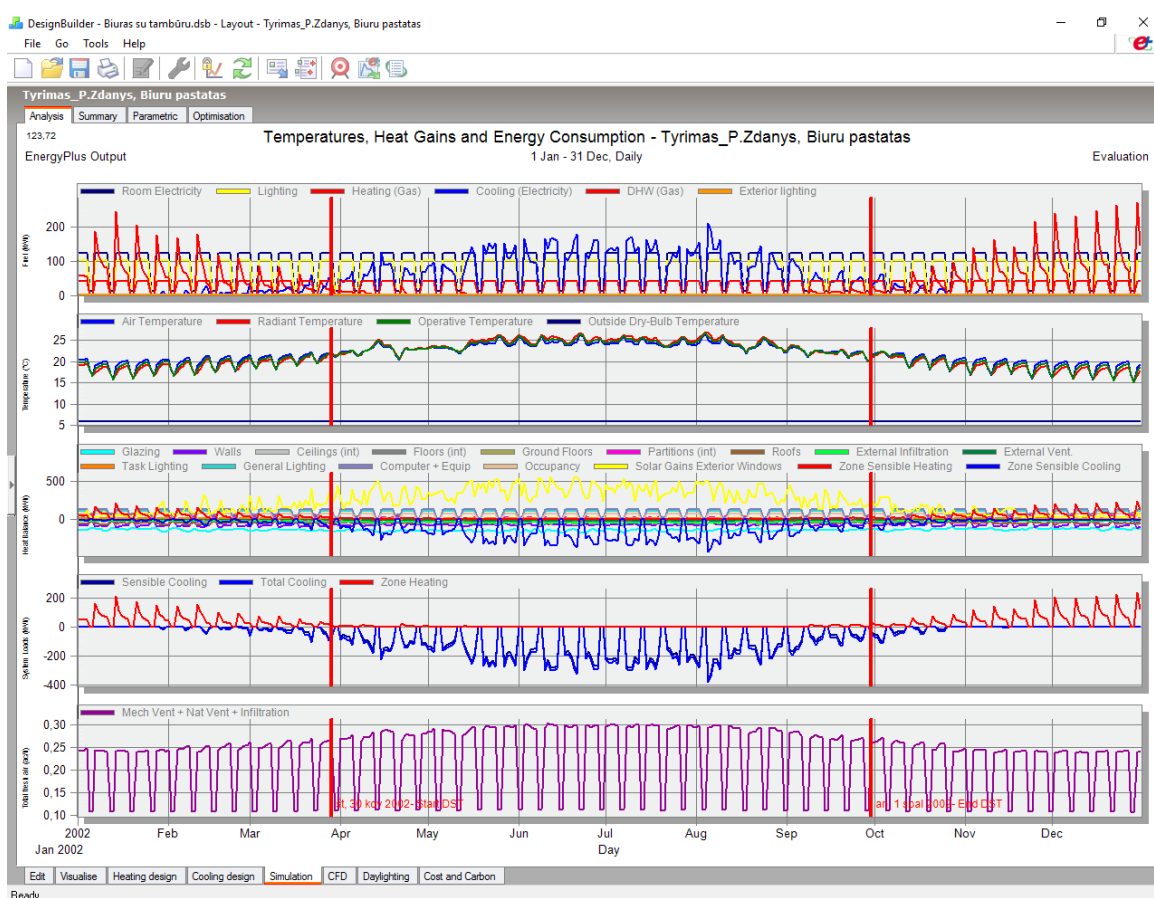
Pakankamas oro judėjimo greitis yra 0,05–0,1 m/s ir 0,15–0,5 m/s atitinkamai šaltuoju ir šiltuoju metų laikotarpiu, komfortui – 0,15 ir 0,25 m/s, santykinio aplinkos drėgnumo diapazonai – 30–75 % ir 40–60 %, pakankama temperatūra 18–26 °C ir 22–28 °C, tuo tarpu komfortui 20–24 °C ir 23–25 °C.

#### 3.3.1 Iėjimo tambūro įtaka pastato metiniams energijos poreikiams

Tyrimo metu atliktas modeliavimas abiem pastatams ir nustatyti metiniai šių pastatų energijos poreikiai (*1 variantas*). Siekiant išsiaiškinti, kokią įtaką pastatų metiniams energijos

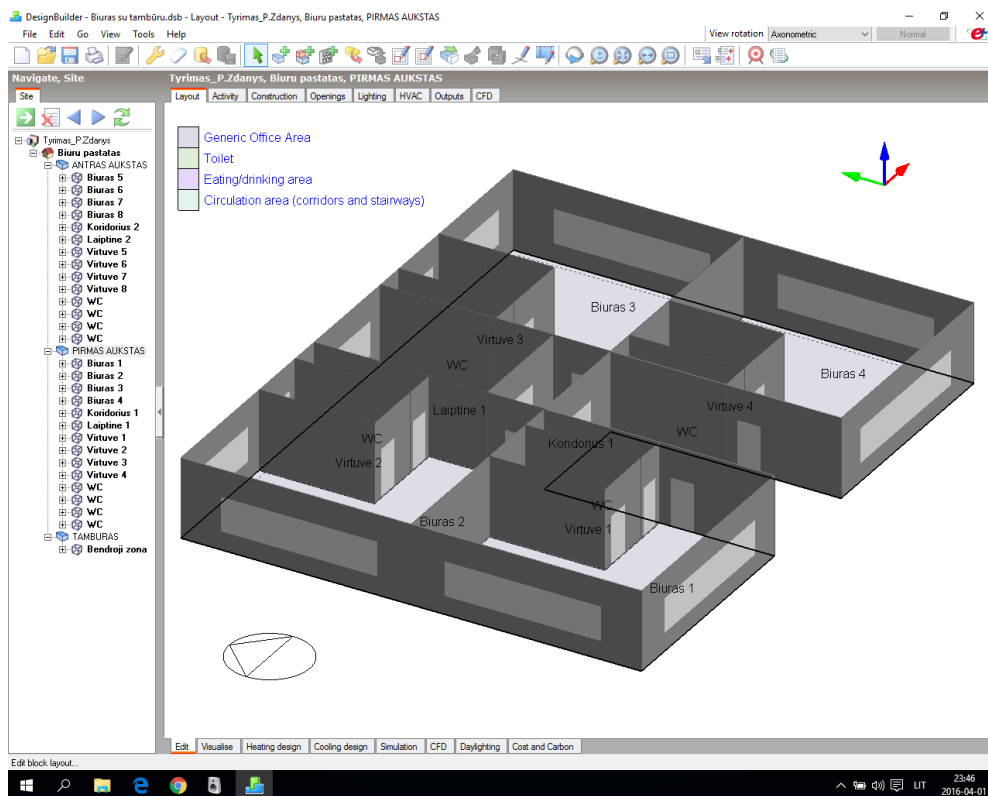
poreikiams turi pastatuose įrengti tambūrai, teoriniuose pastatų modeliuose panaikintos tambūrų patalpos ir EnergyPlus programa atliktas pakartotinis energijos poreikio modeliavimas (2 *variantas*). Tyrimų rezultatai pateikiami modeliavimo rezultatų analizės dalyje, tyrimo metu gautos ataskaitos pateikiamos magistro baigiamojo projekto 1 priede.

DesignBuilder programa [8] sukūrus pasirinkto pastato teorinį modelį ir EnergyPlus [9] programa atlikus modeliavimą, gauname tiriamojo pastato metines skaičiuojamąsias sumines energijos sąnaudas visam pastatui ir vienam kvadratiniam metrui pastato naudingojo ploto. Programa taip pat pateikia energijos poreikį atskiroms inžinerinėms sistemoms – šildymui, vėdinimui, vėsinimui, apšvietimui, vandens pašildymui, bei kitus analizei reikalingus skaitinius ir grafinius duomenis (3.5 pav.).



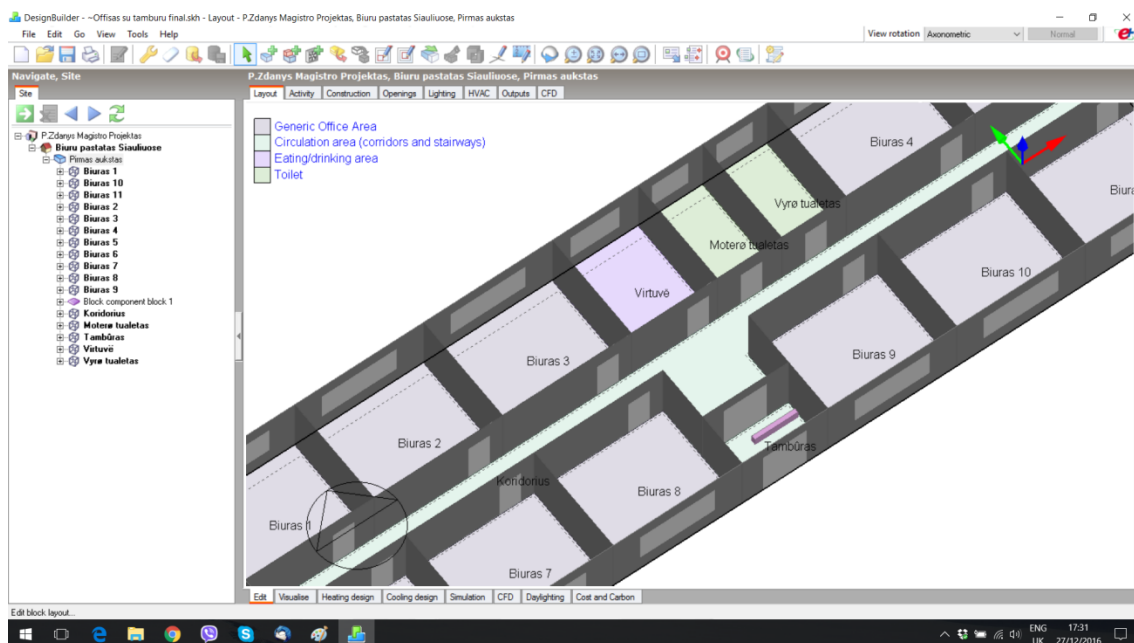
3.5 pav. EnergyPlus programos modeliavimo rezultatų langas

*1 variantas*. Biurų pastatas su atriumu (3.6 pav.), bendras plotas 900,59 kv. m. Atlikus modeliavimą EnergyPlus programa, nustatoma, kad skaičiuojamosios suminės energijos sąnaudos vienam kvadratiniam metrui pastato naudingo ploto sudaro 117,69 kWh/(m<sup>2</sup> x metai), bendras energijos poreikis – 105 994,47 kW/metams.



3.6 pav. Biurų pastato su atriumu pirmo aukšto planas DesignBuilder programoje

Biurų pastatas su tambūru (3.7 pav.), bendras plotas 399,46 kv. m. Atlikus modeliavimą, programa suskaičiuoja, kad skaičiuojamosios suminės energijos sąnaudos vienam kvadratiniam metrui pastato naudingo ploto sudaro 96,69 kWh/(m<sup>2</sup>xmetai), bendras energijos poreikis – 37939,25 kW/metams.



3.7 pav. Biurų pastato su tambūru pirmo aukšto planas DesignBuilder programoje

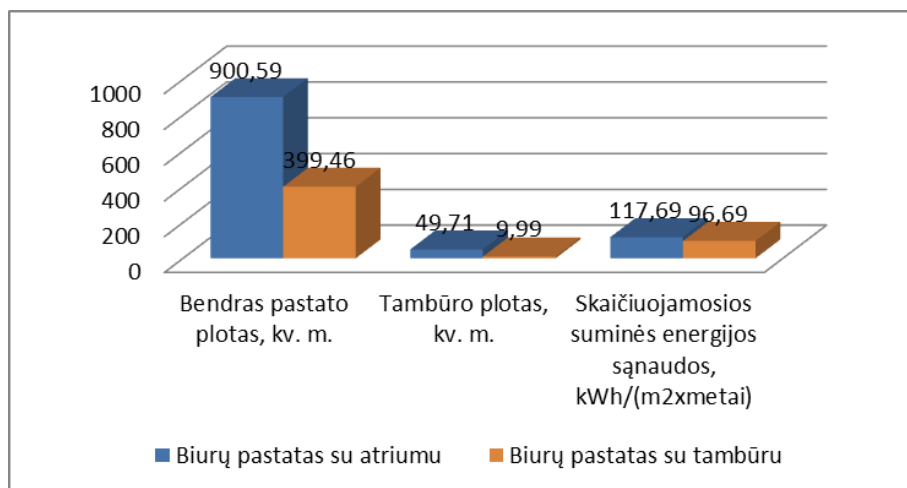
Detalios pastatų skaičiuojamosios suminės energijos sąnaudos pateikiamos 2 lentelėje.

2 lentelė

Tyrimo 1 varianto įvesties duomenys ir rezultatai

Pastatas	Bendras pastato plotas, kv. m.	Tambūro plotas, kv. m.	Metinis energijos poreikis pastatui, kWh	Metinės energijos sąnaudos, kWh/(m <sup>2</sup> xmetai)	Energijos sąnaudų pasiskirstymas	Energijos sąnaudos, kWh
Biurų pastatas su atriumu	900,59	49,71	105.994,47	117,69	Šildymui	8.914,69
					Vėdinimui	26.707,92
					Karšto vandens ruošimui	9.340,55
					Elektros įrangai	33.559,19
					Apšvietimui	27.472,11
Biurų pastatas su tambūru	399,46	9,99	37.939,25	96,69	Šildymui	14.033,54
					Vėdinimui	30,18
					Karšto vandens ruošimui	1.106,20
					Elektros įrangai	13.117,07
					Apšvietimui	9.652,27

Modeliavimo duomenys pateikiami 3.8 pavyzdyje.



3.8 pav. Pastatų su tambūrais modeliavimo duomenys

2 variantas. Biurų pastatas (be atriumo), bendras plotas 836,57 kv. m. Atlikus modeliavimą EnergyPlus programa, nustatoma, kad skaičiuojamosios suminės energijos sąnaudos vienam kvadratiniam metrui pastato naudingo ploto sudaro 116,13 kWh/(m<sup>2</sup>xmetai), bendras energijos poreikis – 97147,40 kW/metams.

Biurų pastatas (be tambūro), bendras plotas 400,22 kv. m. Atlikus modeliavimą, programa suskaičiuoja, kad skaičiuojamosios suminės energijos sąnaudos vienam kvadratiniam metrui pastato naudingo ploto sudaro 96,09 kWh/(m<sup>2</sup>xmetai), bendras energijos poreikis – 38455,84 kWh/metams.

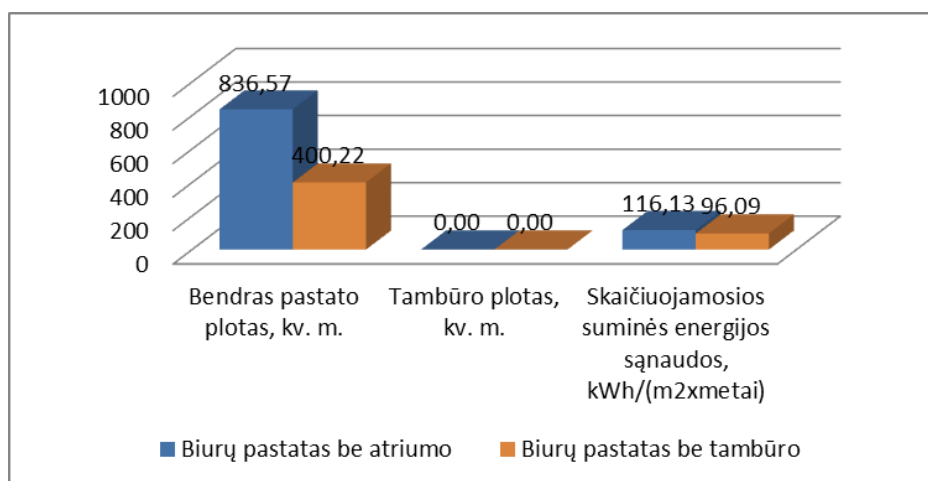
Detalios pastatų energijos sąnaudos pateikiamos 3 lentelėje.

3 lentelė

Tyrimo 2 varianto įvesties duomenys ir rezultatai

Pastatas	Bendras pastato plotas, kv. m.	Tambūro plotas, kv. m.	Metinis energijos poreikis pastatui, kWh	Metinės energijos sąnaudos, kWh/(m <sup>2</sup> xmetai)	Energijos sąnaudų pasiskirstymas	Energijos sąnaudos, kWh
Biurų pastatas (be atriumo)	836,57	-	97.147,40	116,13	Šildymui	9.912,44
					Vėdinimui	20.618,78
					Karšto vandens ruošimui	9.322,17
					Elektros įrangai	33.207,30
					Apšvietimui	24.086,71
Biurų pastatas (be tambūro)	400,22	-	38.455,84	96,09	Šildymui	14.533,96
					Vėdinimui	34,44
					Karšto vandens ruošimui	1.106,20
					Elektros įrangai	13.117,07
					Apšvietimui	9.664,17

Gauti modeliavimo duomenys pateikiami 3.9 pavyzdyje.



3.9 pav. Pastatų be tambūrų modeliavimo duomenys.

Analizuojant abiejų tyrimų rezultatus matome, kad tambūro įrengimas pastatuose turi nedidelę įtaką pastato skaičiuojamosioms suminės energijos sąnaudoms.

### 3.3.2 Įėjimo oro užsklandų CFD modeliavimas

DesignBuilder programa sukurtiems teoriniams pastato modeliams – biurų pastatui su suprojektuotu įėjimo atriumu, biuro pastatui su įėjime suprojektuotu tambūru ir biurų pastatui be įėjime suprojektuoto tambūro – projektuojamos oro užsklandos virš įėjimo durų. Šiam elementui bus atliekami matematiniai CFD skaičiavimai [12].

4 lentelėje pateikiami apibendrinti modeliavimo parametrų įvesties duomenys, tyrimo metu gautos ataskaitos pateikiamos magistro baigiamojo projekto 2 - 4 prieduose.

4 lentelė

CFD modeliavimo parametrų įvesties duomenys

Elementas	Kategorija	Parametrai
Pastatas	Vidaus temperatūra	24 <sup>0</sup> C vasaros režimu ir 21 <sup>0</sup> C žiemos režimu
Durys	Išmatavimai	2 m x 2,4 m
Oro užsklanda	Oro tiekimo greitis ir temperatūra	15 m/s su 20 <sup>0</sup> oro srovės pasvirimo kampu, 24 <sup>0</sup> C vasaros režimu ir 21 <sup>0</sup> C žiemos režimu
	Oro tiekimo ertmės išmatavimai	0,08 m x 2 m
	Oro paėmimo ertmės išmatavimai	0,2 m x 2 m
CDF	Turbulencijos modelis	Standartinis k-ε
	Išorės temperatūra	-20 <sup>0</sup> C ir -5 <sup>0</sup> C žiemos režimu ir 15 <sup>0</sup> C, 30 <sup>0</sup> C vasaros režimu
	Oro srauto reikšmės	500l/s, 800 l/s ir 1200 l/s

Šio tyrimo tikslas yra CFD modeliavimo būdu DesignBuilder programa parinkti konkrečiam pastatui tinkamą įėjimo durų oro užsklandą ir palyginti metinius energijos poreikius pastatui.

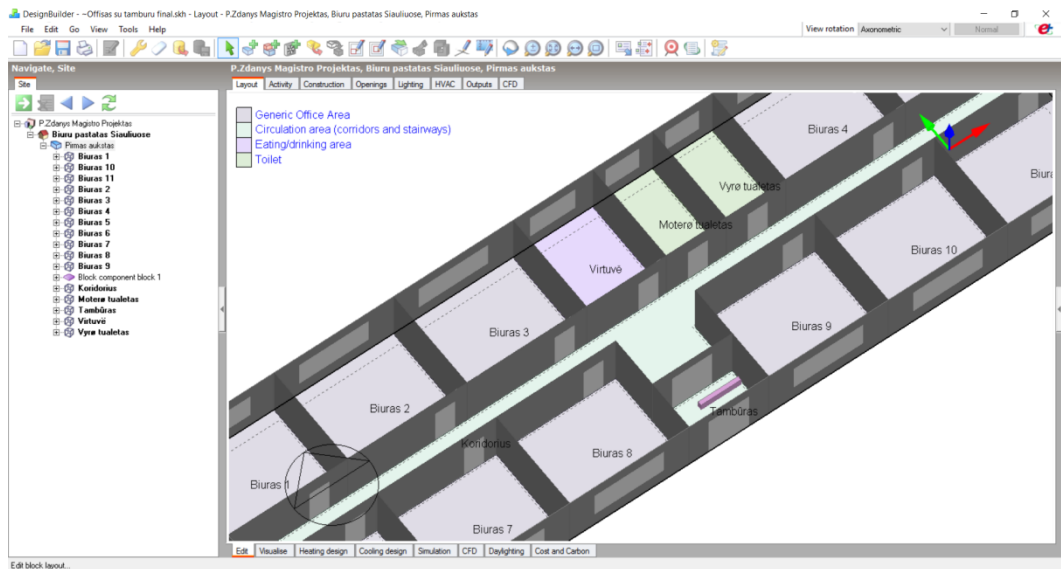
CFD tyrimas atliekamas trims skirtingiems įėjimo į pastatą oro užsklandos projektavimo variantams:

- 1 variantas. Vienguboms įėjimo durims su tambūru ir oro užsklanda;
- 2 variantas. Vienguboms įėjimo durims be tambūro su oro užsklanda;
- 3 variantas. Vienguboms įėjimo į atriumą durims su oro užsklanda.



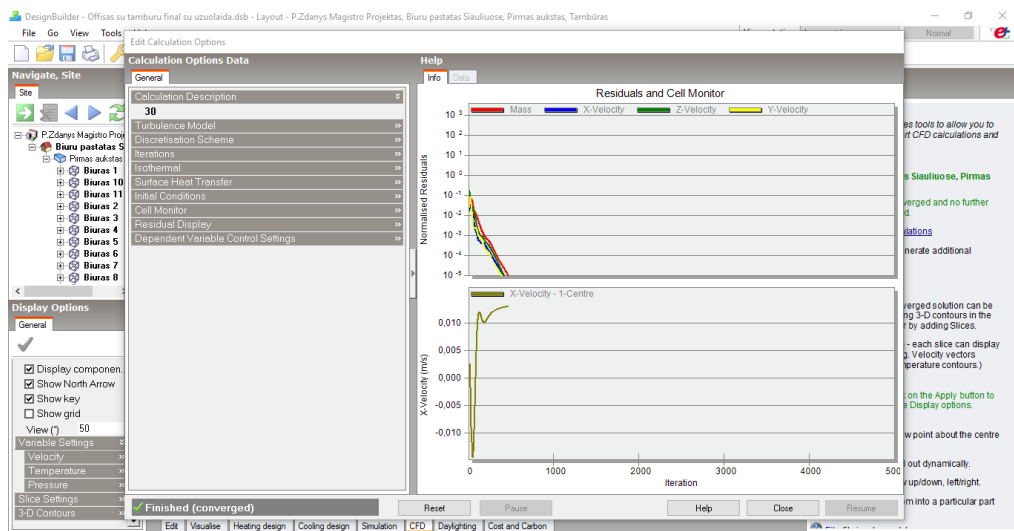
### 3.3.2.1. Pastato su tambūru oro užsklandos CFD modeliavimas

Sukurtame teoriniame pastato modelyje įėjimo tambūre projektuojamas papildomas elementas oro užsklandai virš įėjimo durų generuoti (3.10 pav.). Naujame elemente (oro užsklandoje) projektuojamas oro paėmimo ir oro tiekimo ertmės, oro tiekimo greitis, oro srovės pasvirimo kampas, reikalingas oro srauto kiekis, temperatūra ir kiti parametrai.

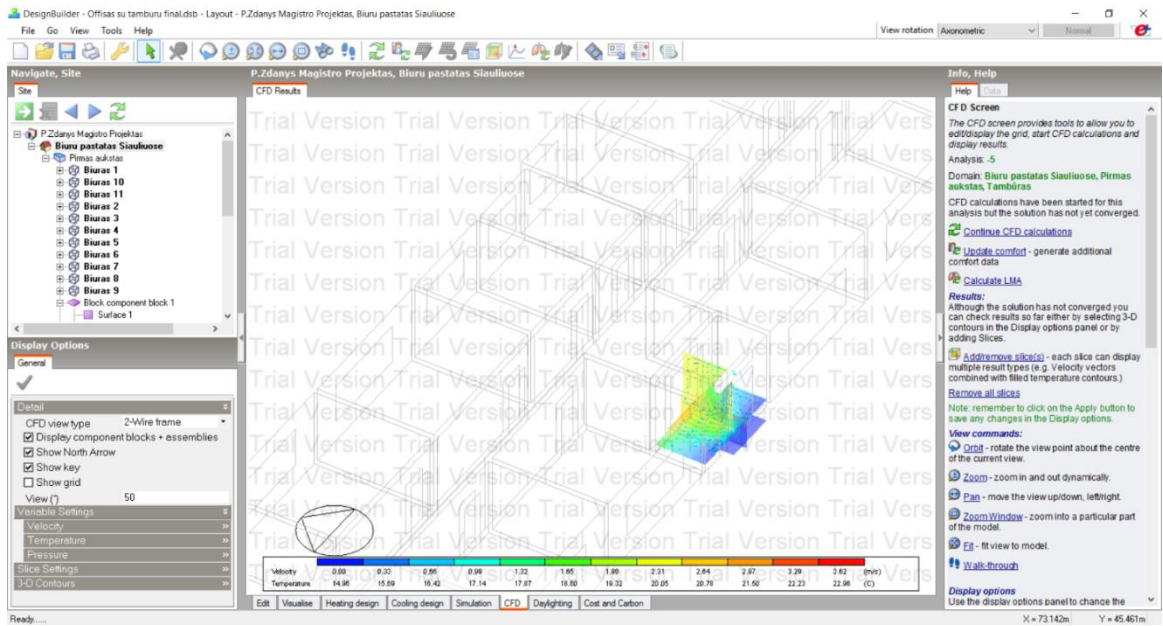


3.10 pav. Biurų pastato su tambūre suprojektuota oro užsklanda teorinis modulis

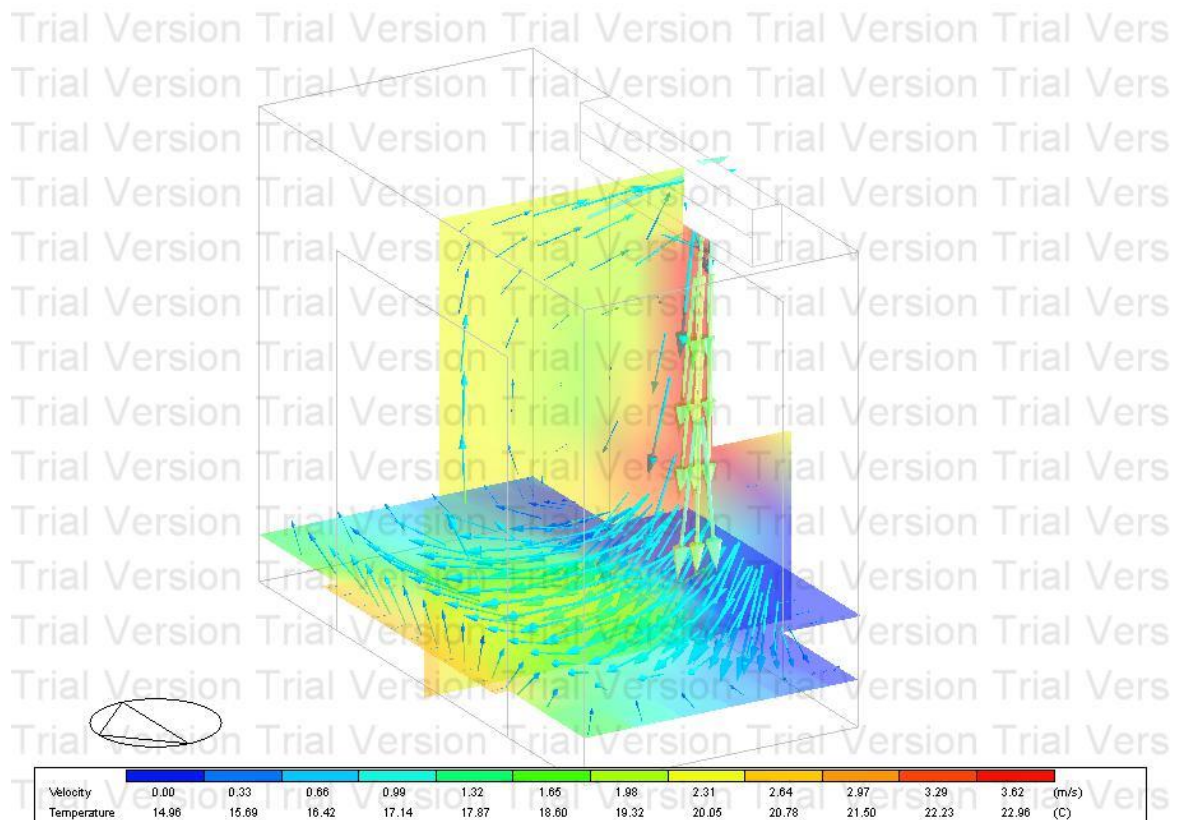
Programoje suvedami modeliavimo parametų įvesties duomenys ir atliekamas CFD skaičiavimas (3.11 pav.). DesignBuilder programai atlikus skaičiavimus, vartotojui pateikiami vaizdiniai ir skaitiniai skaičiavimų rezultatai (3.12 pav. – 3.15 pav.).



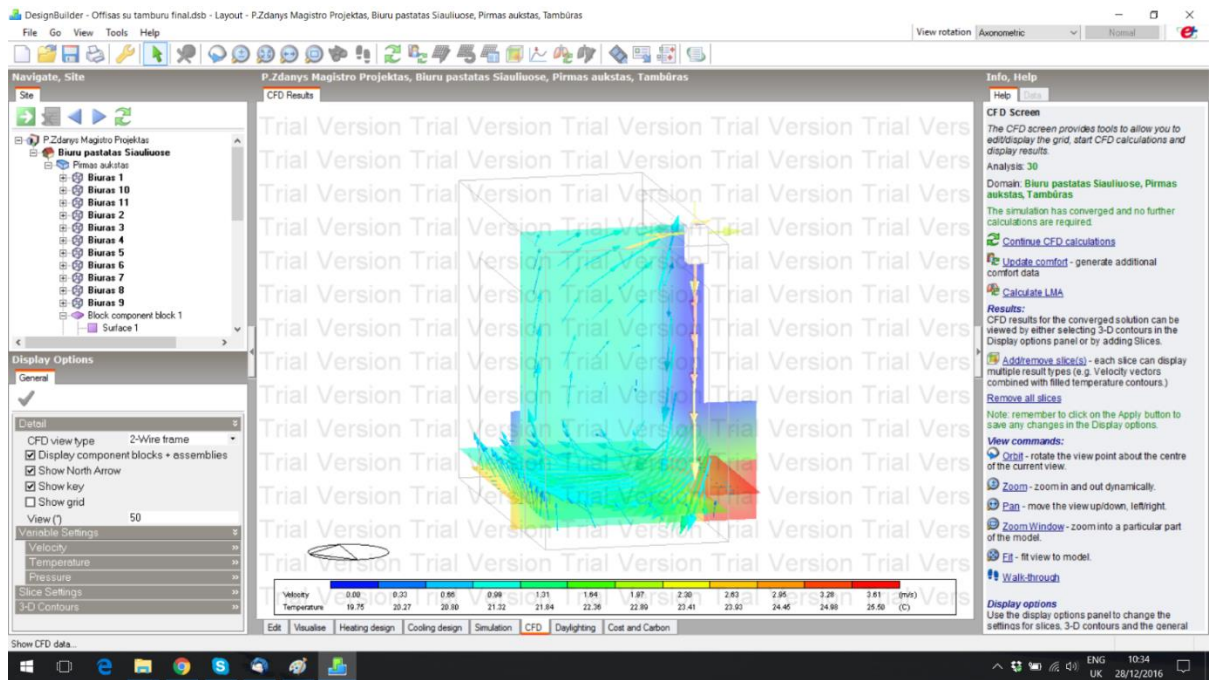
3.11 pav. CFD įvesties duomenų programos langas



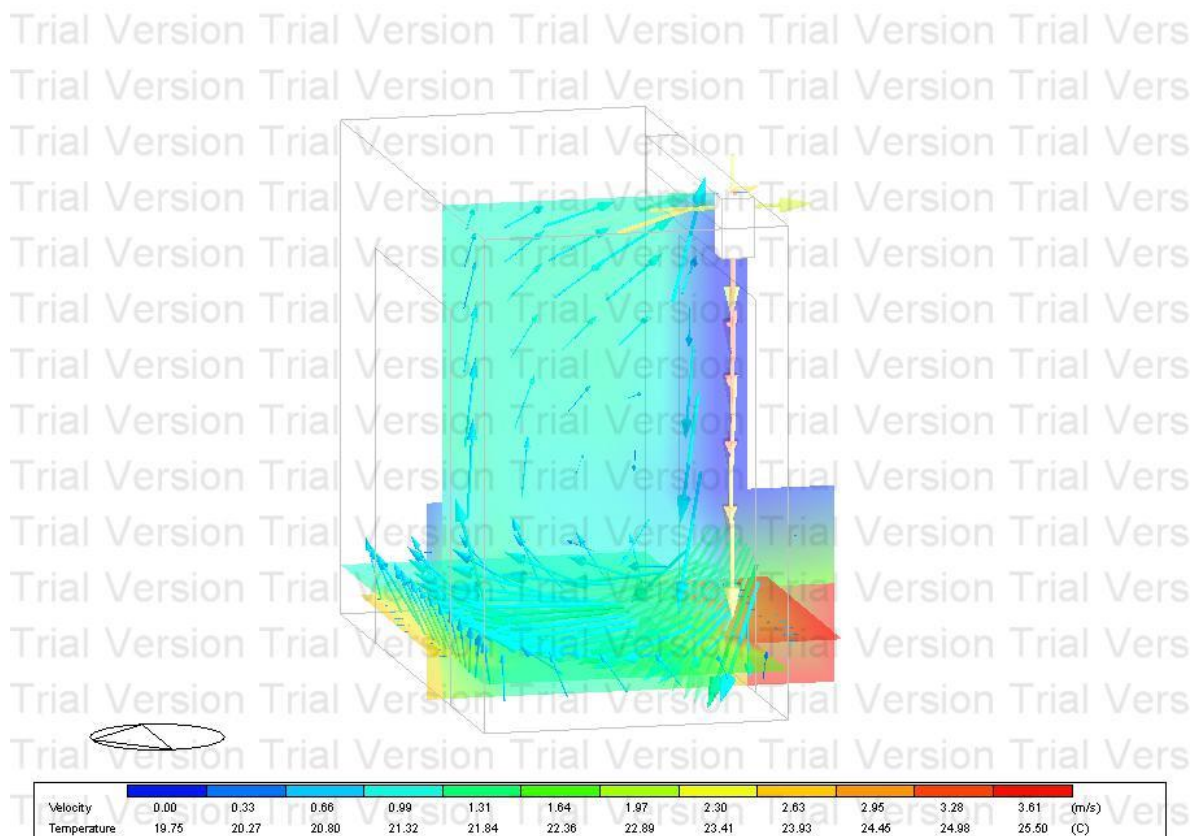
3.12 pav. DesignBuilder programos langas atliekant oro užsklandos skaičiavimus su 500 l/s prie -  
5°C



3.13 pav. DesignBuilder programos skaičiavimo rezultatų langas (oro srauto greitis ir temperatūra  
prie -5°C ir 500 l/s)



3.14 pav. DesignBuilder programos skaičiavimo rezultatų langas (oro srauto greitis ir temperatūra esant 1200 l/s prie 30°C)



3.15 pav. DesignBuilder programos skaičiavimo rezultatų langas (oro srauto greitis ir temperatūra prie 30°C ir 1200 l/s)

Atliktų skaičiavimų biurų pastatui su tambūru įvesties duomenys ir gauti rezultatai pateikiami 5 lentelėje.

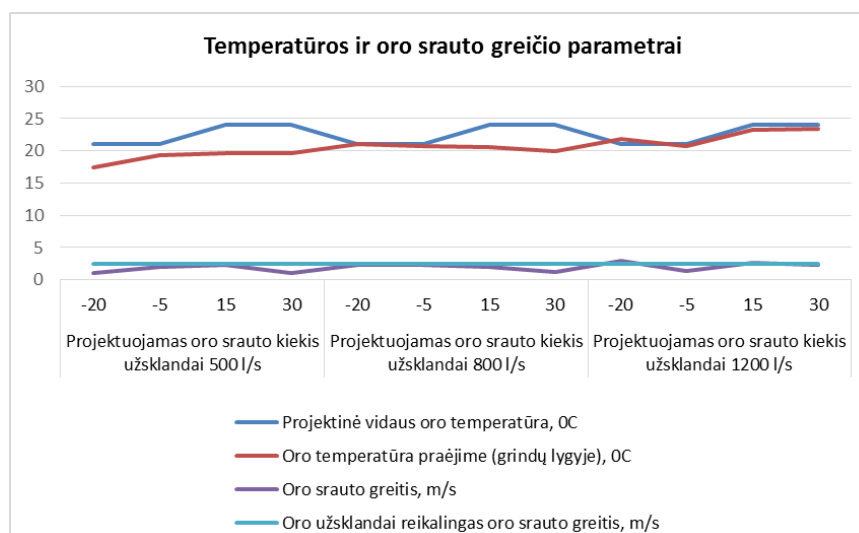
5 lentelė

CFD skaičiavimo biurų pastatui su tambūru įvesties duomenys ir rezultatai

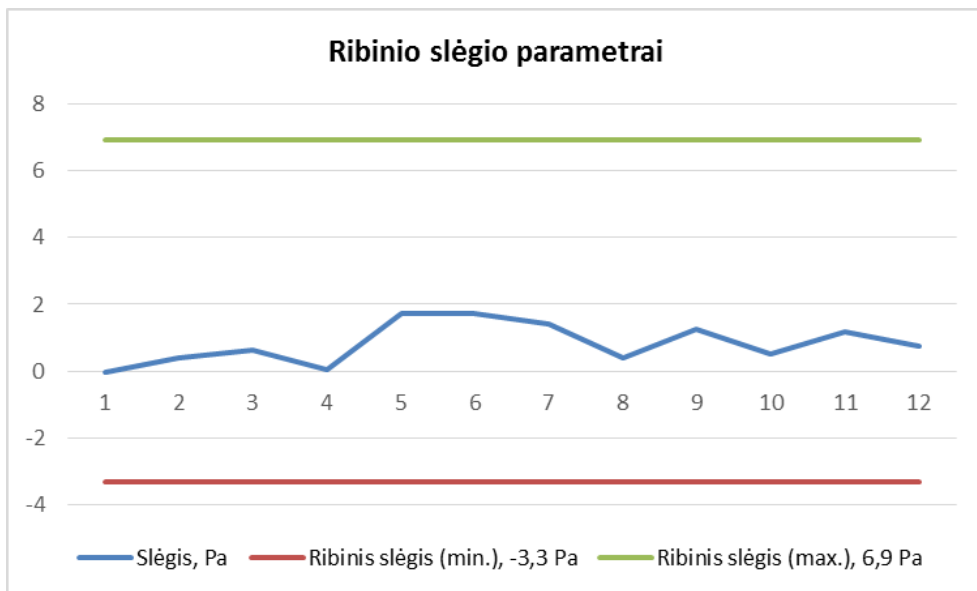
Pastatas	Bendras pastato plotas, kv. m.	Tambūro plotas, kv. m.	Projektuojamas oro srauto kiekis užsklandai, l/s	Lauko oro temperatūra, °C	Projektinė patalpos oro temperatūra, °C	Oro temperatūra praėjime (grindų lygyje), °C	Slėgis, Pa	Oro srauto greitis, m/s
Biurų pastatas su tambūru	399,46	9,994	500	-20	21	17,43	-0,05	0,99
				-5	21	19,32	0,41	1,98
				15	24	19,71	0,61	2,30
				30	24	19,60	0,04	0,99
			800	-20	21	21,07	1,72	2,31
				-5	21	20,78	1,73	2,31
				15	24	20,56	1,40	2,03
				30	24	19,89	0,40	1,16
			1200	-20	21	21,80	1,25	2,94
				-5	21	20,79	0,49	1,31
				15	24	23,22	1,17	2,62
				30	24	23,41	0,75	2,30

Prenkant tinkamą oro užsklandą įėjimui į biurų pastatą su tambūru, buvo atsižvelgiama į šiuos pagrindinius reikalavimus – slėgį (Pa), oro srauto greitį (m/s) ir oro temperatūrą (°C) praėjime.

Atlikti oro užsklandų modeliavimo variantų grafiniai pavyzdžiai ir pasirinkimo kriterijai matomi 3.16 ir 3.17 paveiksluose

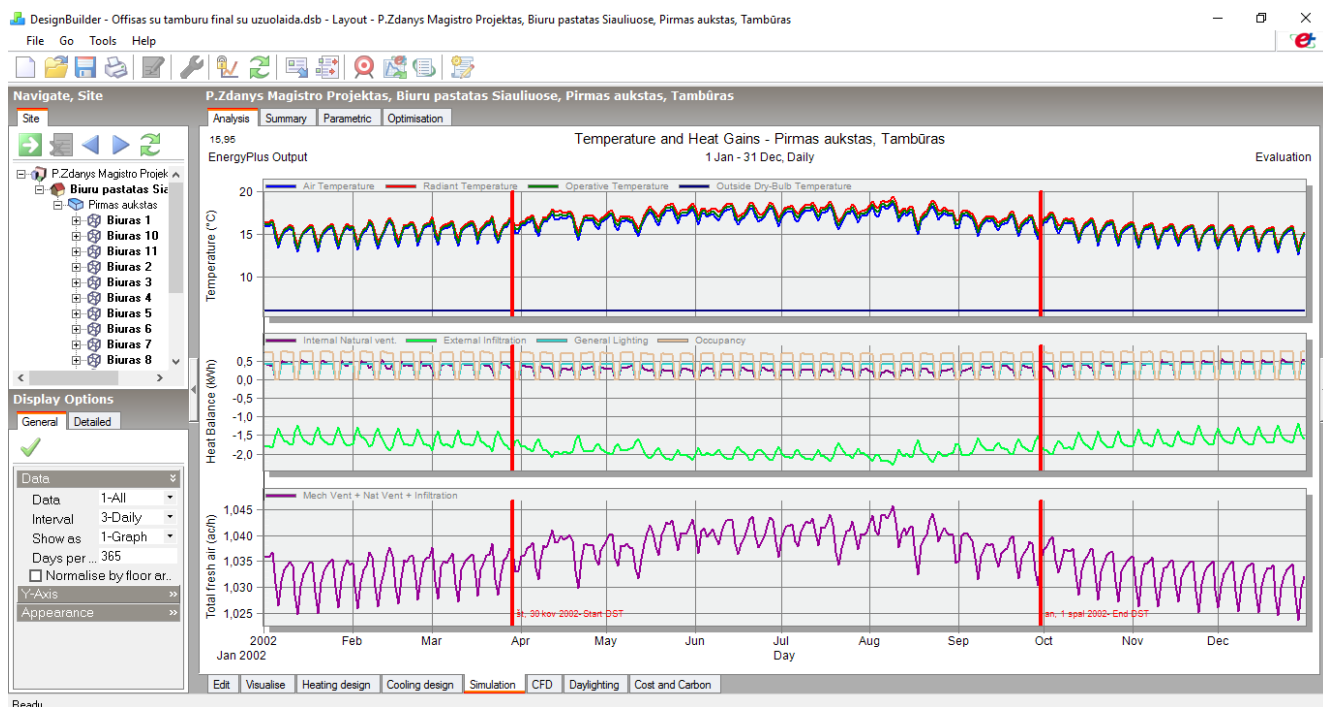


3.16 pav. CFD skaičiavimo duomenų grafinė išraiška



3.17 pav. Oro užsklandos ribinių slėgio parametrų atitiktens grafikas

Atlikus CFD skaičiavimus ir parinkus tinkamą įėjimo durų oro užsklandą, Energy Plus programa atliekamas pakartotinas energijos poreikių šiam biurų pastatui su tambūru simuliacijoms (3.18 pav.). Simuliacijos ataskaitos duomenys pateikiami 6 lentelėje.



3.18 pav. Biurų pastato su tambūru ir oro užsklanda metinių suvartojimų simuliacija

Simuliacijos ataskaitos duomenys pateikiami 6 lentelėje, visa ataskaita pateikiama magistro baigiamojo projekto 5 priede.

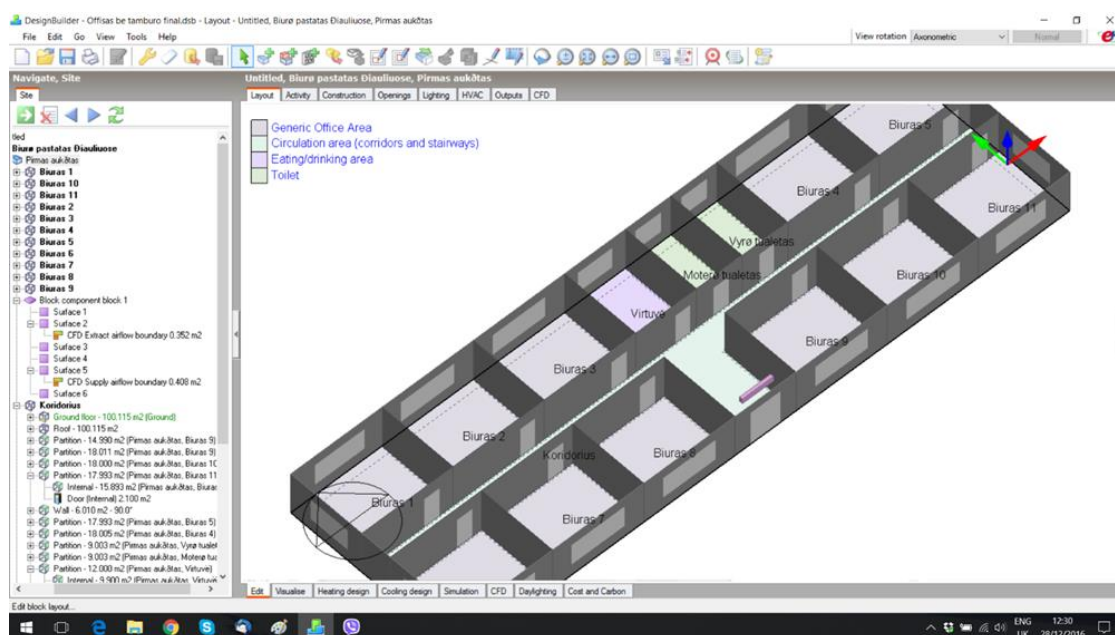


## Biurų pastato su tambūru metinių energijos suvartojimų skaičiavimo rezultatai

Pastatas	Bendras pastato plotas, kv. m.	Tambūro plotas, kv. m.	Metinis energijos poreikis pastatui, kWh	Metinės energijos sąnaudos, kWh/(m <sup>2</sup> xmetai)	Energijos sąnaudų pasiskirstymas	Energijos sąnaudos, kWh
Biurų pastatas su tambūru	399,46	9,994	37.939,25	96,69	Šildymui	14.033,54
					Vėdinimui	30,18
					Karšto vandens ruošimui	1.106,20
					Elektros įrangai	13.117,07
					Apšvietimui	9.652,27
Biurų pastatas su tambūru ir oro užsklanda	399,46	9,994	37.618,48	95,87	Šildymui	13.714,25
					Vėdinimui	28,69
					Karšto vandens ruošimui	1.106,20
					Elektros įrangai	13.117,07
					Apšvietimui	9.652,27

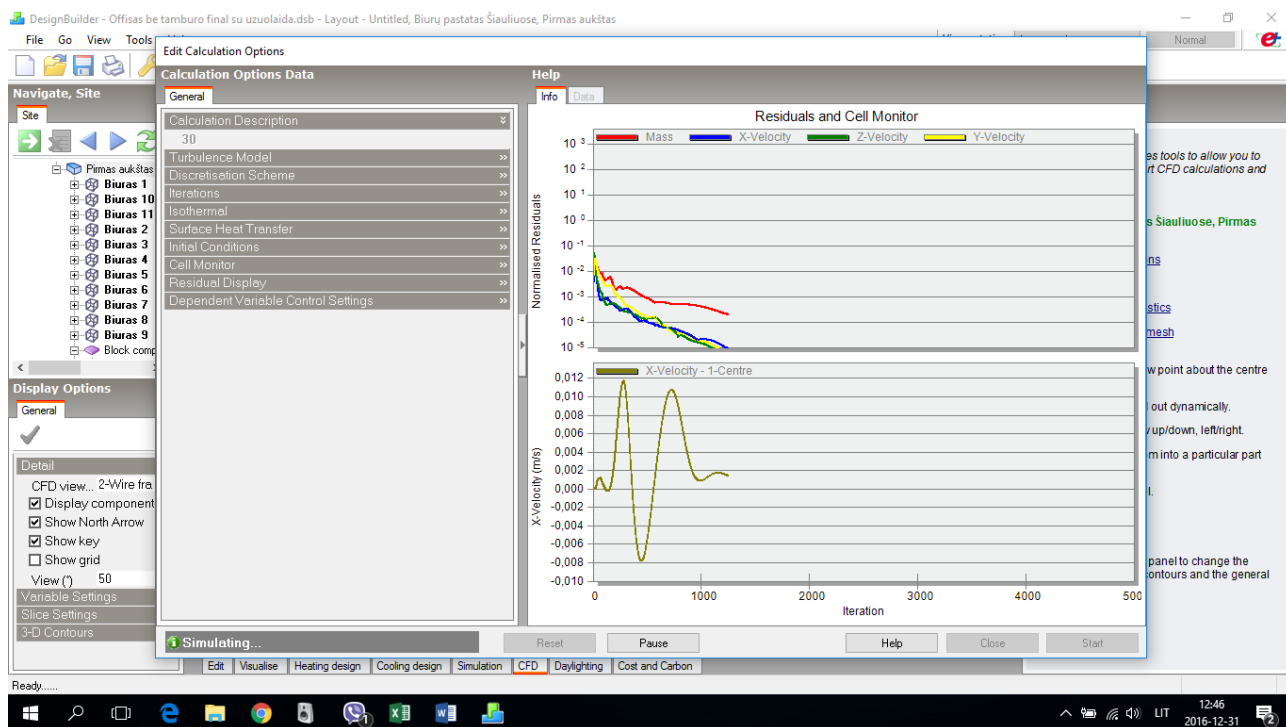
## 3.3.2.2. Pastato be tambūro CFD modeliavimas

Sukurtame teoriniame pastato modelyje įėjimo tambūre projektuojamas papildomas elementas oro užsklandai virš įėjimo durų generuoti (3.19 pav.). Naujame elemente (oro užsklandoje) projektuojamos oro paėmimo ir oro tiekimo ertmės, oro tiekimo greitis, oro srovės pasvirimo kampas, reikalingas oro srauto kiekis, temperatūra ir kiti parametrai.

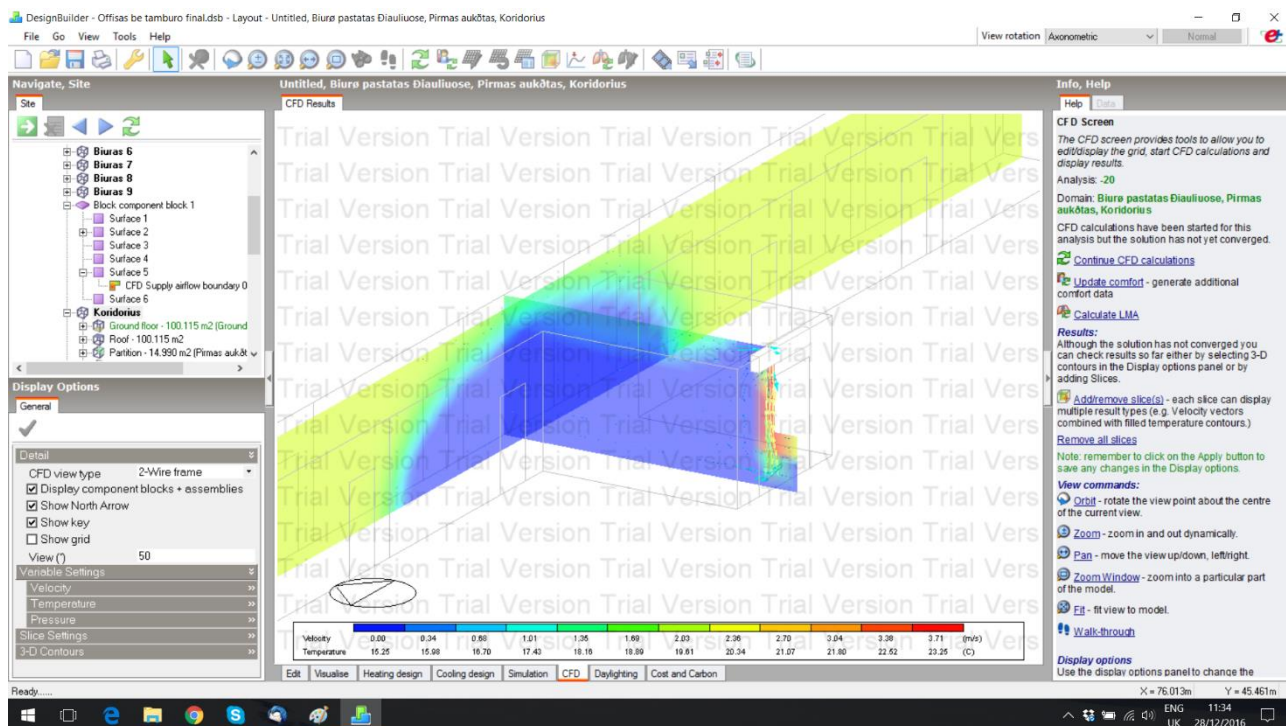


3.19 pav. Biurų pastatas su tambūre suprojektuota oro užsklanda

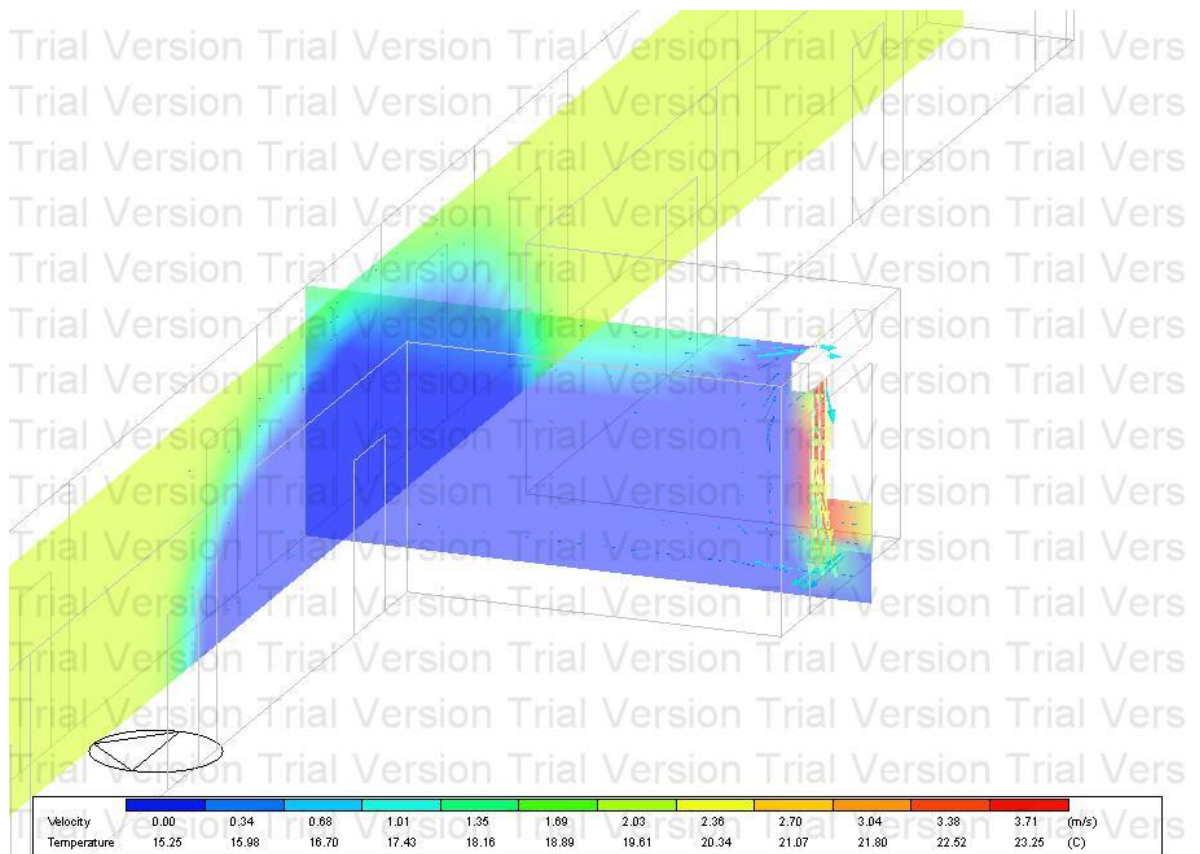
Kompiuterinės programos DesignBuilder pagalba suvedami modeliavimo parametrų įvesties duomenys ir atliekamas CFD skaičiavimas (3.20 pav.). Programos CFD moduliui atlikus skaičiavimus, vartotojui pateikiami vaizdiniai ir skaitiniai skaičiavimų rezultatai (3.21 – 3.24 pav.).



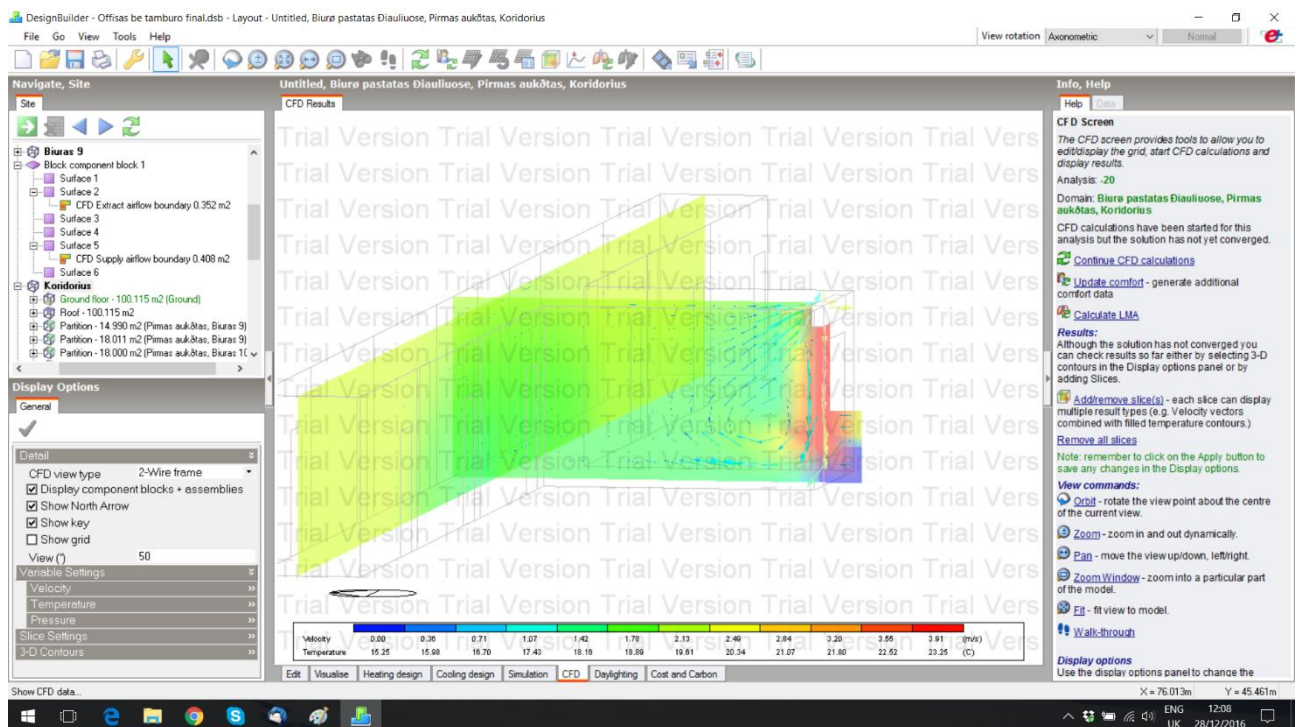
3.20 pav. Pastato be tambūro oro užsklandos CFD skaičiavimas



3.21 pav. DesignBuilder programos langas atliekant oro užsklandos skaičiavimus su 500 l/s prie - 20°C

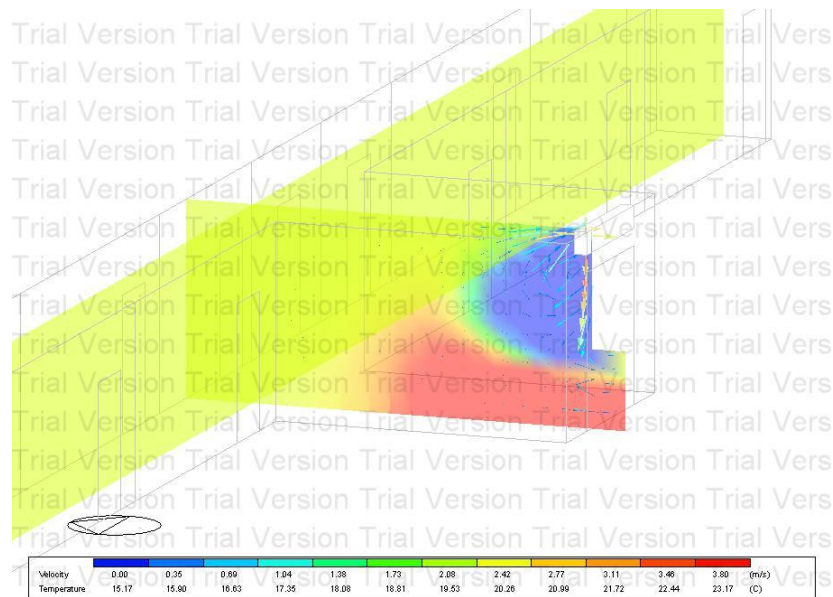


3.22 pav. DesignBuilder programos skaičiavimo rezultatų langas (oro srauto greitis ir temperatūra prie  $-20^{\circ}\text{C}$  ir 500 l/s)



3.23 pav. DesignBuilder programos skaičiavimo rezultatų langas (oro srauto greitis ir temperatūra esant 1200 l/s prie  $-20^{\circ}\text{C}$ )





3.24 pav. DesignBuilder programos skaičiavimo rezultatų langas (oro srauto greitis ir temperatūra prie 30°C ir 1200 l/s)

Atliktų skaičiavimų biurų pastatui su tambūru įvesties duomenys ir gauti rezultatai pateikiami 7 lentelėje.

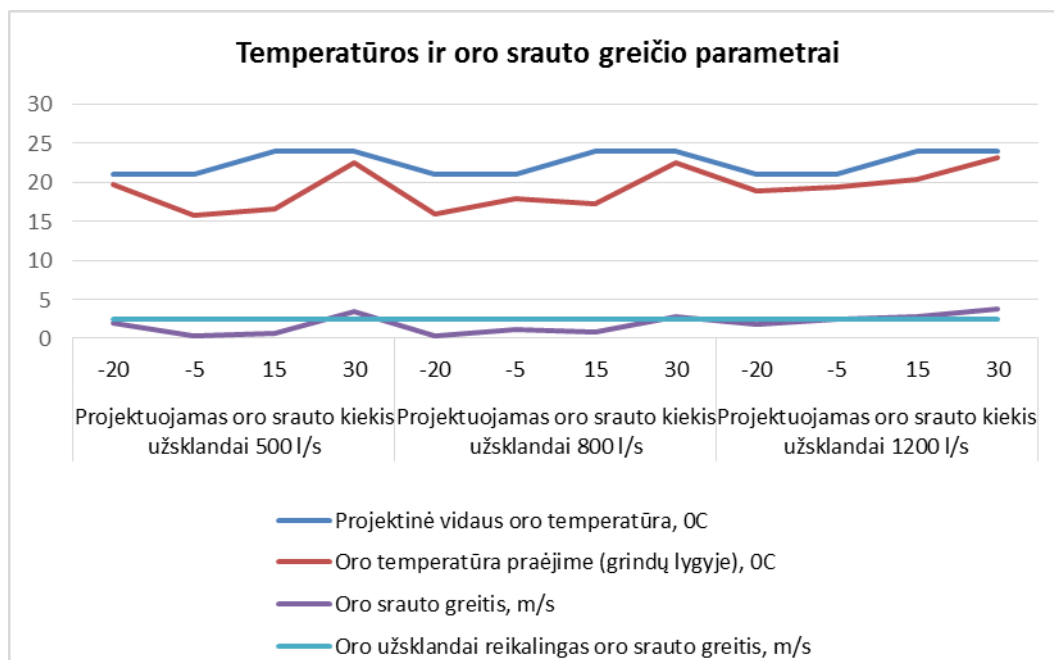
7 lentelė

Tyrimo biurų pastatui be tambūro įvesties duomenys ir rezultatai

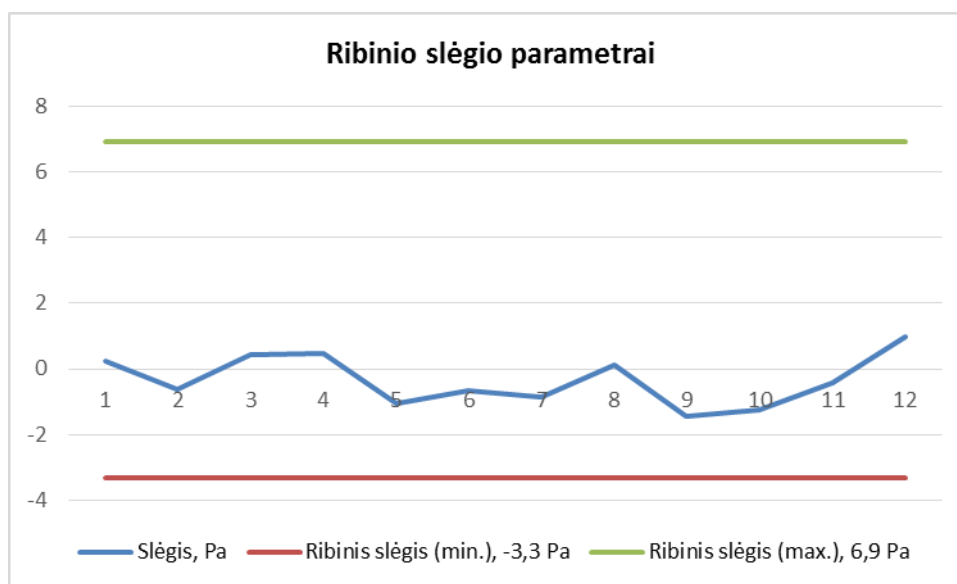
Pastatas	Bendras pastato plotas, kv. m.	Tambūro plotas, kv. m.	Projektuojamas oro srauto kiekis užsklandai, l/s	Lauko oro temperatūra, °C	Projektinė patalpos oro temperatūra, °C	Oro temperatūra praėjime (grindų lygyje), °C	Slėgis, Pa	Oro srauto greitis, m/s
Biurų pastatas be tambūro	400,22	-	500	-20	21	19,61	0,24	2,03
				-5	21	15,69	-0,61	0,34
				15	24	16,61	0,43	0,69
				30	24	22,44	0,47	3,44
			800	-20	21	15,98	-1,07	0,29
				-5	21	17,87	-0,67	1,12
				15	24	17,23	-0,87	0,87
				30	24	22,44	0,13	2,83
			1200	-20	21	18,89	-1,43	1,78
				-5	21	19,32	-1,26	2,45
				15	24	20,33	-0,43	2,76
				30	24	23,17	0,98	3,81

Parenkant tinkamą oro užsklandą įėjimui į biurų pastatą su tambūru, buvo atsižvelgiama į šiuos pagrindinius reikalavimus – slėgį (Pa), oro srauto greitį (m/s) ir oro temperatūrą ( $^{\circ}\text{C}$ ) praėjime.

Atlikti oro užsklandų modeliavimo variantų grafiniai pavyzdžiai ir pasirinkimo kriterijai matomi 3.25 ir 3.26 paveiksluose.

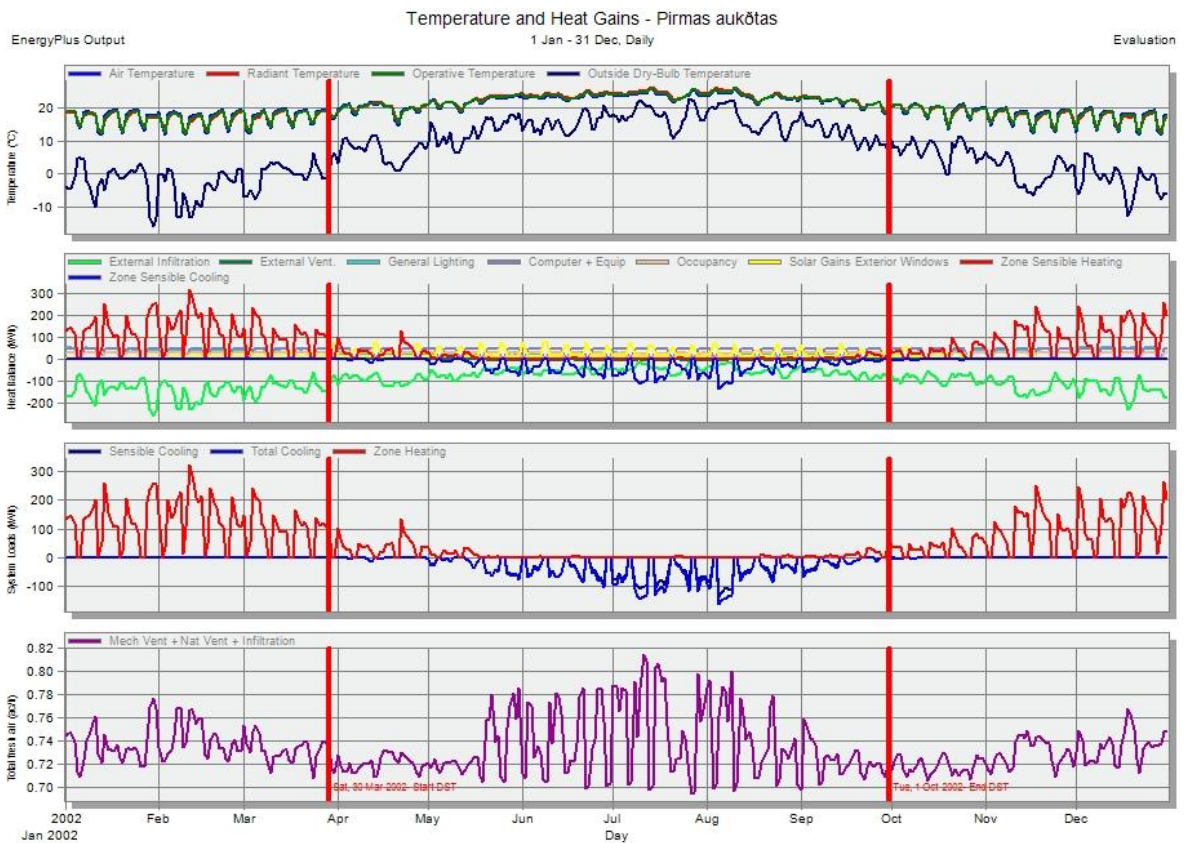


3.25 pav. CFD skaičiavimo duomenų grafinė išraiška



3.26 pav. Oro užsklandos ribinių slėgio parametrų atitiktens grafikas

Atlikus CFD skaičiavimus ir parinkus tinkamą įėjimo durų oro užsklandą, Energy Plus programa atliekamas pakartotinas energijos poreikių šiam biurų pastatui be tambūro simuliacijos (3.27 pav.). Simuliacijos ataskaitos duomenys pateikiami 8 lentelėje.



3.27 pav. Biurų pastato be tambūro metinių energijos suvartojimų simuliacija

Simuliacijos ataskaitos duomenys pateikiami 8 lentelėje, visa ataskaita pateikiama magistro baigiamojo projekto 5 priede.

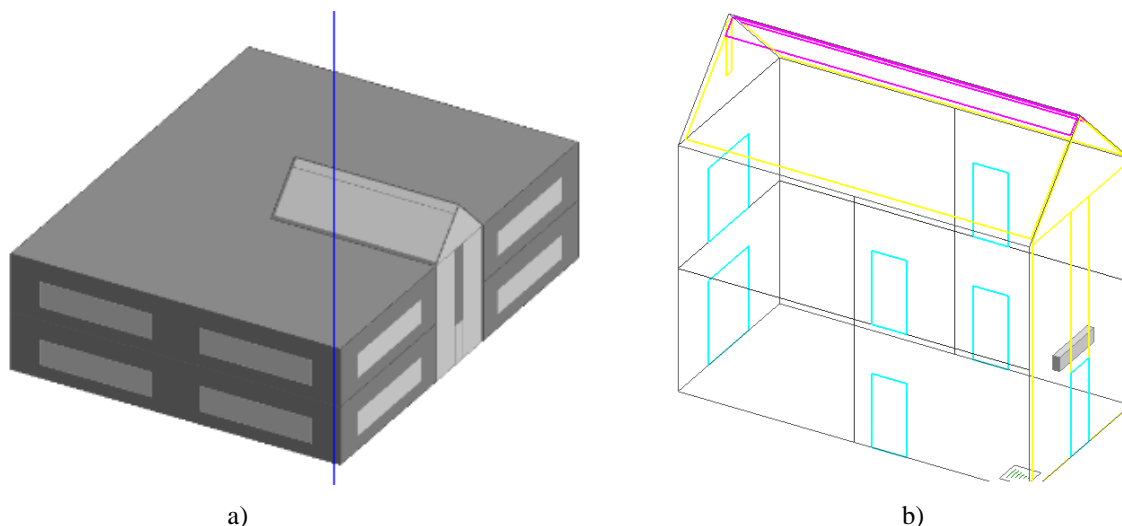
8 lentelė

Biurų pastato be tambūro metinių energijos suvartojimų skaičiavimo rezultatai

Pastatas	Bendras pastato plotas, kv. m.	Tambūro plotas, kv. m.	Metinis energijos poreikis pastatui, kWh	Metinės energijos sąnaudos, kWh/(m <sup>2</sup> xmetai)	Energijos sąnaudų pasiskirstymas	Energijos sąnaudos, kWh
Biurų pastatas be tambūro	400,22	-	38.455,84	96,09	Šildymui	14.533,96
					Vėdinimui	34,44
					Karšto vandens ruošimui	1.106,20
					Elektros įrangai	13.117,07
					Apšvietimui	9.664,17
Biurų pastatas be tambūro su oro užsklanda	400,22	-	38.013,67	94,98	Šildymui	14.089,49
					Vėdinimui	34,44
					Karšto vandens ruošimui	1.106,20
					Elektros įrangai	13.117,07
					Apšvietimui	9.664,17

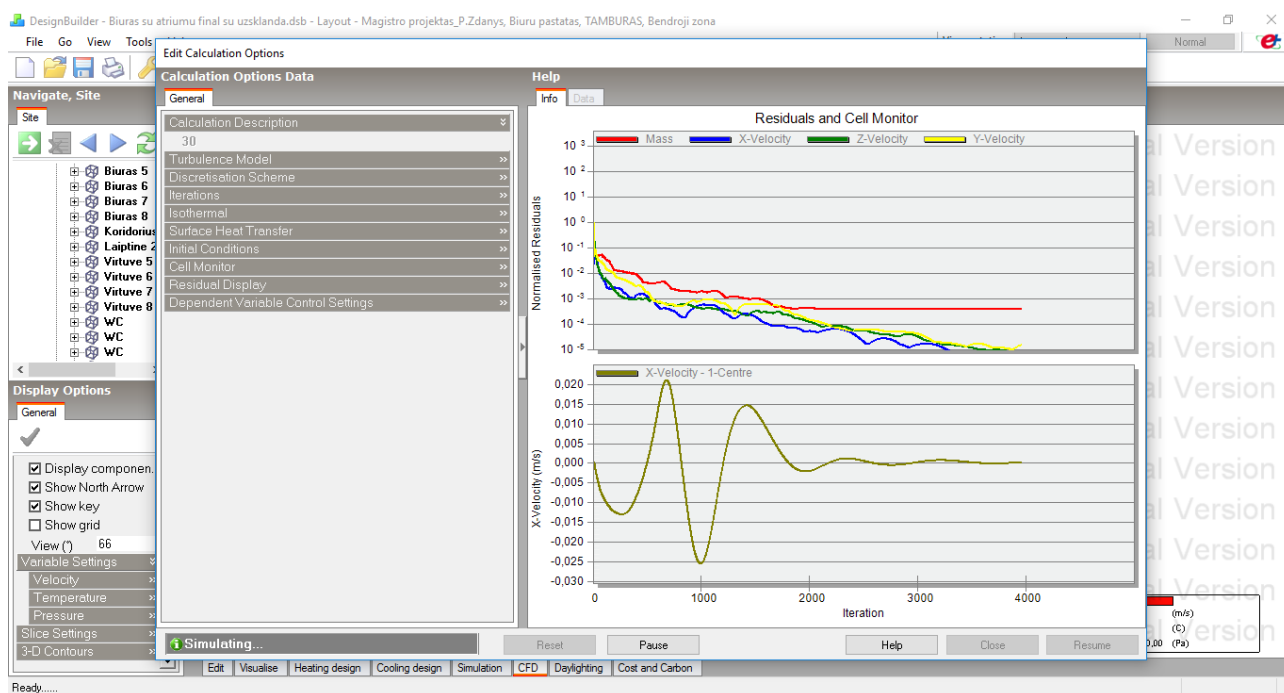
### 3.3.2.3. Pastato su atriumu CFD modeliavimas

Sukurtame teoriniame pastato modelyje įėjimo atriume projektuojamas papildomas elementas oro užsklandai virš įėjimo durų generuoti (3.28 pav.). Naujame elemente (oro užsklandoje) projektuojamos oro paėmimo ir oro tiekimo ertmės, oro tiekimo greitis, oro srovės pasvirimo kampas, reikalingas oro srauto kiekis, temperatūra ir kiti parametrai.



3.28 pav. Biurų pastatas su atriumu (a) ir atriume suprojektuota oro užsklanda (b)

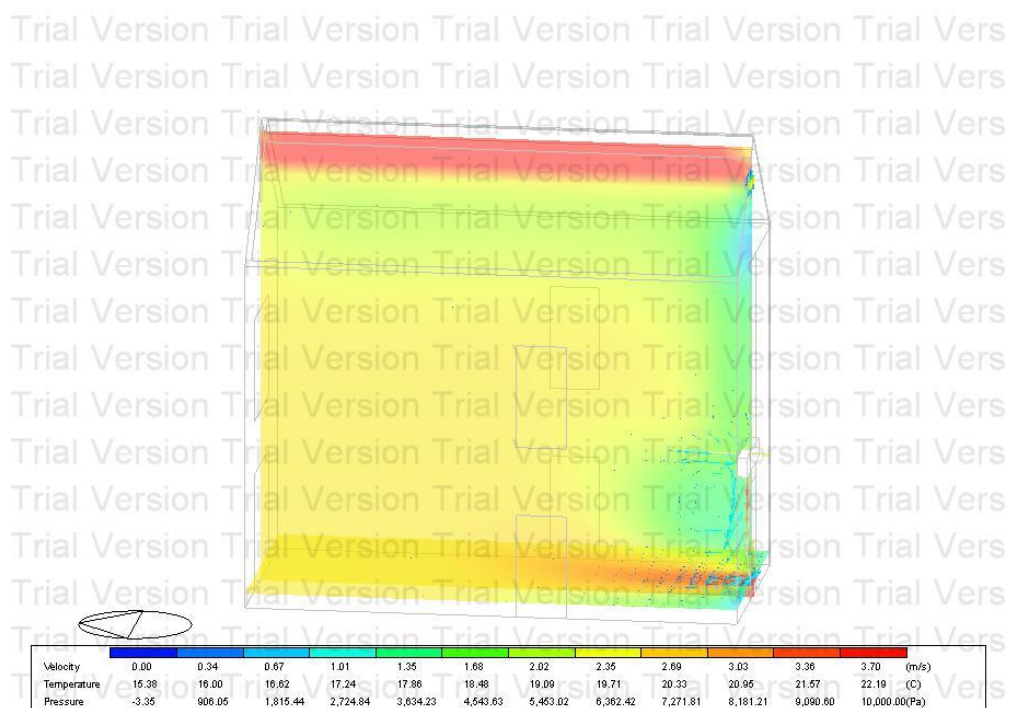
Programoje suvedami modeliavimo parametrų įvesties duomenys ir atliekamas CFD skaičiavimas (3.29 pav.). DesignBuilder programai atlikus skaičiavimus, vartotojui pateikiami vaizdiniai ir skaitiniai skaičiavimų rezultatai (3.30 pav. – 3.32 pav.).



3.29. pav. Pastato su atriumu oro užsklandos CFD skaičiavimas







3.32 pav. DesignBuilder programos skaičiavimo rezultatų langas (oro srauto greitis, temperatūra ir slėgis esant 1200 l/s prie 30°C)

Atliktų skaičiavimų biurų pastatui su atriumu įvesties duomenys ir gauti rezultatai pateikiami 9 lentelėje.

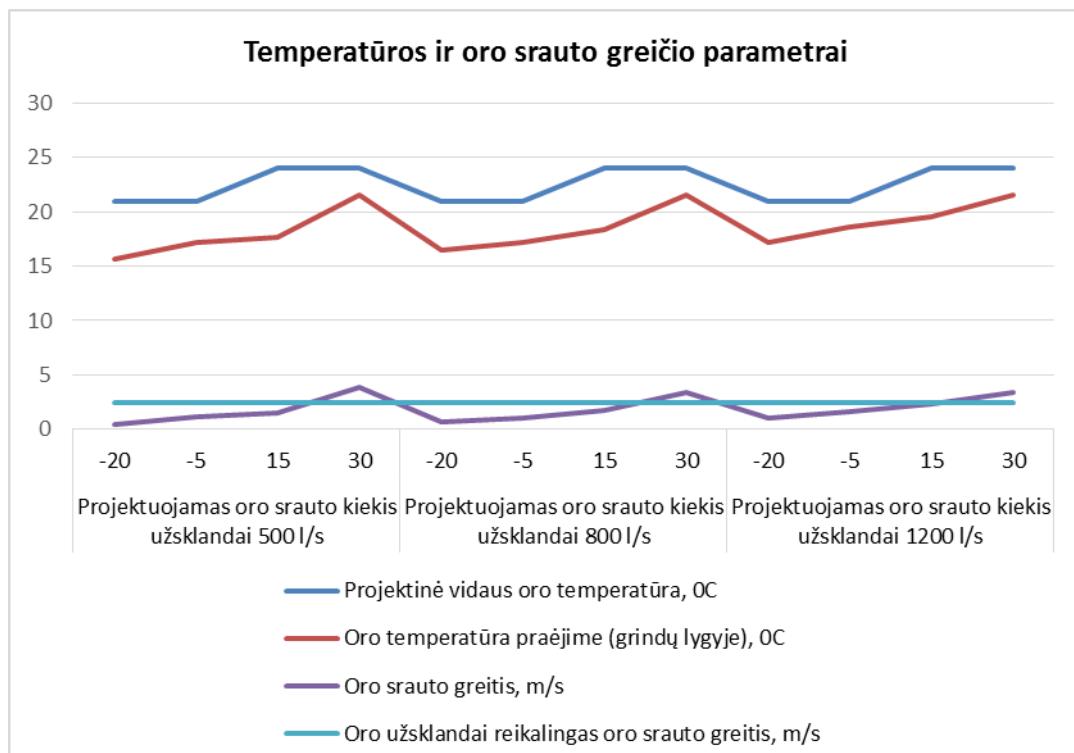
9 lentelė

Tyrimo biurų pastatui su atriumu įvesties duomenys ir rezultatai

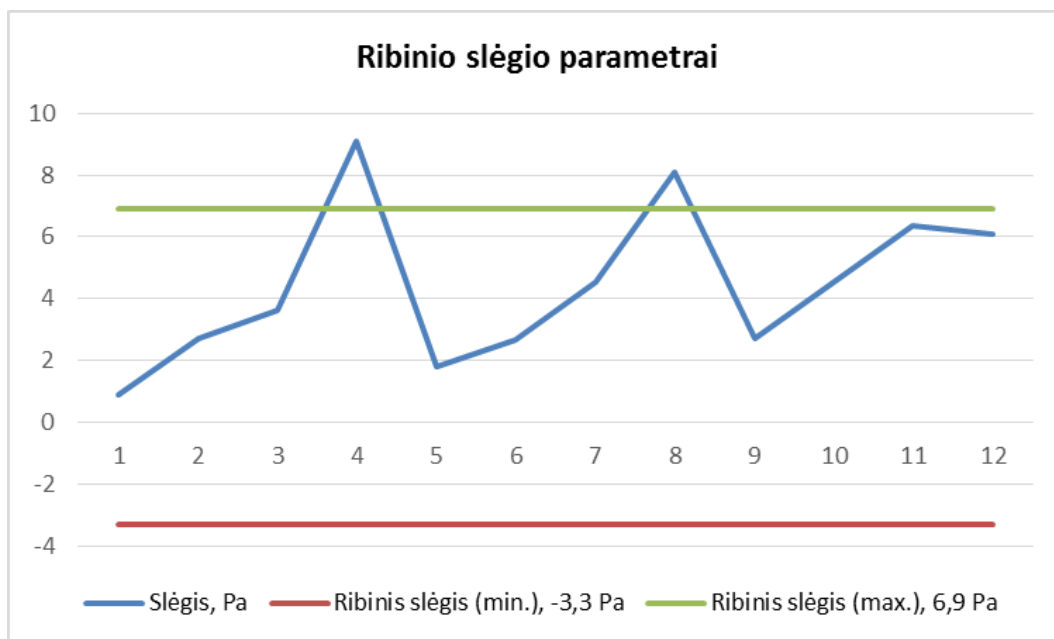
Pastatas	Bendras pastato plotas, kv. m.	Tambūro plotas, kv. m.	Projektuojamas oro srauto kiekis užsklandai, l/s	Lauko oro temperatūra, °C	Projektinė patalpos oro temperatūra, °C	Oro temperatūra praėjime (grindų lygyje), °C	Slėgis, Pa	Oro srauto greitis, m/s
Biurų pastatas su atriumu	900,59	49,71	500	-20	21	15,69	0,91	0,39
				-5	21	17,14	2,73	1,18
				15	24	17,68	3,63	1,54
				30	24	21,57	9,09	3,84
			800	-20	21	16,42	1,81	0,66
				-5	21	17,14	2,69	0,98
				15	24	18,31	4,54	1,69
				30	24	21,54	9,09	3,37
			1200	-20	21	17,14	2,7	0,99
				-5	21	18,60	4,54	1,68
				15	24	19,57	6,36	2,35
				30	24	21,57	9,09	3,36

Prenkiant tinkamą oro užsklandą įėjimui į biurų pastatą su atriumu, buvo atsižvelgiama į šiuos pagrindinius reikalavimus – slėgį (Pa), oro srauto greitį (m/s) ir oro temperatūrą (°C) praėjime.

Atlikti oro užsklandų modeliavimo variantų grafiniai pavyzdžiai ir pasirinkimo kriterijai matomi 3.33 ir 3.34 paveiksluose.

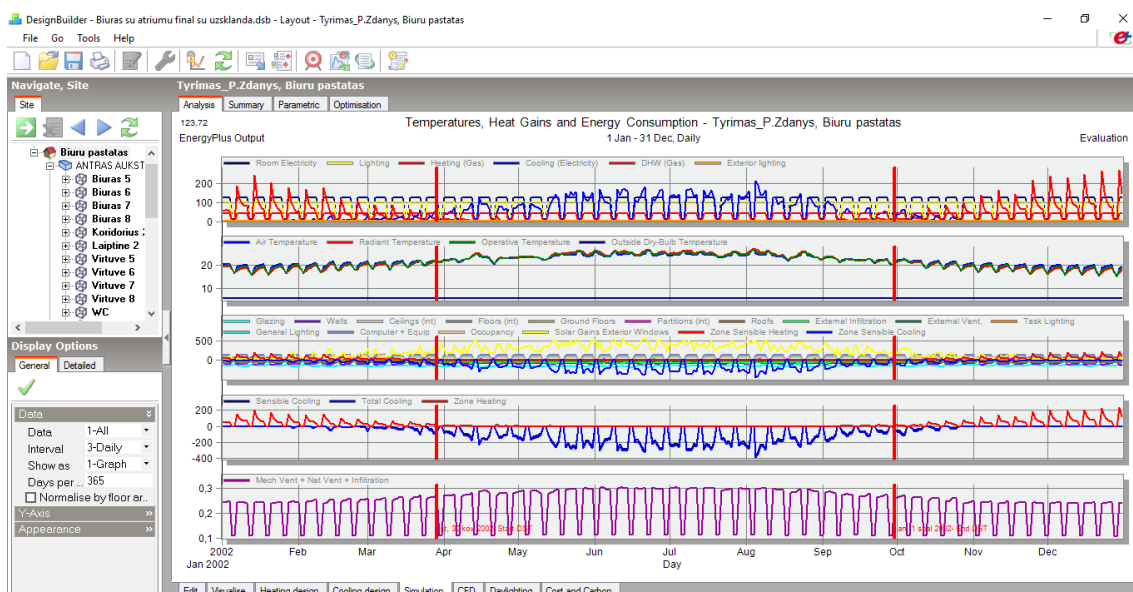


3.33 pav. CFD skaičiavimo duomenų grafinė išraiška



3.34 pav. Oro užsklandos ribinių slėgio parametrų atitikmens grafikas

Atlikus CFD skaičiavimus ir parinkus tinkamą įėjimo durų oro užsklandą, Energy Plus programa atliekamas pakartotinas energijos poreikių šiam biurų pastatui su atriumu simuliacijoms (3.35 pav.). Simuliacijos ataskaitos duomenys pateikiami 10 lentelėje.



3.35 pav. Biurų pastato su atriumu ir jame įrengta oro užsklanda metinių energijos suvartojimų analizė

Simuliacijos ataskaitos duomenys pateikiami 10 lentelėje, visa ataskaita pateikiama magistro baigiamojo projekto 5 priede.

10 lentelė

Biurų pastato su atriumu metinių energijos suvartojimų skaičiavimo rezultatai

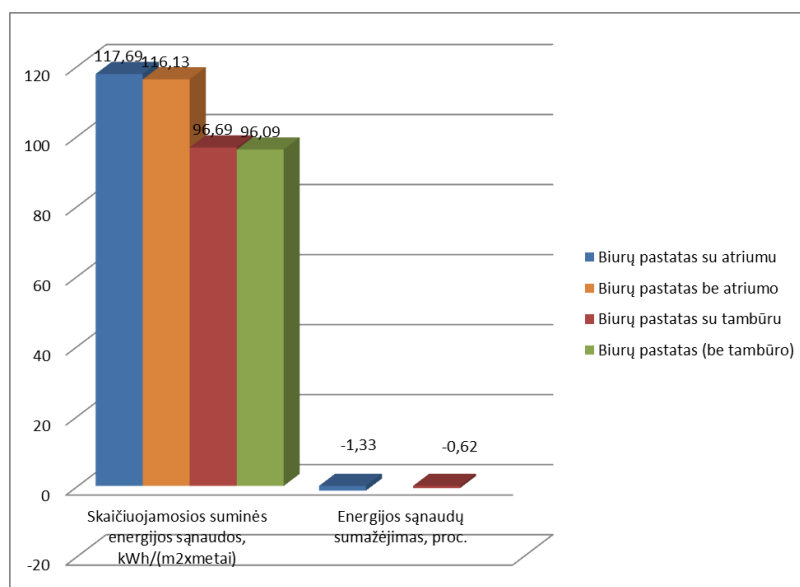
Pastatas	Bendras pastato plotas, kv. m.	Tambūro plotas, kv. m.	Metinis energijos poreikis pastatui, kWh	Metinės energijos sąnaudos, kWh/(m <sup>2</sup> xmetai)	Energijos sąnaudų pasiskirstymas	Energijos sąnaudos, kWh
Biurų pastatas su atriumu	900,59	49,71	105.994,47	117,69	Šildymui	8.914,69
					Vėdinimui	26.707,92
					Karšto vandens ruošimui	9.340,55
					Elektros įrangai	33.559,19
					Apšvietimui	27.472,11
Biurų pastatas su atriumu ir oro užsklanda	900,59	49,71	106.082,49	117,79	Šildymui	8.900,29
					Vėdinimui	26.810,35
					Karšto vandens ruošimui	9.340,55
					Elektros įrangai	33.559,19
					Apšvietimui	27.472,11



## 4. MODELIAVIMO REZULTATŲ ANALIZĖ

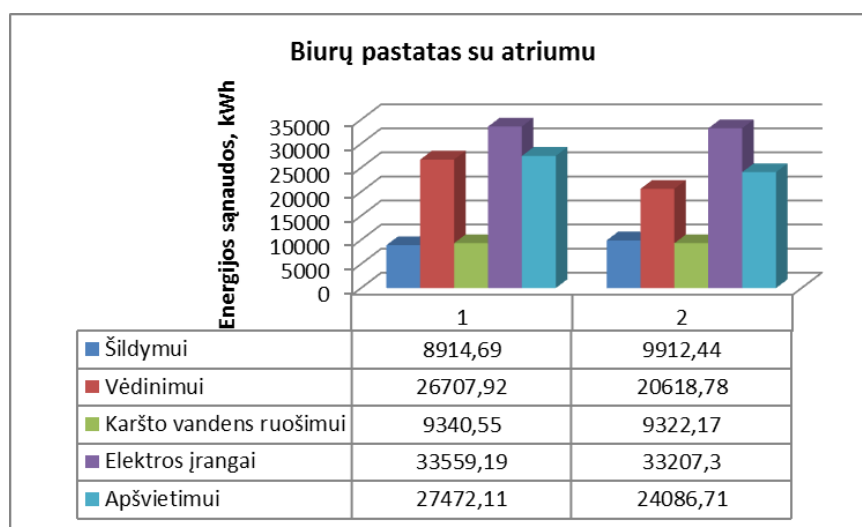
### 4.1 Pastato metinių energijos poreikių skaičiavimo analizė

Modeliuojant pastatus be įėjimo tambūrų (atriumo ir tambūro), biurų pastato su atriumu skaičiuojamosioms suminės energijos sąnaudos sumažėja 1,33 procento, biurų pastato su įrengtu įėjimo tambūru skaičiuojamosioms suminės energijos sąnaudos sumažėja 0,62 procento (4.1 pav.).

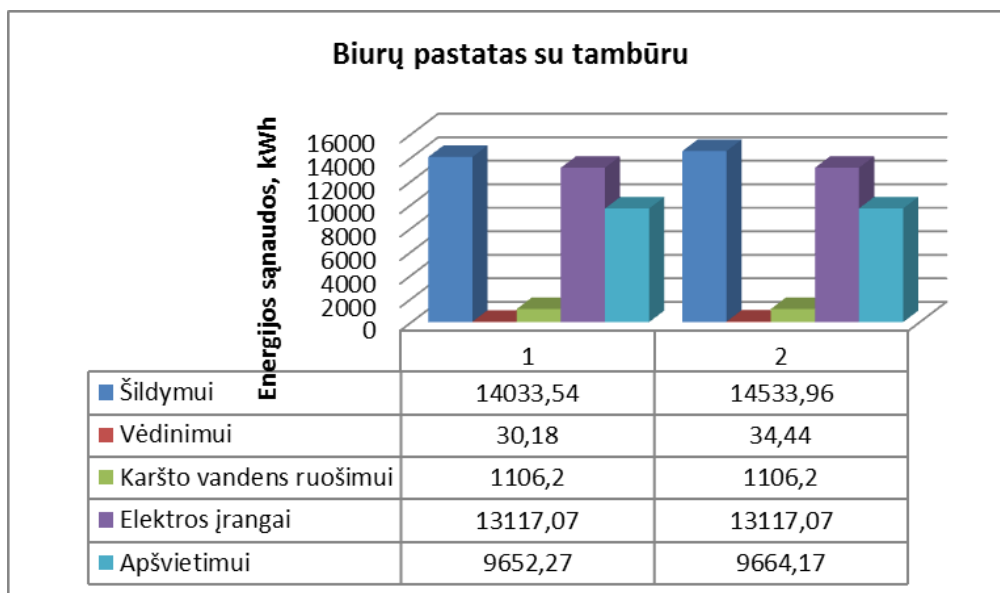


4.1 pav. Skaičiuojamųjų suminių energijos sąnaudų sumažėjimas pastatuose be tambūro.

Lyginant detalizuotas energijos sąnaudas pagal energijos panaudojimą pastato inžinerinėms sistemoms nustatytus parametrus, matome, kad energijos panaudojimo metiniai poreikiai atskiroms sistemoms kinta (4.2 pav., 4.3 pav.).

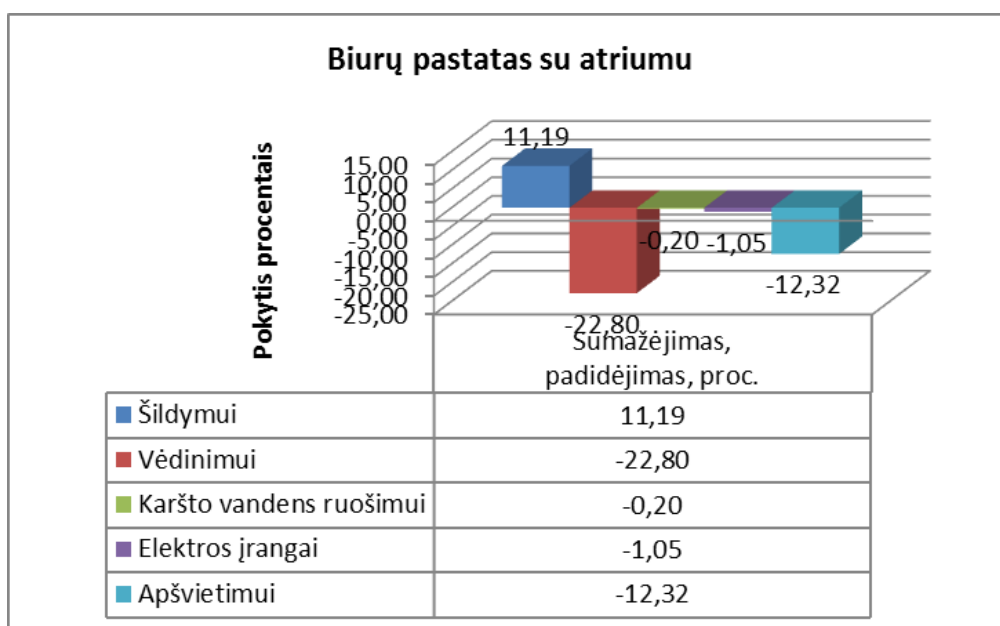


4.2 pav. Pastato skaičiuojamosios suminės energijos panaudojimo inžinerinėms sistemoms pokyčiai, kWh.

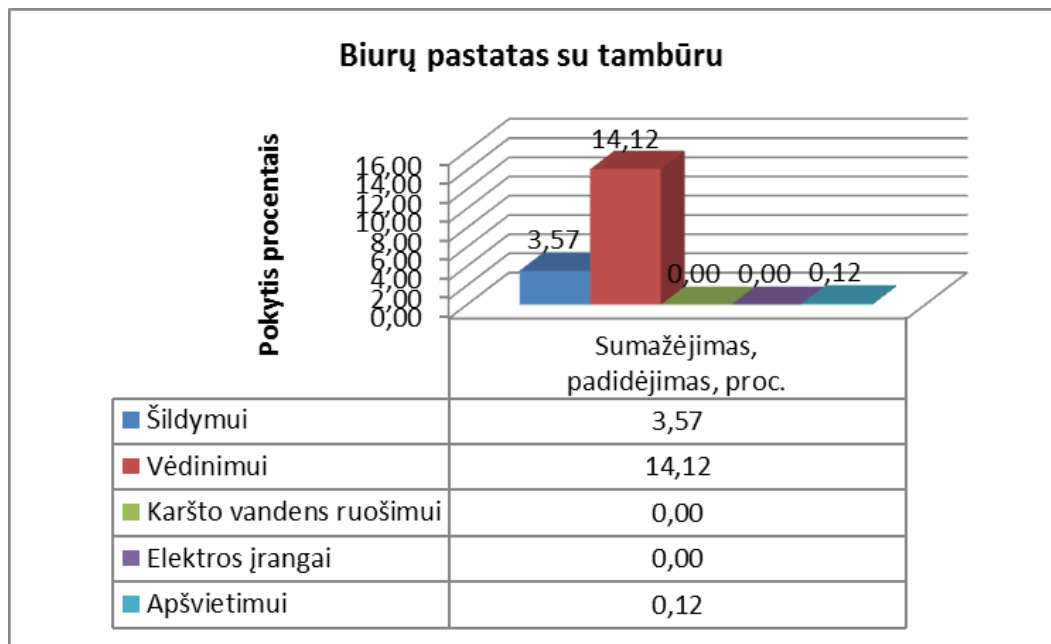


4.3 pav. Pastato skaičiuojamosios suminės energijos panaudojimo inžinerinėms sistemoms pokyčiai, kWh.

Pateiktuose pavyzdžiuose (4.4 pav. ir 4.5 pav.) matome procentinį energijos poreikių persiskirstymą atskiroms pastato mikroklimatą užtikrinančioms inžinerinėms sistemoms.

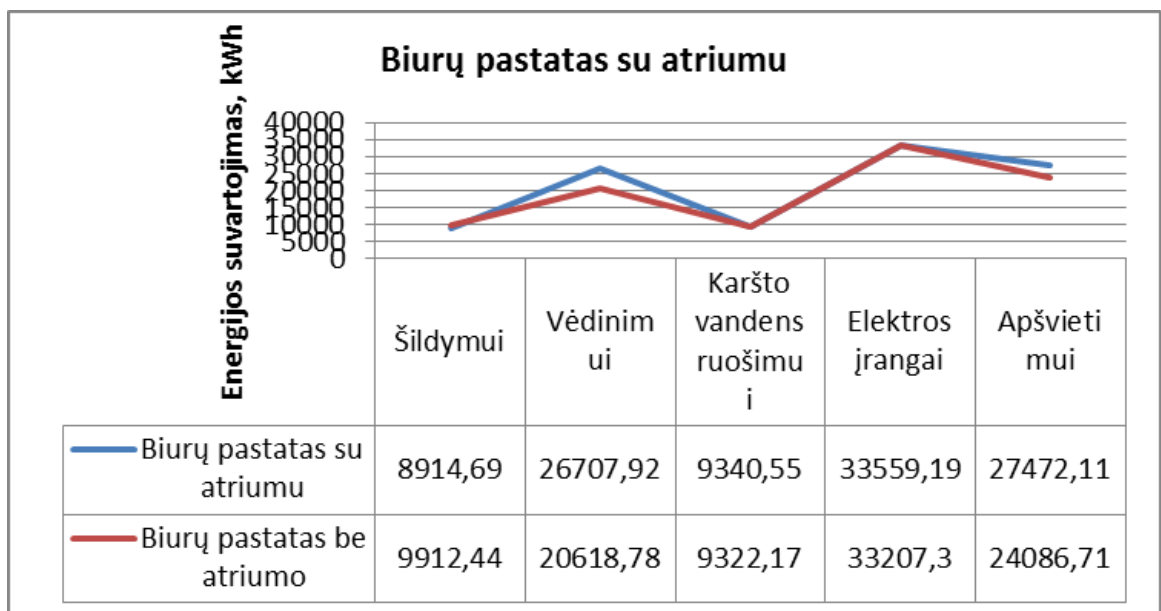


4.4 pav. Pastato skaičiuojamosios suminės energijos pokyčiai procentais.

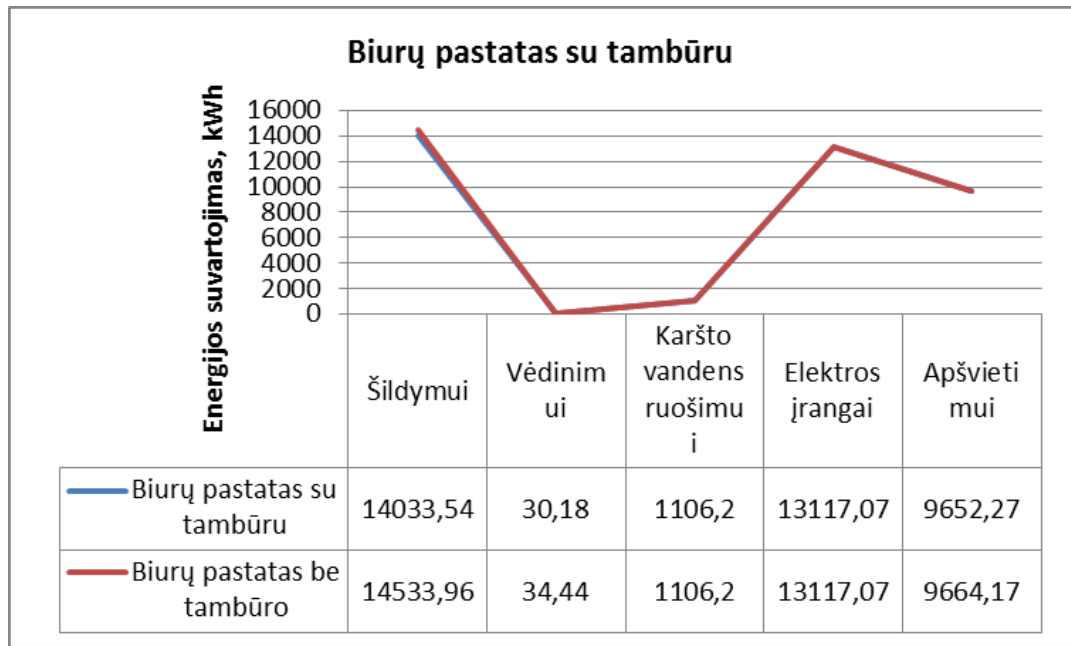


4.5 pav. Pastato skaičiuojamosios suminės energijos pokyčiai procentais.

Apibendrinami abiejų tyrimų rezultatus matome, kad tambūro įrengimas pastatuose neturi didelės įtakos pastato skaičiuojamosioms suminės energijos sąnaudoms, o energijos panaudojimo inžinerinėms sistemoms pokyčiai tiesiogiai priklauso nuo patalpų naudojimo paskirties pasikeitimo ir tose patalpose nustatytų atskirų mikroklimato inžinerinių sistemų poreikių tą tinkamą patalpų mikroklimatą palaikyti (4.6 pav. ir 4.7 pav.).



4.6 pav. Pastato skaičiuojamosios suminės energijos panaudojimo inžinerinėms sistemoms pokyčiai



4.7 pav. Pastato skaičiuojamosios suminės energijos panaudojimo inžinerinėms sistemoms pokyčiai

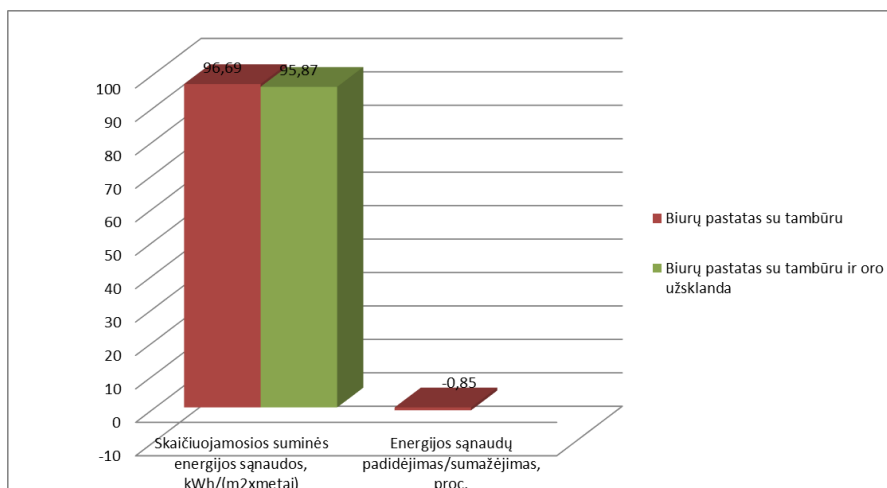
#### 4.2. Oro užsklandų skaičiavimo analizė

Prenkant pastatams oro užsklandų parametrus buvo atsižvelgiama į šiuos pagrindinius reikalavimus – slėgį (Pa), oro srauto greitį (m/s) ir oro temperatūrą ( $^{\circ}\text{C}$ ) praėjime.

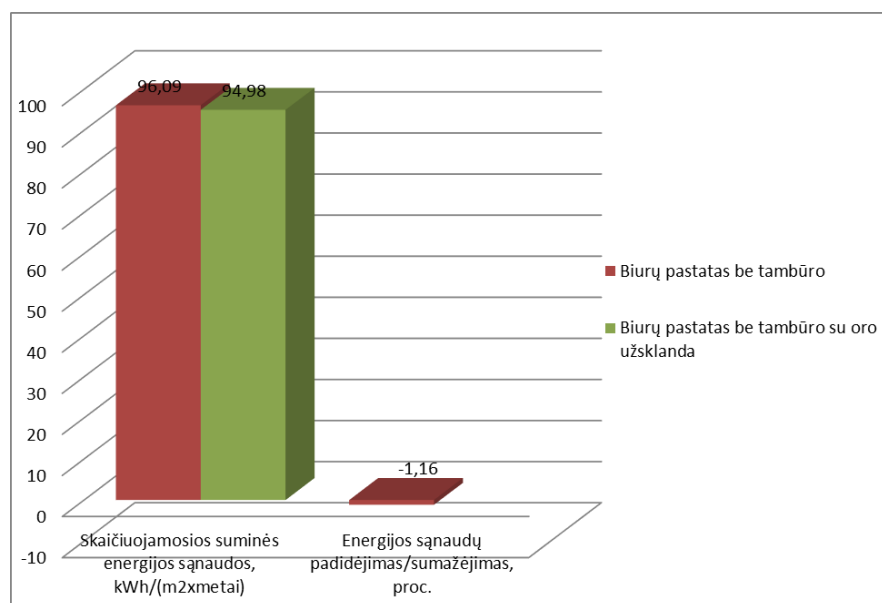
Moksliniais tyrimais nustatyta, kad apatinė kritinė slėgio riba  $\Delta P_{lc} = -3,3$  Pa, viršutinė kritinė slėgio riba  $\Delta P_{uc} = 6,9$  Pa. Oro eksfiltracija atsiranda, kai  $\Delta P < \Delta P_{uc}$ , o oro infiltracija atsiranda, kai  $\Delta P > \Delta P_{uc}$ . Taip pat nustatyta, kad optimalus oro užsklandos oro srauto greitis praėjime grindų lygyje turi būti 3 m/s ( $\pm 0,5$ ). Oro temperatūra turi būti artima numatytai projektinei patalpos temperatūrai.

Atsižvelgiant į šiuos pagrindinius kriterijus nustatyta, kad visais trimis modeliavimo atvejais tinkami parametrai oro užsklandai yra tada, kai projektuojamas oro srauto kiekis užsklandai yra ne mažesnis, nei 1200 l/s.

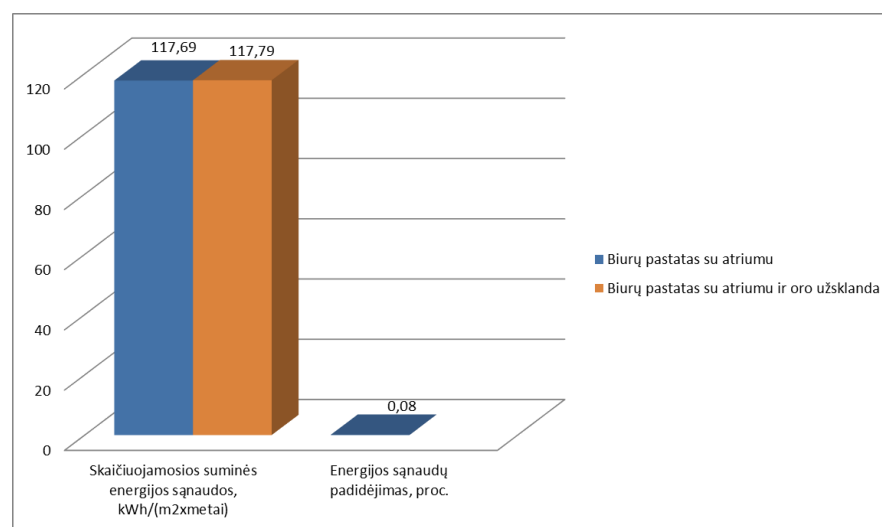
Tyrimo metu atlikus CFD modeliavimą DesignBuilder programa oro užsklandoms nustatyta, kad įėjimo duryse įrengus tinkamas oro užsklandas, skaičiuojamosios suminės energijos sąnaudos biurų pastatui su įrengtu įėjimo tambūru sumažėja 0,85 procento (4.8 pav.), biurų pastato be įrengto įėjimo tambūro skaičiuojamosioms suminės energijos sąnaudos sumažėja 1,16 procento (4.9 pav.), biurų pastate su atriumu įrengus oro užsklandą skaičiuojamosioms suminės energijos sąnaudos padidėjo 0,08 procento (4.10 pav.).



4.8 pav. Skaičiuojamųjų suminių energijos sąnaudų sumažėjimas pastatuose su tambūru.

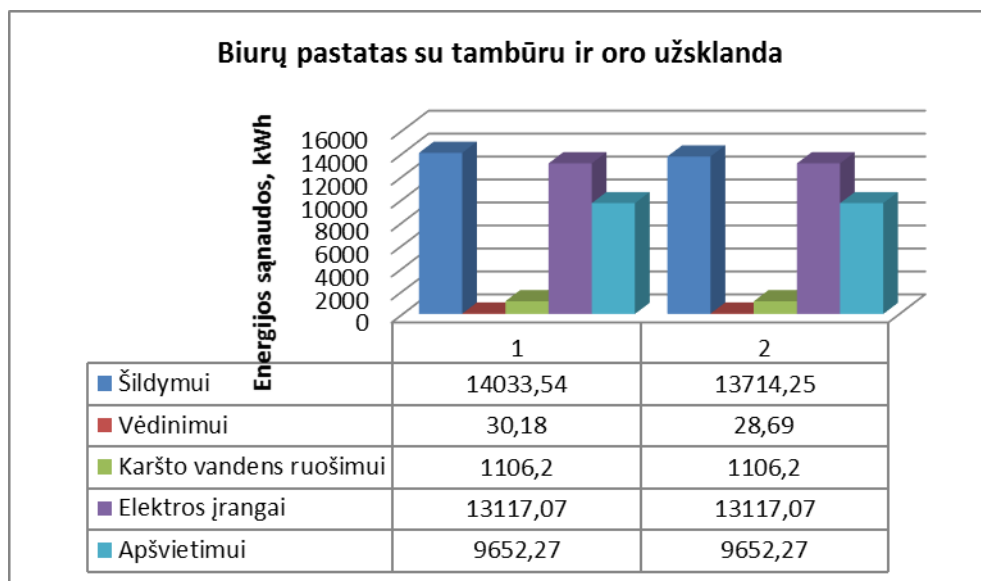


4.9 pav. Skaičiuojamųjų suminių energijos sąnaudų sumažėjimas pastatuose be tambūro

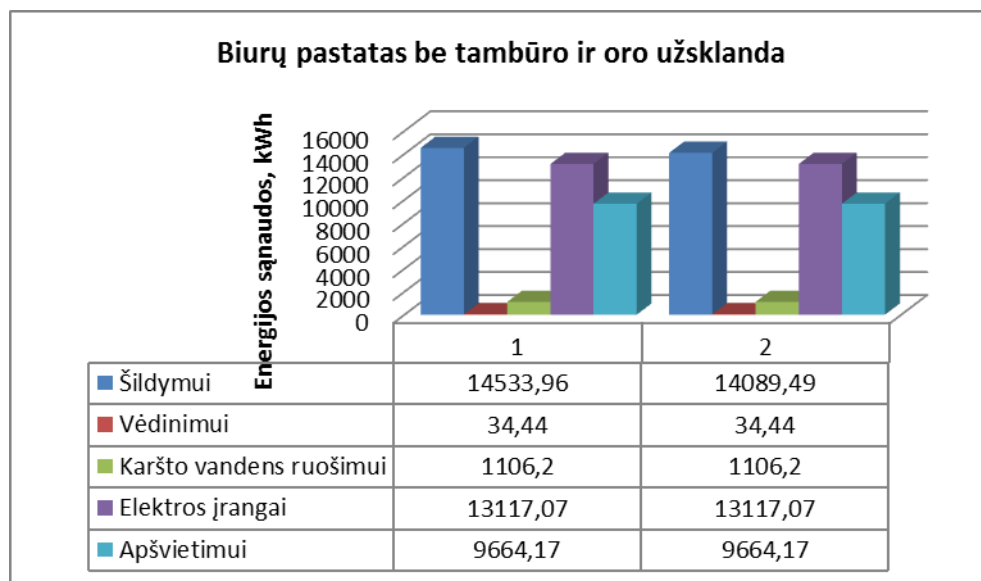


4.10 pav. Skaičiuojamųjų suminių energijos sąnaudų padidėjimas pastate su atriumu

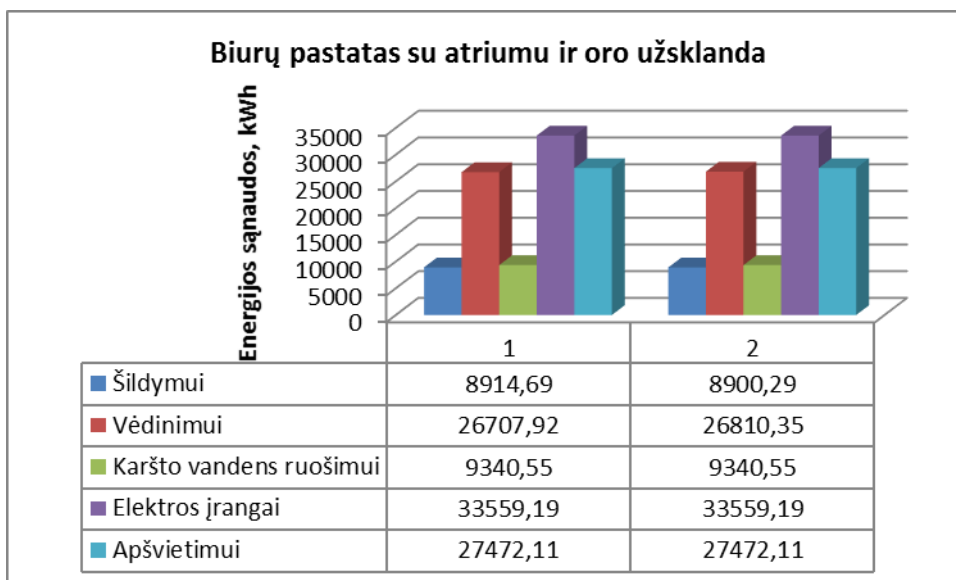
Lyginant detalizuotas energijos sąnaudas pagal energijos panaudojimą pastato inžinerinėms sistemoms nustatytus parametrus, matome, kad energijos panaudojimo metiniai poreikiai atskiroms sistemoms kinta (4.11 pav., 4.12 pav., 4.13 pav.).



4.11 pav. Pastato skaičiuojamosios suminės energijos panaudojimo inžinerinėms sistemoms pokyčiai, kWh.

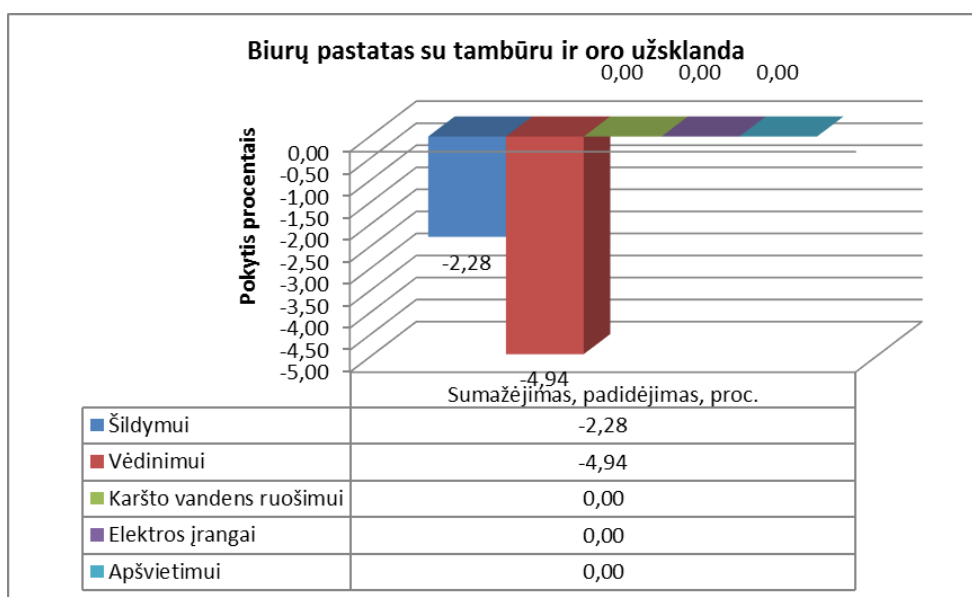


4.12 pav. Pastato skaičiuojamosios suminės energijos panaudojimo inžinerinėms sistemoms pokyčiai, kWh.

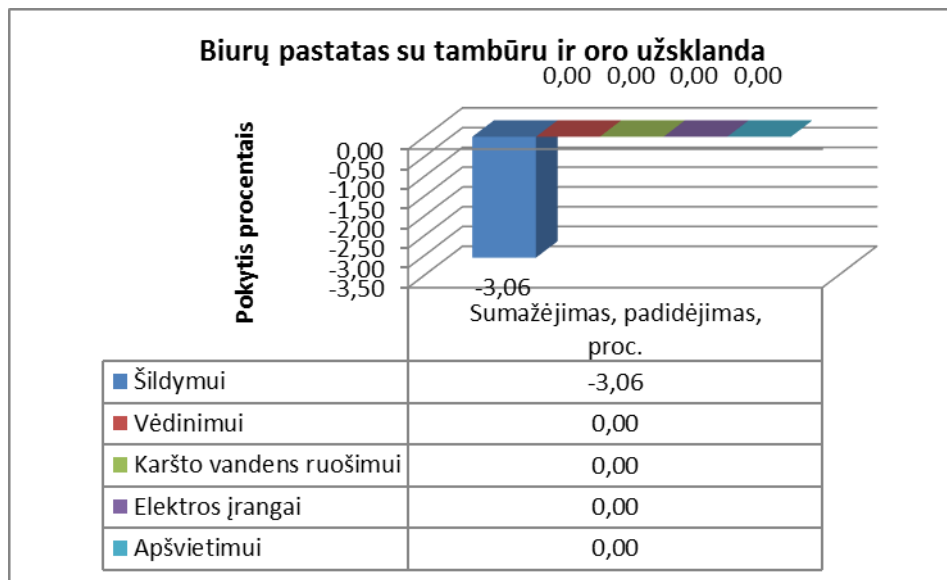


4.13 pav. Pastato skaičiuojamosios suminės energijos panaudojimo inžinerinėms sistemoms pokyčiai, kWh.

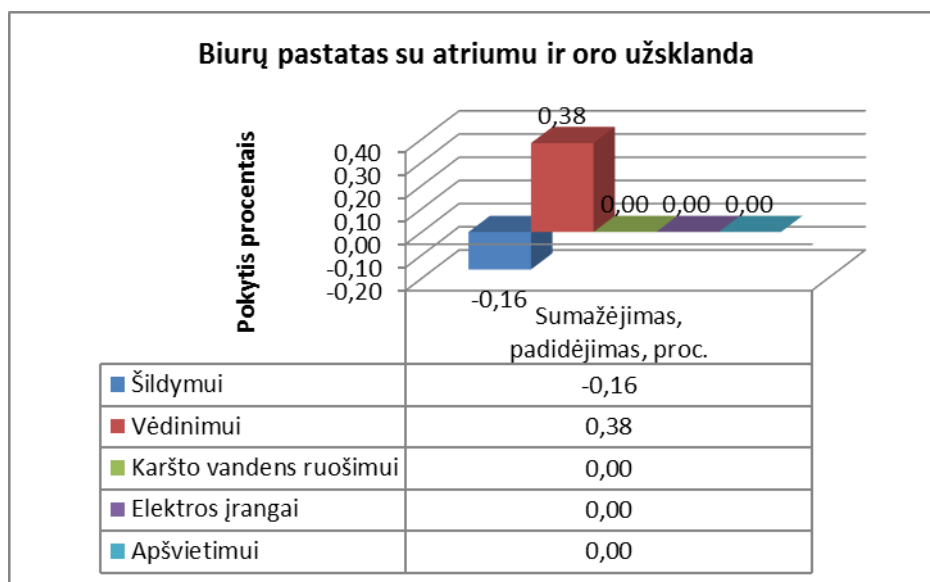
Pateiktuose pavyzdžiuose (4.14 – 4.16 pav.) matome procentinę energijos poreikių persiskirstymą atskiroms pastato mikroklimatą užtikrinančioms inžinerinėms sistemoms.



4.14 pav. Pastato skaičiuojamosios suminės energijos pokyčiai procentais.



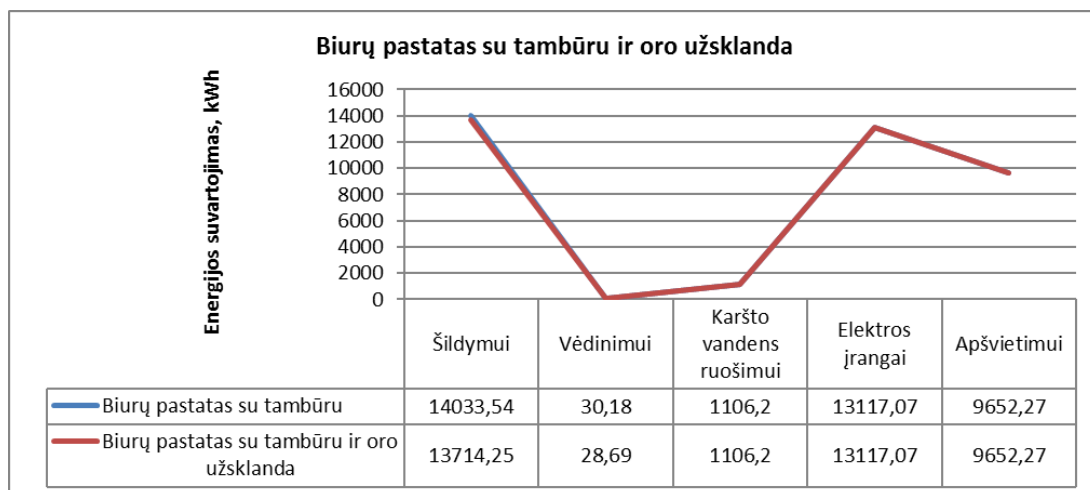
4.15 pav. Pastato skaičiuojamosios suminės energijos pokyčiai procentais.



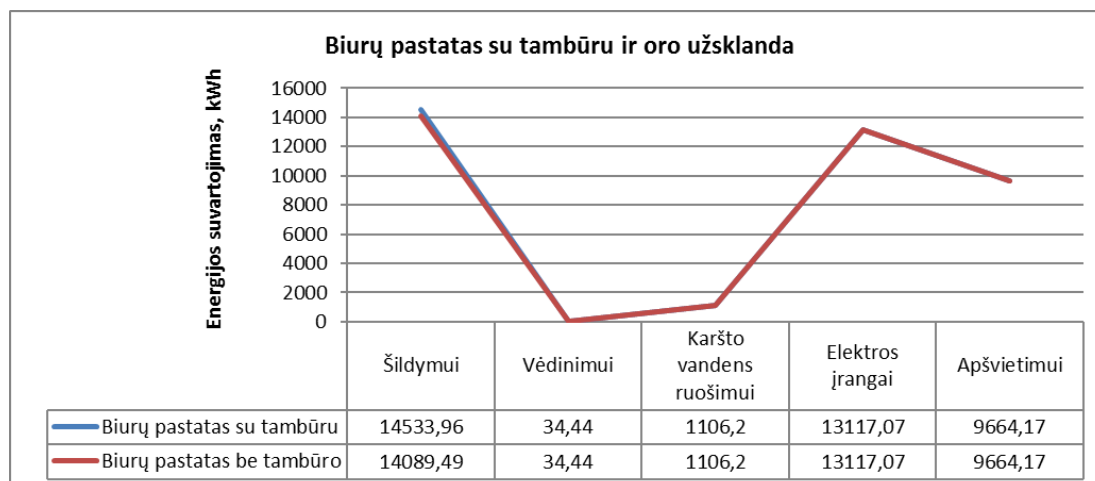
4.16 pav. Pastato skaičiuojamosios suminės energijos pokyčiai procentais.

Apibendrinant atlikto modeliavimo rezultatus galima teigti, kad oro užsklandos įrengimas pastato įėjime didelės įtakos pastato skaičiuojamosioms suminės energijos sąnaudoms neturi, o energijos panaudojimo inžinerinėms sistemoms pokyčiai tiesiogiai priklauso nuo tose patalpose nustatytų atskirų mikroklimato inžinerinių sistemų poreikių tinkamam patalpų mikroklimatui palaikyti (4.17 – 4.19 pav.).

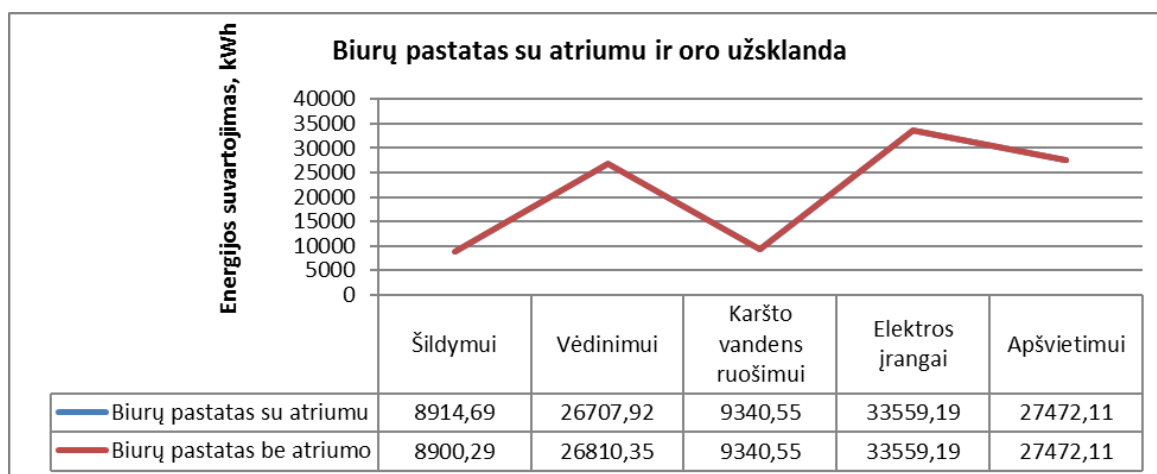




4.17 pav. Pastato skaičiuojamosios suminės energijos panaudojimo inžinerinėms sistemoms pokyčiai



4.18 pav. Pastato skaičiuojamosios suminės energijos panaudojimo inžinerinėms sistemoms pokyčiai



4.19 pav. Pastato skaičiuojamosios suminės energijos panaudojimo inžinerinėms sistemoms pokyčiai

## IŠVADOS

1. Pastato energetinį naudingumą didele dalimi lemia ankstyvoji jo projektavimo stadija, todėl šiame etape priimti projektiniai sprendimai turi lemiamą įtaką statybos kaštams ir energijos suvartojimui pastato naudojimo stadijoje.

2. Analizuotuose pastatuose be tambūro metinių skaičiuojamųjų suminių energijos sąnaudų sunaudojama neženkliai mažiau (-1,33; -0,62 proc.), skaičiuojant energijos sąnaudas vienam kvadratiniam metrui pastato naudingo ploto.

3. Analizuotuose pastatuose atsisakius įėjimo tambūrų, energijos poreikis šildymui padidėjo vidutiniškai 7,38 proc., vėdinimui sumažėjo vidutiniškai 5,22 proc.

4. Remiantis tyrimų rezultatais, oro užsklandų įrengimas virš išorinių įėjimo durų yra tinkamas sprendimas pastato šilumos nuostoliams mažinti tiek pastatams su įrengtu tambūru, tiek pastatams be tambūro.

5. Parenkant pastatams oro užsklandų parametrus buvo atsižvelgiama į šiuos pagrindinius parametrus – slėgį (Pa), oro srauto greitį (m/s) ir oro temperatūrą ( $^{\circ}\text{C}$ ) praėjime. Atsižvelgiant į šiuos pagrindinius kriterijus nustatyta, kad visais trimis modeliavimo atvejais tinkami parametrai oro užsklandai yra tada, kai projektuojamas oro srauto kiekis užsklandai yra ne mažesnis, nei 1200 l/s, o oro srauto greitis – ne mažesnis nei 2,5 m/s.

6. Nustatyta, kad įėjimo duryse įrengus tinkamas oro užsklandas, skaičiuojamosios suminės energijos sąnaudos biurų pastatui su įrengtu įėjimo tambūru sumažėja 0,85 procento, biurų pastato be įrengto įėjimo tambūro - 1,16 procento, biurų pastate su atriumu - padidėjo 0,08 procento.

7. Analizuotuose pastatuose įėjimuose įrengus oro užsklandas, energijos poreikis šildymui sumažėjo vidutiniškai 1,8 proc., vėdinimui sumažėjo vidutiniškai 1,52 proc.

8. Energijos panaudojimo inžinerinėms sistemoms pokyčiai tiesiogiai priklauso nuo patalpų naudojimo paskirties pasikeitimo ir tose patalpose nustatytų atskirų mikroklimato inžinerinių sistemų poreikių tam tinkamam patalpų mikroklimatui palaikyti.

## NAUDOTOS LITERATŪROS IR KITŲ INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. Jungtinių Tautų Bendrosios klimato konvencijos Kioto protokolas [interaktyvus] [žiūrėta 2016 m. spalio 17 d.]. Prieiga per internetą:< <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.197965> >
2. Commission of the European Communities 2011. Communication of commission: Energy Efficiency Plan 2011[interaktyvus] [žiūrėta 2016 m. spalio 17 d.]. Prieiga per internetą:< [http://europa.eu/rapid/press-release MEMO-11-149 en.htm?locale=en](http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-11-149_en.htm?locale=en)>.
3. Statybos techninis reglamentas STR 2.01.01(6):2008 „Esminis statinio reikalavimas „Energijos taupymas ir šilumos išsaugojimas“ [žiūrėta 2016 m. spalio 18 d.]. Prieiga per internetą: < <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.316519> >.
4. Statybos techninis reglamentas STR 2.02.01:2004 „Gyvenamieji pastatai“ [interaktyvus] [žiūrėta 2016 m. spalio 20 d.]. Prieiga per internetą: < <http://www.vtpsi.lt/node/1062> >.
5. Statybos techninis reglamentas STR 2.03.01:2001 „Statiniai ir teritorijos. reikalavimai žmonių su negalia reikmėms“ [interaktyvus] [žiūrėta 2016 m. spalio 18 d.]. Prieiga per internetą: < <http://www.vtpsi.lt/node/1065> >.
6. Oro užuolaidos praėjimo durims. [interaktyvus] [žiūrėta 2016 m. gruodžio 9 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.parduotuvuiranga.lt/oro-u%C5%BEuolaidos-pra%C4%97jimo-durims> >.
7. Wang L. Investigation of the Impact of Building Entrance Air Curtain on Whole Building Energy Use Executive Summary. [interaktyvus] [žiūrėta 2016 m. spalio 20 d.]. Prieiga per internetą:<<http://www.amca.org/UserFiles/file/Energy%20Initiative%20Web%20Pages/Air%20Curtain%20Study.pdf> >.
8. Wang L., Zhong Z. Whole Building Annual Energy Analysis of Air Curtain Performance in Commercial Building. [interaktyvus] [žiūrėta 2016 m. spalio 28 d.]. Prieiga per internetą: < <http://www.ibpsa.org/proceedings/eSimPapers/2014/7B.1.pdf> >.
9. Bertašienė A. Patalpų oro srauto tyrimo būdai ir matavimo priemonės, užtikrinančios komfortinių sąlygų parametrus. Pastatų inžinerinės sistemos. Respublikinės mokslinės konferencijos medžiaga.
10. Motuzienė V. 2010. Įstiklinimo įtakos viešųjų pastatų energijos poreikiams kompleksinė analizė: daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius : Technika. 29 – 59 p.
11. Clarke J. A. 2001. Energy Simulation in Building Design. 2nd Edition. Oxford: Butterworth-Heinemann. 384 p.

12. DesignBuilder Simulation + CFD Training Guide. [interaktyvus] [žiūrėta 2016 m. lapkričio 7 d.]. Prieiga per internetą: <[http://www.designbuildersoftware.com/docs/designbuilder/DesignBuilder\\_CFD\\_DraftManual.pdf](http://www.designbuildersoftware.com/docs/designbuilder/DesignBuilder_CFD_DraftManual.pdf)>.
13. U.S. Department of Energy 2015. The Reference to EnergyPlus Calculations. [interaktyvus] [žiūrėta 2016 m. spalio 10 d.]. Prieiga per internetą: <[https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs\\_v8.3.0/EngineeringReference.pdf](https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs_v8.3.0/EngineeringReference.pdf)>.
14. DesignBuilder - Simulation Made Easy. [interaktyvus] [žiūrėta 2016 m. lapkričio 3 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.designbuilder.co.uk/>>.
15. Statybos techninis reglamentas STR 2.05.01:2013 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas“ [interaktyvus] [žiūrėta 2016 m. spalio 18 d.]. Prieiga per internetą: <<http://vtpsi.lt/node/1153>>.
16. Statybos techninis reglamentas STR 2.02.02:2004 „Visuomeninės paskirties statiniai“ [interaktyvus] [žiūrėta 2016 m. spalio 20 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.vtpsi.lt/node/1063>>.
17. International Weather for Energy Calculations [interaktyvus] [žiūrėta 2016 m. lapkričio 3 d.]. Prieiga per internetą:< <https://www.ashrae.org/resources--publications/bookstore/international-weather-for-energy-calculations>>.
18. U.S. Department of Energy 2015. Engineering Reference. The Reference to EnergyPlus Calculations [interaktyvus] [žiūrėta 2016 m. lapkričio 5 d.]. Prieiga per internetą: <[https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs\\_v8.3.0/EngineeringReference.pdf](https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs_v8.3.0/EngineeringReference.pdf)>.

## **PRIEDAI**

**AUTORIAUS PUBLIKACIJA MAGISTRO BAIGIAMOJO PROJEKTO  
TEMA**