

VILNIAUS UNIVERSITETAS  
MATEMATIKOS IR INFORMATIKOS FAKULTETAS  
DIFERENCIALINIŲ LYGČIŲ KATEDRA

Simonas Bernotas

Izoliacinės palatos ventiliacijos strategijos gyvenamajame  
būste įrengimo galimybės analizė ir vienpusės natūralios  
ventiliacijos skysčių dinamikos simuliacijų tyrimas

Investigation of Isolation Room Ventilation Strategy  
Applicability in a Household Environment and Analysis of  
Single-Sided Natural Ventilation Using Computational Fluid  
Dynamics

Magistro baigiamasis darbas

Leidžiu ginti .....

Darbo vadovas      prof. Olga Štikonienė

Vilnius 2020

# Turinys

1	Įvadas	3
1.1	Uždavinio aktualumas ir formulavimas	3
1.2	Magistro darbo tikslas	4
2	Teorinė dalis	6
2.1	Infekcijos	6
2.1.1	Infekcijos plitimo mechanizmo tyrimų ištakos	6
2.1.2	Apie oro lašelinį plitimo būdą	6
2.1.3	Infekcijos plitimo tyrimai	8
2.1.4	Ventiliacijos dažnumo įtaka infekcijos plitimo rizikai	9
2.1.5	Infekcijos plitimo uždaroje patalpoje tyrimų ribotumas	10
2.1.6	Izoliacinių palatų ir laikinųjų prieškambarių ventiliacijos dizaino specifika	10
2.1.7	Laikinojo prieškambario realizavimas	11
2.2	Ventiliacija	12
2.3	Vienpusė ventiliacija	13
2.3.1	Analitiniai tyrimai	14
2.3.2	Eksperimentiniai tyrimai	15
2.3.3	Skaitiniai tyrimai	15
2.4	Navjė-Stokso lygčių sistema	16
2.5	Skaitinė skysčių dinamika	19
2.5.1	Apie dimensijos pasirinkimą	20
2.5.2	Apie simuliuojamų fizinių procesų pasirinkimą	20
2.5.3	Apie aproksimacijų pasirinkimą	20
2.5.4	Apie geometrijos kūrimą	22
2.5.5	Apie kraštines sąlygas ir pradines sąlygas	22

2.5.6	Apie tinklelio konstravimą . . . . .	25
2.5.7	Apie laiko periodo pasirinkimą . . . . .	25
3	Praktinė dalis	26
3.1	Ventiliacijos strategijos ir scenarijus . . . . .	26
3.2	Pasiruošimas skaičiavimams . . . . .	27
3.3	Diskusija . . . . .	29
3.4	Rezultatai . . . . .	31
	Išvados . . . . .	31
	Literatūra . . . . .	48

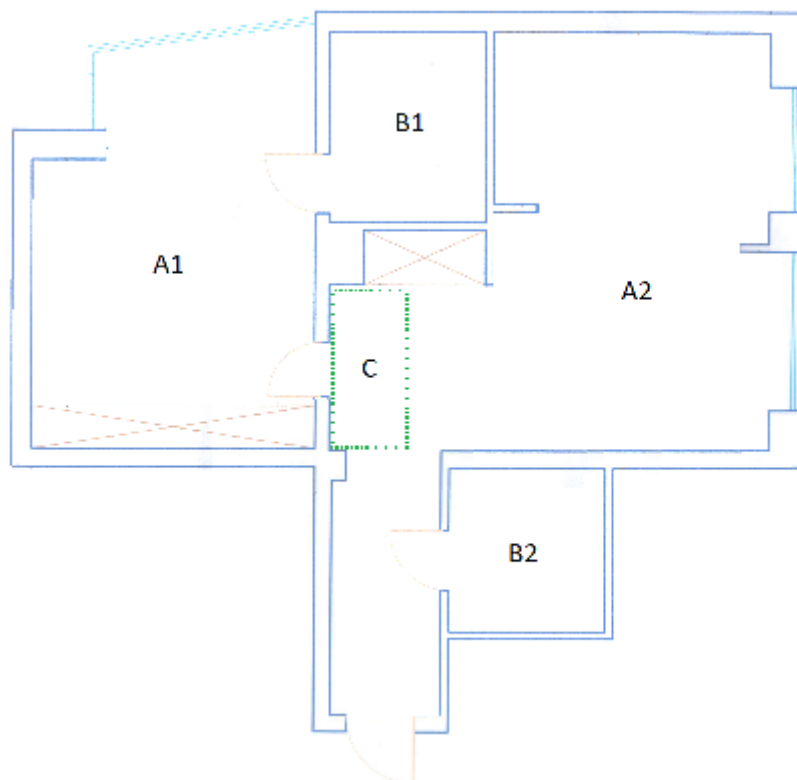
# 1. Įvadas

## 1.1 Uždavinio aktualumas ir formulavimas

Pasaulinė COVID-19 (angl. corona virus disease 2019) viruso epidemija sukėlė didelę įtampą sveikatos apsaugos sistemoms. Tokio rimto epidemijos poveikio nematyta nuo 1918 metų pasaulinės H1N1 gripo viruso epidemijos. Vienas iš sveikatos apsaugos sistemos stresorių yra intensyvios priežiūros palatų ir izoliacinių palatų trūkumas. Remiantis Higienos Instituto statistikos duomenimis 2018 metų gale visoje Lietuvoje buvo 257 lovos skirtos gydyti infekcinių ligų profilio pacientams [1], o epidemijos Lietuvoje piko metu numatomas 2256 patvirtintų susirgimo atvejų skaičius [2]. Epidemijos piko metu susirgusių infekcine liga žmonių skaičius gali siekti arba net viršyti Lietuvos sveikatos apsaugos sistemos turimų infekcinių ligų profilio lovų skaičių, todėl kyla reikmė ieškoti alternatyvių būdų izoliuoti sergančius infekcinėmis ligomis.

Epidemijos atveju vienas iš sveikatos apsaugos sistemos paralyžiavimą švelninančių priemonių galėtų būti inžinerinis sprendimas - savadarbių izoliacinių palatų su oro valdymo sistema įrengimas sergančiųjų gyvenamosiose patalpose. Gyvenamąją patalpą su nemažiau kaip dviem tualetais būtų galima padalinti į dvi dalis - sveikojo gyvenamąją zoną ir sergančiojo gyvenamąją zoną. Gyvenamoji patalpa būtų padalinta įrengiant laikinąjį prieškambarį (angl. anteroom) su oro srauto valdymo sistema tarp sveikojo ir sergančiojo gyvenamųjų zonų (žr. 1.1 pav.). Laikiniame prieškambaryje būtų įrengta ventiliacijos sistema, kuri didintų prieškambario patalpos oro slėgį. To pasekoje atidarius praėjimą tarp sveikojo gyvenamosios zonos ir laikinojo prieškambario oras dėl masės tvermės dėsnio tekėtų iš prieškambario į sveikojo gyvenamąją zoną, o atidarius praėjimą tarp sergančiojo gyvenamosios zonos ir prieškambario oras sklistų iš prieškambario į sergančiojo gyvenamąją zoną. Tokiu būdu nešvaraus oro srautui su užkrato dalelėmis būtų užkirsta sklįsti į sveikojo

gyvenamąją zoną.



1.1 pav.: A1 - sergančiojo gyvenamoji zona; A2 - sveikojo gyvenamoji zona; B1 - sergančiojo tualetas; B2 - sveikojo tualetas; C - laikinasis prieškambaris

## 1.2 Magistro darbo tikslas

Norint išsiaiškinti izoliacinės palatos ir laikinojo prieškambario įrengimo gyvenamojoje patalpoje galimybių ribas inžinerinio ventiliacijos sprendimo dizaino kūrimo metu darbe apžvelgiami su nagrinėjamu atveju susiję moksliniai tyrimai. Magistrinio darbo teorinės dalies tikslai:

- Apžvelgti infekcijos plitimo mechanizmą
- Apžvelgti tyrimus susijusius su COVID-19 plitimu
- Apžvelgti ventiliacijos būdus ir patalpų ventiliacijos įtaką infekcijų plitimui
- Apžvelgti infekcinių izoliacinių palatų ir laikinųjų prieškambarių ventiliavimo specifiką

- Apžvelgti nagrinėjamo atvejo ventiliacijos tyrimo būdus
- Apžvelgti matematinės lygtis naudojamas oro srautų modeliavime
- Apžvelgti skaitinius metodus bei pradines ir kraštines sąlygas tinkančias nagrinėjamo atvejo oro srautų simuliacijai

Magistrinio darbo praktinės dalies tikslai:

- Atsižvelgiant į apžvelgtą mokslinę literatūrą apsibrėžti reikalingas simuliacijas nagrinėjamo ventiliacijos uždaviniui tirti
- Sukonstruoti konkrečios gyvenamosios patalpos modelį ir atlikti oro srautų simuliaciją

## 2. Teorinė dalis

### 2.1 Infekcijos

#### 2.1.1 Infekcijos plitimo mechanizmo tyrimų ištakos

Oro lašeline būdu plintančių ligų atradimas turi ilgą istoriją. Jau prieš 12000 metų raupų epidemijos buvo minimos šiuorės rytų Afrikoje [3]. Ankstyvaisiais laikais buvo tikėta, kad juodoji magija arba piktosios raganos yra infekcijos sukėlėjai. Seniausios mokslinės teorijos apie epidemijos plitimą oru pradėtos nagrinėti šešioliktame amžiuje [4]. Buvo iškelta hipotezė, kad ligos kyla iš maliarijos ir miazmos esančios ore, ir buvo nurodoma į kenksmingus garus ir blogą orą [5]. Tačiau su bakterijų teorijos atsiradimu, kontakto ir infekcijos pernešimo oro lašeline būdu konceptai tapo vyraujantys [6].

#### 2.1.2 Apie oro lašelinį plitimo būdą

Šiais laikais, kai infekcine liga užsikrėtęs individas ateina į ligoninę nėra jokio būdo galutinai įvertinti kaip jis užsikrėtė. Epidemiologai atliekantys kontaktų susekimą (angl. contact-tracing), kurio metu nuosekliai sekama kas turėjo artimą kontaktą su į ligoninę atėjusiu užsikrėtusiuoju, negali iš tikrųjų atsakyti kokiu būdu pats užkratas užkrėtė užkrėstąjį. Infekcinių ligų bendruomenėje yra sutariama, kad pagrindiniai galimi būdai kvėpavimo takų virusams persiduoti tarp žmonių yra kontaktas arba oro lašelinis būdas [7]. Imlus individas gali kontaktuoti su užkrėstu individu tiesiogiai arba netiesiogiai. Tiesioginis užkrato perdavimo tarp žmonių kontaktas įvyksta tada, kai imlus ir užkrėstasis individai liečiasi fiziškai, pavyzdžiui - rankų paspaudimo pasisveikinimo metu, o netiesioginis kontaktas įvyksta tada, kai imlus individas paliečia ranka koki nors objektą, kurį prieš tai buvo lietęs užsikrėtęs individas su užkrato dalelėmis ant jo rankų. Abu kontakto būdai reikalauja imlų individų pa-

liesti save su užkrato dalelių turinčia ranka. Priešingai, užkrėčiamų ligų perdavimas oro lašeline būdu nereikalauja jokio fizinio kontakto tarp užsikrėtusiojo ir imlaus individo. Užkrėtimas oro lašeline būdu įvyksta, kai užkrėsto individo kosėjimo, čiaudėjimo, garsaus kalbėjimo arba net kvėpavimo metu iš kvėpavimo takų pasklidę lašelių branduoliai susiduria su imliu individu. Šios užkrato dalelės yra pakankamai mažos, t.y. nedidesnės nei 5mm, todėl jos yra pakankamai lengvos, kad išliktų pakibusios ore keletą valandų. Čiaudėjimo metu gali būti paskleista 40 tūkstančių tokių lašelių, kosėjimo metu - nemažiau nei 100 tūkstančių ir 3000 garsaus kalbėjimo metu [8][9][10][11]. Imlus asmuo gali užsikrėsti virusu įkvėpęs mikroskopines užkrato daleles, kurios susideda iš kietųjų užkrato komponentų išlikusių po kvėpavimo takų lašelių branduolių išdžiuvimo ore. COVID-19 epidemijos atveju nėra aišku, kuris iš šių mechanizmų - kontakto būdas ar oro lašelinis būdas, vaidina didžiausią vaidmenį užkrato plitime. Daugelis oro lašeline būdu plintančių ligų tyrimų iki dabartinės epidemijos koncentravosi į žiaurius iškvėpimo įvykius (angl. violent expiratory events) [12] [13], tačiau dabar yra daug įrodymų, kad daugelis užsikrėtusiųjų individų, kurie skleidžia COVID-19 yra arba minimaliai simptomatiški arba visiškai asimptomatiški [14][15].

Taip pat didelį užkrėčiamumą turintis korona virusas buvo ir 2002-2003 metais kilusio sunkus ūmaus kvėpavimo sindromo (angl. severe acute respiratory syndrome, SARS) protrūkio priežastis, kuri sukėlė pasaulinį sveikatos pavojų. Tuomet iš pradžių taip pat manyta, kad infekcija plinta per lokalizuotą (artimą) kontaktą su užkrato daleles skleidžiančiais užsikrėtusiais individais, tačiau rasta atvejų, kai individai neturėję artimo kontakto su žinomais užsikrėtusiais individais buvo užkrėsti [16].

Asimptomatiški arba iki-simptomatiški (angl. pre-symptomatic) individai pagal apibrėžimą nekosėja ir nečiaudi. Paimti oro mėginiai iš 2003 metų epidemijos laikotarpio parodė, kad hospitalizuoti SARS užkrėsti pacientai skleidė gyvastingą, t. y. užkrėčiamumo potencialą turintį, aerosolizuotą virusą į orą. Pastebėtina, kad protrūkis buvo sukeltas SARS-COV-1, artimiausio žmonėse žinomo viruso giminingo SARS-COV-2 virusui atsakingam už dabartinę epidemiją. Šie virusai nėra tokie patys, bet neseniai atlikti eksperimentiniai darbai pademonstravo, kad aerosolizavęs SARS-COV-2 virusas išlieka gyvastingas ore su vienos valandos pusėjimo trukme. Buvo prieita išvados, kad užsikrėtimas SARS-COV-2 virusu per ore pakibusias ir ant paviršių esančias užkrato daleles yra tikėtinas, nes virusas ore gali išlikti gyvas-



tingas ir turėti užkrėčiamumo potencialą keletą valandų, o ant paviršių net ir keletą dienų [15].

### 2.1.3 Infekcijos plitimo tyrimai

Užkrato plitimo tyrimų procesas yra komplikuoatas dėl keleto veiksnių, kurie turi svarstytinus ir neaiškius kintamumus, į kuriuos įeina: nagrinėjamo užkrato charakteristika, užkrėsto individo užkrėčiamumas, terpė, kurioje užkratas perduodamas iš šaltinio naujam imliam individui, ir naujo imlaus individo imuninės sistemos atsakas šiam virusui. Net jei informacija apie viruso gaminimąsi ir užkrėčiamumą būtų žinoma su tobulu tikslumu, vis tiek būtų reikalinga tirti kaip šios dalelės patalpose juda oru link imlių individų, todėl ligos transporto analizė turi didelę svarbą infekcinių ligų plitimo užkardymo tyrimų kontekste. Nepaisant oro srautų įtakos užkrėtimo rizikai, tyrėjai epidemiologijoje turi išradę būdų modeliuoti ligos dinamiką nuo tokių klasikinių modelių kaip Imlus-Užkrečiantis-Imlus (angl. Susceptible-Infector-Susceptible, SIS) ir Imlus-Užkrečiantis-Pašalintas (angl. Susceptible-Infector-Removed, SIR) [18] iki naujesnių tyrimų, kurie remiasi dozės-atsako duomenimis [19] arba kurie įtraukia užkrato ir užsikrėtusiojo biologinę sąveiką [20]. Daugelis tyrimų nustatančių oru sklindančios infekcijos užkrėtimo riziką uždaroje patalpoje kyla iš William F. Wells ir Richard L. Riley atliktų darbų ir tyrimų. Dvidešimto amžiaus ketvirtajame dešimtmetyje Wells pristatė užkrato dalelių (angl. quanta) idėją nusakančią užkrėtimui įvykti imliame individe reikalingą užkrato dozę [21][24] ir paaiškino, kad oro būdu pernešamos ligos keliauja lašelinuose branduoliuose. Ši hipotezė buvo patvirtinta eksperimentiškai [21][22][23]. Tuo tarpu Riley remdamasis šia prielaida ir Poissono pasiskirstymu išvedė oro lašelinio būdu plintančios infekcijos užkrėtimo tikimybę nusakančią funkciją [24], kuri vadinama Wells-Riley lygtimi

$$P = S(1 - e^{-\frac{Iqpt}{Q}}) \quad (2.1)$$

Čia  $P$  yra užsikrėtimo įvykio rizika (tikimybė),  $S$  yra skaičius imlių individų,  $I$  yra skaičius užkrėstų individų,  $p$  yra kiekvieno imlaus individo per valandą iškvepiamo oro tūris ( $\frac{m^3}{h}$ ),  $Q$  yra per valandą patalpoje pratekančio oro tūris ( $\frac{m^3}{h}$ ),  $q$  yra per valandą vieno užkrėsto individo generuojamų užkrato dalelių kiekis ( $\frac{quanta}{h}$ ) ir  $t$  yra imlių individų sąveikavimo su patalpos užkrėstu oru laikas ( $h$ ).

Lygtis (2.1) indikuoja, kad ventiliacijos dėka padidėjus patalpoje pratekančio

oro tūriui gali žymiai sumažėti užsikrėtimo rizika. Ventiliacija lygtyje yra išreikšta kaip patalpos ventiliacinės sistemos pateiktas į patalpą oro kiekis per vieną valandą. Padalinus šį dydį iš ventiliuojamos patalpos oro užimamo tūrio  $V$  gauname patalpos oro pasikeitimo per valandą dažnį (angl. air change rate per hour, ACH).

$$\mu = \frac{Q}{V} \quad (2.2)$$

Ventiliacijos tyrimuose ši išraiška dažnai naudojama ventiliacijos efektyvumui nuskaičiuoti [29], tačiau realybėje negalime manyti, kad pateikus į patalpą patalpos tūrio šviežio oro kiekį, jis idealiai iš patalpos išstums visą seną orą.

#### 2.1.4 Ventiliacijos dažnumo įtaka infekcijos plitimo rizikai

Retrospektyvūs pastatų oro srautų tekėjimo dėsnų tyrimai parodė, kad užkrato sklidimas pastatų ventiliacijos indukuojamais oro srautais gali turėti didelės įtakos infekcijos plitimui [17]. Didesnis ventiliacijos dažnumas gali pravėdinti patalpoje esantį užkrastą orą greičiau ir taip sumažinti infekcijos pernešimo riziką. Buvo tirta sveikatos apsaugą teikiančių darbuotojų užsikrėtimo rizika skirtingose palatose su skirtingo dydžio langais dvejose ligoninėse 2003 metų SARS protrūkio Guangdongo metu ir rasta, kad didesni langai lemia mažesnę užsikrėtimo riziką [28]. Taip pat SARS protrūkio metu Honk Konge dvejose ligoninėse, kurių palatos yra natūraliai ventiliuojamos, buvo tirtas ventiliavimo dažnumas. Rezultatai parodė, kad natūralios ventiliacijos būdu kryžminio ventiliavimo atveju, t. y., kai ventiliuojama dvejų patalpos ertmių (dvejų langų arba lango ir durų) indukuojamo srauto, palatose galima pasiekti net 69 oro pasikeitimų per valandą dažnį ir 18 oro pasikeitimų per valandą dažnį vienpusės ventiliacijos atveju, kai langas yra pilnai atidarytas [29]. Maksimizuoti natūralią ventiliaciją jau dabar yra siūlome mažiau turtingose šalyse [11][26]. Daugelyje dokumentų, kuriuose pateikiamos gairės infekcijos kontroliavimui, minimalus rekomenduojamas ventiliacijos dažnumas užkrečiamų ligų profilio izoliacinėse palatose yra 12 oro pasikeitimų per valandą (angl. air change per hour, ACH) [26][30]. Šios rekomendacijos kilo iš Amerikos Ligų Kontrolės ir Prevencijos Centro (angl. Center for Disease Control and Prevention, CDC) 6 oro pasikeitimų per valandą rekomendacijos ir padvigubėjo po 2003 metų SARS epidemijos. Tuo tarpu komercinių pastatų ventiliacijos standartas yra 1 oro pasikeitimas per valandą [11]. Nepaisant to, nėra pakankamai įrodymų patvirtinančių minimalias infekcijos kontroliavimo ventiliavimo dažnumo rekomendacijas [31].

### 2.1.5 Infekcijos plitimo uždaroje patalpose tyrimų ribotumas

Klasikinis Wells-Riley užkrato plitimo modelis numano, kad oras kambaryje yra tolygiai susimaišęs, t. y. patalpoje bioaerozolių (žmonių iškvepiamų dalelių) koncentracija yra tolygiai pasiskirsčiusi. Realybėje tai retai kada yra tiesa net ir patalpose su geriausiai įdiegta ventiliacijos sistema, todėl šis modelis neatsako už artimumo įtaką tarp užkrėstojo ir imlių individų. Taip pat, iškveptos dalelės gali dėl gravitacijos nusėsti ant paviršių ir būti pašalintos iš oro prieš jį įkvėpiant. Toliau naginėjama atveji komplikuoja dėl ventiliacijos padidėjęs patalpos oro greitis, dėl kurio užkrato dalelės gali pasklisti toliau nuo užsikrėtusiojo ir užkrėsti imlius individus, arba gali padidinti ore esančią turbulenciją ir to pasekoje praskiesti dalelių koncentraciją tam tikrose zonos taip sumažinant užsikrėtimo riziką [15]. Šie neaiškumai dingsta ventiliaciją tiriant skaitinėmis skysčių dinamikos modeliavimo technikomis simuliuojant oro srautus ir užkrato pasklidimą, atskleidžiant patalpos geruosius ir bloguosius oro maišymosi regionus [25].

### 2.1.6 Izoliacinių palatų ir laikinųjų prieškambarių ventiliacijos dizaino specifika

Ligoninėse pacientams su skirtingais ligų profiliais palatose gali būti reikalingos skirtingos ventiliacinės strategijos. Infekcinėmis ligomis sergantiems pacientams yra skirtos specialios izoliacinės palatos. Bendrai, įprastai palatai ir neigiamo slėgio izoliacinei palatai ideali ventiliacijos sistema turi greitai ir efektyviai išpūsti arba pravėdinti taršalus (užkrato daleles), kad būtų sumažinta rizika sveikatos apsaugą teikiantiems individams ir kitiems pacientams. Oro srautas turi tekėti iš švarių zonų į nešvarias zonas, užkertant kelią užkrato dalelių sklidimui tarp patalpų [11]. Oro srauto krypties įvedimas tarp zonų - sergančiųjų infekcine liga palatų ir sveikatos apsaugą teikiančių asmenų naudojamų patalpų, yra pasiekiamas sukuriant patalpose skirtingus oro slėgius. Mechaninėmis ventiliacinėmis sistemomis sukuriant nelygius į patalpą patenkančio ir išpučiamo oro kiekius pasiekiamas skirtingas patalpos oro slėgis [11]. Palata vadinama teigiamo slėgio skirtumą turinčia palata, kai į patalpą pateikiama daugiau oro nei iš jos išpučiama. Tokio pobūdžio palata priešinamasi palatą supančiam potencialiai užkrėtam orui ir taip individams su kompromituotu imunitetu sumažinama rizika užsikrėsti infekcine liga. Priešingu atveju, palata va-

dinama neigiamo slėgio, kai iš jos išpučiama daugiau oro nei į ją pateikiama. Tokio pobūdžio palatomis siekiama apsaugoti aplinkines patalpas nuo užkrėsto paciento generuojamų lašelinių branduolių. Tačiau slėgio skirtumas yra palaikomas tik tada, kai durys ir langai yra pilnai uždaryti. Kai izoliacinės palatos durys yra atidarytos, slėgio skirtumas tarp palatos ir koridoriaus pradingsta [32]. Šiai problemai išspręsti naudojami laikinieji prieškambariai, kurie įrengiami tarp palatos ir koridoriaus [11].

Laikinasis prieškambaris, kai jis būna prijungiamas prie izoliacinio kambario, funkcionuoja kaip:

- Kontroliuojama vieta, kurioje neužsikrėtę individai gali vykdyti užsikrėtusiam asmeniui reikalingų išteklių (maisto, medicininių reikmenų) perdavimą nepaskleidžiant užkrėsto oro į kitų pacientų ar sveikatos apsaugą teikiančių asmenų naudojamą patalpą
- Barjeras apsaugantis nuo potencialaus slėgio skirtumo sumažėjimo tarp sergančiojo ir sveikųjų naudojamų patalpų
- Vieta, kurioje sveikatos priežiūrą atliekantys asmenys užsideda asmeninės saugos įrangą ir drabužius, t. y. kaukes, pirštines ir kitas priemones, prieš įeidami į izoliacinę palatą, ir nusiima apsaugos priemones prieš grįždami į neužsikrėtusių žmonių naudojamą patalpą

### 2.1.7 Laikinojo prieškambario realizavimas

Laikinojo prieškambario įrengime geriausiu atveju reiktų panaudoti nesunkiai prieinamas medžiagas ir mechanizmus. Laikinojo prieškambario sienas galima būtų sukonstruoti iš sujungtų patvarios politileninės plėvelės juostų. Šios juostos tada galėtų būti pritvirtintos prie lubų ir grindų lipnia juosta ir atliktų sienos funkcijas. Durų funkcijai atlikti būtų galima panaudoti plastikinės plėvelės laikinai pastatomas sienas su užtrauktuku, kurios būna naudojamos statybų industrijoje apsaugant tam tikras patalpas nuo dulkių srauto. Į laikinąjį prieškambarį turėtų būti įmontuoti oro padavimo ir ištraukimo mechaniniai ventiliatoriai laikinojo prieškambario padidintam oro slėgiui sukurti, tačiau nėra akivaizdu kokius mechaninius ventiliatorius reiktų panaudoti laikinojo prieškambario įrengime, nes tokie ventiliatoriai nėra plačiai prieinama prekė.

## 2.2 Ventiliacija

Ventiliacija yra apibrėžiama kaip oro tiekimo, pašalinimo ir paskirstymo uždaroje erdvėje procesas mechaniniais arba natūraliais būdais. Ventiliacijos tikslas yra teikti į pastatų patalpas išorės orą ir pašalinti iš pastato patalpų užterštą orą ir šilumos bei drėgmės perteklių, kad patalpos atitiktų sveikatos ir komforto reikalavimus. Pastatų patalpų ventiliavime naudojami trys pagrindiniai metodai - mechaninė ventiliacija, natūrali ventiliacija ir mišri ventiliacija [26].

Mechaniniuose ventiliacijos methoduose naudojami fenai (ventiliatoriai) įmontuoti languose arba ventiliacinėse šachtose, kurie pučia arba ištraukia orą iš ventiliuojamų patalpų. Tokiu būdu užtikrinamas pastovus oro kiekio ventiliuojamose patalpose pasikeitimas nepriklausantis nuo kintančio vėjo ar išorės temperatūros kaitos, tačiau mechaninės ventiliacijos sistemos įrengimo ir palaikymo išlaidos gali būti labai didelės. Jei mechaninė ventiliacijos sistema nėra gerai įrengta, nėra tinkamai prižiūrima arba nėra užtikrintas nuolatinis elektros tiekimas, jos eksploatacinės savybės gali kompromituoti ventiliacijos procesą. Dėl šios problemos mechaninė ventiliacijos sistema gali būti infekcinės ligos sklidimo priežastis, vietoj to, kad būtų svarbus įrankis infekcijos kontrolėje [17][26].

Natūralios ventiliacijos methoduose nesiremiamas mechaniniais prietaisais, o vietoje to panaudojami natūraliai gamtoje pasireiškiantys fenomenai - vėjas, šiluminio plūdrumo varomas srautas ir šiluminė energija, kuri yra Saulės ir pastato vidinio šildymo pasekmė. [26].

Mišrios ventiliacijos sistemose panaudojama natūrali ventiliacija ir, kai jos neužtenka, įjungiamas mechaninė ventiliacija reikalingam patalpos oro pasikeitimų dažniui užtikrinti [26].

Didesni ventiliacijos pajėgumai gali suteikti didesnio pravėdinimo galimybę mažinant užsikrėtimus, bet didesni ventiliavimo dažniai, taip pat, reiškia ir didesnius energijos kaštus, kai patalpos yra ventiliuojamos mechaniniu būdu. Lyginant su mechanine ventiliacija, natūrali ventiliacija gali suteikti daug didesnius ventiliavimo dažnius esant palankioms sąlygoms, bet ventiliacijos procesas gali būti kompromituotas šiltą nevējuotą dieną [33].

Pastatų ventiliacijos sistemose reikalinga laikytis pusiausvyros tarp užkrėtimo rizikos mažinimo ir energijos kaštų mažinimo. Norint įrengti izoliacinę palatą su laikinuoju prieškambariu gyvenamojoje patalpoje reikalinga naudoti mišrios venti-

liacijos strategiją, nes nėra natūralių ventiliacijos būdų slėgio skirtumui palaikyti tarp izoliacinės palatos ir laikinojo prieškambario. Dėl to inžinerinio sprendimo dizaino kūrimo metu laikinojo prieškambario zonoje neišvengiama naudoti mechaninės ventiliacijos būdą oro slėgiui padidinti, o sergančiojo zonoje pasirinkta ventiliuoti natūralios ventiliacijos būdu, taip atsižvelgiant į energijos kaštų taupymą [33].

## 2.3 Vienpusė ventiliacija

Galima išskirti du erdvės (patalpos) natūralaus ventiliavimo atvejus

- Vienpusė ventiliacija - kai erdvė (patalpa) ventiliuojama vienoje erdvės sienos pusėje esančios ertmės (lango) indukuojamu oro srautu
- Kryžminė ventiliacija - kai erdvė ventiliuojama skirtingose erdvės sienose esančių ertmių (langu ir/arba durų) indukuojamu srautu

Kadangi izoliacinėje palatoje reikia laikytis oro srauto kontroliavimo kriterijaus, šio darbo kontekste yra aktualus tik vienpusės ventiliacijos atvejis.

Vėjo jėga ir patalpos vidaus ir išorėje esančio oro temperatūrų skirtumas yra pagrindiniai parametrai įtakojančys oro srautus vienpusės ventiliacijos atveju [39]. Vėjas gali dažnai atrodyti dominuojantis veiksnys varantis oro srautų tekėjimą, tačiau daugeliu atvejų ventiliacijoje oro temperatūrų skirtumai taip pat vaidina kontroliuojantį bruožą. Erdvėje (patalpoje) su didele ertme arba apatine ir viršutine ertmėmis, temperatūros skirtumas tarp išorės ir vidaus lemia tankio skirtumą tarp išorės ir vidaus oro, nes šiltesnis oras yra retesnis nei šaltas oras. Dėl to taip pat skiriasi ir išorės ir vidaus oro slėgis. Didesnis vidinis patalpos oro slėgis, lyginant su išorės oro slėgiu, įtakoja oro srautą ištekėti, o mažesnis vidinis slėgis lemia oro srautą įtekėti į patalpą. Šis plūdrumo įtakojamasis srautas ventiliacijos literatūroje kartais vadinamas kamino efektu (angl. stack effect) [27]. Šis reiškinys turi didelę įtaką pastatuose tekančio oro srauto dėsninėjimams ir oro pasikeitimui su išore [27]. Kai išorės ir vidaus oro temperatūra susivienodina, plūdrumo jėga išnyksta ir nebėra jokios jėgos įtakojančios pastato ventiliuojamo kamino efektu ventiliaciją. Ventiliacijos ertmių lokacijos patalpoje daro didelę įtaką jos oro temperatūros pasiskirstymui. Jei yra dvi ventiliacijos ertmės - viena viršuje, o kita apačioje, šiltesnis oras tekės pro apatinę ertmę ir šiltesnis oras tekės per viršutinę ertmę. Tokio tipo

ventiliacija, kurios metu erdvėje susidaro temperatūros stratifikacija, vadinama išstumiamąja ventiliacija. Nors ji pasireiškia stipriau erdvėse su žemutine ir viršutine ertmėmis, išstumiamoji ventiliacija taip pat gali nutikti ir erdvėse su viena didele ertme (langu). Tokiu atveju ertmė atlieka oro įvedimo į patalpą (angl. inlet) ir išvedimo iš patalpos (angl. outlet) funkcijas. Lyginant erdvės su žemutine ir viršutine ertmėmis bei erdvės su viena didele ertme patalpos oro pasikeitimų per valandą dažnumus erdvės su viena didele ertme generuoja mažesnius ventiliavimo dažnius ir ventiliuojamas oras nepasklinda taip giliai į erdvę. Patalpoje stipresnis oro srautas susidaro tada, kai būna didesnis vertikalus atstumas tarp erdvės oro išvedimo ir įvedimo ertmių ir kai būna didesnis skirtumas tarp vidaus ir išorės oro temperatūrų [39][45].

Vienpusė ventiliacija taip pat gali būti sukurta dėl vėjo atsirandančio slėgio skirtumo erdvės ertmės vietoje (lange) [39]. Dėl savo nepastovumo vėjas yra sunkiai aprašomas ir simuliuojamas veiksnys. Šiai problemai apeiti tyrimų (simuliacijų) metu vėjo kryptis ir greitis yra fiksuojami ir laikomi konstantomis. Bendrai kalbant, vėjui pučiant į pastatą toje pastato pusėje į kurią pučia vėjas susidaro didesnis oro slėgis, o priešingoje pastato pusėje oro slėgis susidaro mažesnis. Taip pat vėjo srautą pučiantį į pastatą stipriai įtakoja paties pastato forma ir kitų aplinkinių pastatų išsidėstymas. Daugelis pastatų turi aštrius kampus, kurie įtakoja vėjo srauto pasidalinimą ir aptekėjimą aplink pastatą. Dėl šios priežasties tiriant natūralią ventiliaciją galima atkreipti dėmesį į skirtingą ventiliavimo efektyvumą vėjui pučiant iš skirtingų pusių [27]. Blogiausias atvejis sveikatos apsaugą teikiančių patalpų natūralios ventiliacijos tyrimuose nutinka šiltą nevējuotą dieną, kurios metu ventiliacija yra varoma tik plūdrumo jėgų.

Vienpusės ventiliacijos oro srautai gali būti tiriama naudojantis analitiniais, eksperimentiniais ir skaitiniais tyrimais [33][39].

### 2.3.1 Analitiniai tyrimai

Analitiniuose tyrimuose yra konstruojamos analitinės funkcijos apimančios ventiliacijos procese dalyvaujančius parametrus, tokius kaip vėjo greitis, lango plotis ir kiti [39]. Dažniausiai analitiniuose skaičiavimuose numanoma pastovi patalpos vidaus temperatūrą, vidaus oro temperatūros stratifikacija ir besiskiriantis tankis yra ignoruojami, tačiau yra keletas tyrimų, kuriuose nagrinėti komplikuočiau modeliai su

patikslintu srauto elgesiu ertmėse apibrėžiant temperatūros stratifikaciją [47] [48].

### 2.3.2 Eksperimentiniai tyrimai

Eksperimentinių tyrimų metu gauti rezultatai yra vertingi nustatant specifinį fizinį tiriamo proceso elgesį. Dažnai trumpalaikiuose patalpų ventiliacijos efektyvumo eksperimentiniuose tyrimuose naudojamos sintetinės susekamosios dujos (angl. tracer gas) - sieros heksoflouridas, kurių pagalba galima atlikti realiai vykstančio oro srauto tekėjimo matavimus [33][55] ir palyginimus su skaitinės skysčių dinamikos gaunamais rezultatais [37]. Matavimai gauti iš eksperimentinių metodų gali vėliau būti naudojami konstruojant bendresnius (daugiau parametrų apimančius) analitinius modelius [39] arba panaudojami kraštinių bei pradinių sąlygų uždavimui skaitinės skysčių dinamikos simuliacijose [33].

Pažymėtina, kad ventiliacijos inžinerinio dizaino, tokio kaip izoliacinė palatos gyvenamojoje patalpoje su laikiniu prieškambariu, kūrimo metu eksperimentiniais metodais galima tirti tik paprastus oro srauto atvejus, nes yra sunku pakankamai pakeisti atliekamų eksperimentų sąlygas, pavyzdžiui, vėją, temperatūrą ar egzistuojančias testinės aplinkos struktūras [39].

### 2.3.3 Skaitiniai tyrimai

Paskutinis tyrimų metodas naudoja skaitines technikas, tokias kaip skaitinę skysčių dinamiką, kuri leidžia modeliuoti įvairaus pobūdžio tekėjimo fenomenus nuo paprastų iki komplikuočių atvejų. Skysčiu fizikoje laikomos tokios medžiagos, kurios tolygiai keičia savo formą medžiagą veikiant išorinėms jėgoms ir kurios turi savybę įtekant į uždara erdvę ir įgyti erdvės tūrio formą. Oras yra tokia medžiaga, todėl oro srautus galima nagrinėti pasitelkiant skaitinės skysčių dinamikos simuliacijomis.

Ventiliacijos proceso tyrimai naudojantis skaitine skysčių dinamika prasidėjo 1970 metais tyrėjams atkreipus dėmesį į blogai ventiliuojamų patalpų daromą įtaką žmonių sveikatai. Iš pradžių buvo modeliuojami srautai paprastose geometrijose [57]. Norint padaryti simuliacijos rezultatus patikimus ir tikslus, daug dėmesio ir darbo buvo skirta tiriant skirtingų turbulencijos modelių, įvairių skaitinių diskretizacijos schemų ir algoritmų įtaką simuliacijos rezultatams ir patvirtinimui šių simuliacijų eksperimentiniais rezultatais [32]. Pavyzdžiui, buvo padaryti skaitiškai simuliuojamų situacijų palyginimai su lazeriniu lašelių matuoklio (angl. laser-



doppler anemometre) matavimais mažo mastelio kambaryje [55]. Kitose studijos šis darbas pratęstas paprastose geometrijose įtraukiant plūdrumo efektą ir darant tolimesnius palyginimus su eksperimentais [56]. Vėliau pradėta nagrinėti ventiliaciją ir komplikutesnėse geometrijose [58].

Skaitinės skysčių dinamikos simuliacijos turi didelį potencialą dizaino kūrimo metu kuriant natūralios ventiliacijos inžinerinį sprendimą. Skaitinės skysčių dinamikos didis pranašumas yra tai, kad jis turi potencialą suteikti detalią oro srauto tekėjimo dėsningumą ir temperatūros pasiskirstymų erdvėje informaciją, ir skaičiavimai, iš principo, įtraukia visus tikėtinius fizinius procesus. Skaitinės skysčių dinamikos simuliacijos yra tinkamos tyrimuose su komplikuotomis patalpų geometrijomis ir įvairiais šilumos šaltinių išsidėstymais, tačiau praktikoje yra būtina daryti geometrijos supaprastinimus ir laikyti, kad nagrinėjamas atvejis tik aproksimuojama realiai vykstančius reiškinius [27]. Remiantis skaitinės skysčių dinamikos rezultatais dizaineriai gali nuspręsti optimalų erdvės ertmių išsidėstymą geriausiai natūraliai ventiliacijai pasiekti. Dėl to oro srautų modeliavimas yra populiarėjantis dizainerių ir architektų bendruomenėje [39].

## 2.4 Navjė-Stokso lygčių sistema

Klampaus nespūdaus skysčio tekėjimo modeliavime naudojamos Navjė-Stokso lygtys. Šios lygtys buvo išvestos devyniolikto amžiaus pirmoje pusėje prancūzų inžinieriaus K. Navjė ir anglų matematiko G. Stokso. Neišspręsti Navjė-Stokso lygčių teorijos uždaviniai traukia dėmesį, ne tik dėl uždavinių išsprendžiamumo atsakymo, bet ir dėl to, kad jie stimuliuoja daugelio kitų matematikos ir tikslųjų mokslo sričių vystymąsi. Matematinės Navjė-Stokso lygčių teorijos vystymasis ypač suintensyvėjo dvidešimtojo amžiaus pabaigoje. Tai susiję su išaugusia hidrodinamikos modelių taikymo moksle ir įvairiose industrijose paklausa. Navjė-Stokso lygtimis grįstų hidrodinamikos modelių pagalba ieškoma efektyvesnių dizaino sprendimų įvairių transporto priemonių gamyboje, medicinoje tiriami kraujotaka ir įvairūs jos sutrikimai, meteorologijoje sudaromos orų, cunamių ir įvairių ekologinių problemų prognozės [34].

Tegu  $\Omega \subset \mathbb{R}^3$  yra klampaus nespūdaus skysčio tekėjimo sritis, o  $\partial\Omega$  - jos kraštas. Navjė-Stokso lygčių sistema nusakanti tokio skysčio tekėjimą Dekarto koordinatų

sistemoje užrašoma taip:

$$\begin{cases} \rho \mathbf{u}_t - \nu \Delta \mathbf{u} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p = \rho \mathbf{f}, \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

Čia  $\mathbf{u} = \mathbf{u}(x, t) = (u_1(x, t), u_2(x, t), u_3(x, t))$  yra skysčio greičio vektorius taške  $x \in \Omega$  ir laiko momentu  $t \in [0, T]$ ,  $p = p(x, t)$  - skysčio slėgis,  $\nu > 0$  - skysčio klampumo koeficientas (pastovus dydis, priklausantis nuo skysčio savybių),  $\rho > 0$  - skysčio tankis,  $\mathbf{f} = \mathbf{f}(x, t) = (f_1(x, t), f_2(x, t), f_3(x, t))$  išorinių jėgų, veikiančių skysčių, vektorius. Lygčių sistemoje  $\mathbf{u}_t$  yra greičio vektoriaus  $\mathbf{u}(x, t)$  išvestinė kintamojo  $t$  (laiko) atžvilgiu,  $\Delta$  yra Laplaso operatorius erdvėje  $\mathbb{R}^3$ , t.y.

$$\Delta \mathbf{u} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 \mathbf{u}(x, t)}{\partial x_i^2}, \quad (2.4)$$

$\nabla$  - gradientas kintamųjų  $x$  atžvilgiu:

$$\nabla = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} \\ \frac{\partial}{\partial x_3} \end{pmatrix}, \quad (2.5)$$

" $\cdot$ " - skaliarinė daugyba erdvėje  $\mathbb{R}^3$ , t. y.

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = \sum_{j=1}^3 a_j b_j \quad \forall \mathbf{a}, \mathbf{b} \in \mathbb{R}^3. \quad (2.6)$$

Pirmoji lygtis (2.3) sistemoje yra vektorinė. Naudojant greičio vektoriaus komponentes (2.3) sistemą galima užrašyti taip:

$$\begin{cases} \rho u_{1t} - \nu \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_j^2} + \rho \sum_{j=1}^3 u_j \frac{\partial u_1}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_1} = \rho f_1 \\ \rho u_{2t} - \nu \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_j^2} + \rho \sum_{j=1}^3 u_j \frac{\partial u_2}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_2} = \rho f_2 \\ \rho u_{3t} - \nu \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_j^2} + \rho \sum_{j=1}^3 u_j \frac{\partial u_3}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_3} = \rho f_3 \\ \sum_{j=1}^3 \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

Pirmoji (2.3) sistemos lygtis aprašo skysčio judėjimo kiekio kitimo dėsnį. Netiesinis lygties narys  $(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}$  vadinamas konvekciniu pagreičiu ir reiškia nuo erdvės priklausančią ir nuo laiko nepriklausančią įtaką tekėjimo pagreičiui, o lygties nariai  $\nu \Delta \mathbf{u}$  ir  $\nabla p$  laikomi vidinėmis jėgomis veikiančiomis tekėjimą.

Tekėjimas, kurio metu tankis  $\rho$  yra konstanta vadinamas nespūdžiu. Priešingu atveju, tekėjimas, kurio metu tankis kinta, vadinamais spūdžiu. Iš tiesų visi tekėjimai daugmaž yra spūdūs, nes grynai nespūdūs tekėjimai, kurių metu tankis

yra ištis konstanta, gamtoje neatsitinka. Tačiau kai kuriuos tekėjimus galima tirti kaip nespūdžius tekėjimus nepatiriant žymių netikslumų skaičiavimuose. Pavyzdžiui, homogeninių skysčių tekėjimas yra laikomas nespūdžiu, todėl hidrodinamikos uždaviniuose tankis  $\rho$  laikomas konstanta. Dujų tekėjimo uždaviniuose, taip pat galima laikyti tankį  $\rho$  konstanta, jei tiriamas dujų tekėjimo greitis yra palyginamai mažesnis už garso greitį  $M \approx 330 \frac{m}{s}$ , t.y. jei  $\max(\mathbf{u}) < M$  [35].

Antroji (2.3) sistemos lygtis taip pat reiškia skysčio nespūdumą. Skysčių mechanikoje ir koontinumo mechanikoje ši lygtis vadinama masės tvermės dėsnium ir įprastai užrašoma tokia forma:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2.8)$$

Kadangi tankį  $\rho$  galima laikyti pastoviu dydžiu, lygtis (2.8) suprastinama ir gaunama antroji (2.3) sistemos lygtis.

Norint išspręsti Navjė-Stokso lygčių sistemą reikalinga užduoti kraštines (2.9) ir pradines sąlygas (2.10), t. y. apibrėžti kaip elgsis srautas tekėjimo srities krašte ir kokia yra pradinė srauto būseną (greitis) laiko momentu  $t = 0$ :

$$\mathbf{u}(x, t) = \alpha(x, t), \text{ kai } x \in \partial\Omega \quad (2.9)$$

$$\mathbf{u}(x, 0) = \mathbf{u}_0(x) \quad \forall x \in \Omega \quad (2.10)$$

čia  $\alpha(x, t)$  aprašo srauto judėjimą srities krašte  $\partial\Omega$ .

Sujungę (2.3), (2.9), (2.10) gauname Navjė-Stokso lygčių sistemos pradinį ir kraštinį uždavinį

$$\begin{cases} \mathbf{u}_t - \nu \Delta \mathbf{u} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p = \mathbf{f}, & (x, t) \in \Omega \times (0, T), \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, & (x, t) \in \Omega \times (0, T), \\ \mathbf{u} |_{S^T} = \alpha, \\ \mathbf{u}(x, 0) = \mathbf{u}_0(x), \end{cases} \quad (2.11)$$

kur  $S^T = \partial\Omega \times (0, T)$ , o  $(0, T)$  yra laiko intervalas, kuriame nagrinėjamas skysčio tekėjimas. Pradinio ir kraštinio uždavinio (2.11) nežinomieji kintamieji yra greičio vektorius  $\mathbf{u}(x, t)$  ir slėgis  $p(x, t)$ , o  $\mathbf{f}(x, t)$ ,  $\alpha(x, t)$  ir  $\mathbf{u}_0(x)$  yra duoti.

Trečios dimensijos Navjė-Stokso lygčių sistemos išsprendžiamumas, jos sprendinių glodumas ir vienatis yra viena iš septynių 2000 metais Klejaus Matematikos Instituto (Clay Mathematics Institute, JAV) paskelbtų naujojo tūkstantmečio pagrindinių matematikos problemų. Nepaisant nesamo lygčių išsprendžiamumo įrodymo, skaitinės skysčių dinamikos simuliacijose sėkmingai naudojamos aproksimuotos

Navjè-Stokso lygtys. Skaičiavimų metu šios lygtys diskretizuojamos naudojantis baigtinio tūrio techniką, kuri konvertuoja srautą apibrėžiančias lygtis į aibę skaitiškai išsprendžiamų algebrinių lygčių [39].

## 2.5 Skaitinė skysčių dinamika

Yra keletas kompiuterinių programų skirtų skaitinėms skysčių dinamikos simuliacijoms atlikti - Fluent, Pheonics, Cmsol ir kitos. Šiame darbe buvo naudojama Cmsol Multiphysics - interaktyvi programinė įranga skirta įvairių mokslinių ir inžinerinių problemų besiremenčių dalinėmis išvestinėmis modeliavimui ir išsprendimui. Programinė įranga sprendžia dalines išvestines naudodamasi baigtinių elementų metodu (angl. Finite Element Method, FEM) naudojantis įvairiais skaitiniais sprendimų būdais. Modeliavimo darbas Cmsol programoje gali būti susiejamas su keletu skirtingų fizinių fenomenų viename modelyje. Taip pat nesunkiai galima supaprastinti modelį ir taip pat sumažinti skaičiavimams reikalingus kompiuterio atminties ir procesoriaus resursus.

Ši programinė įranga yra ne kartą naudota oro srautų sklidimo pastatuose ir aplink pastatus tyrimuose [44][46]. Norint pasiruošti skaitinės skysčių dinamikos simuliacijų atlikimui reikia:

- Pasirinkti simuliacijos dimensiją
- Pasirinkti norimus simuliuoti fizikinius procesus
- Pasirinkti geriausias Navjè-Stokso lygčių aproksimacijas norimų fizikinių procesų simuliacijoms
- Sukonstruoti patalpos geometriją
- Įvesti reikalingus oro tankio, klampumo, slėgio ir temperatūros parametrus ir kraštines bei pradines sąlygas
- Sukonstruoti sukonstruotos geometrijos tinklę
- Pasirinkti skaičiavimams tinkamiausią sprendiklio laiko periodą

### 2.5.1 Apie dimensijos pasirinkimą

Patalpos vidaus oro srautų tyrimuose naudojamos tiek antros dimensijos tiek trečios dimensijos geometrijos. Nors oro srautų tyrimai trečios dimensijos geometrijose yra dažnesni, antra dimensija buvo naudota mechaninės ventiliacijos tyrime [44] ignoruojant patalpos aukštį ir natūralios ventiliacijos tyrime [56] ignoruojant patalpos plotį. Nors antros dimensijos simuliacijos nėra tokios informatyvios kaip trečios dimensijos simuliacijos, jos gali turėti pranašumų dėl trumpesnio laiko reikalingo atlikti skaičiavimams.

### 2.5.2 Apie simuliuojamų fizinių procesų pasirinkimą

Atsižvelgiant į žmonių sveikatos ir komforto reikalavimus oro srautų skaitinės skysčių dinamikos simuliacijų tyrimuose galimos įvairios fizinių procesų pasirinkimų kombinacijos. Daugelyje ventiliacijos tyrimų simuliacijose paprastai pasirenkami srauto greičio ir šilumos fiziniai procesai. Izoliacinės palatos oro srautų tyrimų kontekste į tiriamus procesus gali taip pat būti įtrauktas oro vidutinio amžiaus sekimas [59] arba individų iškvėpiamo oro sekimas [32].

### 2.5.3 Apie aproksimacijų pasirinkimą

Deja, nėra unikalaus turbulencijos modelio, skaitinės schemos ar skaitinio algoritmo sprendžiančio visus pastatų viduje esančio oro judėjimus, todėl tinkamas turbulencijos modelio, skaitinės schemos ir skaitinio algoritmo pasirinkimas, gali padidinti pastatų patalpų vidinio oro judėjimo simuliacijų tikslumą [32]. Kadangi oro tekėjimas yra tubulentiškas reiškinys, srauto simuliacijų tyrimuose naudojami turbulencijos modeliai tokie kaip didžiųjų sūkurių simuliacija (angl. large eddy simulation, LES) ir Reynold vidurkių Navjė-Stokso lygtys (angl. Reynold's averaged Navier Stokes, RANS) su turbulencijos modeliu.

Reynold vidurkių Navjė-Stokso lygčių modelyje aproksimuota Navjė-Stokso lygčių sistema (2.12) susiejama su kokia nors turbulencijos lygčių sistema.

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot (-p\mathbf{I} + \mathbf{K}) + \mathbf{F} + \rho\mathbf{g} \\ \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \\ \mathbf{K} = (\nu + \nu_T)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \end{cases} \quad (2.12)$$

Šioje lygčių sistemoje  $\mathbf{I}$  yra vienetinė matrica,  $\mathbf{F}$  yra išorinės jėgos veikiančios srautą, o  $\mathbf{g}$  yra gravitacija. Yra daug turbulencijos modelių, kuriuos galima naudoti su Raynold vidurkių Navjė-Stokso lygtimis. Buvo rasta, kad  $k - \epsilon$  modelis geriausiai tinka natūralios ventiliacijos indukuojamiems oro srautams simuliuoti [33]. Šiame modelyje Raynold vidurkių Navjė-Stokso lygčių sistema (2.12) susiejama su srauto kinetinės energijos  $k$  ir sklidimo dažnumo (angl. dissipation rate)  $\epsilon$  pernešimo lygtimis (2.13)

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)k = \nabla \cdot ((\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k})\nabla k) + P_k - \rho\epsilon \\ \rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\epsilon = \nabla \cdot ((\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\epsilon})\nabla \epsilon) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \end{cases} \quad (2.13)$$

kur  $\nu_T = \rho C_\nu \frac{k^2}{\epsilon}$  ir  $P_k = \nu_T (\nabla \mathbf{u} : (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T))$ . Šis metodas reikalauja aibės modeliavimo konstantų, kurios nustatomos eksperimentų būdu ir bendru atveju, šis metodas yra gan patikimas [27]. Tokio pobūdžio turbulencinis modeliavimas buvo naudotas daugelyje natūralios ventiliacijos tyrimų [33][36][37][38][39][40][42][53].

Taip pat oro srautų simuliacijų tyrimuose galima naudoti didžiųjų sūkurių simuliacijos modelį, kuriuo taip pat skaitiškai išsprendžiamas ir simuliuojamas trijų dimensijų nuo laiko priklausantis oro srautas. Yra parodyta, kad šis modelis gali būti sėkmingai naudojamas oro srautams aplink pastatą ir pastato viduje simuliuoti [49][50]. Kadangi natūrali ventiliacija reikalauja oro srautų prognozių ir pastato išorėje ir viduje, didžiųjų sūkurių simuliacijos taip pat tinka natūralios ventiliacijos tyrimuose, tačiau užima daugiau laiko skaičiavimuose lyginant su Raynold vidurkių Navjė-Stokso lygtimis su turbulencijos modeliu [33].

Be srauto tekėjimą aprašančių lygčių pasirinkimo dažnai į simuliacijų modelį įtraukiama šilumos pernešimo lygčių sistema, tačiau jos pasirinkimas nėra toks komplikotas kaip srauto tekėjimo ir priklauso tik nuo terpės, kurioje norima stebėti šilumos pernešimą. Šilumos pernešimo skysčiuose lygtis užrašoma taip:

$$\begin{cases} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q \\ \mathbf{q} = -k \nabla T \end{cases} \quad (2.14)$$

Čia  $\rho$  yra oro tankis,  $C_p$  - slėgio koeficientas,  $T$  - temperatūra,  $\mathbf{u}$  - srauto greičio vektorius,  $\mathbf{q}$  yra šilumos srauto vektorius kylantis dėl šilumos laidumo,  $Q$  yra išoriniai šilumos šaltiniai.

Pasirinkus norimas aproksimacijas taip pat galima pasirinkti srauto spūdumo sąlygą. Nuo srauto spūdumo sąlygos priklauso skaičiavimo programos elgesys su nagrinėjamo skysčio tankiu  $\rho$ . Galimos trys spūdumo sąlygos - nespūdus srautas,

silpnai spūdus srautas ir spūdus srautas, kurio greitis mažesnis už garso greitį. Pasirinkus nespūdaus srauto sąlygą skaičiavimuose skysčio tankis  $\rho$  laikomas konstanta, o pasirinkus kitas dvi sąlygas skysčio tankiui leidžiama kisti.

#### 2.5.4 Apie geometrijos kūrimą

Izoliacinės palatos ir laikinojo prieškambario geometrija gyvenamojoje patalpoje gali būti komplikauta erdvė. Norint sutaupyti laiko kaštus reikalingus detalios geometrijos sukūrimo ir norint sutaupyti skaitinių algoritmų skaičiavimo laiko kaštus sprendinio skaičiavime geometrijos kūrimo metu buvo padaryti geometrijos supaprastinimai - ignoruoti patalpoje esantys baldai ir daiktai. Reikalingas geometrijas galima kurti naudojantis lygčių skaičiavimo programoje esančia geometrijų kūrimo grafine vartotojo sąsaja arba trečiosiomis programomis, pavyzdžiui, AutoCAD grafine automatizuoto projektavimo sistema. Specializuotos geometrijų kūrimų programos gali stipriai palengvinti darbą kompleksinių geometrijų kūrimo atveju, tačiau importuojant jas į lygčių skaičiavimo programas gali kilti problemų [60].

#### 2.5.5 Apie kraštines sąlygas ir pradines sąlygas

Norint įsitikinti, kad skaitinės skysčių dinamikos simuliacijų metu yra simuliuojamas realybėje apytiksliai nutinkantis procesas yra svarbu validuoti simuliacijų rezultatus ir atlikti daugiau skaitinės skysčių dinamikos kraštinių sąlygų tyrimų [39].

Aproksimuotoms Navje-Stokso lygtims su turbulencijos modeliu ir šilumos pernešimo lygtims geometrijos kraštuose reikalinga užduoti kraštines bei pradines sąlygas. Dažniausiai skaitinės skysčių dinamikos oro srautų simuliacijose naudojamos srauto neslydimo (angl. no-slip), srauto slydimo (angl. slip), srauto slėgio išvesties ir srauto greičio įvesties kraštines sąlygos ir simuliuojamos erdvės srities slėgio pradinė reikšmė. Comsol programoje neslydimo sąlyga yra tokia lygčių sistema

$$\begin{cases} \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0 \\ \mathbf{K}\mathbf{n} = -\rho \frac{u_\theta}{u^r} \mathbf{u}_{tang} \\ \mathbf{u}_{tang} = \mathbf{u} - (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} \\ \nabla k \cdot \mathbf{n} = 0 \\ \epsilon = \rho \frac{C_v k^2}{K_v \theta_w^+ \nu} \end{cases} \quad (2.15)$$

Ši lygčių sistema reiškia, kad srautas krašte nejuda ir artėjantis į kraštą srautas yra verčiamas keisti savo kryptį ir greitį atsižvelgiant į neslydimo savybę. Slydimo

sąlyga yra tokia lygčių sistema

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0 \\ \mathbf{K}_n - (\mathbf{K}_n \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} = 0 \\ \mathbf{K}_n = \mathbf{K}\mathbf{n} \\ \nabla k \cdot \mathbf{n} = 0 \\ \nabla \epsilon \cdot \mathbf{n} = 0. \end{array} \right. \quad (2.16)$$

Ši lygčių sistema reiškia, kad srauto judėjimas krašte nėra įdomus ir nėra neslydimumo savybės verčiančios keistis link kraštinės tekančio srauto greičiui ir kryptiai. Slėgio išvesties sąlyga yra tokia lygčių sistema

$$\left\{ \begin{array}{l} (-p\mathbf{I} + \mathbf{K})\mathbf{n} = -p_0\mathbf{n} \\ \nabla k \cdot \mathbf{n} = 0 \\ \nabla \epsilon \cdot \mathbf{n} = 0. \end{array} \right. \quad (2.17)$$

Šia lygčių sistema aprašoma srauto ištekėjimą veikianti sąlyga. Greičio įvesties sąlyga yra tokia lygčių sistema:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{u} = \mathbf{u}_0 \\ U_{ref} = \|\mathbf{u}_0\| \\ k = \frac{3}{2}(U_{ref}I_T)^2 \\ \epsilon = C_\nu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{L_T}. \end{array} \right. \quad (2.18)$$

Šia lygčių sistema kraštinėje apibrėžiami srauto greitis ir kryptis.

Taip pat dažnai oro srautų simuliacijose naudojami šilumos pernešimo lygtims užduodamos terminės izoliacijos, šilumos įtekėjimo, šilumos ištekėjimo ir simetrijos kraštinės sąlygos bei srities pradinės šilumos sąlygos. Terminės izoliacijos, ištekėjimo ir simetrijos kraštinės sąlygos apibrėžiamos lygtimi

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0. \quad (2.19)$$

ir reiškia, kad per kraštinę nevyksta šilumos srauto tekėjimas, o šilumos įtekėjimą aprašo srauto įvesties kraštinėje užduodama lygčių sistema

$$\left\{ \begin{array}{l} -\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \rho \Delta H \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} \\ \Delta H = \int_{T_{ustr}}^T C_p dT + \int_{p_{ustr}}^{p_A} \frac{1}{\rho} (1 - \alpha_p T) dp. \end{array} \right. \quad (2.20)$$

Čia  $T_{ustr}$  yra nustatoma įtekančio srauto šiluma. Temperatūros pradinė kraštinė sąlyga apibrėžiama lygtimi

$$T = T_0 \quad (2.21)$$



ir reiškia, kad simuliacijos pradžios metu visos simuliuojamos erdvės oro temperatūra bus  $T_0$ .

Teisingų kraštinių bei pradinių sąlygų parinkimas yra bene sudėtingiausia pasirošimo skaitinėms skysčių dinamikos simuliacijoms atlikti dalis. Daugumoje ventiliacijos tyrimų, kuriuose naudojamos skaitinės skysčių dinamikos simuliacijomis, yra nagrinėjamas mechaninės ventiliacijos atvejis [17][32][37][38][44][51][53]. Šiuose tyrimuose oro srautams sukelti naudojamos oro srauto greičio įvesties ir greičio arba slėgio išvesties kraštinės sąlygos užduodant jas geometrijoje ventiliacines šachtas reprezentuojančiose erdmėse. Įprastai šios erdmės būna skirtingose patalpos geometrijos pusėse, todėl jų indukuojamo kryžminės ventiliacijos oro srautų dėsningumai yra gan aiškūs.

Natūralios ventiliacijos simuliacijų tyrimuose yra keletas būdų tirti patalpose tekančius oro srautus - įtraukiant arba neįtraukiant išorės erdvę į simuliuojamą geometriją. Tyrimuose, kuriuose yra įtraukta išorės erdvė [36][49], vidinė patalpa yra dažniausiai patalpinama į daug didesnio stačiakampio gretasienio geometrijos vidų. Ši stačiakampio gretasienio geometrija reprezentuoja išorės aplinką ir oro srautas yra sukliamas geometrijos vienoje iš kraštinių užduodant srauto greičio įvesties kraštinę sąlygą, kuri imituoja vėją, o priešingoje išorės geometrijos kraštinėje užduodama slėgio išvesties kraštinė sąlyga, kurioje srautas išteka. Tyrimuose, kuriuose nėra įtraukta išorės erdvė [33][56], oro srauto įvesties ir išvesties kraštinės sąlygos užduodamos vidaus patalpos geometrijos erdmėse reprezentuojančiose langus, duris ir ventiliacines šachtas.

Šio darbo kontekste yra aktualus gyvenamosios patalpos izoliuoto kambario vienpusis ventiliacijos atvejis. Tokio atvejo simuliuojamoje geometrijoje, jei nėra įtraukiama išorės erdvė, lango erdmė yra vienintelė galima erdmė kraštinių sąlygų uždavimui. Kadangi srautas tekantis per langą yra dvikryptis, tokioje geometrijos erdmėje nėra paprasta užduoti kraštines sąlygas [39][61]. Vienpusės ventiliacijos simuliacijos kraštinių sąlygų uždavimą galima palengvinti į simuliuojamą geometriją įtraukiant dalį išorės erdvės [42]. Tokiu atveju lauko srities geometrijos kraštuose užduodamos kraštinės srauto įvesties ir išvesties kraštinės sąlygos ir tokiu būdu išvengiama sudėtingo kraštinių sąlygų uždavimo lango erdmėje.

### 2.5.6 Apie tinklelio konstravimą

Tinklelio konstravimo metu sukurta geometrija yra padalinama į aibę mažyčių elementų, kurie sudaro tinklelį. Šie elementai gali būti įvairių formų - trikampiai, keturkampiai, tetrahedrai, heksahedrai [37]. Jei sudarytas tinklelis yra per retas, sprendinys skaičiavimų metu gali nekonverguoti arba skaičiavimo paklaidos gali būti per didelės. Iš kitos pusės, jei tinklelis yra per daug tankus, sprendimo laikas netiesinių lygčių sistemai spręsti gali užtrukti per daug ilgą laiką. Norint rasti optimaliausią tinklelio tankį reikia atlikti pakartotines simuliacijas su skirtingu tinklelio tankiu ir nustatyti kada gaunami rezultatai kokybiškai nebesiskiria didinant tinklelio tankį.

### 2.5.7 Apie laiko periodo pasirinkimą

Sprendiklio parametruose galima nustatyti simuliacijos laiko periodą, kuris yra aktualus stebimo oro srauto tekėjimo procese. Per trumpas nustatytas simuliacijos laikas gali nesuteikti pakankamai informacijos išvadų apie srauto tekėjimą išvedimui. Tuo tarpu didinant simuliacijos laiko periodą didėja ir laiko kaštai reikalingi skaičiavimams atlikti. Taip pat simuliuojamas oro srautas simuliacijos eigoje gali pasiekti stacionarią arba beveik stacionarią būseną ir tolimesni skaičiavimai gali tapti pertekliniai.

## 3. Praktinė dalis

### 3.1 Ventiliacijos strategijos ir scenarijus

Remiantis nagrinėtais ventiliacijos tyrimais ir analizuojant izoliacinės palatos su laikinuoju prieškambariu įrengimo galimybę gyvenamojoje patalpoje galima išskirti dvi ventiliacijos strategijas:

- Strategija 1 - sergančiojo gyvenamosios zonos ventiliavimas natūraliu metodu
- Strategija 2 - laikinojo prieškambario padidinto slėgio palaikymas mechaninės ventiliacijos metodu

Iš šių strategijų galima apibrėžti aktualias nagrinėjamos problemos skysčių dinamiškos scenarijus:

- Scenarijus 1 - sergančiojo gyvenamosios zonos vienpusės ventiliacijos atvejo plūdrumo jėgų įtakojamo oro srauto simuliacija
- Scenarijus 2 - sergančiojo gyvenamosios zonos vienpusės ventiliacijos atvejo vėjo įtakojamo oro srauto simuliacija įtraukiant į simuliuojamą erdvę ir išorės erdvę
- Scenarijus 3 - sergančiojo gyvenamosios zonos sujungtos su laikinuoju prieškambariu oro slėgių skirtumo ir jo išsilyginimo įtakos oro srautui simuliacija momentu po barjero tarp sergančiojo gyvenamosios zonos ir laikinojo prieškambario atidarymo

Šių scenarijų simuliacijų gaunamais rezultatais būtų galima pasinaudoti kiekvienos konkrečios gyvenamosios patalpos atveju analizuojant ir įvertinant izoliacinės palatos su laikinuoju prieškambariu įrengimo galimybes.

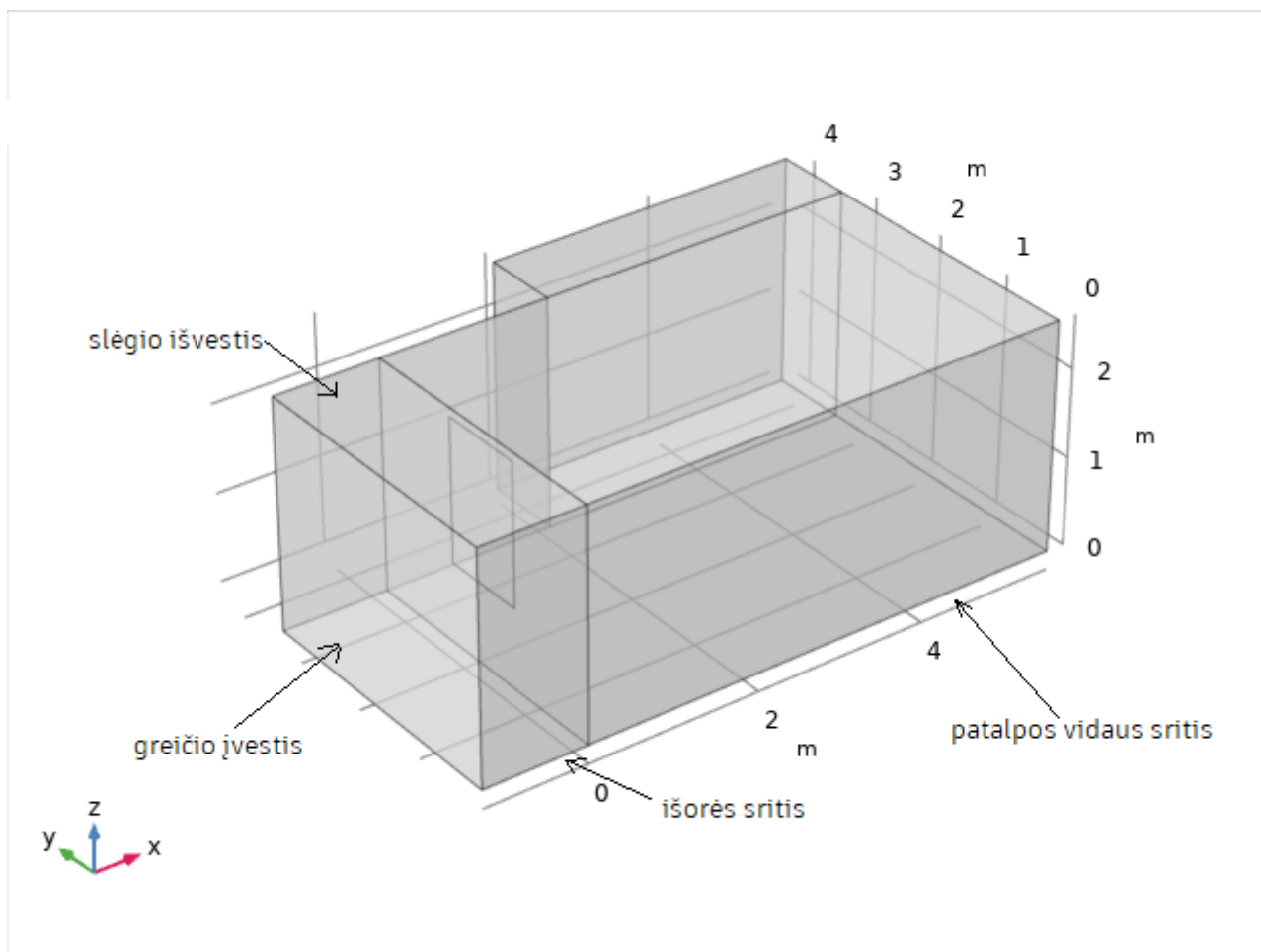
## 3.2 Pasiruošimas skaičiavimams

Tyrimė buvo pasirinkta simuliuoti sergančiojo gyvenamosios zonos vienpusės ventiliacijos atvejį įtakojamą plūdrumo ir vėjo jėgų į simuliuojamą erdvę įtraukiant ir išorės erdvės dalį. Toks simuliacijos scenarijus pasirinktas dėl pirmo scenarijaus simuliacijų eksperimentų metu kilusių neapibrėžtumų užduodant lango ertmėje srauto įvesties ir išvesties kraštines sąlygas.

Comsol programoje trečiosios dimensijos geometrijai buvo pasirinktas neizoterminio srauto tekėjimas, kuriame susiejamos oro srauto tekėjimo ir šilumos pernešimo lygtys. Oro srauto tekėjimui simuliuoti pasirinkta Reynold vidurkių Navjė-Stokso lygčių sistemos aproksimacija su  $k - \epsilon$  turbulencijos modeliu. Šis oro srauto tekėjimą simuliuojantis modelis pasirinktas dėl jo dažno naudojimo panašiuose tyrimuose ir dėl to, kad naudojantis juo skaičiavimai yra trumpesni lyginant su alternatyvia didžiųjų sūkurių simuliacija. Šilumos pernešimo simuliacijai pasirinktos šilumos pernešimo lygtys skysčiuose (2.14).

Buvo išmatuotas konkretus gyvenamosios patalpos kambarys turintis vieną 1m pločio ir 1.6m aukščio langą. Kambarys yra 5.6m ilgio, 2.6m aukščio, prie lango kambario plotis yra 3.3m, o toliau nuo lango kambarys praplatėja ir jo plotis yra 4.2m. Kadangi supaprastinta gyvenamosios patalpos vieno kambario erdvė nėra sudėtinga, ją nuspręsta kurti per skaičiavimo programą. Comsol geometrijos kūrimo grafinėje naudotojo sąsajoje iš stačiakampių gretasienių ir poligono naudojantis aibių sąjungos operacija buvo sukonstruotas sergančiojo patalpos su langu modelis. Taip pat prie modelio patalpos lango sienos išorės pusėje aibių sąjungos operacija prijungtas 1.2m ilgio, 3.3m pločio ir 2.6m aukščio stačiakampis gretasienis reprezentuojantis lauko erdvę.

Ventiliacijos kraštinių sąlygų pasirinkimo metu buvo padarytos keturios preliminarios simuliacijos naudojantis skirtingomis lentelėje 3.1 nurodytomis srauto greičio kraštinėmis sąlygomis ir srauto spūdumo sąlygomis. Šių preliminarių simuliacijų metu geometrija buvo padalinta į 79747 elementų ir skaičiavimo periodas parinktas 1 sekundė. Lentelėje 3.1 lyginant pirmos ir trečios simuliacijų skaičiavimo trukmes matyti, kad esant mažesniai įvesties srauto greičiui, skaičiavimų trukmė skiriasi nežymiai, o esant didesniai įvesties srauto greičiui, t. y. antros ir ketvirtos simuliacijų atveju, skaičiavimo trukmės skiriasi gerokai ir užtrunka keletą kartų ilgiau. Kadangi nespūdaus ir silpnais spūdaus srautų preliminarių simuliacijų rezultatai žymiai nesi-



3.1 pav.: Simuliacijos geometrija sukurta Comsol geometrijos kūrimo įrankiu

Nr.	Spūdumas	Laikas	Greitis
1	Nespūdus	7min 39s	$1 \frac{m}{s}$
2	Nespūdus	27min 18s	$5 \frac{m}{s}$
3	Silpnai spūdus	7min 59s	$1 \frac{m}{s}$
4	Silpnai spūdus	40min 51s	$5 \frac{m}{s}$

3.1 lentelė: preliminarių simuliacijų skaičiavimo trukmės rezultatai.

skyrė, buvo nuspręsta tolimesnių simuliacijų metu naudoti nespūdaus srauto sąlygą ir srauto įvestyje kraštinėje sąlygoje naudoti  $1 \frac{m}{s}$  greitį.

Taigi, lauko srities geometrijos kairiausioje kraštinėje buvo nustatytos  $1 \frac{m}{s}$  srauto greičio ir 303.15K šilumos įtekėjimo kraštinės sąlygos, o lauko srities viršutinėje kraštinėje nustatytos 101325Pa slėgio išvesties bei šilumos ištekėjimo kraštinės sąlygos. Lauko srities šoninėse kraštinėse nustatytos slydimo ir temperatūros simetrijos

kraštinės sąlygos, o lauko srities apatinėje kraštinėje, kaip ir visos vidinės patalpos kraštinėse, nustatytos srauto neslydimo ir šilumos izoliacijos kraštinės sąlygos. Lango ertmėje jokių kraštinių sąlygų nenaudojama.

Visų atliktų simuliacijų metu visos erdvės pradinė temperatūra nustatyta 293.15K, o pradinis visos erdvės oro slėgis nustatytas 101325Pa. Simuliacijų metu oro tankis nustatytas ties  $1,225 \frac{m^3}{kg}$ , o dinaminis klampumas ties  $1,802 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{m^2 \cdot s}$ . Tinklelio konstravimo metu buvo panaudotas geometrijos suskaidymas į trikampinius elementus ir geometrija buvo suskaidyta į 371372 elementų. Simuliacijos periodas sprendiklio parametruose buvo nustatytas 180s.

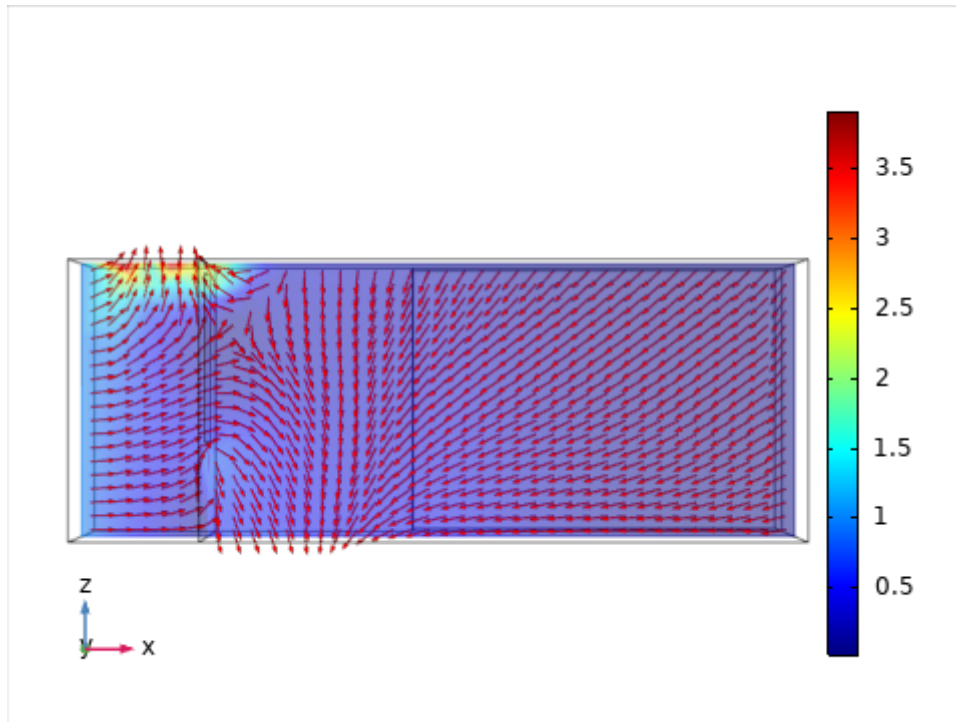
### 3.3 Diskusija

Atliktos simuliacijos rezultatai buvo vizualizuoti ir dalis vizualizacijų pateikiamos 3.4 skyriuje. Iš srauto greičio ir krypčių laukų laiko momentu  $t = 0s$  (žr. pav. 3.2) matoma, kad srautas prasideda lauko srities karinėje kraštinėje, kur buvo užduota srauto greičio įvesties kraštinė sąlyga ir iš pradžių sklinda link patalpos sienos. Slėgio išvesties kraštinė sąlyga užduota lauko srities viršutinėje kraštinėje matomai stipriai veikia iš lauko srities kairiosios kraštinės ateinantį srautą. Nors simuliacijos laiko momentu  $t = 0s$  lango ertmėje srauto krypčių rodyklės ateinančios iš lauko srities yra daugumoje horizontalios ir nukreiptos į kambario vidų, jau po vienos sekundės ir visu likusiu simuliacijos metu srauto krypčių rodyklės lango ertmėje tampa labiau vertikalios su nežymiu išgaubimu kambario srityje. Šis išgaubimas priklauso nuo srauto greičio įvesties kraštinėje sąlygoje nustatyto greičio. Simuliacijos pradžioje srauto krypčių lauko vektoriai patalpos viduje yra nukreipti link šalia lango esančių grindų, tačiau jau po vienos sekundės (žr. pav. 3.3) patalpos viduje atsiranda du sūkuriai - vienas sūkurys besisukantis pagal laikrodžio rodyklę šalia lango ir kitas besisukantis prieš laikrodžio rodyklę giliau kambaryje. Dešimtą simuliacijos sekundę (žr. pav. 3.4) prie lango buvęs sūkurys nukeliauja ties kambario lubomis, o giliau kambaryje buvęs sūkurys slenka link dešiniausio apatinio patalpos kampo. Trisdešimtą simuliacijos sekundę (žr. pav. 3.5) ties lubomis buvęs pagal laikrodžio rodyklę besisukantis sūkurys vėl grįžta arčiau lango, o giliau kambaryje esantis prieš laikrodžio rodyklę besisukantis sūkurys pasiekia kambario kampą ir nurimsta. Dar po trisdešimties sekundžių (žr. pav. 3.6) pagal laikrodžio rodyklę besisukantis sūkurys vėl nukeliauja nuo lango link lubų, o trisdešimtą simuliacijos sekundę dešiniajame

apatiniame kambario kampe nurimęs sūkurys vėl atgyja. Paskesniais simuliacijos momentais ( $t = 90\text{s}$ ,  $t = 120\text{s}$  ir  $t = 180\text{s}$ ) patalpoje prie lango ir lubų pagal laikrodžio rodyklę besisukantis sūkurys nusistovi ties lubomis ir nebekeičia savo pozicijos, o prieš laikrodžio rodyklę besisukantis giliau kambaryje esantis sūkurys vėl nurimsta ir simuliacijos periodo metu daugiau nebesusikuria (žr. pav. 3.7, 3.8, 3.9).

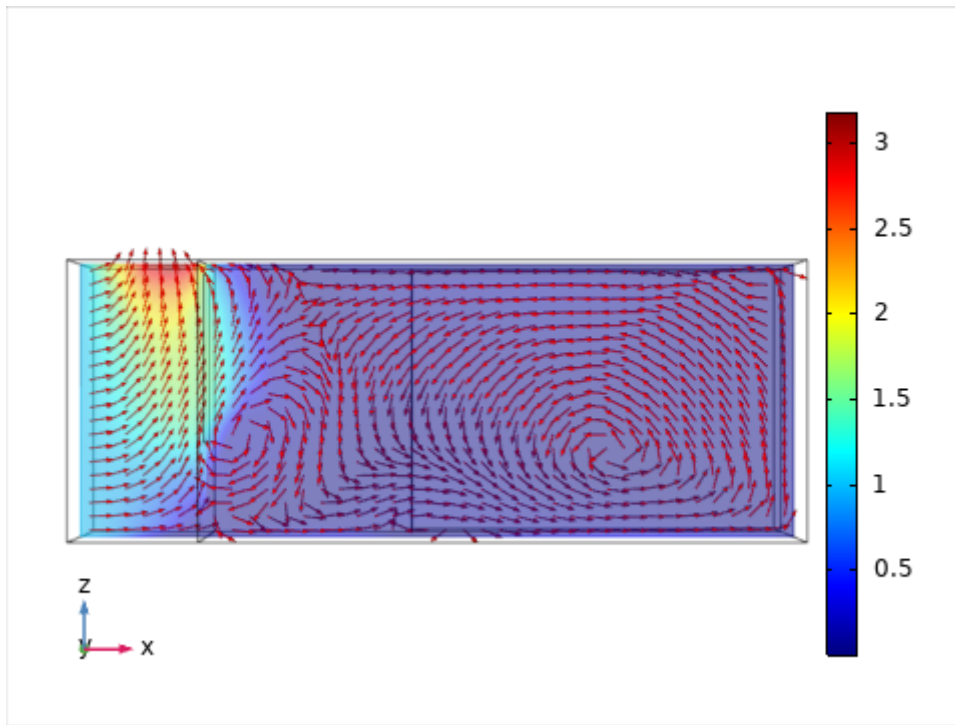
Analizuojant temperatūros rezultatus matyti, kad simuliacijos pradžioje (žr. pav. 3.10) tiek lauko srities, tiek patalpos srities temperatūra yra vienoda. Po vienos sekundės nuo simuliacijos pradžios jau yra matomas artėjantis šilumos srautas link patalpos išorinės sienos (žr. pav. 3.11). Visoje lauko srityje temperatūrai pasiekus  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  šiluma pradeda sklisti į kambarį (žr. pav. 3.12). Trisdešimtą simuliacijos sekundę yra matoma, kad patalpoje temperatūra stratifikuojasi į du sluoksnius - šiltesnio oro viršuje ir šaltesnio oro apačioje, ir vėlesniais simuliacijos momentais šilto oro sluoksnis tik didėja. Analizuojant šilumos srauto sklidimą iš viršaus trisdešimtą simuliacijos sekundę (žr. pav. 3.29) matosi, kad toliau nuo lango esančiame praplatėjusios kambario geometrijos kampe yra besiskiriančios temperatūros zona, kuri išlieka viso simuliuojamo laikotarpio metu.

### 3.4 Rezultatai

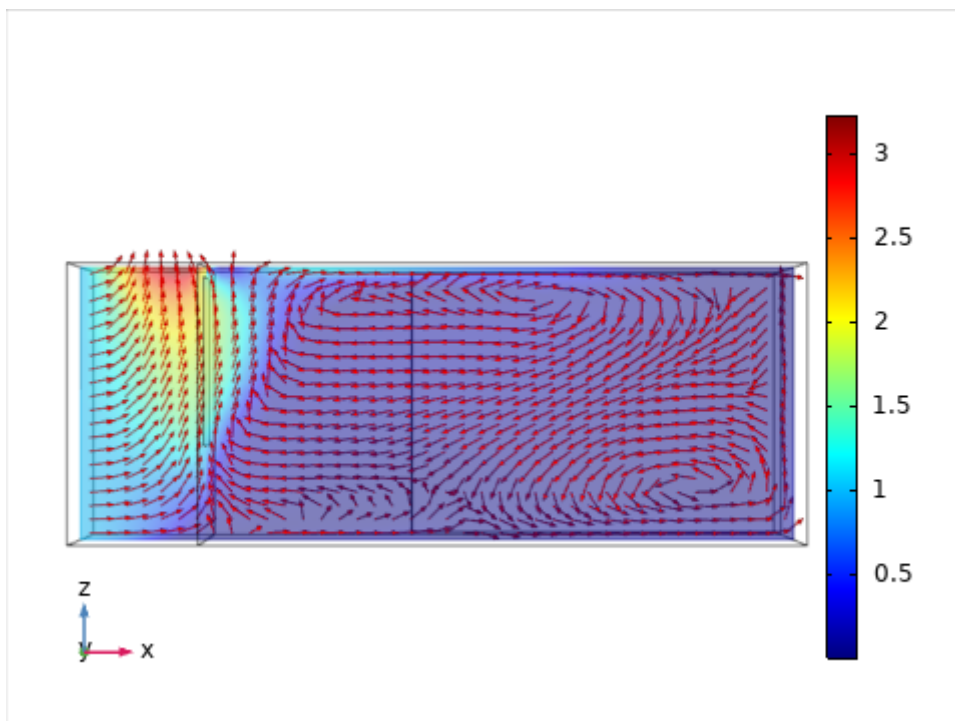


3.2 pav.: Srauto vektorinio ir greičio laukų  $x, z$  ašių pjūvis ties lango viduriu  $y = 1.65\text{m}$  laiko momentu  $t = 0\text{s}$

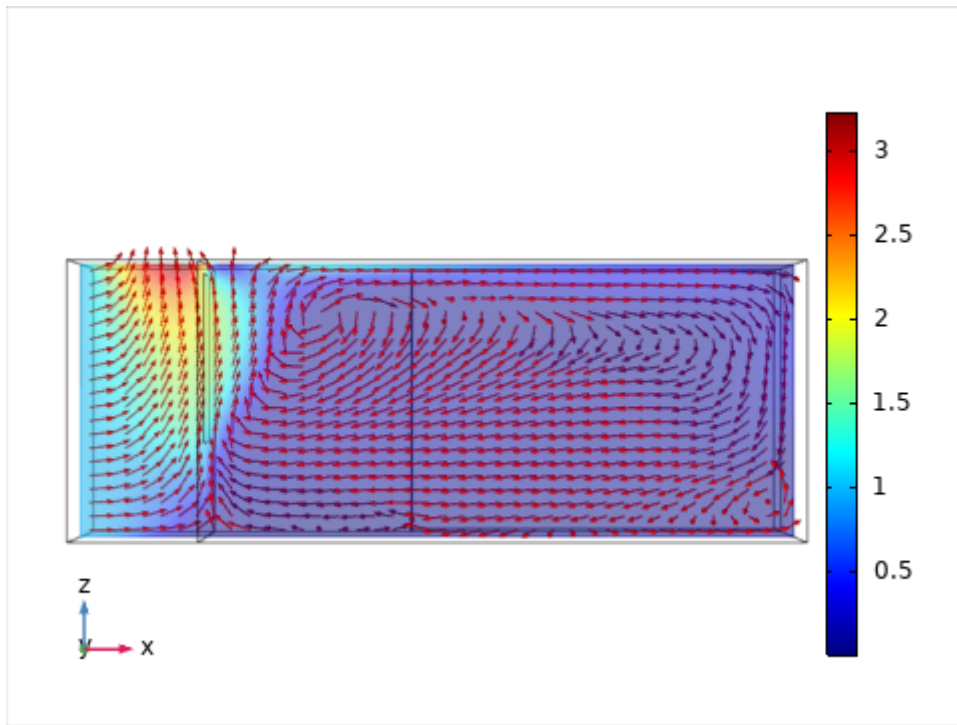




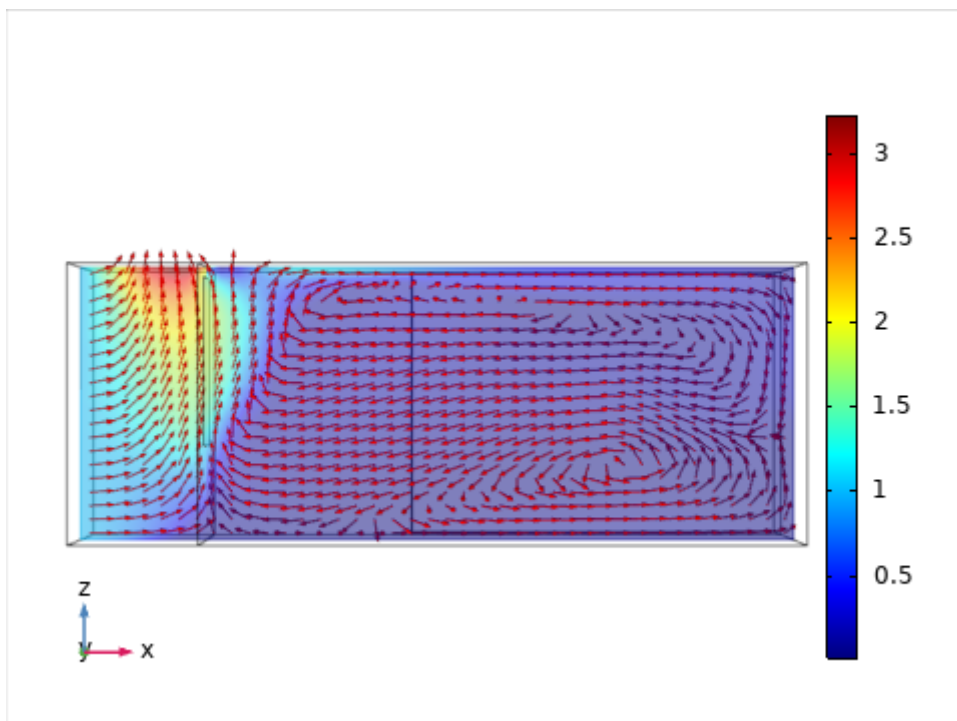
3.3 pav.: Srauto vektorinio ir greičio laukų  $x, z$  ašių pjūvis ties lango viduriu  $y = 1.65\text{m}$  laiko momentu  $t = 1\text{s}$



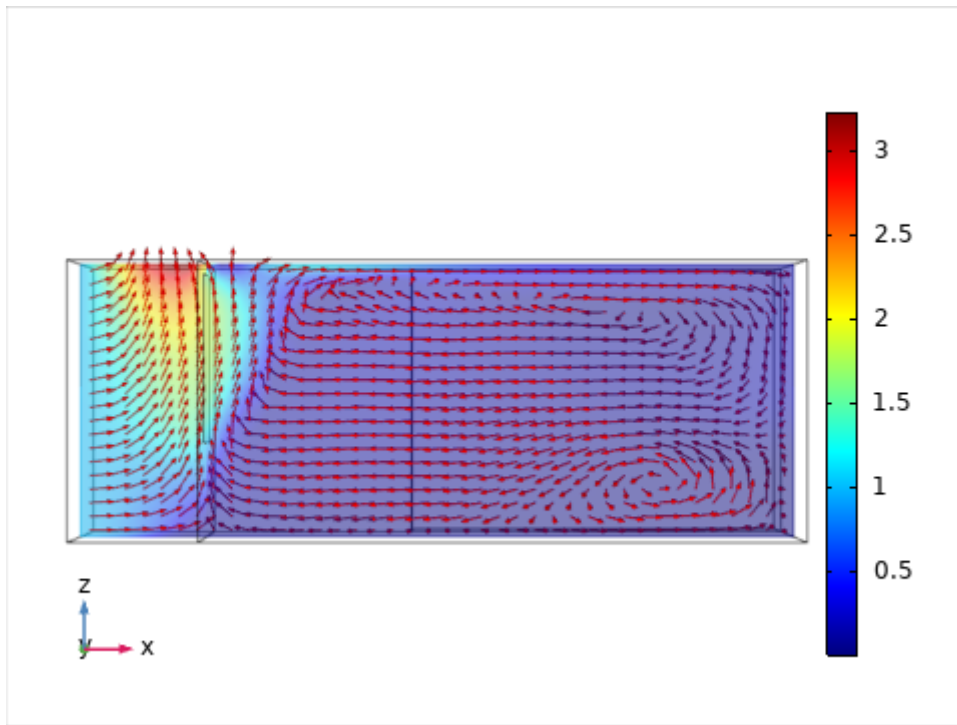
3.4 pav.: Srauto vektorinio ir greičio laukų  $x, z$  ašių pjūvis ties lango viduriu  $y = 1.65\text{m}$  laiko momentu  $t = 10\text{s}$



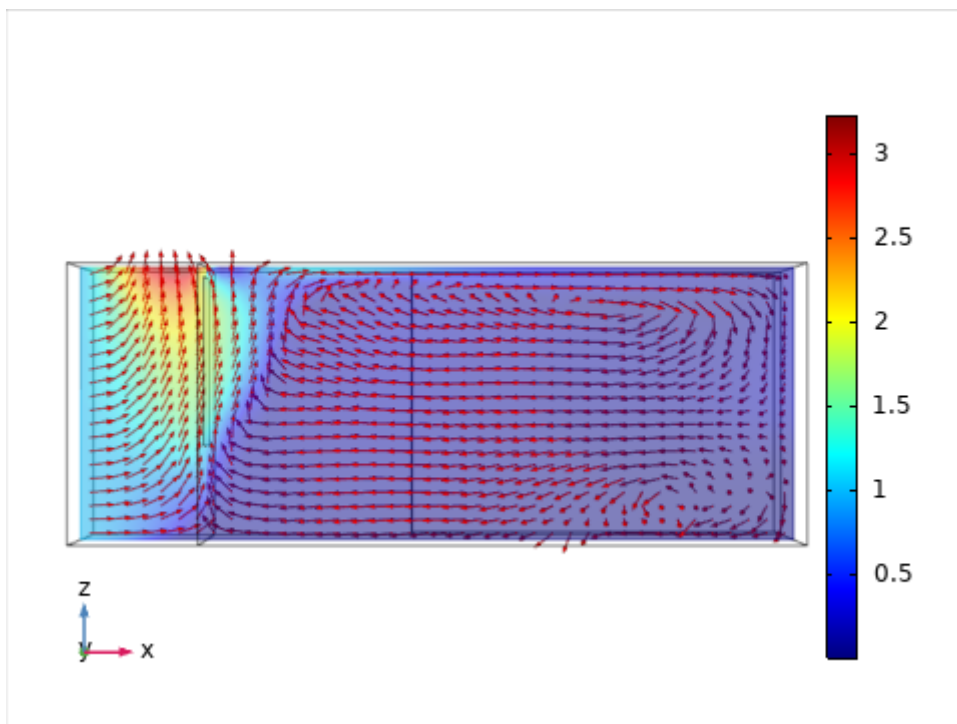
3.5 pav.: Srauto vektorinio ir greičio laukų  $x, z$  ašių pjūvis ties lango viduriu  $y = 1.65\text{m}$  laiko momentu  $t = 30\text{s}$



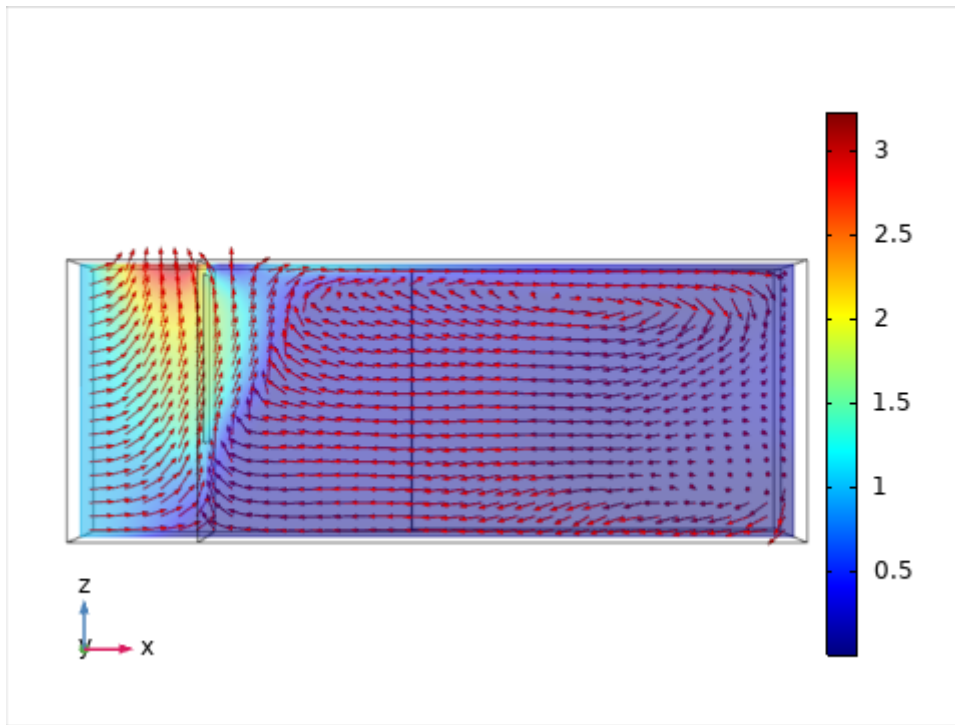
3.6 pav.: Srauto vektorinio ir greičio laukų  $x, z$  ašių pjūvis ties lango viduriu  $y = 1.65\text{m}$  laiko momentu  $t = 60\text{s}$



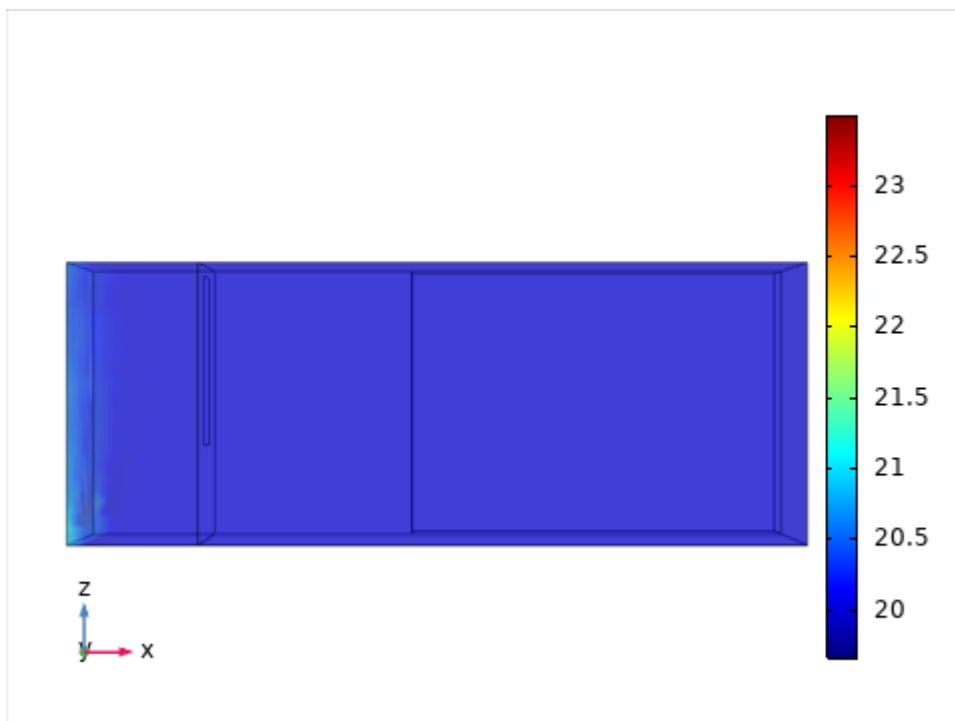
3.7 pav.: Srauto vektorinio ir greičio laukų  $x, z$  ašių pjūvis ties lango viduriu  $y = 1.65\text{m}$  laiko momentu  $t = 90\text{s}$



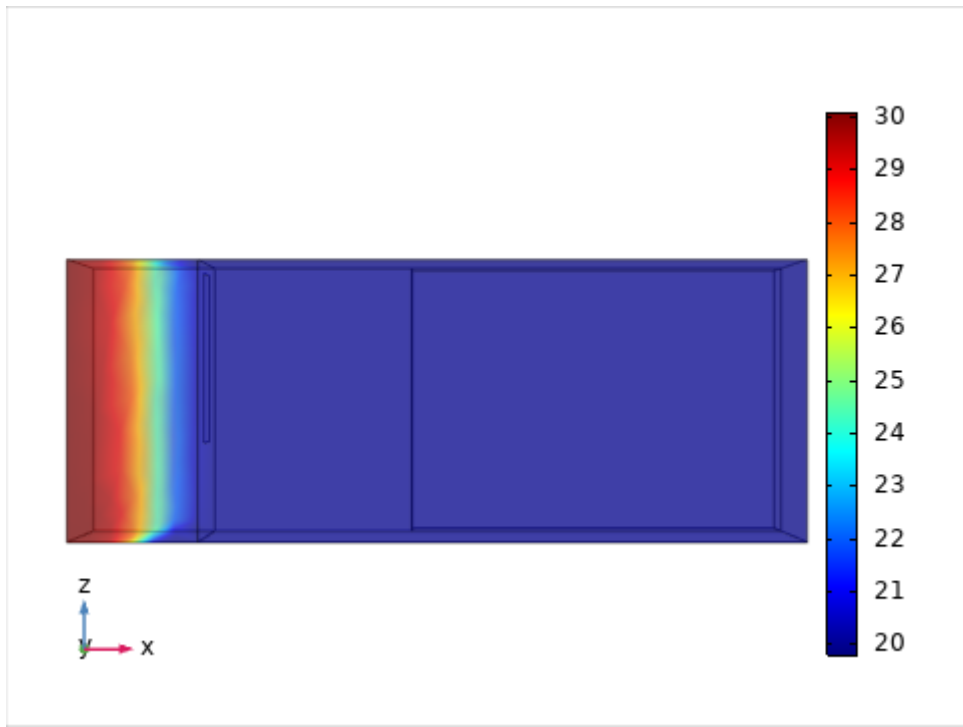
3.8 pav.: Srauto vektorinio ir greičio laukų  $x, z$  ašių pjūvis ties lango viduriu  $y = 1.65\text{m}$  laiko momentu  $t = 120\text{s}$



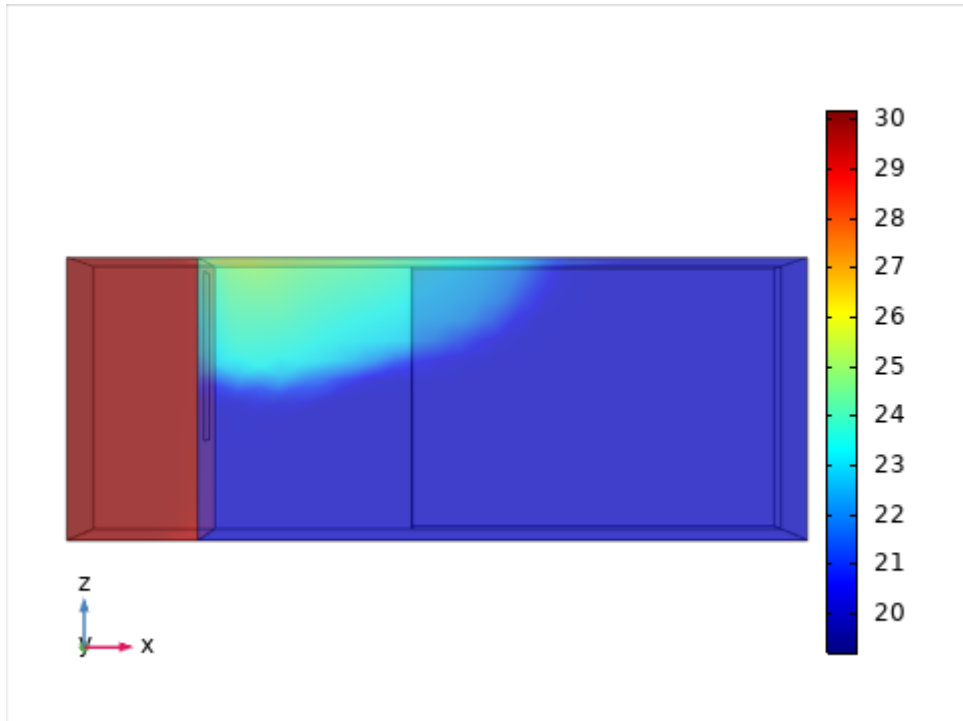
3.9 pav.: Srauto vektorinio ir greičio laukų  $x, z$  ašių pjūvis ties lango viduriu  $y = 1.65\text{m}$  laiko momentu  $t = 180\text{s}$



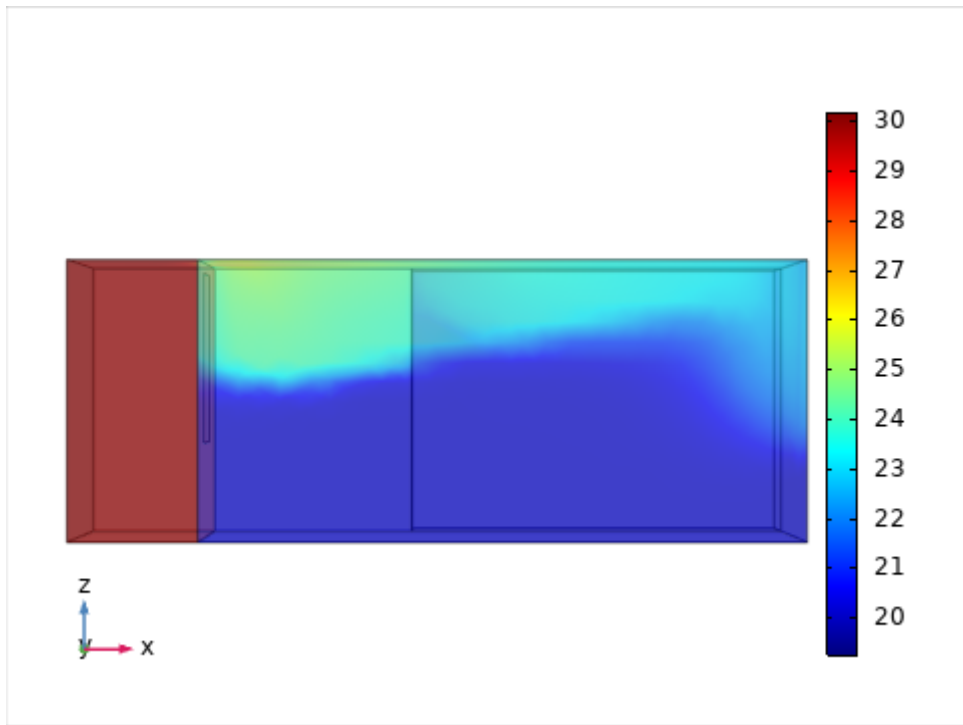
3.10 pav.: Srauto tūrio temperatūros laukai laiko momentu  $t = 0\text{s}$  iš šoninės perspektyvos



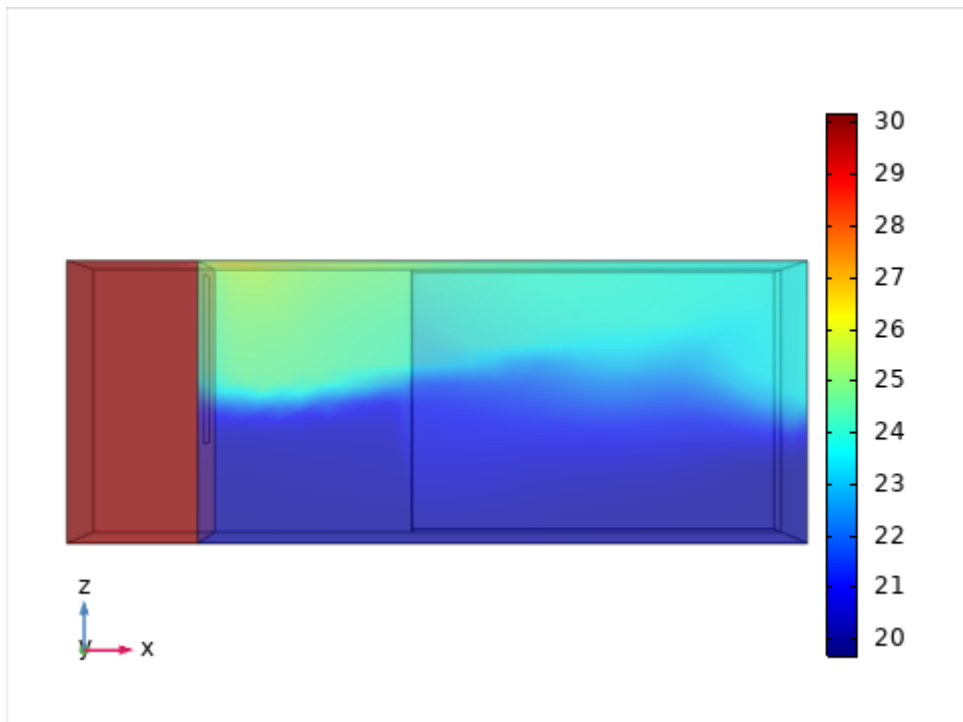
3.11 pav.: Srauto tūrio temperatūros laukai laiko momentu  $t = 1\text{s}$  iš šoninės perspektyvos



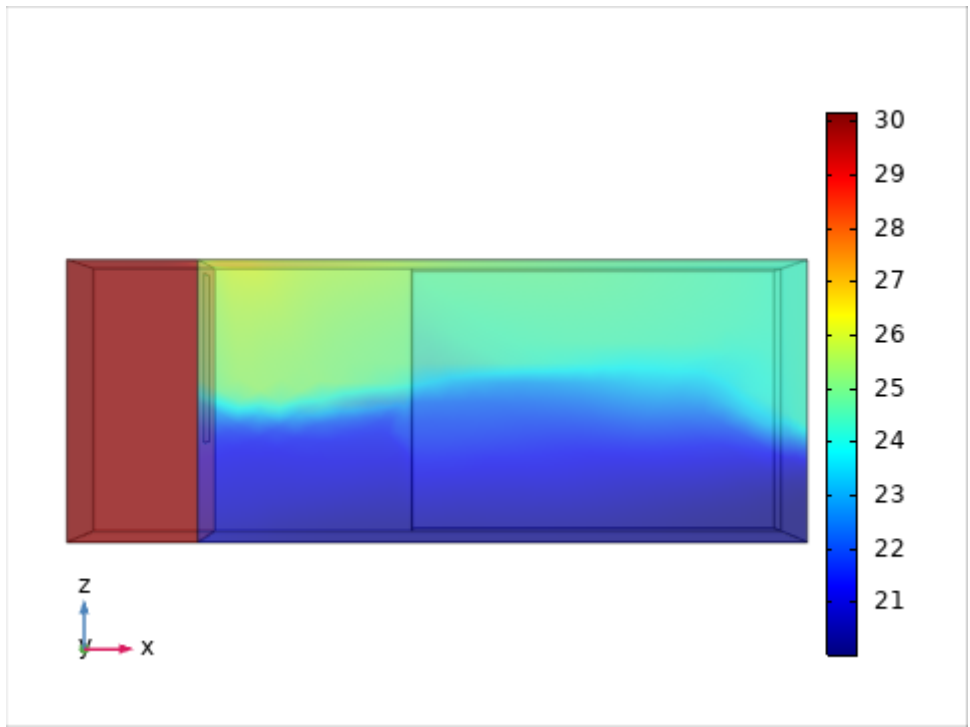
3.12 pav.: Srauto tūrio temperatūros laukai laiko momentu  $t = 10\text{s}$  iš šoninės perspektyvos



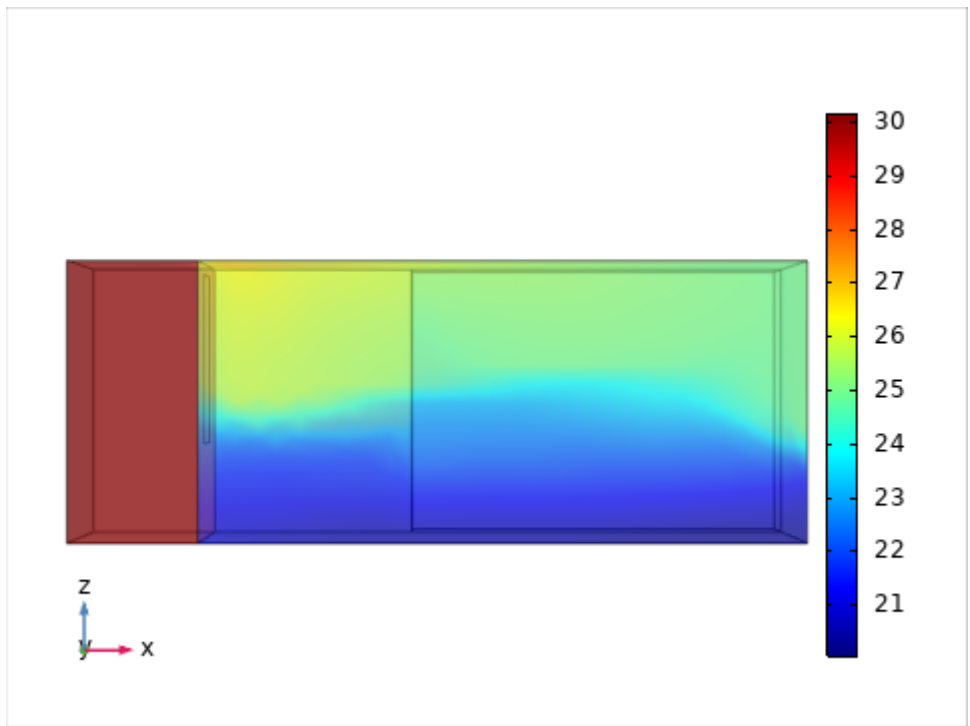
3.13 pav.: Srauto tūrio temperatūros laukai laiko momentu  $t = 30s$  iš šoninės perspektyvos



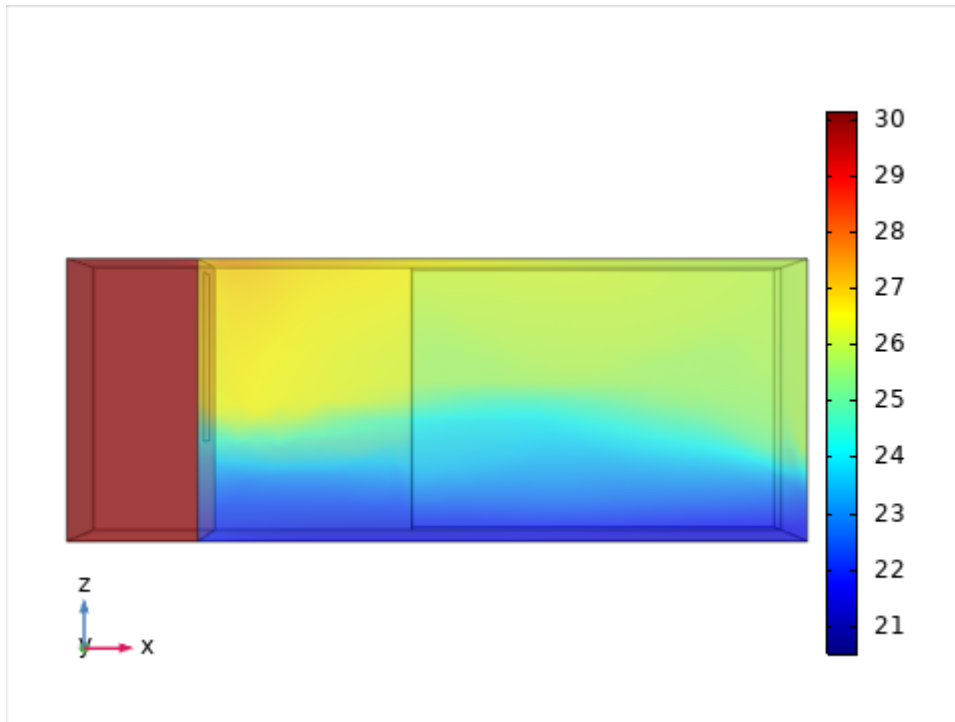
3.14 pav.: Srauto tūrio temperatūros laukai laiko momentu  $t = 60s$  iš šoninės perspektyvos



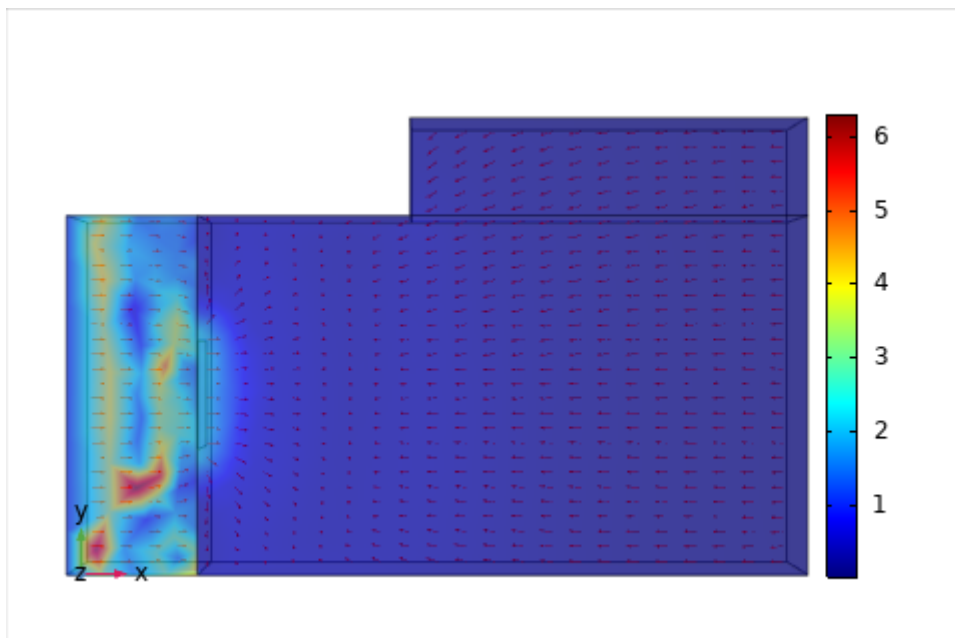
3.15 pav.: Srauto tūrio temperatūros laukai laiko momentu  $t = 90\text{s}$  iš šoninės perspektyvos



3.16 pav.: Srauto tūrio temperatūros laukai laiko momentu  $t = 120\text{s}$  iš šoninės perspektyvos

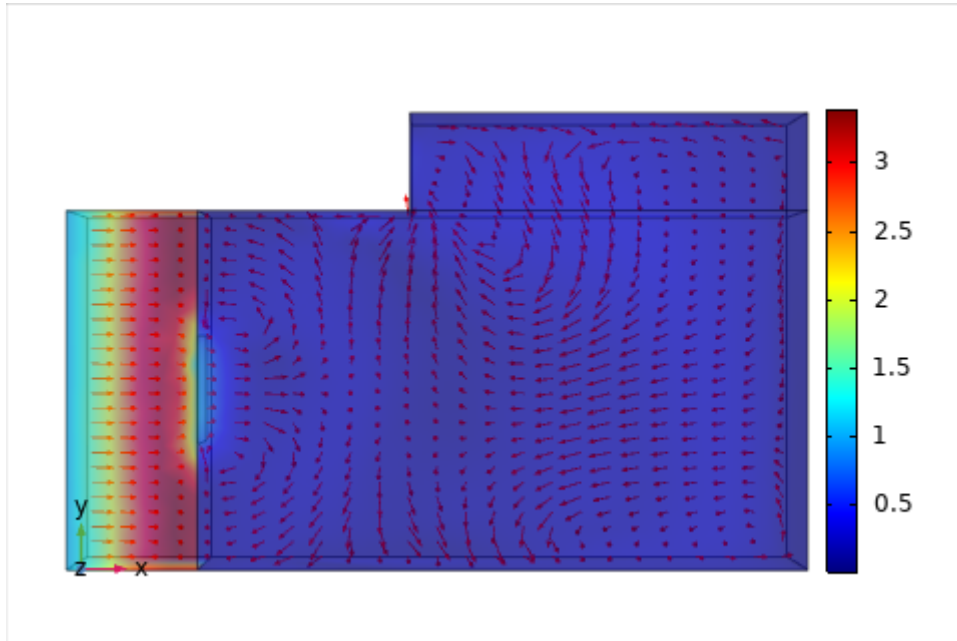


3.17 pav.: Srauto tūrio temperatūros laukai laiko momentu  $t = 180s$  iš šoninės perspektyvos

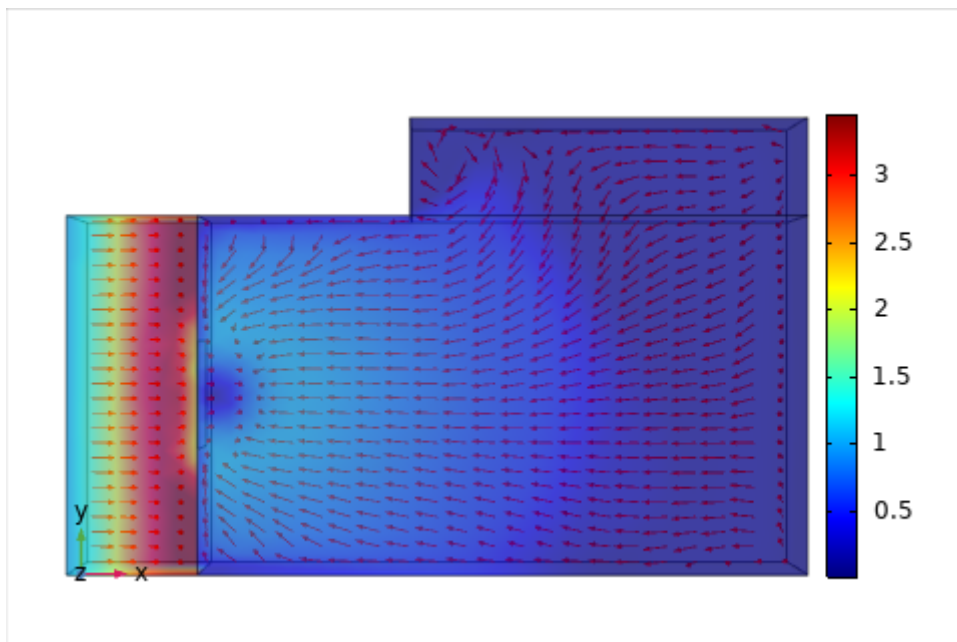


3.18 pav.: Srauto vektorinio ir greičio laukų  $x, y$  ašių pjūvis ties patalpos viduriu  $z = 1.3m$  laiko momentu  $t = 0s$

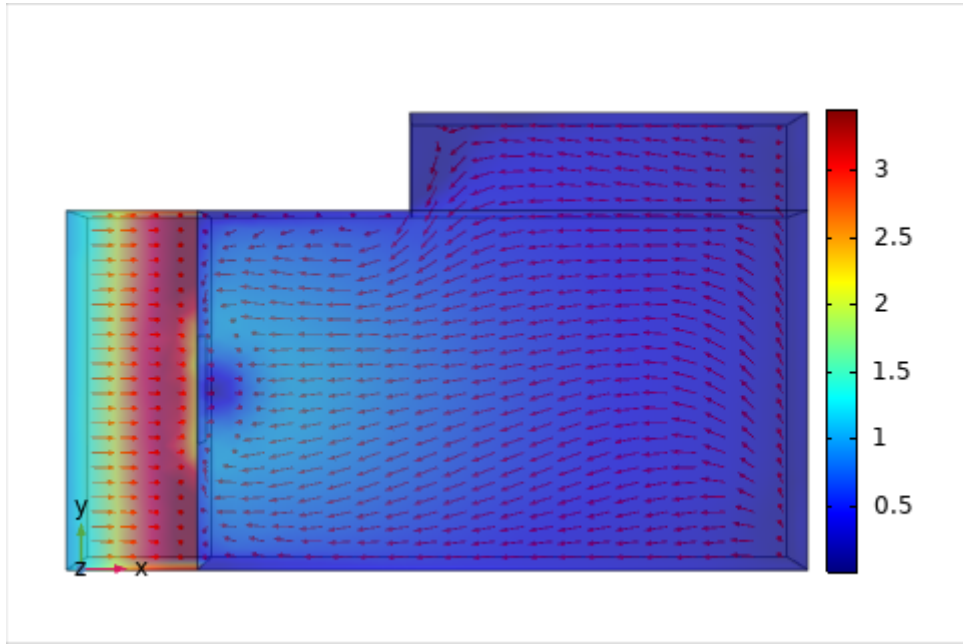




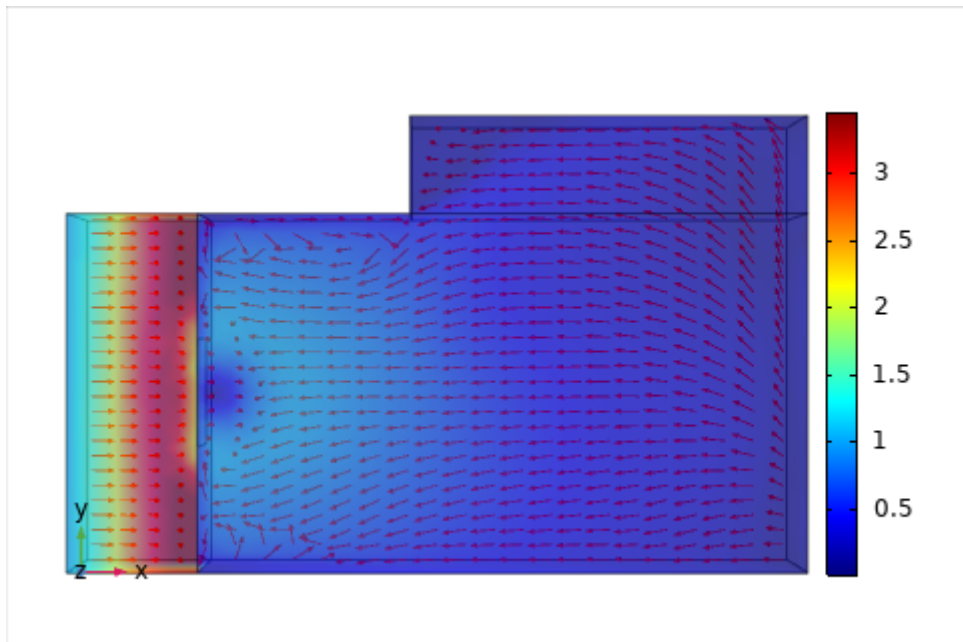
3.19 pav.: Srauto vektorinio ir greičio laukų  $x, y$  ašių pjūvis ties patalpos viduriu  $z = 1.3\text{m}$  laiko momentu  $t = 1\text{s}$



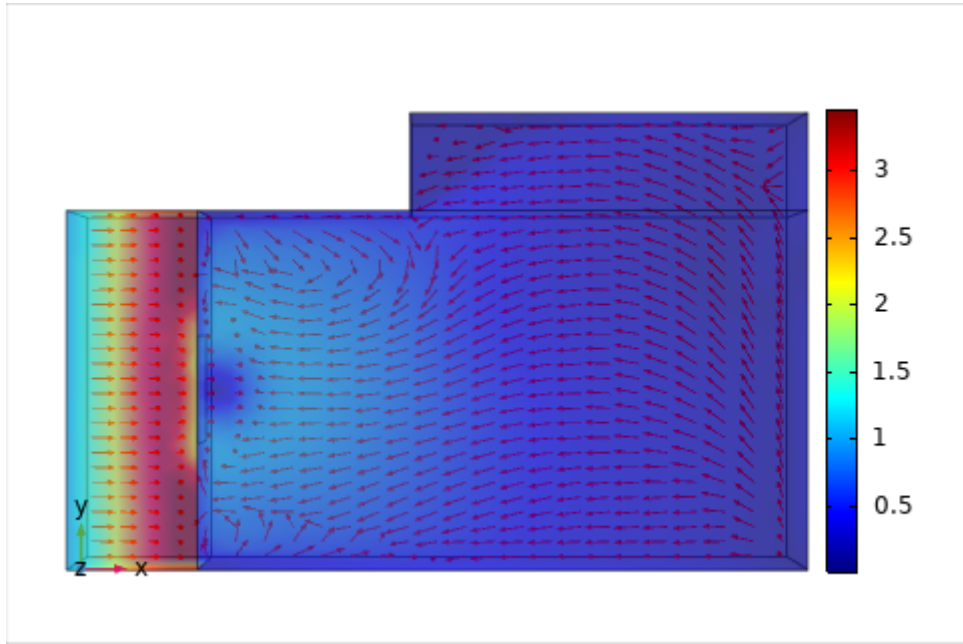
3.20 pav.: Srauto vektorinio ir greičio laukų  $x, y$  ašių pjūvis ties patalpos viduriu  $z = 1.3\text{m}$  laiko momentu  $t = 10\text{s}$



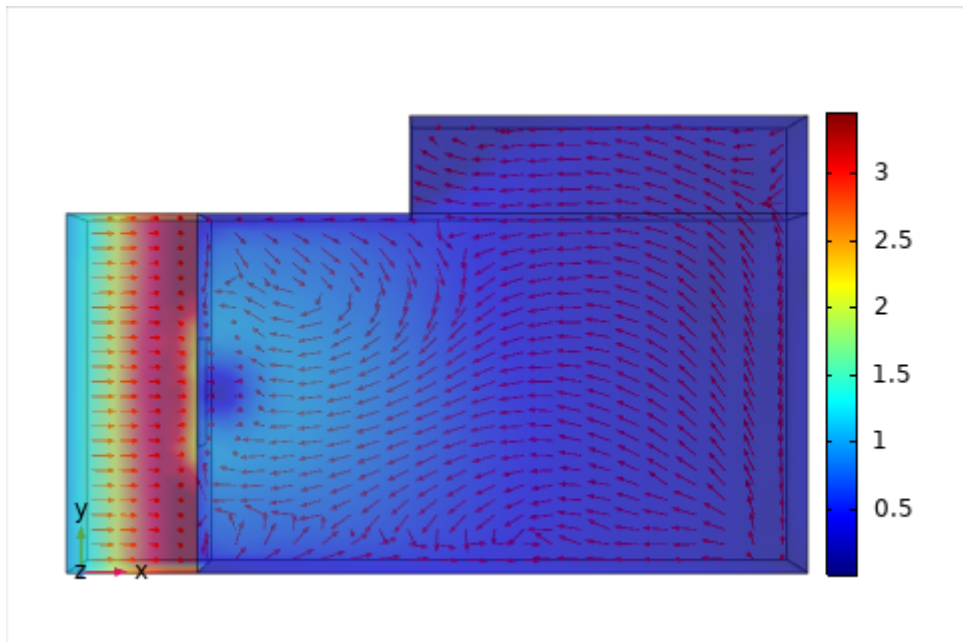
3.21 pav.: Srauto vektorinio ir greičio laukų  $x, y$  ašių pjūvis ties patalpos viduriu  $z = 1.3\text{m}$  laiko momentu  $t = 30\text{s}$



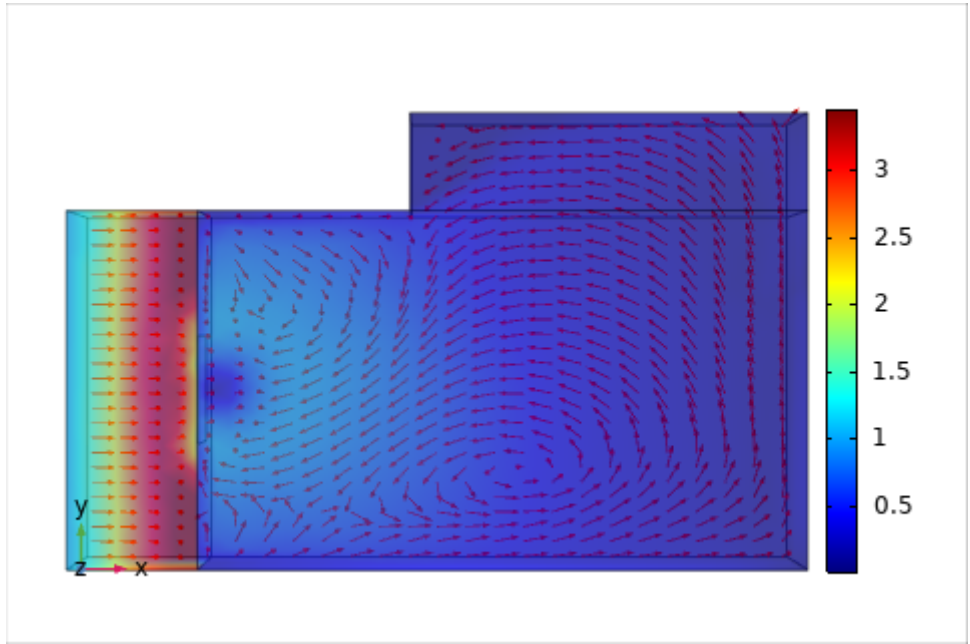
3.22 pav.: Srauto vektorinio ir greičio laukų  $x, y$  ašių pjūvis ties patalpos viduriu  $z = 1.3\text{m}$  laiko momentu  $t = 60\text{s}$



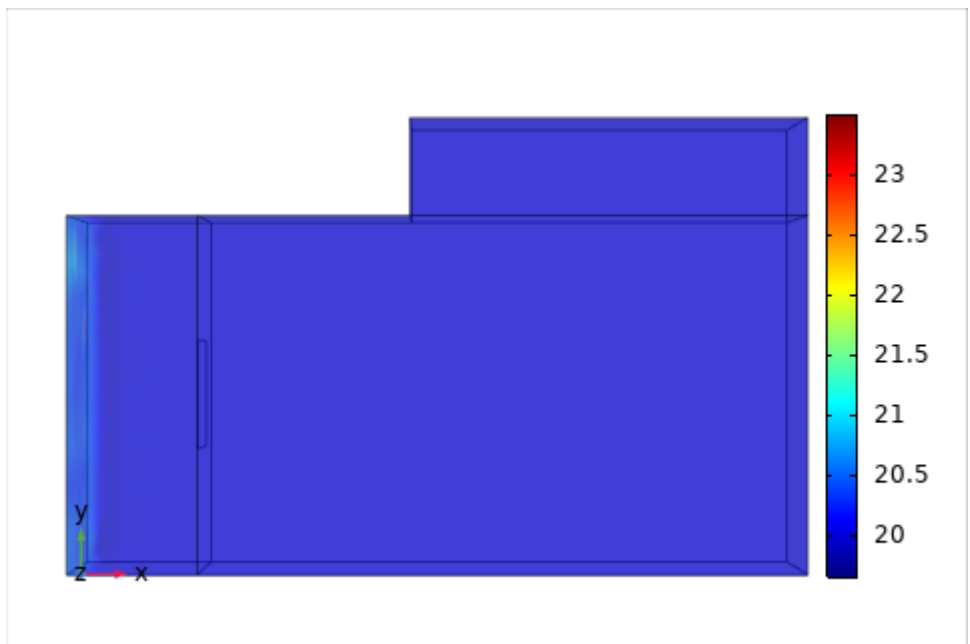
3.23 pav.: Srauto vektorinio ir greičio laukų  $x, y$  ašių pjūvis ties patalpos viduriu  $z = 1.3\text{m}$  laiko momentu  $t = 90\text{s}$



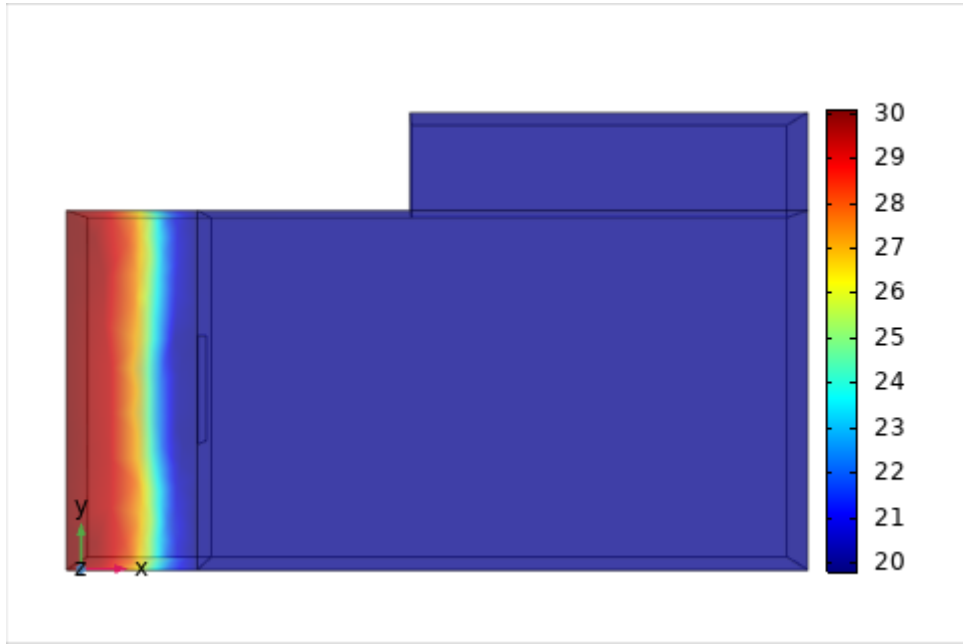
3.24 pav.: Srauto vektorinio ir greičio laukų  $x, y$  ašių pjūvis ties patalpos viduriu  $z = 1.3\text{m}$  laiko momentu  $t = 120\text{s}$



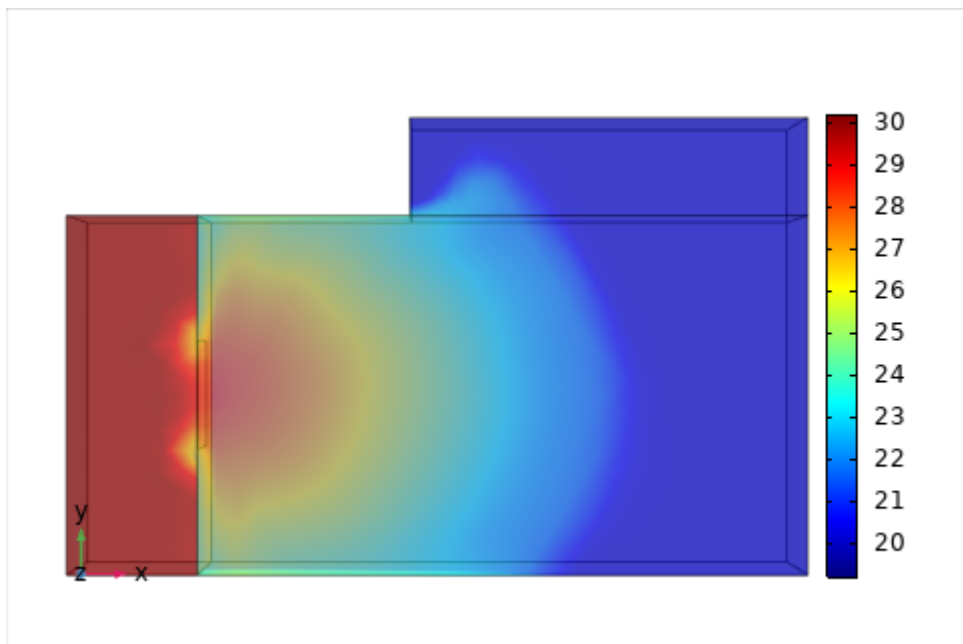
3.25 pav.: Srauto vektorinio ir greičio laukų  $x, y$  ašių pjūvis ties patalpos viduriu  $z = 1.3\text{m}$  laiko momentu  $t = 180\text{s}$



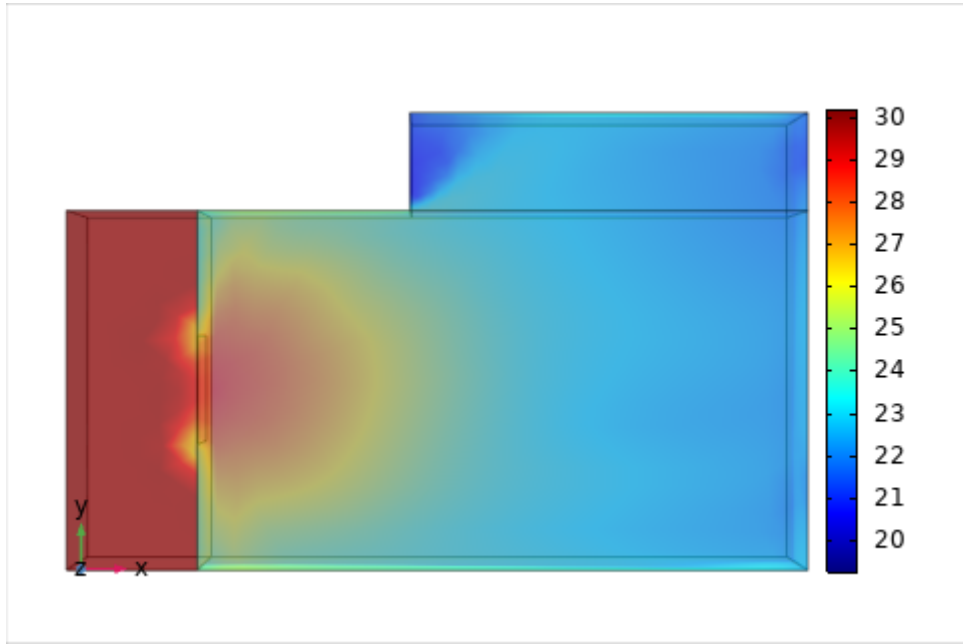
3.26 pav.: Srauto tūrio temperatūros laukai laiko momentu  $t = 0\text{s}$  iš viršaus perspektyvos



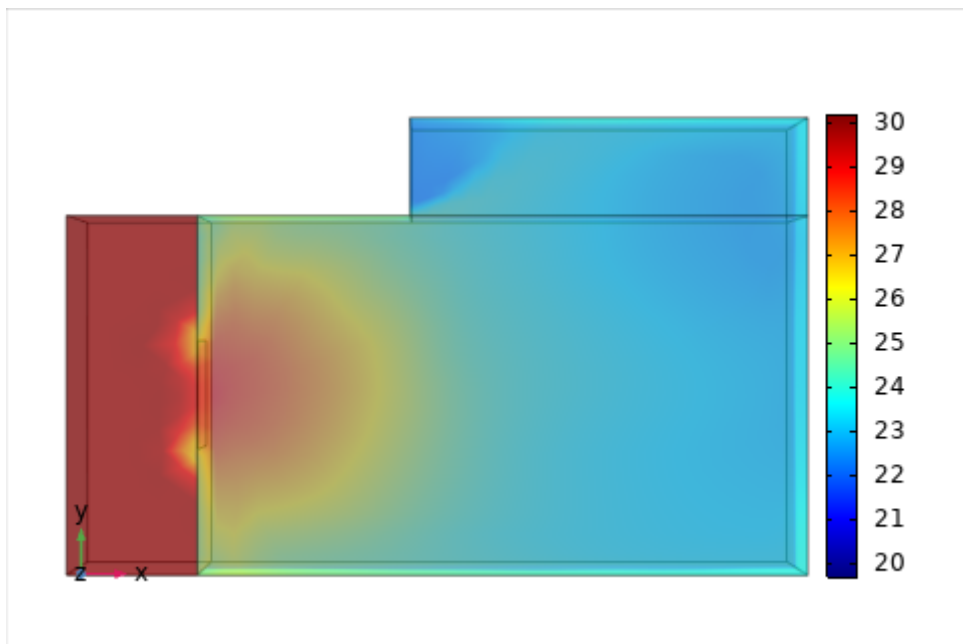
3.27 pav.: Srauto tūrio temperatūros laukai laiko momentu  $t = 1$ s iš viršaus perspektyvos



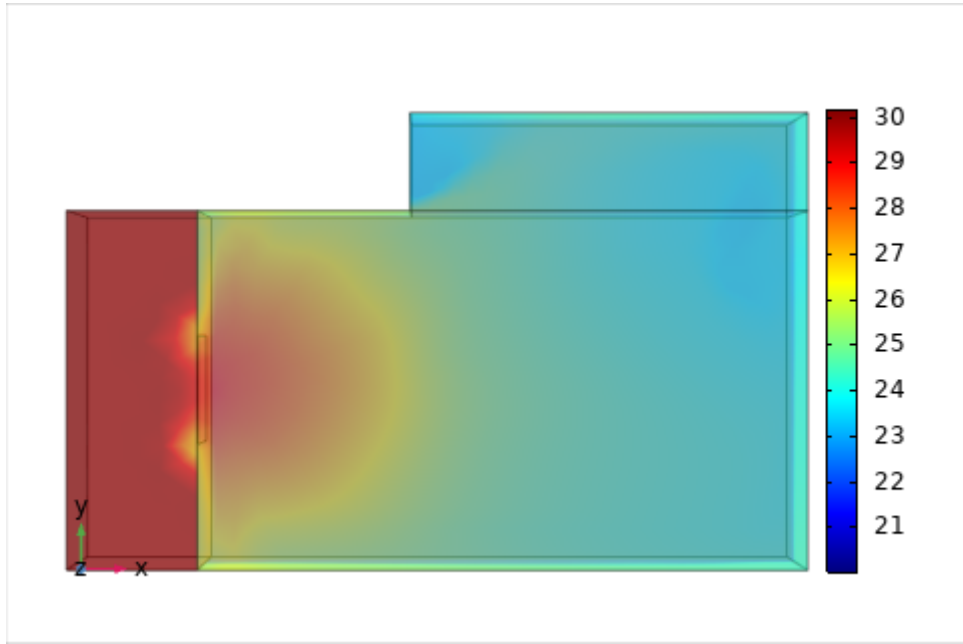
3.28 pav.: Srauto tūrio temperatūros laukai laiko momentu  $t = 10$ s iš viršaus perspektyvos



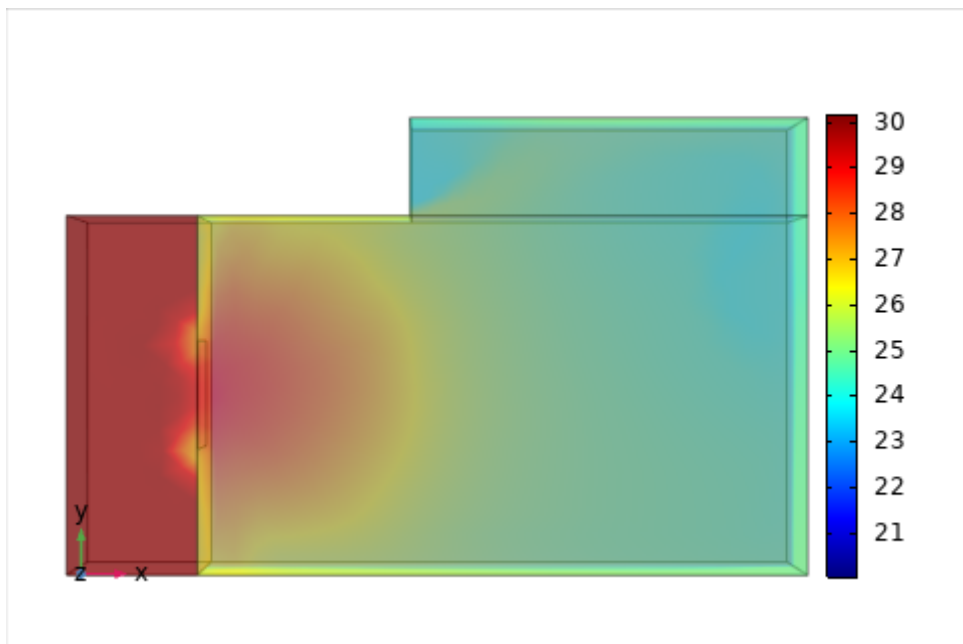
3.29 pav.: Srauto tūrio temperatūros laukai laiko momentu  $t = 30$ s iš viršaus perspektyvos



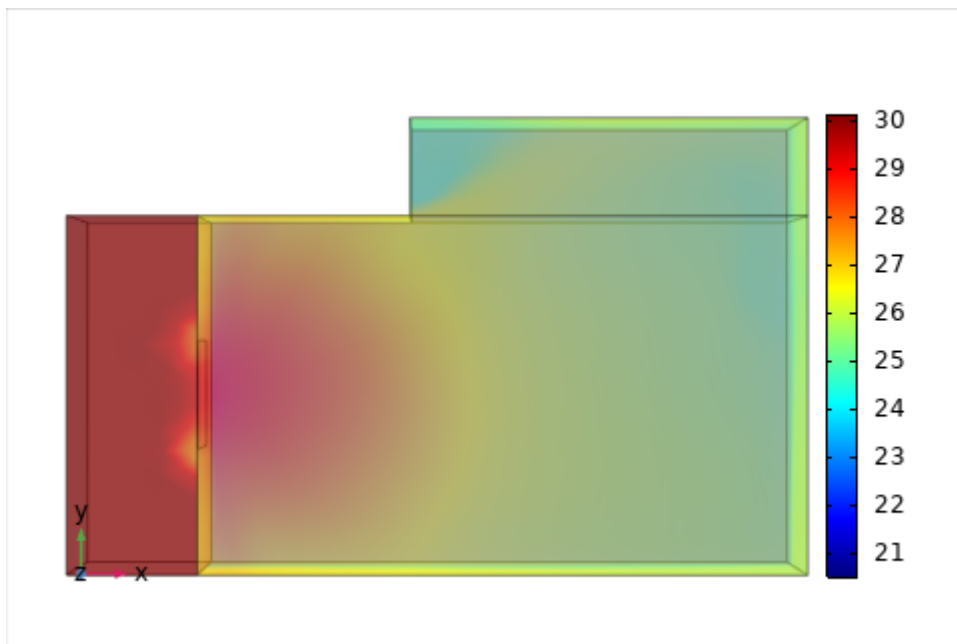
3.30 pav.: Srauto tūrio temperatūros laukai laiko momentu  $t = 60$ s iš viršaus perspektyvos



3.31 pav.: Srauto tūrio temperatūros laukai laiko momentu  $t = 90\text{s}$  iš viršaus perspektyvos



3.32 pav.: Srauto tūrio temperatūros laukai laiko momentu  $t = 120\text{s}$  iš viršaus perspektyvos



3.33 pav.: Srauto tūrio temperatūros laikai laiko momentu  $t = 180\text{s}$  iš viršaus perspektyvos



## Išvados

Magistrinio darbo teorinės dalies atlikimo metu suprastas infekcinių ligų plitimo mechanizmas, išnagrinėta ventiliacijos įtaka infekcijų plitime, apžvelgti ventiliacijos metodai bei jų tyrimų būdai. Praktinės dalies metu buvo įsisavintas Comsol Multiphysics skaičiavimo programos naudojimas ir įgyti gebėjimai atlikti oro srautų simuliacijas naudojantis Navjė-Stokso ir šilumos laidumo lygtimis. Iš atliktos oro srautų simuliacijos galima daryti išvadą, kad netaisyklingų geometrijų kambariuose vienpusės natūralios ventiliacijos atveju gali atsirasti blogo oro maišymosi zonos.

## Santrauka

Darbe nagrinėjama galimybė gyvenamajame būste panaudoti ventiliacijos strategiją naudojamą izoliacinėse palatose su laikinuoju prieškambariu. Atliekama infekcijos plitimo mechanizmo, ventiliacijos įtakos užsikrėtimo rizikai, ventiliacijos metodų ir ventiliacijos skaitinių skysčių dinamikos tyrimų analizė, apžvelgiamos matematinės lygtys naudojamos oro srautų simuliacijų skaičiavimuose. Pateikiami aktualūs nagrinėjamo ventiliacijos atvejo skaitinės skysčių dinamikos simuliacijų scenarijai. Atlikta konkretaus gyvenamojo būsto kambario vienpusės natūralios ventiliacijos skysčių dinamikos simuliacija.

## Summary

In this paper the applicability of natural ventilation strategy in an isolation room installed in a household environment is explored. Analysis of infection mechanism, relation of ventilation to infection risk, ventilation methods and ventilation computational fluid mechanics articles were performed. Mathematical equations used in air flow computational fluid dynamics simulations were examined. Scenarios were presented for the studied case of computational fluid dynamics simulations. Simulations were performed of single-sided natural ventilation case.

# Literatūra

- [1] Higienos Institutas, Stacionaro lovų skaičius pagal lovų profilių grupes (specialybės), 2018.
- [2] R. Leipus, O. Štikonienė Apibendrinto SEIR modelio taikymas COVID-19 ilgalaikėms prognozėms, 2020.
- [3] M.E. Snodgrass, World epidemics: a cultural chronology of disease from pre-history to the era of SARS, 2003.
- [4] G. Ayliffe, Hospital infection: from Miasmas to MRSA, 2003.
- [5] A.D. Langmuir, Epidemiology of airborne infection, 1961.
- [6] A.D. Langmuir, Airborne Infection: How Important for Public Health?, 1964.
- [7] R. Tellier, Y. Li, B. J. Cowling, J. W. Tang., Recognition of aerosol transmission of infectious agents: a commentary, 2019.
- [8] J. P. Duguid, The size and the duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet-nuclei, 1946.
- [9] R. S. Papineni, F. S. Rosenthal, The size distribution of droplets in the exhaled breath of healthy human subjects, 1997.
- [10] S. C. Chen, C. P. Chio, L. J. Jou, C. M. Liao, Characterization of infectious aerosols in health care facilities: An aid to effective engineering controls and preventive strategies, 2009.
- [11] Hua Qianc, Xiaohong Zheng, Ventilation control for airborne transmission of human exhaled bio-aerosols in buildings, 2018.

- [12] W. G. Lindsley, J. S. Reynolds, J. V. Szalajda, J. D. Noti, D. H. Beezhold, A cough aerosol simulator for the study of disease transmission by human cough-generated aerosols, 2013.
- [13] L. Bourouiba, E. Dehandschoewercker, J. W. M. Bush, Violent expiratory events: on coughing and sneezing, 2014.
- [14] Z. Hu, C. Song, C. Xu, G. Jin, Y. Chen, X. Xu, H. Ma, W. Chen, Y. Lin, Y. Zheng, Clinical characteristics of 24 asymptomatic infections with COVID-19 screened among close contacts in Nanjing, China, 2020.
- [15] S. Asadi, N. Bouvier, A. S. Wexler, W. D. Ristenpart, The coronavirus pandemic and aerosols: Does COVID-19 transmit via expiratory particles?, 2020.
- [16] S. Riley, et al., Transmission dynamics of the etiological agent of SARS in Hong Kong: impact of public health interventions, 2003.
- [17] Y. Li, X. Huang, I. T. Yu, T. W. Wong, H. Qian, Role of air distribution in SARS transmission during the largest nosocomial outbreak in Hong Kong, 2005.
- [18] N. T. Bailey, The mathematical theory of epidemics, 1957.
- [19] R. M. Jones, Y. Masago, T. A. Bartrand, C. N. Haas, M. Nicas, J. B. Rose, Characterizing the risk of infection from Mycobacterium tuberculosis in commercial passenger aircraft using quantitative microbial risk assessment, 2009.
- [20] S. C. Chen, C. P. Chio, L. J. Jou, C. M. Liao, Viral kinetics and exhaled droplet size affect indoor transmission dynamics of influenza infection, 2009.
- [21] W. F. Wells, On the mechanics of droplet nuclei infection .1. apparatus for the quantitative study of droplet nuclei infection of animals, 1948.
- [22] W. F. Wells, Crumb C. On the mechanics of droplet nuclei infection .2. quantitative experimental airborne tuberculosis in rabbits, 1948.
- [23] W. F. Wells, On air-borne infection study II. droplets and droplet nuclei, 1934.
- [24] E. C. Riley, G. Murphy, R. L. Riley, Airborne spread of measles in a suburban elementary-school, 1978.

- [25] C. J. Noakes, P. A. Sleigh, Mathematical models for assessing the role of airflow on the risk of airborne infection in hospital wards, 2009.
- [26] World Health Organization, Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings, 2009.
- [27] P. F. Linden, The fluid mechanics of natural ventilation, 1999.
- [28] E. C. Cole, C. E. Cook, Ventilation of wards and nosocomial outbreak of severe acute respiratory syndrome among healthcare workers, 1998.
- [29] H. Qian, Y. G. Li, W. H. Seto, Natural ventilation for reducing airborne infection in hospitals, 2010.
- [30] Center for Disease Control and Prevention, Guidelines for environmental infection control in health-care facilities.
- [31] Y. Li, G. M. Leung, J. W. Tang, et al., Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment – a multidisciplinary systematic review, 2007.
- [32] Y. C. Shiha, C. Chiua, O. Wangb, Dynamic airflow simulation within an isolation room, 2007.
- [33] Y. Jianga, Q. Chen, Buoyancy-driven single-sided natural ventilation in buildings with large openings, 2003.
- [34] K. Pileckas, Navjė-Stokso lygčių matematinė teorija, 2007.
- [35] J. D. Anderson, Fundamentals of Aerodynamics, 2020.
- [36] Y. C. Shiha, C. Chiua, O. Wangb, Application of integrating multi-zone model with CFD simulation to natural ventilation prediction, 2007.
- [37] K. W. D. Cheong, S. Y. Phua, Development of ventilation design strategy for effective removal of pollutant in the isolation room of a hospital, 2006.
- [38] J. Richmond-Bryant, Transport of exhaled particulate matter in airborne infection isolation rooms, 2007.
- [39] C. Allocca, Q. Chen, L. R. Glicksman, Design analysis of single-sided natural ventilation, 2002.

- [40] S. A. Osman, M. T. Ismail , Wind Loads Prediction Using Three-Dimensional Simulation of k-epsilon Turbulence Model, 2007.
- [41] S. Houdaa, R. Belarbib, N. Zemmouri, A CFD Comsol model for simulating complex urban flow, 2016.
- [42] C. M. Chiang, Y. Y. Li, P. C. Chou, C. M. Lai, CFD simulation to predict natural ventilation efficiency in a dwelling bedroom with the central horizontal pivot window, 1999.
- [43] H.B. Awbi, Ait movement in naturally-ventilated buildings, 1996.
- [44] A. Asmi, J. C. P. Putra, I. A. Rahman, Simulation of Room Airflow Using Comsol Multiphysics Software, 2014.
- [45] A. Asmi, J. C. P. Putra, I. A. Rahman, Effective depth of fresh air distribution in rooms with single-sided natural ventilation, 2014.
- [46] C. Balocco, Transient Simulation of a Naturally Ventilated Façade in a Mediterranean climate, 2009.
- [47] Y. Li, Buoyancy-driven natural ventilation in a thermally stratified one-zone building, 2000.
- [48] Y. Li, Z. D. Chen, Buoyancy-driven displacement natural ventilation in a single-zone building with three-level openings, 2002.
- [49] W. Rodi, J. H. Ferziger, M. Breuer, M. Pourquiee Status of large eddy simulation: results of a workshop, 1997.
- [50] S.J. Emmerich, K.B. McGrattan Application of a large eddy simulation model to study room airflow, 1998.
- [51] J. Cho, K. Woo, S. K. Byungseon, Removal of Airborne Contamination in Airborne Infectious Isolation Rooms, 1998.
- [52] J. Ansuini, A. Giretti, R. Larghetti, C. Perna, Simulation of wind-driven ventilation in an urban underground station.
- [53] P. Mahajan, A. Sac, R. D. Kumar, Airflow Simulation of an Isolation room using CFD Technique.

- [54] T. S. Larsena, P. Heiselberg, Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference, 2006.
- [55] Q. Chen, Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications, 2008.
- [56] P. V. Nielsen , A. Restivo, J. H. Whitelaw, Buoyancy-affected flows in ventilated rooms, 1979.
- [57] P. V. Nielsen , Flow in air conditioned rooms, 1974.
- [58] I. Seoa, I. Leea, O. Moonb, S. Honga, H. Hwanga, J. P. Bitoga, K. Kwona, Z. Yec, J. Lee, Modelling of internal environmental conditions in a full-scale commercial pig house containing animals, 2011.
- [59] V. Chanteloup, P. S. Mirade, Computational fluid dynamics (CFD) modelling of local mean age of air distribution in forced-ventilation food plants, 2008.
- [60] N. Kliuba, Skysčių tekėjimo modeliavimas: ventiliacijos atvejis, 2012.
- [61] F. Allard , Y. Utsumi , Airflow through large openings, 1992.