



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia temperatūros  
pasiskirstymo tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Algirdas Rukšėnas**  
Projekto autorius

**Prof. dr. Romualdas Dundulis**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia temperatūros  
pasiskirstymo tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas  
Mechanikos inžinerija (6211EX009)

---

**Algirdas Rukšėnas**

Projekto autorius

**Prof. dr. Romualdas Dundulis**

Vadovas

**Doc. dr. Sigitas Kilikevičius**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas  
Algirdas Rukšėnas

## **Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia temperatūros pasiskirstymo tyrimas**

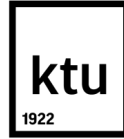
Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Algirdas Rukšėnas

*Patvirtinta elektroniniu būdu*



**Kauno technologijos universitetas**

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Studijų programa – Mechanikos inžinerija (6211EX009)

## **Magistro studijų baigiamojo projekto užduotis**

**Studentui(-ei) – Algirdui Rukšėnui**

### **1. Baigiamojo projekto tema –**

Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia temperatūros pasiskirstymo tyrimas

*(Lietuvių kalba)*

Analysis of Temperature Distribution in Refrigerated Well with Refrigerated Display

*(Anglų kalba)*

### **2. Baigiamojo projekto tikslas ir uždaviniai –**

**Darbo tikslas** – atlikti tiriamosios šaldymo vitrinos su šaldoma vonia temperatūros pasiskirstymo tyrimą, atliekant eksperimentą bei skaičiuojamosios fluidų dinamikos skaičiavimus.

**Darbo uždaviniai:**

1. Atlikti įrenginio veikimo principo, konstrukcijos ir mokslinių tyrimų analizę.
2. Atlikti tiriamosios šaldymo vitrinos su šaldoma vonia eksperimentinį tyrimą.
3. Skaitiniu būdu supaprastinti fizinio garintuvo poveikį šilumos mainams, priskiriant charakteringąsias reikšmes aktytos medžiagos modeliui.
4. Sukurti šaldymo vitrinos su šaldoma vonia validuojantį skaičiuojamąjį modelį.
5. Skaitiniu būdu atlikti tiriamosios šaldymo vitrinos su šaldoma vonia modifikacijas ir nustatyti jų poveikį temperatūros pasiskirstymui šaldomajame tūryje.

### **3. Pradiniai baigiamojo projekto duomenys –**

Tiriamosios šaldymo vitrinos su šaldoma vonia ilgis be kompresorinės yra 746 mm, plotis 640 mm, aukštis 1005 mm. Tiriamajame objekte naudojamas prapučiamas garintuvas, o priverstinė konvekcija sukuriama naudojant ašinių ventiliatorių. Šaldomos vonios termoizoliacinio sluoksnio gamybai naudojamos poliuretano putos.

#### 4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos –

Darbe turi būti atlikta literatūros analizė ir tiriamosios problemos eksperimentinis tyrimas. Remiantis eksperimentinio tyrimo rezultatais turi būti sukurtas skaitinis skaičiuojamasis modelis ir atliktas tiriamosios problemos skaitinis tyrimas.

Projekto autorius

Algirdas Rukšėnas

*(Vardas, Pavardė)*

*(parašas)*

*(data)*

Baigiamojo projekto vadovas

Prof. dr. Romualdas Dundulis

*(Vardas, Pavardė)*

*(parašas)*

*(data)*

Krypties studijų programos vadovas

Doc. dr. Kęstutis Pilkauskas

*(Vardas, Pavardė)*

*(parašas)*

*(data)*

Rukšėnas, Algirdas. Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia temperatūros pasiskirstymo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. Romualdas Dundulis; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Mechanikos inžinerija, Technologijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: skaičiuojamoji fluidų dinamika, šaldymo sistema, temperatūros pasiskirstymas.

Kaunas, 2021. 57 p.

### **Santrauka**

Darbe atliekama literatūros analizė, kurios metu išanalizuojamas šaldymo vitrinos su šaldoma vonia veikimo principas, konstrukciniai ypatumai bei panašių šaldymo įrenginių mokslinių tyrimų aktualios detalės. Taikant literatūros analizėje surinktą informaciją, atliekami eksperimentinis ir skaitinis šaldymo vitrinos su šaldoma vonia tyrimai. Eksperimentinio tyrimo metu skirtinguose matavimų taškuose išmatuojamos tiriamojo objekto darbinių temperatūrų reikšmės. Skaitinio tyrimo metu atliekamas garintuvo modelio supaprastinimas į akytą medžiagą. Taip pat skaitiniame tyrime sukuriama validuojantis tiriamojo objekto skaičiuojamasis modelis ir, naudojant sukurtą modelį, atliekamos tiriamojo objekto modifikacijos.

Rukšėnas, Algirdas. Analysis of Temperature Distribution in Refrigerated Well with Refrigerated Display. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. Romualdas Dundulis; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Mechanical Engineering, Technological Sciences.

Keywords: computational fluid dynamics, cooling system, temperature distribution.

Kaunas, 2021. 57 p.

### **Summary**

The thesis begins with literature analysis of refrigerated well with refrigerated display working principal and design. Also, the thesis analyzes similar cooling units research details. Using information from literature overview, the experimental and numerical studies are done with refrigerated well with refrigerated display. In the experimental research, the temperature values of different measuring points were measured. Numerical research provides information that consists of the evaporator was simplified into porous medium. Also, in the numerical research, the validating numerical model of refrigerated well with refrigerated display was established. Using validating numerical model, the modifications of the refrigerated well with refrigerated display were performed.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>10</b>
<b>Įvadas .....</b>	<b>12</b>
<b>1. Literatūros analizė.....</b>	<b>13</b>
1.1. Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia veikimo principas .....	14
1.2. Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia konstrukcija .....	17
1.3. Šaldymo įrenginių tyrimai .....	20
<b>2. Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia eksperimentinis tyrimas.....</b>	<b>24</b>
2.1. Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia eksperimentinio tyrimo atlikimas.....	25
2.2. Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia eksperimentinio tyrimo rezultatai.....	27
<b>3. Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia skaitinis tyrimas .....</b>	<b>30</b>
3.1. Garintuvo skaitinio modelio kūrimas .....	30
3.1.1. Garintuvu tekančio oro srauto slėgio kritimo tyrimas.....	34
3.1.2. Garintuvu tekančio oro srauto šilumos mainų tyrimas.....	37
3.2. Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia validuojančio modelio kūrimas .....	41
3.3. Skaitinis šaldymo vitrinos su šaldoma vonia patobulinimų tyrimas .....	51
<b>Išvados .....</b>	<b>55</b>
<b>Literatūra .....</b>	<b>57</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>59</b>
1 priedas. Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia durelių stiklo konfiguracijų įtaka temperatūros ir greičio pasiskirstymui šaldomajame tūryje .....	59
2 priedas. Tiriamojo ventiliatoriaus ir jo posvyrio kampo įtaka temperatūros ir greičio pasiskirstymui šaldomajame tūryje .....	62



## Lentelių sąrašas

<b>3.1 lentelė.</b> Garintuvo skaičiuojamajame modelyje naudojamų medžiagų šiluminės charakteristikos .....	38
<b>3.2 lentelė.</b> Garintuvo sugeriamo šilumos kiekio priklausomybė nuo įtekančio oro srauto temperatūros .....	39
<b>3.3 lentelė.</b> Garintuvo šilumos mainų intensyvumo priklausomybė nuo įtekančio oro srauto greičio .....	40
<b>3.4 lentelė.</b> Šaldymo vitrinoje su šaldoma vonia skaičiuojamajame modelyje naudojamų medžiagų šiluminės charakteristikos .....	42
<b>3.5 lentelė.</b> Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia eksperimentinių ir skaitinio modelio rezultatų palyginimas.....	50
<b>3.5 lentelė.</b> (tęsinys).....	51

## Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Šaldymo proceso schema [1].....	14
1.2 pav. Šaldymo proceso grafikas [3].....	15
1.3 pav. Statinis šaldymo būdas [4] .....	15
1.4 pav. Dinaminis šaldymo būdas [4].....	16
1.5 pav. Prapučiamas garintuvas [5] .....	16
1.6 pav. Šaldymo vitrina su stikline ekspozicine dalimi [8] .....	17
1.7 pav. Šaldymo korpuso su ekspozicine dalimi eskizas.....	18
1.8 pav. Šaldymo korpuso sienelės konstrukcija [9].....	18
1.9 pav. „RIM“ technologinio proceso eiliškumas [10].....	19
1.10 pav. Šaldymo korpusas su atviru šaldymo agregatu [11].....	20
1.11 pav. Charakteringųjų taškų išdėstymo schema [12].....	21
1.12 pav. Eksperimento ir skaitinių skaičiavimų rezultatų validacija [13].....	21
1.13 pav. Iteracinio būdo taikymas siekiant sudaryti validuojantį skaičiuojamąjį modelį, keičiant garintuvo parametrus [18] .....	23
2.1 pav. Tiriamoji šaldymo vitrina su šaldoma vonia .....	24
2.2 pav. „NTC 10k“ laidinis termistorius [19].....	25
2.3 pav. Matuojamų temperatūrų apdorojimo ir saugojimo schema.....	25
2.4 pav. Tiriamojoje šaldymo vitrinoje su šaldoma vonia naudojamų durelių konstrukcija .....	26
2.5 pav. Charakteringųjų matavimo taškų išdėstymo schema .....	27
2.6 pav. Termistorių išdėstymas tiriamojoje šaldymo vitrinoje su šaldoma vonia .....	27
2.7 pav. Visą parą matuojamų temperatūrų verčių rezultatai.....	28
2.8 pav. Valandos trukmės matuojamų temperatūrų verčių rezultatai.....	28
3.1 pav. Fizinis tiriamosios šaldymo vitrinos su šaldoma vonia garintuvas iš viršaus .....	30
3.2 pav. Fizinis tiriamosios šaldymo vitrinos su šaldoma vonia garintuvas iš priekio .....	30
3.3 pav. Sumodeliuoto garintuvo segmento eskizas .....	31
3.4 pav. Garintuvo skaičiuojamasis modelis.....	33
3.5 pav. Bendrieji garintuvo skaičiavimų nustatymai.....	33
3.6 pav. Garintuvo skaičiavimų pradinių sąlygų įvertinimas.....	34
3.7 pav. Slėgio kritimo gradiento tyrimui naudojamas skaičiuojamojo modelio tinkliukas.....	34
3.8 pav. Greičio pasiskirstymas išilgai garintuvo, kai įtekančio oro srauto greitis yra 1 m/s.....	35
3.9 pav. Slėgio kitimas išilgai garintuvo, kai įtekančio oro srauto greitis yra 1 m/s .....	35
3.10 pav. Slėgio kitimas išilgai skaičiuojamojo domeno, kai įtekančio oro srauto greitis yra 1 m/s.....	35
3.11 pav. Slėgio kritimo gradiento priklausomybė nuo greičio z ašies kryptimi.....	36
3.12 pav. Slėgio kritimo gradiento priklausomybė nuo greičio y ašies kryptimi .....	36
3.13 pav. Garintuvo šilumos mainų tyrimui naudojamas skaičiuojamojo modelio tinkliukas .....	37
3.14 pav. Tekančio oro temperatūros pasiskirstymas skaičiuojamajame modelyje, kai įtekančio oro srauto temperatūra yra +20 °C.....	38
3.15 pav. Pilnutinio šilumos perdavimo koeficiento vertė, kai įtekančio oro srauto temperatūra yra +20 °C.....	39
3.16 pav. Garintuvo segmento kietų kūnų ir oro temperatūros, kai įtekančio oro srauto greitis yra 1,5 m/s .....	40
3.17 pav. Garintuvo segmento temperatūrinės charakteristikos .....	41
3.18 pav. Bendrieji šaldymo vitrinos su šaldoma vonia skaičiavimų nustatymai.....	41
3.19 pav. Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia skaičiavimų pradinių sąlygų įvertinimas.....	42

<b>3.20 pav.</b> Simetriško skaičiuojamojo domeno įvertinimas .....	42
<b>3.21 pav.</b> a) Sandarinimų slėgio potencialo įvertinimas, b) vidinių sienelių sąlygos įvertinimas, c) išorinių sienelių sąlygos įvertinimas .....	43
<b>3.22 pav.</b> Naudojamo ventiliatoriaus slėgio šuolio ir tūrinio debito priklausomybė .....	44
<b>3.23 pav.</b> Charakteringojo taško pozicija prieš garintuvą .....	44
<b>3.24 pav.</b> Įtekančio oro srauto temperatūros ir sugeriamos galios priklausomybės įvertinimas.....	44
<b>3.25 pav.</b> Bendrieji akytos medžiagos parametrai .....	45
<b>3.26 pav.</b> Akytos medžiagos modelyje įvertinamas tūrinio šilumos perdavimo koeficientas .....	45
<b>3.27 pav.</b> Šaldymo vitrinės su šaldoma vonia skaičiuojamajame modelyje sudarytas tinkliukas ...	46
<b>3.28 pav.</b> Naudoto iteracinio skaičiavimo algoritmas .....	46
<b>3.29 pav.</b> Skaičiuojamajame modelyje pasiskirstančios temperatūros kontūrai .....	47
<b>3.30 pav.</b> Skaičiuojamajame modelyje pasiskirstančio oro srauto greitis ir kryptis .....	47
<b>3.31 pav.</b> Skaičiuojamojo modelio temperatūrų reikšmių priklausomybė nuo laiko.....	48
<b>3.32 pav.</b> Eksperimentinio ir skaitinio tyrimų išpučiamo oro temperatūrų reikšmės .....	48
<b>3.33 pav.</b> Eksperimentinio ir skaitinio tyrimų įtraukiamo oro temperatūrų reikšmės .....	49
<b>3.34 pav.</b> Eksperimentinio ir skaitinio tyrimų viršutinės lentynėlės oro temperatūrų reikšmės .....	49
<b>3.35 pav.</b> Eksperimentinio ir skaitinio tyrimų apatinės lentynėlės oro temperatūrų reikšmės .....	50
<b>3.36 pav.</b> Skaitiniame tyrime naudojamų durelių stiklų konfigūracijos .....	51
<b>3.37 pav.</b> Temperatūrų reikšmių priklausomybės nuo durelių stiklo konfigūracijų .....	52
<b>3.38 pav.</b> Tyrime naudojamo ventiliatoriaus posvyrio kampo schema.....	53
<b>3.39 pav.</b> Tiriamojo ventiliatoriaus slėgio šuolio ir tūrinio debito priklausomybė.....	53
<b>3.40 pav.</b> Ventiliatoriaus posvyrio kampo įtaka temperatūros pasiskirstymui šaldomajame tūryje.	53
<b>1 pav.</b> Temperatūros pasiskirstymas šaldomajame tūryje naudojant pirmąją durelių stiklo konfigūraciją.....	59
<b>2 pav.</b> Greičio pasiskirstymas šaldomajame tūryje naudojant pirmąją durelių stiklo konfigūraciją	59
<b>3 pav.</b> Temperatūros pasiskirstymas šaldomajame tūryje naudojant antrąją durelių stiklo konfigūraciją.....	60
<b>4 pav.</b> Greičio pasiskirstymas šaldomajame tūryje naudojant antrąją durelių stiklo konfigūraciją..	60
<b>5 pav.</b> Temperatūros pasiskirstymas šaldomajame tūryje naudojant trečiąją durelių stiklo konfigūraciją.....	61
<b>7 pav.</b> Temperatūros pasiskirstymas šaldomajame tūryje, kai ventiliatorius pakreiptas 135 laipsnių kampu .....	62
<b>8 pav.</b> Greičio pasiskirstymas šaldomajame tūryje, kai ventiliatorius pakreiptas 135 laipsnių kampu .....	62
<b>9 pav.</b> Temperatūros pasiskirstymas šaldomajame tūryje, kai ventiliatorius pakreiptas 120 laipsnių kampu .....	63
<b>10 pav.</b> Greičio pasiskirstymas šaldomajame tūryje, kai ventiliatorius pakreiptas 120 laipsnių kampu .....	63
<b>11 pav.</b> Temperatūros pasiskirstymas šaldomajame tūryje, kai ventiliatorius pakreiptas 105 laipsnių kampu .....	64
<b>12 pav.</b> Greičio pasiskirstymas šaldomajame tūryje, kai ventiliatorius pakreiptas 105 laipsnių kampu .....	64
<b>13 pav.</b> Temperatūros pasiskirstymas šaldomajame tūryje, kai ventiliatorius pakreiptas 90 laipsnių kampu .....	65
<b>14 pav.</b> Greičio pasiskirstymas šaldomajame tūryje, kai ventiliatorius pakreiptas 90 laipsnių kampu .....	65

## Įvadas

**Temos aktualumas.** Šaldymo vitrina su šaldoma vonia yra sudėtingas šaldymo įrenginys, kurio paskirtis yra palaikyti žemą darbinę temperatūrą šaldomajame tūryje. Šiam tikslui yra naudojamos žemu šilumos laidumo pasižyminčios konstrukcinės medžiagos bei šaldymo procesui įgyvendinti reikalingos šaldymo sistemos. Kuriant ir modifikuojant šaldymo vitriną su šaldoma vonia, siekiama sudaryti šaldymo sistemos ir komponentų sąveiką, kuri užtikrintų po šaldomąjį tūrį pasiskirstančią darbinę temperatūrą. Tokią sąveiką įgyvendinti yra sudėtinga dėl didelės gausos vieno nuo kito priklausančių procesų. Nors daugumą priklausomybių ir veiksnių įtakų galima nuspėti intuityviai, dėl didelio temperatūros pasiskirstymo jautrumo intuityvių sprendimų neužtenka. Dėl šios priežasties, kuriamai ir modifikuojamai šaldymo vitrinai su šaldoma vonia, atliekami eksperimentiniai ir skaitiniai tyrimai. Eksperimento atlikimas suteikia daug naudingos informacijos, skirtos nagrinėti šaldymo vitrinos veikimo ypatumus. Taip pat, eksperimento metu gautus rezultatus galima naudoti kuriant validuojantį skaičiuojamąjį modelį. Validuojančio skaičiuojamojo modelio sukūrimas padeda pigiai ir greitai atlikti kuriamos šaldymo vitrinos su šaldoma vonia modifikacijas bei patikrinti atliktų modifikacijų įtaką temperatūros pasiskirstymui šaldomajame tūryje. Dėl panašių kuriamų šaldymo įrenginių konstrukcijų ir veikimo principų, surinktus eksperimentinius rezultatus ir taikant principus, naudotus kuriant validuojantį skaičiuojamąjį modelį, pradinėse gaminio kūrimo stadijose galima tiksliau numatyti ir įvertinti kuriamo įrenginio veikimo ypatumus. Darbo metu siekiama kuriamai prototipinei šaldymo vitrinai su šaldoma vonia parinkti temperatūros pasiskirstymo tolygumo atžvilgiu, tinkamiausią komponentų ir jų išdėstymo konfigūraciją. Siekiant sumažinti brangių ir laikui imlių eksperimentų skaičių, atliekamas vienas eksperimentinis tyrimas, skirtas skaičiuojamojo modelio kūrimui. Naudojant skaičiuojamosios fluidų dinamikos programinę įrangą bei atliekant oro srauto tėkmės ir šilumos mainų skaičiavimus, kuriamas validuojantis skaičiuojamasis modelis, kuris skirtas atlikti tiriamosios šaldymo vitrinos su šaldoma vonia modifikacijas ir ateityje kuriamų panašių šaldymo įrenginių projektiniams skaičiavimams.

**Darbo tikslas** – atlikti tiriamosios šaldymo vitrinos su šaldoma vonia temperatūros pasiskirstymo tyrimą, atliekant eksperimentą bei skaičiuojamosios fluidų dinamikos skaičiavimus.

### **Darbo uždaviniai:**

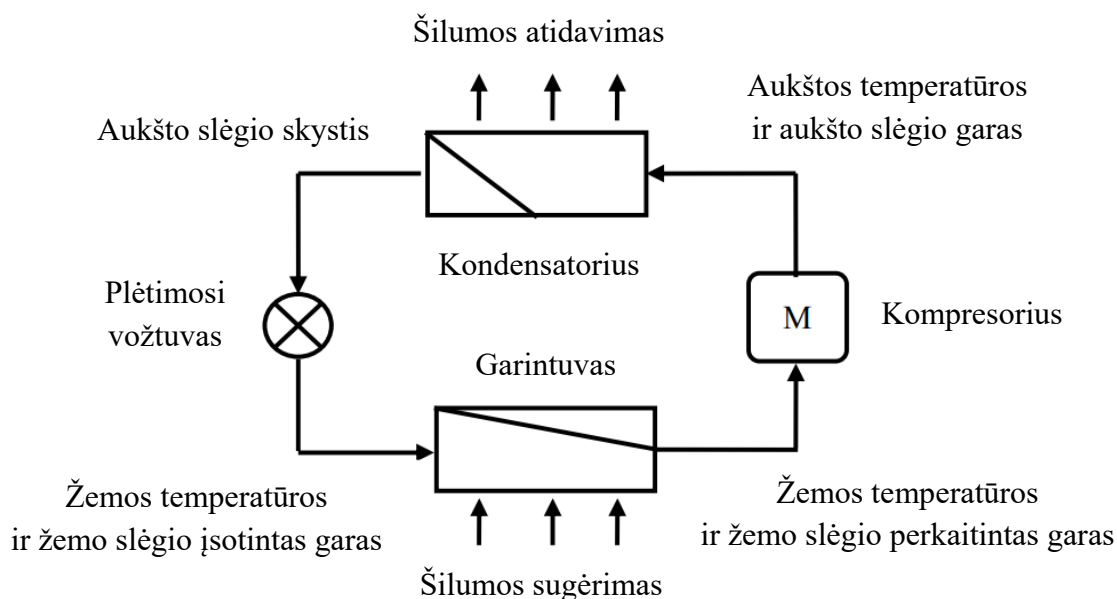
1. Atlikti įrenginio veikimo principo, konstrukcijos ir mokslinių tyrimų analizę.
2. Atlikti tiriamosios šaldymo vitrinos su šaldoma vonia eksperimentinį tyrimą.
3. Skaitiniu būdu supaprastinti fizinio garintuvo poveikį šilumos mainams, priskiriant charakteringąsias reikšmes akytos medžiagos modeliui.
4. Sukurti šaldymo vitrinos su šaldoma vonia validuojantį skaičiuojamąjį modelį.
5. Skaitiniu būdu atlikti tiriamosios šaldymo vitrinos su šaldoma vonia modifikacijas ir nustatyti jų poveikį temperatūros pasiskirstymui šaldomajame tūryje.

## 1. Literatūros analizė

Vienas iš restoranų ir kavinių neatsiejamų įrenginių yra šaldymo vitrinos su šaldoma vonia. Šis įrenginys naudojamas palaikyti žemą maisto produktų temperatūrą. Kadangi šaldymo vitrinose su šaldoma vonia laikomi maisto produktai prieš pat jų patiekimą, jos naudojamos maisto patiekimo dalyje, kuri dažniausiai yra matoma restoranų bei kavinių lankytojų. Dėl šios priežasties šioms vitrinoms keliami aukšti funkcionalumo ir estetiškos išvaizdos reikalavimai. Vienas pagrindinių funkcionalumo reikalavimų yra suvartojamos elektros energijos efektyvumas. Kiekvienas potencialus vitrinos pirkėjas skaičiuoja vitrinos atsipirkimo laikotarpį, todėl viena iš neatsiejamų dedamųjų yra elektros energijos suvartojimas. Kitas labai svarbus šaldymo vitrinos funkcionalumo rodiklis yra temperatūros pasiskirstymas šaldomajame tūryje. Projektuojant ir gaminant vitriną siekiama, kad temperatūra šaldomajame tūryje pasiskirstytų kuo tolygiau. Tai yra labai svarbu palaikant vienodą produktų šviežumą. Šaldymo įrenginyje sukuriama šaldymo ciklas turi užtikrinti numatomą įrenginio darbinę temperatūrą ir jos kitimą. Ši temperatūra įvairių gamintojų svyruoja tarp +2 °C ir +10 °C. Siekiami kuo tinkamiau patenkinti šiuos funkcionalumo reikalavimus ir tokiu būdu išlaikyti produktą konkurencingą rinkoje, inžinieriai atlieka daug tyrimų ir eksperimentų. Šie žingsniai yra labai svarbūs pirminėse produkto kūrimo ir vystymo stadijose, kai yra gaminami prototipai. Patvirtinus prototipo funkcionalumą ir toliau plėtojant produktą, būna suprojektuojama specializuota įranga šaldymo vitrinų su šaldoma vonia gamybai. Tokia įranga labai brangi ir dėl savo specifikos nelanksti, todėl tolimesniuose produkto vystymo cikluose vitrinų korpusų pakeitimai būna praktiškai neįmanomi arba labai brangūs. Siekiant išvengti šaldymo vitrinos korpuso pakeitimų ir produktą išlaikant konkurencingą, būna atliekami pakeitimai arba šaldymo agregate, arba naudojamuose vitrinos komponentuose ir detalėse. Šaldymo agregato atnaujinimas yra ilgas ir sudėtingas procesas, reikalaujantis aukštos kvalifikacijos šaldymo įrenginių specialistų žinių. Atnaujinant šaldymo agregatą reikia įvertinti ne tik funkcionalumo faktorius, bet ir saugos faktorius, kurie atnaujinimo procesą padaro tik dar sudėtingesnį. Dėl šių priežasčių yra stengiamasi atlikti atnaujinimus šaldymo vitrinose su šaldoma vonia, atnaujinant jos komponentus ir detales. Tai, lyginant su šaldymo korpuso ar šaldymo agregato atnaujinimais, yra nebrangūs pakeitimai, kurie gali turėti nemažą įtaką šaldymo vitrinos elektros energijos efektyvumo didinimui ir temperatūros pasiskirstymo tolygumui. Kadangi vitrinos konstrukciją sudaro daug skirtingų detalių, kurios gali turėti įtaką šaldymo procesui, yra gana sudėtinga tiksliai numatyti kaip detalių formos ir jų išdėstymas veiks temperatūros pasiskirstymą įrenginyje. Taip pat atitinkamas komponentų, tokių kaip ventiliatorių, parinkimas turi didelę įtaką šilumos mainų intensyvumui bei oro srauto sudarymui. Siekiant nustatyti šias įtakas, atliekami eksperimentai ir skaitiniai skaičiavimai. Eksperimentai tiksliausiai nusako įvairių veiksnių įtakas, tačiau jie trunka daug laiko bei, atsižvelgiant į galimų konfigūracijų gausą, yra santykinai brangūs. Dėl šios priežasties tikslingiausia atlikti skaitinius skaičiavimus ir ištirti komponentų įtaką šaldymo procesui naudojant skaičiuojamosios fluidų dinamikos įrankius. Vienas svarbiausių uždavinių, kuris yra atliekamas skaičiuojamuosiuose tyrimuose, yra sukurti validuojantį skaičiuojamąjį modelį. Šio tipo skaitiniams skaičiavimams turi būti susieti dviejų tipų fizikiniai reiškiniai – šilumos mainai ir fluidų dinamika. Tik tinkamai atlikę eksperimentą ir sudarę validuojantį skaičiuojamąjį modelį, galime atlikti pakankamai tikslus skaičiavimus, skirtus vitrinos atnaujinimams, kadangi kraštinių ir pradinių sąlygų įvertinimas turi didelę įtaką jautrių rezultatų teisingumui. Atsižvelgdami į tai turime gerai suprasti kokia yra šaldymo vitrinos konstrukcija, koku principu ji veikia bei kaip atliekami panašių šaldymo įrenginių tyrimai.

## 1.1. Šaldymo vitrinose su šaldoma vonia veikimo principas

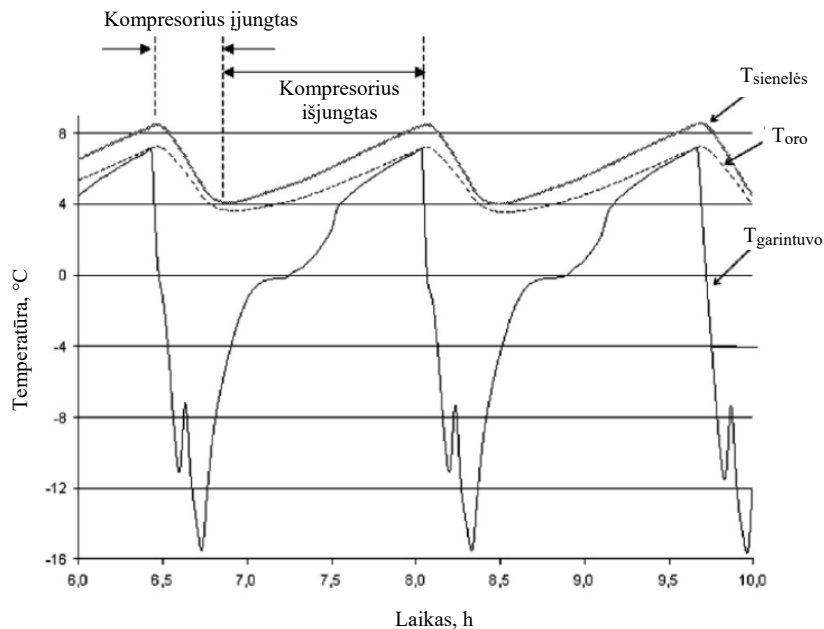
Siekiant tinkamai atlikti šaldymo vitrinose su šaldoma vonia eksperimentą ir skaitinius skaičiavimus, o juos atlikus gebėti teisingai interpretuoti rezultatus, reikia visapusiškai suprasti, kokių principu vyksta šaldymo procesas tiriamajame įrenginyje. Kaip ir kituose šaldymo paskirties įrenginiuose, šaldymo vitrinose su šaldoma vonia yra naudojami šaldymo agregatai. Šaldymo agregato veikimas yra paremtas šilumos siurblio principu, kai šaldymo kameroje šiluma yra sugeriama ir perkeliama į išorę. Šaldymo agregatą sudaro šie pagrindiniai komponentai: garintuvas, kompresorius, kondensatorius, plėtimosi vožtuvas ir šaltnešis (žr. 1.1 pav.).



1.1 pav. Šaldymo proceso schema [1]

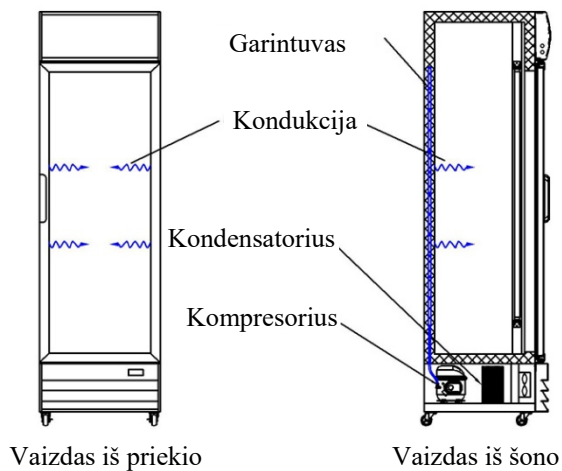
Žvelgiant į šaldymo proceso schemą (žr. 1.1 pav.), galima išskirti proceso eiliškumą bei komponentų funkcijas. Šaltnešio, tekančio pro plėtimosi vožtuvą, slėgis ženkliai krenta. Toks staigus slėgio kritimas veikia skysčio garavimą esant žemesnei skysčio temperatūrai. Tekėdamas pro garintuvą šaltnešis pradeda keisti savo skystą fazę į dujinę fazę. Vykstant šiam procesui, šaltnešis atvėsta, dėl garavimo procesui sunaudojamos energijos. Iš dalies dujinės ir skystos fazės atvėšęs šaltnešis tekėdamas pro garintuvą sugeria šilumą iš aplinkos, kurioje jis yra patalpintas. Sugėręs šilumą ir tapęs dujinės fazės, šaltnešis toliau teka ir tekėdamas pro veikiančią kompresorių yra suslegiamas. Dėl slėgio pakilimo į pradinę vertę, kuri buvo prieš šaltnešiui tekant pro plėtimosi vožtuvą, šaltnešis įkaista. Įkaitęs dujinės fazės šaltnešis toliau teka pro kondensatorių, kuriuo tekėdamas atiduoda sugertą šilumą į aplinką ir atvėsdamas į pradinę temperatūrą kondensuojasi. Kondensacijos metu šaltnešis pakeičia dujinę fazę į skystą fazę, kuri buvo prieš jam tekant pro plėtimosi vožtuvą. Šis ciklas yra nuolatos tęsiamas iki kol šaldymo kameroje yra pasiekama reikiama temperatūra. Pasiekus reikiama temperatūrą, kompresorius yra išjungiamas ir ciklas sustabdomas. Šis procesas būna sustabdytas tol, kol šaldymo kameroje temperatūra pradeda kilti iki leidžiamos maksimalios temperatūros. Kai temperatūros reikšmė pasiekia maksimalią leidžiamą, kompresorius vėl įjungiamas ir šaldymo ciklas pradedamas iš naujo. Dėl šios priežasties, laiko atžvilgiu, temperatūra šaldymo kameroje yra nuolatos kintanti (žr. 1.2 pav.). Temperatūros priklausomybės nuo laiko grafike yra išskiriamas kompresoriaus įjungimo periodas. Projektuojant ir eksploatuojant šaldymo įrenginį yra stengiamasi, kad šis periodas būtų kuo ilgesnis, o aktyvus šaldymo ciklas truktų kuo trumpiau. Tai tiesiogiai veikia suvartojamą elektros energiją, šaldymo procesui užtikrinti. Viena iš pagrindinių priežasčių, kodėl naujuose

šaldymo įrenginiuose yra naudojamas propano šaltnešis, kuris žinomas kaip „R-290“, yra efektyvesnis šaldymo procesas, kurio metu šaldymo kameroje šiluma yra sugeriama intensyviau. Remiantis [2] šaltiniu, šis šaltnešis yra pranašesnis už kitus šaldymo įrenginiuose naudojamus šaltnešius, vertinant kainą, globalinio atšilimo potencialą ir šilumos siurblio transformacijos koeficientą.



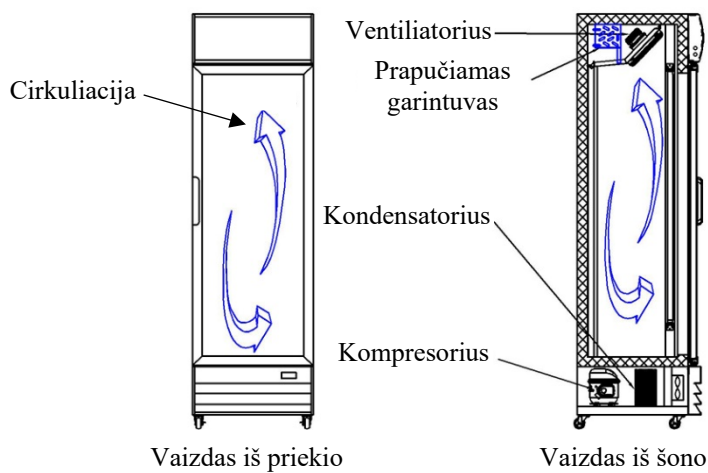
1.2 pav. Šaldymo proceso grafikas [3]

Šaldymo įrenginiuose šaldymo proceso įvykdymą galima išskirti į du pagrindinius būdus: statinį ir dinaminį. Abu šie būdai remiasi oro cirkuliacijos principu, kurį veikia konvekcija. Esant statiniam būdai, konvekcija vyksta natūraliu būdu, o esant dinaminiam būdai, konvekcija vyksta priverstiniu būdu. Statinio būdo metu oro srauto cirkuliacija sukuriama, kai kondukcijos principu, per korpuso sieneles, oras yra atvėsintas ir dėl konvekcijos dėsnio oras natūraliai pradeda cirkuliuoti dėl susidarančių aukštesnės ir žemesnės oro temperatūrų sričių. Statinio šaldymo metu žemos temperatūros sritį sukuria garintuvas, kuris dažniausiai būna patalpintas šaldymo korpuso sienelėje (žr. 1.3 pav.).



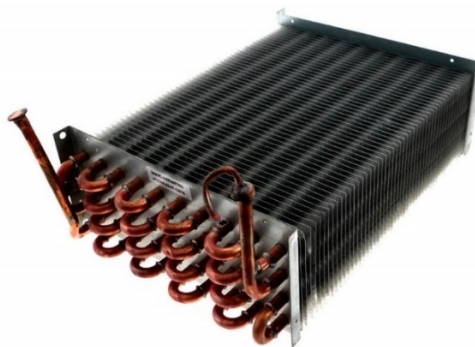
1.3 pav. Statinis šaldymo būdas [4]

Tam, kad garintuvą būtų galima naudoti šaldymo korpuso viduje, naudojamas vamzdelinis garintuvas, kuris turi tiesioginį kontaktą su šaldymo korpuso sienele, per kurią sugeria šilumą iš vėsinamos aplinkos. Siekiant paspartinti konvekciją statinio šaldymo tipo metu būna panaudojamas ventiliatorius, kuris šaldymo korpuso tūryje sukuria priverstinį oro srautą. Tokiu būdu paitensyvinami šilumos mainai tarp aukštesnės ir žemesnės temperatūrų sričių ir sukuriama tolygesnis temperatūros pasiskirstymas šaldymo kameroje. Nors oro srauto cirkuliacija yra dirbtinai paitensyvinama ventiliatoriumi, šis būdas vis tiek yra priskiriamas statiniam šaldymo būdui, kadangi vėsinamas oras neturi tiesioginio kontakto su garintuvu. Dinaminiam šaldymo tipui taip pat naudojami ventiliatoriai, tačiau lyginant su statiniu šaldymo būdu, naudojamo garintuvo tipas ir oro vėsinimo principas skiriasi. Dinaminiam šaldymui garintuvas talpinamas ne šaldymo korpuso sienelėse, o pačio šaldymo įrenginio korpuso viduje (žr. 1.4 pav.).



1.4 pav. Dinaminis šaldymo būdas [4]

Dinaminiam šaldymui naudojamas prapučiamas garintuvas (žr. 1.5 pav.). Prapučiamas garintuvas yra sudarytas iš vamzdelių, kurie vedami pro darbinės plokštelės, vadinamas lamelėmis. Pro garintuvo vamzdelius pradėjus tekėti šaltnešiui, jis atvėsina vamzdelius. Dėl medžiagų šilumos laidumo, kondukcijos principu, vamzdeliai atvėsina darbinės plokštelės. Už garintuvo patalpinami ventiliatoriai, kurie traukia arba prapučia orą pro prapučiamą garintuvą. Traukiant arba prapučiant oro srautą pro darbinį plotą, kurį sudaro garintuvo vamzdeliai ir lamelės, vykdomi šilumos mainai, kurių metu yra atvėsintas tekančias oras. Kuo didesnis garintuvo darbinis plotas, tuo intensyviau yra sugeriama šiluma iš tekančio oro. Atvėsintas oro srautas yra tiekiamas į šaldomą kameros tūrį.



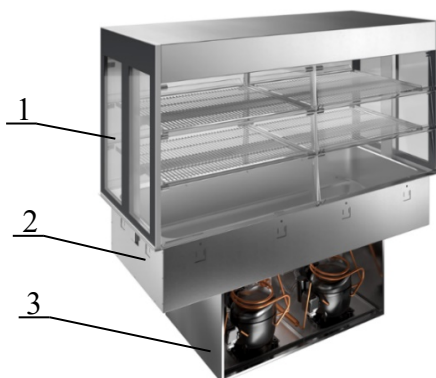
1.5 pav. Prapučiamas garintuvas [5]



Naudojant dinaminį šaldymo būdą, pasiekus reikiamą oro temperatūrą, šaldymo įrenginio valdiklis stabdo šaldymo procesą ir išjungia šaldymo agregate esantį kompresorių. Išjungus kompresorių, ventiliatoriai toliau dirba sukurdami nepertraukiamą oro srauto cirkuliaciją. Tokiu būdu palaikoma tolygesnė oro temperatūra visame šaldomajame tūryje. Taip pat dinaminiam šaldymo būdai būdinga tai, kad šaldymo įrenginio ventiliatoriai įjungiami ne iš karto. Ventiliatoriai įjungiami tik tuo metu, kai garintuvas pasiekia reikiamą temperatūrą. Toks sprendimas taikomas tam, kad kol šaldymo agregatas tinkamai įsidirbs, būtų mažesni šilumos mainai su aplinka, siekiant nesutrikdyti šaldymo ciklo.

## 1.2. Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia konstrukcija

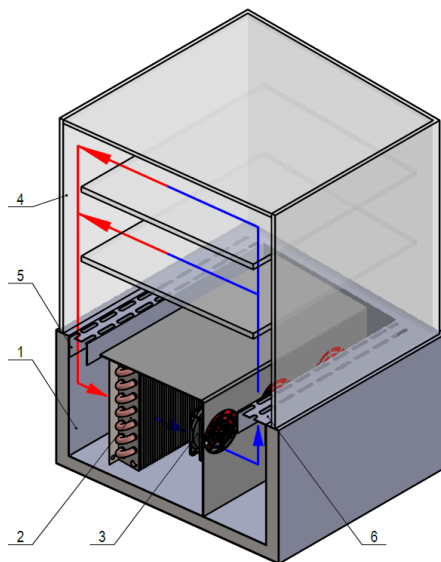
Šaldymo vitriną su šaldoma vonia sudaro trys pagrindinės dalys: ekspozicinė dalis 1, šaldymo korpusas 2, šaldymo agregatas 3, pateikta 1.6 pav. Dėl keliamų aukštų šaldymo vitrinų išvaizdos reikalavimų, ekspozicinei daliai skiriama dėmesio ne mažiau kaip šaldymo korpusui ar šaldymo agregatui. Ši dalis naudojama eksponuoti maisto produktus ar patiekalus, prieš juos patiekiant. Dėl šios priežasties šioje dalyje taip pat labai svarbu palaikyti reikalingą oro temperatūrą. Įprastai ekspozicinė dalis gaminama iš stiklo, kurią sudaro stiklinis korpusas, lentynėlės ir durelės arba stalčiukai. Nors tokia konstrukcija yra estetiškai graži, tačiau funkcionalumo požiūriu turi daug trūkumų. Pirmasis trūkumas yra neužsandinami tarpai tarp atskirų elementų, tokių kaip stiklinio korpuso ir durelių. Šie neužsandinami tarpai, dėl natūralios konvekcijos, sukuria atitinkamus šilumos nuostolius, dėl įtekančio šilto aplinkos oro į šaldomąjį tūrį. Šiuos nuostolius reikia kompensuoti intensyvinant šaldymo agregato darbą. Įprastai šaldymo įrenginiuose tokios vietos yra sandarinamos naudojant sandarinimo tarpines, tačiau dėl stiklinio korpuso, tokių tarpinių šiose konstrukcijoje naudoti galimybės nėra. Kitas trūkumas yra iš dalies didelis ekspozicinėje dalyje naudojamų medžiagų šilumos laidumas, lyginant su šaldymo korpusu. Dažniausiai ekspozicinė dalis gaminama iš grūdinto stiklo, kurio šilumos laidumas, remiantis [6] šaltiniu, yra  $0,8 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , kai tuo tarpu šaldymo korpuse naudojamos poliuretano putas šilumos laidumas, remiantis [7] šaltiniu, yra tarp  $0,022 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  ir  $0,028 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , tai yra tarp 28 ir 36 kartų mažesnis šilumos laidumas. Šiuo metu dalis tokių vitrinų yra atnaujinamos, keičiant įprastą grūdintą stiklą į stiklo paketus, kurie pasižymi mažesniu šilumos laidumu, lyginant su vieno sluoksnio grūdintu stiklu.



1.6 pav. Šaldymo vitrina su stikline ekspozicine dalimi [8]

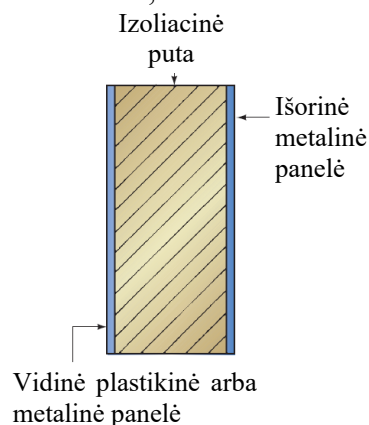
Kita labai svarbi šaldymo vitrinos su šaldoma vonia dalis yra šaldymo korpusas. Tai daugiafunkcė įrenginio dalis, kadangi joje yra laikoma dalis eksponuojamų maisto produktų bei laikomi šaldymo ciklo sukūrimui reikalingi šaldymo agregato komponentai. Šaldymo korpusas maisto produktų

laikymui naudojamas kaip vonia, į kurią talpinami GN (angl. *Gastronorm*) indai, su juose patalpintais maisto produktais. Įprastai šaldymo korpuse 1 yra patalpintas garintuvas 2 bei priverstinei konvekcijai sukurti reikalingi ventiliatoriai 3, kurie traukia arba pučia šiltesnį orą pro garintuvą ir atvėsinus jį išpučia į ekspozicinę dalį 4. Garintuvas yra talpinamas ties vienos pusės oro kanalu 5, o ventiliatoriai talpinami arčiau kitos pusės oro kanalo 6. Atsižvelgiant į tai, kuria kryptimi yra cirkuliuojamas vėsinamas oras, vienas oro kanalas skirtas oro įtraukimui, o kitas - oro išpūtimui. Tokiu būdu išdėsčius komponentus tarpusavyje yra sukuriamas oro srauto cirkuliacinis ratas šaldymo vitrinės viduje. Šaldymo korpuso, jo komponentų ir ekspozicinės dalies eskizas pateiktas 1.7 pav.



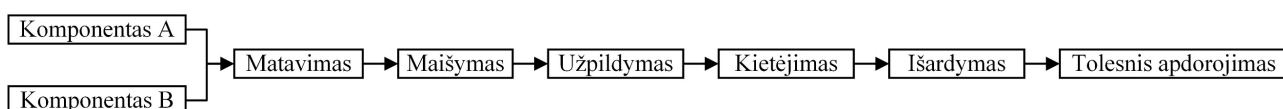
1.7 pav. Šaldymo korpuso su ekspozicine dalimi eskizas

Pats šaldymo korpusas yra gaminamas izoliuotos sluoksniuotos plokštės (angl. *insulated sandwich panel*) principu, kai tarp vidinės ir išorinės korpuso sienelių yra naudojama termoizoliacinė medžiaga (žr. 1.8 pav.). Šaldymo vitrinoms, kurios naudojamos profesionaliose virtuvėse, dažniausiai vidinių ir išorinių sienelių gamybai naudojamas nerūdijantis plienas, kurio markė yra parenkama atitinkamai pagal kainos kriterijus ir darbinės aplinkos sąlygas. Pasirenkant nerūdijantį plieną sienelių gamybai yra išvengiami korozijos procesai, kuriems susidaryti yra labai palankios sąlygos, kadangi įrenginys dažnai dirba daug drėgmės turinčioje aplinkoje. Termoizoliacinis sluoksnis gaminamas iš poliuretano putų. Šios putos pasižymi ne tik mažu šilumos laidumu, bet ir didele įtaka korpuso standumui. Šaldymo korpusas yra viena brangiausių šaldymo vitrinės dalių, kadangi jos gamybai reikalinga specializuota įranga ir technologija. Poliuretano putų sluoksnio formavimui naudojama technologija, kurios pavadinimo trumpinys yra „RIM“ (angl. *reaction injection molding*). Remiantis [10] šaltiniu, šios technologijos eiliškumas yra: tikslus dviejų reagentų kiekio išmatavimas, reagentų maišymas ir įpurškimas į šaldymo korpusą, reagentų polimerizacija ir putų susidarymas, korpuso atskyrimas nuo formavimo formos ir galutinis apdorojimas, pateikta 1.9 pav. Formuojant poliuretano putas yra naudojami du reagentai – izocianatas ir poliolis. Šių reagentų matavimui, maišymui ir įpurškimui naudojamas specialus maišymo ir įpurškimo įrenginys, kurio techninės charakteristikos priklauso nuo gaminamų konkrečių šaldymo korpūsų konfiguracijų.



1.8 pav. Šaldymo korpuso sienelės konstrukcija [9]

Reagentų polimerizacijos ir putų susidarymo metu kyla didelis slėgis, veikiantis į šaldymo korpuso sienelės, kurio dydis, pagal [10] šaltinį, yra tarp 0,2 ir 0,3 MPa. Siekiant atstoti putų susidarymo metu veikiantį slėgį į sienelės, yra naudojama specializuota putų formavimo įranga, kuri neleidžia deformuotis šaldymo korpuso sienelėms. Tokia įranga yra brangi, todėl ji yra dažniausiai naudojama serijinei šaldymo korpusų gamybai. Dėl įrangos konstrukcijos ypatybių, šaldymo korpuso dydis negali kisti, kadangi pati įranga gaminama nekintančių matmenų korpusams gaminti. Tokia sąlyga atpigina įrangą, lyginant su universalesniais ir rečiau naudojamais įrenginiais. Atsižvelgiant į šias sąlygas, po įrangos įsigijimo, tobulinant šaldymo vitrinų korpusus, įprastai šaldymo korpusų matmenys nebekoreguojami. O atvejais, kai šaldymo korpusų atnaujinimas yra būtinas, yra vertinamas atnaujinimų atsipirkimo laikotarpis, kuriame vertinama korpusų atnaujinimo sukuriama pridėtinė vertė ir įrangos modernizacijos kaštai.



1.9 pav. „RIM“ technologinio proceso eiliškumas [10]

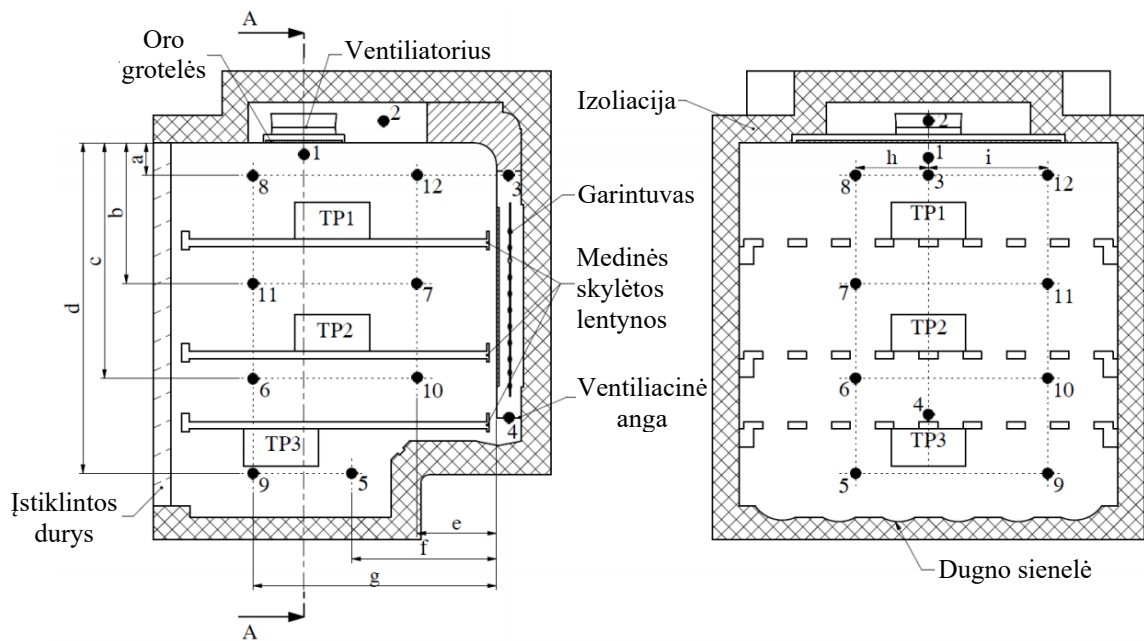
Trečioji svarbiausia šaldymo vitrinės dalis yra šaldymo agregatas (žr. 1.10 pav.). Ši dalis yra atsakinga už šaldymo ciklo palaikymą. Šaldymo agregate patalpinti visi tarpusavyje sukonfigūruoti komponentai, kurie atlieka atitinkamas funkcijas šaldymo ciklo vykdyme. Šie komponentai yra jungiami nuosekliai, atitinkamose pozicijose, atsižvelgiant į šaldymo ciklo eiliškumą (žr. 1.1 pav.). Šaldymo vitrinose didžioji dauguma šių komponentų yra laikomi kompresorinėje ir šioje dalyje jie užtikrina kondensacinį šaltnešio procesą, o garintuvas yra laikomas šaldymo korpuse ir atlieka šaldymo procesą. Dėl šaltnešio kondensavimo proceso, kondensatorius išskiria daug šilumos į aplinką. Taip pat šaldymo proceso metu įkaista ir kompresorius, kuris taip pat išskiria į aplinką šilumą. Dėl šių komponentų skleidžiamos šilumos ir jų patalpavimo po šaldymo korpusu, jie šaldymo korpuso dugną įšildo, todėl šaldymo korpuso šilumos mainai su aplinka paintensyvėja ir tokiu būdu šaldymo vitrinėje esantis oras sparčiau įšyla. Taip pat didesnė aplinkos oro temperatūra ir drėgmė lėtina kondensacinį procesą kondensatoriuje, dėl kurio sumažėja šaldymo proceso efektyvumas. Šie poveikiai priverčia trumpinti šaldymo įrenginių paleidimo periodą, o tai įtakoja didesnes elektros energijos sąnaudas. Siekiant sužeminti kondensatoriaus ir kompresoriaus temperatūras eksploatacijos metu, yra naudojamas papildomas šių komponentų aušinimas. Dažniausiai šis aušinimas vykdomas naudojant ventiliatorių, kuris yra statomas už kondensatoriaus. Šis ventiliatorius traukia oro srautą iš aplinkos ir jį traukia pro kondensatorių, tokiu būdu vėsindamas kondensatorių. Siekiant šį išilusį orą pašalinti iš kompresorinės, yra naudojami oro srauto takai, kurie išilusį oro srautą nukreipia į aplinką. Dėl šių prižasčių montuojant šaldymo vitrinas yra labai svarbu numatyti, ar bus galimybė įtraukti reikiamą aplinkos oro kiekį ir ar šį įtrauktą ir išilusį orą bus galimybė išpūsti iš šaldymo vitrinės taip, kad jis nebūtų vėl įtraukiamas pro kondensatorių. Pasitaiko atvejų, kai šaldymo vitrinės su šaldoma vonia yra jungiamos į centrinę šaldymo sistemą. Tokiu atveju kompresorinės po šaldymo vitrina su šaldoma vonia nebelieka, kadangi šaltnešio kondensacinis procesas vykdomas centrinės šaldymo sistemos kondensatoriuje.



1.10 pav. Šaldymo korpusas su atviru šaldymo agregatu [11]

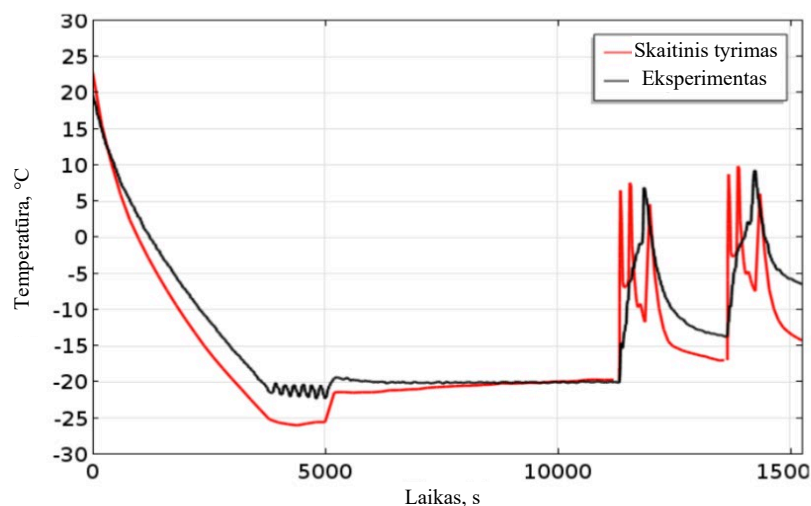
### 1.3. Šaldymo įrenginių tyrimai

Šaldymo vitrinų su šaldomomis voniomis veikimo principas bei konstrukcijos yra labai panašios į šaldomųjų prekystalių su vitrinomis bei šaldymo spintų ir spintelių, skirtų profesionaliajam naudojimui. Dėl šios priežasties šaldymo vitrinai su šaldoma vonia galima taikyti panašius tyrimų metodus. Įprastai pramoniniams poreikiams eksperimentai atliekami siekiant nustatyti įrenginio energetinę bei klimato klases. Standartizuoti šaldomųjų prekystalių su vitrinomis eksperimentai atliekami remiantis ISO 23953 standartu, o šaldymo spintų ir spintelių, skirtų profesionaliajam naudojimui, remiantis ISO 22041 standartu. Šiuose standartuose nurodoma kokioje aplinkos temperatūroje ir drėgmėje turi būti atliekamas eksperimentas, siekiant įrenginiui priskirti atitinkamą energetinę ir klimato klases. Atliekant standartizuotus eksperimentus, taip pat nurodoma kokio dydžio ir kuriose vietose yra patalpunami apkrovimo paketai, kurie imituoja maisto produktus. Tiriant šaldymo vitrinų su šaldomomis voniomis funkcionalumą, kurių šaldymo būdas yra dinaminis, atsižvelgiama į du pagrindinius kriterijus: temperatūros pasiskirstymą šaldomajame tūryje ir oro srauto greitį. Tolygesnis temperatūros pasiskirstymas veikia tolygesnį maisto produktų vėsinimą dėl kurio produktų šviežumas ir galiojimo laikas tampa tolygesnis. Eksploatuojant šaldymo vitriną, kurios šaldymo būdas yra dinaminis, siekiama, kad oro srauto greitis būtų kuo mažesnis, kadangi didėjant oro srauto greičiui, paaugėja maisto produktų sausėjimas. Oro srauto greitis veikia ir temperatūros pasiskirstymą po šaldomąją kamerą bei šilumos mainų intensyvumą orui tekant pro garintuvą. Taip pat atliekant šaldymo vitrinų su šaldoma vonia eksperimentus, siekiama nustatyti skaičiuojamųjų modelių kraštines bei pradines sąlygas. Šios sąlygos naudojamos norint pasiekti skaičiuojamojo modelio validaciją. Atliekant temperatūros pasiskirstymo tyrimą įprastai naudojamos termoporos, kurios būna priklijuojamos charakteringuosiuose taškuose (žr. 1.11 pav.). Labai svarbu eksperimento metu matuoti ne tik šaldymo korpuse esančią temperatūrą, bet ir aplinkos temperatūrą bei oro drėgmę. Šie du faktoriai tiesiogiai veikia šaldymo agregato darbo efektyvumą bei šilumos mainų intensyvumą. Dažniausiai eksperimento metu tiriant oro srauto pasiskirstymą bei jo greitį yra naudojamas anemometras. Analogiškai kaip ir matuojant temperatūrą, taip ir matuojant oro srauto greitį, anemometras yra talpinamas skirtinguose charakteringuose taškuose. Matuojant oro srauto greitį dažniausiai siekiama nustatyti kaip tolygiai pasiskirsto oro srautas tarp skirtingo lygmens lentynėlių. Taip pat, pagal poreikį, atliekant eksperimentus panaudojamas dūmų generatorius. Panaudojus dūmų generatorių siekiama vizualiai nustatyti oro srauto pasiskirstymą bei nustatyti sritis, kuriose susidaro oro srauto recirkuliacija.



1.11 pav. Charakteringųjų taškų išdėstymo schema [12]

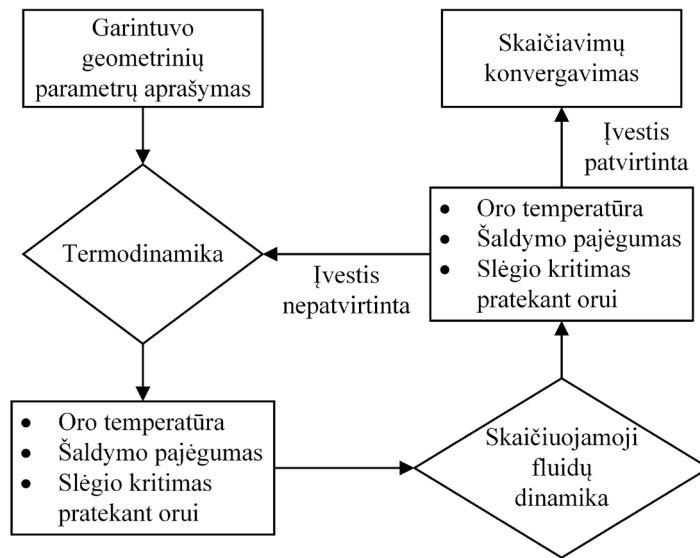
Atliekant šaldymo įrenginių kūrimą bei vystymą atliekami ir skaičiuojamosios fluidų dinamikos skaičiavimai. Siekiant sukurti patikimą skaičiuojamąjį skaitinį modelį atliekama rezultatų validacija. Validacijos metu yra lyginamos temperatūrų reikšmės charakteringuosiuose taškuose tarp eksperimento metu gautų rezultatų bei skaitiniais būdais apskaičiuotų rezultatų (žr. 1.12 pav.). Įprastai validacijai patvirtinti skaičiavimai atliekami pradedant nuo pradinių aplinkos ir įrenginio sąlygų, iki kol būna įvykdytas vienas kompresoriaus įjungimo periodas, po pasiektos reikiamos darbinės įrenginio šaldymo temperatūros. Įvykdžius vieną periodą laikoma, kad toliau tęsti skaičiavimų nėra prasminga, nes šaldymo ciklas tęsis įprastu periodu.



1.12 pav. Eksperimento ir skaitinių skaičiavimų rezultatų validacija [13]

Skaitiniams skaičiuojamosios fluidų dinamikos skaičiavimams naudojamas baigtinių tūrių metodas. Taikant šį metodą skaičiuojamasis domenai yra diskretizuojamas į baigtinių tūrių tinklą. Siekiant

sukurti validuojantį skaičiuojamąjį modelį svarbu diskretizuoti domeno tinkliuką iki tokio lygmens, kad tinkliuko dydis neveiktų rezultatų jautrumo ir tokį skaičiuojamąjį modelį galima būtų laikyti nepriklausomą nuo tinkliuko tankio. Šiam rezultatų jautrumui pašalinti, tinkliukas yra tankinamas atitinkamose skaičiuojamojo domeno srityse. Atliekant šio tipo temperatūros pasiskirstymo tyrimus dažniausiai sutankinamos dvi sritys – didžiausių temperatūros ir oro srauto greičio gradientų sritys. Dėl šios priežasties įprastai tinkliukas intensyviai tankinamas ties garintuvo sritimi, ventiliatorių sritimis, perforacijų ir įtraukimo bei išpūtimo kanalų sritimis. Taip pat dažniausiai šiose srityse pasireiškia ir didžiausi oro srauto vektorių kitimai, dėl to gali pasireikšti oro srauto sukuriavimas. Rezultatų validavimui didelę įtaką turi tinkamai parinktos pradinės ir kraštinės skaičiuojamojo modelio sąlygos. Kadangi dažniausiai šaldymo įrenginiams atliekami pereinamojo proceso tipo skaičiavimai, svarbu atkreipti dėmesį į pradinių ir kraštinių sąlygų kitimą laiko atžvilgiu. Viena iš kintančių pradinių sąlygų yra poliuretano putų šiluminio laidumo priklausomybė nuo aplinkos temperatūros. Šaltinyje [14] nurodoma, kad poliuretano putų šiluminis laidumas didėja, kai atitinkamai didėja poliuretano putų temperatūra. Vertinant šilumos mainų intensyvumą laiko atžvilgiu svarbu įvertinti kraštines sąlygas, atsižvelgiant į kitų parametų reikšmių įtaką. Vienu didžiausių iššūkiu atliekant šaldymo įrenginio skaičiavimus yra garintuvo kraštinės sąlygos įvertinimas. Dažniausiai taikomas būdas skaičiuojant šaldymo įrenginį, kurio veikimo būdas yra dinaminis, yra įvertinti garintuvo modelį kaip monolitinę akytą medžiagą, pro kurią tekant oro srautui pasireikštų oro srauto slėgio kritimas ir šilumos mainų intensyvumas. Tyrimuose vertinant oro srauto slėgio kritimą dažniausiai remiamasi eksperimentiniais rezultatais, kurie nustatyti matuojant slėgio kritimą orui nutekėjus pro fizinį garintuvą. Vertinant garintuvo šilumos sugėrimo ir šilumos mainų intensyvumus yra naudojami įvairūs būdai. Atliekant tyrimą [15], naudojant empirines formules bei šaldymo agregato parametrus apskaičiuojamas garintuvo šilumos mainų koeficientas bei šilumos srautas, o šios reikšmės priskiriamos akytos medžiagos monolitui. Kitas būdas, taikytas [16] tyrime, yra eksperimento metu matuoti garintuvo paviršiaus temperatūrą. Ši temperatūra yra analogiškai priskiriama monolitiniams akytos medžiagos blokui, kuris imituoja garintuvą, o šilumos mainų koeficientas apskaičiuojamas taikant analitines formules [16]. Paprasčiausias taikomas būdas, įvertinant garintuvo poveikį, yra nemodeliuoti pačio garintuvo, o eksperimento metu išmatavus temperatūrą, išpučiamą iš ventiliatorių arba išpūtimo kanalo, taikyti ją ir skaitiniame modelyje, nurodant išpučiamą oro srauto masės debitą ir temperatūrą [17]. Šis būdas yra labiau tinkamas sprendžiant nusistovėjusio proceso uždavinius, kai vertinamas oro srauto pasiskirstymas ir temperatūros pasiskirstymas sraute, dažniausiai naudojamas tiriant oro srauto užuolaidas pramoninėse vitrinose. Visuose dinaminiais būdais paremtuose šaldymo įrenginių skaičiavimuose yra įvertinamas ventiliatoriaus poveikis. Įprastai ventiliatoriaus priklausomybė išreiškiama priklausomybe tarp slėgio ir tūrinio debito. Skaitiniuose tyrimuose, atliekamuose tiriant šaldymo įrenginius, yra įvertinama pasireiškianti trinties jėga tarp kietų kūnų sienelių ir fluido. Įvertinus šią sąlygą ties sienelėmis formuojasi pasienio sluoksnis, kuris veikia srauto tekėjimo būdo kitimą iš laminarinio į turbulentinį. Taip pat šią sąlygą svarbu įvertinti siekiant įvertinti temperatūros pasiskirstymą ties sienelių paviršiais. Šaldymo įrenginių skaičiavimuose, kuriuose naudojamas supaprastintas garintuvo poveikis šilumos mainams, dalis parametų verčių yra vertinamos naudojant iteracinį būdą, remiantis eksperimento metu gautais rezultatais (žr. 1.13 pav.).



**1.13 pav.** Iteracinio būdo taikymas siekiant sudaryti validuojantį skaičiuojamąjį modelį, keičiant garintuvo parametrus [18]

## 2. Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia eksperimentinis tyrimas

Atliekant šaldymo vitrinos su šaldoma vonia eksperimentinį tyrimą, siekiama nustatyti temperatūros pasiskirstymo tolygumą šaldomajame tūryje. Temperatūros pasiskirstymo tolygumo nustatymui temperatūra matuojama keliuose skirtinguose charakteringuose taškuose. Atlikus eksperimentą ir išanalizavus rezultatus, galima numatyti tiriamojo įrenginio veikimo ypatybes bei tobulintinas vietas. Taip pat, remiantis eksperimento rezultatais, numatoma sukurti skaičiuojamąjį modelį. Šis eksperimentinis tyrimas atliekamas nesertifikuotoje laboratorijoje. Taip pat, šaldymo vitrinos su šaldoma vonia konstrukcijos negalima tiesiogiai priskirti prie šaldomojo prekystalio su vitrina konstrukcijos ar šaldymo spintelės, skirtos profesionaliajam naudojimui, konstrukcijos. Dėl šių priežasčių eksperimentas yra atliekamas netiesiogiai vadovaujantis ISO 23953 ar ISO 22041 standartų nurodymais. Nors laboratorija, kurioje atliekamas eksperimentas, yra nesertifikuota, tačiau joje dirbtiniu būdu pavyksta palaikyti pastovią aplinkos temperatūrą ir drėgmę. Viso eksperimento metu patalpoje nebuvo jokio judėjimo ar kitų išorinių poveikių, kurie galėtų veikti eksperimento rezultatus. Taip pat, eksperimento metu nebuvo darinėjamos šaldymo vitrinos su šaldymo vonia durelės ar kitu būdu trikdomas įrenginio veikimas tam, kad nebūtų sutrikdytas šaldymo ciklas. Kadangi eksperimentas atliktas netiesiogiai vadovaujantis tarptautiniais standartais, tiriamajame įrenginyje nebuvo naudojami apkrovimo paketai, kurie imituoja maisto produktus. Nors tiriamoje šaldymo vitrinoje su šaldoma vonia yra galimybė naudoti šaldomą vonią ir joje laikyti „GN“ indus, žinoma, kad tokia funkcija naudojama retai. Dėl šios priežasties eksperimentas atliekamas su neapkrauta šaldoma vonia. Prieš eksperimento atlikimą, tiriamasis įrenginys laboratorijoje laikytas penkias paras, siekiant suvienodinti tiriamojo įrenginio temperatūrą su aplinkos temperatūra. Tokiu būdu sumažinamos matavimo paklaidos bei, kuriant skaičiuojamąjį modelį, tiksliau įvertinamos pradinių temperatūrų sąlygos. Tiriamoji šaldymo vitrina su šaldoma vonia pateikta 2.1 pav.



2.1 pav. Tiriamoji šaldymo vitrina su šaldoma vonia



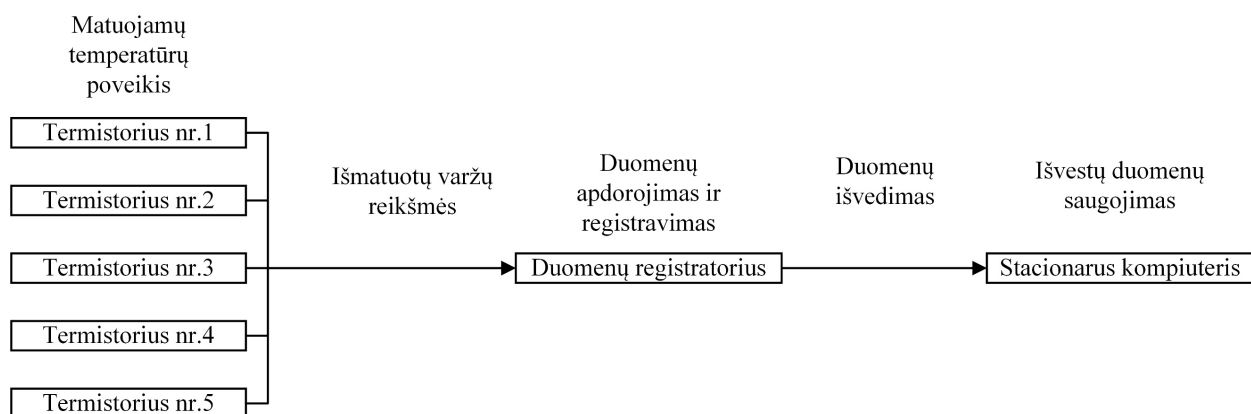
## 2.1. Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia eksperimentinio tyrimo atlikimas

Siekiant sistemingai matuoti ir saugoti išmatuotus rezultatus, sukuriama temperatūrų verčių matavimo sistema. Šios sistemos tikslas yra nuolatos matuoti temperatūrų reikšmes ir jas saugoti atitinkamu laiko periodu. Matuojant temperatūros pasiskirstymą šaldymo vitrinos su šaldoma vonia viduje svarbu, kad matuojantis jutiklis būtų atsparus drėgmei. Vėsinant orą, šaldomajame tūryje susidaro didelis temperatūros gradientas tarp tiriamojo įrenginio vidinio tūrio ir aplinkos. Dėl šios priežasties šaldomajame tūryje pradeda formotis rasa, kuri padidina recirkuliuojamo oro drėgmę. Tai veikia drėgmės nusėdimą ant vėsinamų objektų. Įrenginio viduje esančios temperatūros matavimui panaudoti „NTC 10k“ termistoriai (žr. 2.2 pav.). Naudojami termistoriai yra padengti termoplastikine guma, kurios dėka yra pasiekama IP67 atsparumo aplinkos poveikiui klasė. Šios atsparumo aplinkos poveikiui klasės užtenka, kad susidaranti drėgmė neįtakotų matuojamų reikšmių tikslumui. Eksperimente naudojamų termistorių matuojamos temperatūros intervalas yra tarp  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ir  $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o išmatuotų reikšmių tikslumas yra  $\pm 1\%$ .



2.2 pav. „NTC 10k“ laidinis termistorius [19]

Tyrimo metu naudoti penki termistoriai, kuriais buvo matuojama tik juos supančio oro temperatūra. Šių termistorių išmatuotų reikšmių apdorojimui ir registravimui panaudotas aštuonių kanalų duomenų registratorius. O duomenų išvedimui ir saugojimui naudojamas stacionarus kompiuteris (žr. 2.3 pav.).



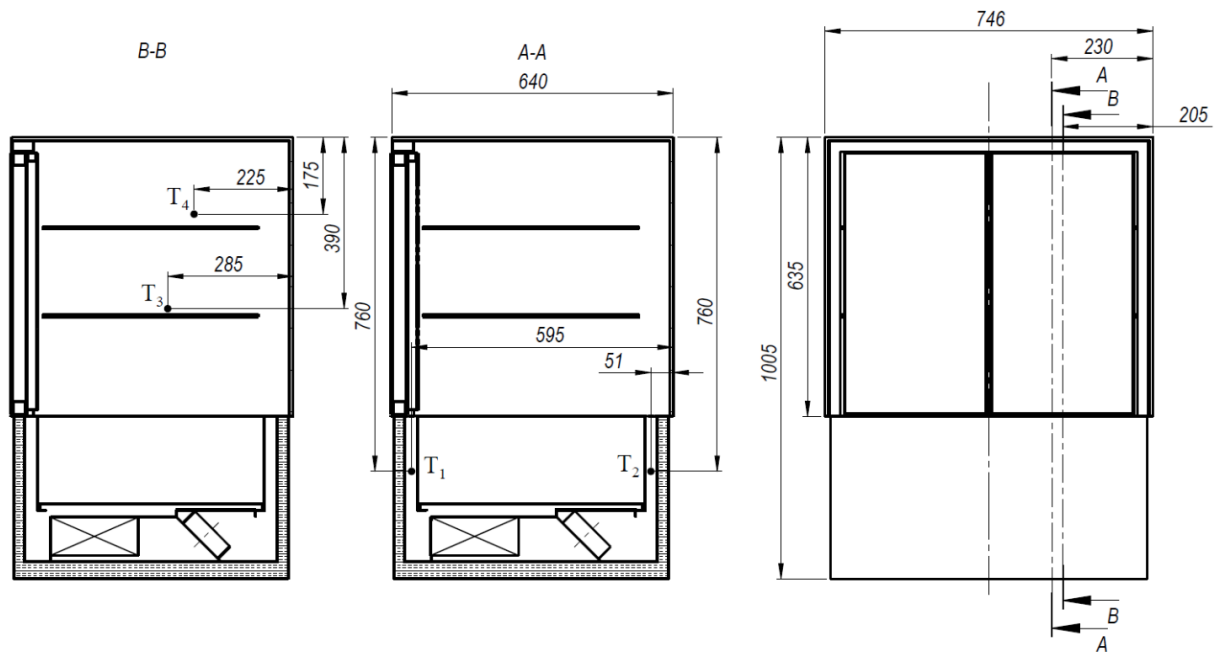
2.3 pav. Matuojamų temperatūrų apdorojimo ir saugojimo schema

Eksperimento metu pasirinkta temperatūrą matuoti penkiuose skirtinguose taškuose. Siekiant sukurti kuo tikslesnį validuojantį modelį ir įvertinant garintuvo generuojamą šilumos sugėrimą, vienas matuojamasis taškas  $T_1$  yra patalpintas išpučiamo oro kanale. Sekantis taškas  $T_2$ , matuojantis į garintuvą įtraukiamą oro temperatūrą į garintuvą, patalpintas įtraukiamo oro kanale. Siekiant tolygiau paskirstyti temperatūrą tarp skirtingų tiriamosios šaldymo vitrinos su šaldoma vonia sekcijų, buvo naudojama perforuoto stiklo durelių konstrukcija (žr. 2.4 pav.). Apatinis durelių perforacijų segmentas skirtas vėsinti šaldomos vonios dalį. Vidurinis perforacijų segmentas skirtas vėsinti apatinę lentynėlę, o viršutinis durelių perforacijų segmentas yra skirtas vėsinti viršutinę lentynėlę. Dėl šios durelių konstrukcijos pasirinkta matuoti temperatūrą apatinėje lentynėlėje  $T_3$  ir viršutinėje lentynėlėje  $T_4$ .

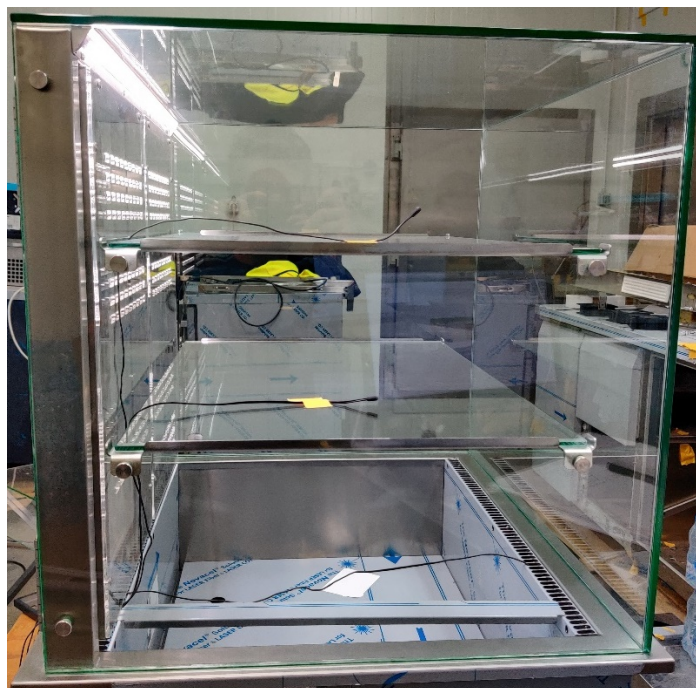


**2.4 pav.** Tiriamojoje šaldymo vitrinoje su šaldoma vonia naudojamų durelių konstrukcija

Paskutinis temperatūros matavimo taškas  $T_5$  skirtas matuoti aplinkos temperatūrą. Matuojant aplinkos temperatūrą ilguoju laikotarpiu galima įvertinti, ar galimiems įrenginio veikimo nuokrypiams įtakos sudarė aplinkos veiksniai. Visų matuojamųjų taškų termistoriai patalpinti taip, kad neturėtų kontakto su aplink esančiais kietais kūnais. Tokiu būdu eliminuojamos galimos temperatūrų matavimo paklaidos, kurias gali veikti įšilę arba atitinkamai atvėsę kieti kūnai. Aplinkos drėgmė yra matuojama prieš įrenginio paleidimą ir stabdant eksperimentą. Tiriamojoje šaldymo vitrinoje su šaldoma vonia naudojamo valdiklio temperatūrinio daviklio rezultatai nėra registruojami. Šis valdiklio temperatūrinis daviklis yra talpinamas įtraukiamo oro kanale, siekiant išmatuoti grįžtamą oro temperatūrą iš šaldomojo tūrio, pagal kurią yra nustatoma, ar garintuvus įjungiamas, ar išjungiamas, atsižvelgiant į nustatytą palaikomąjį temperatūros intervalą. Dėl šios priežasties priimama, kad matuojamojo taško  $T_2$  reikšmė atitinka tiriamojo įrenginio temperatūrinio daviklio matuojamą reikšmę. Matuojamųjų temperatūrų reikšmių taškų išdėstymas pateiktas 2.5 pav. ir 2.6 pav.



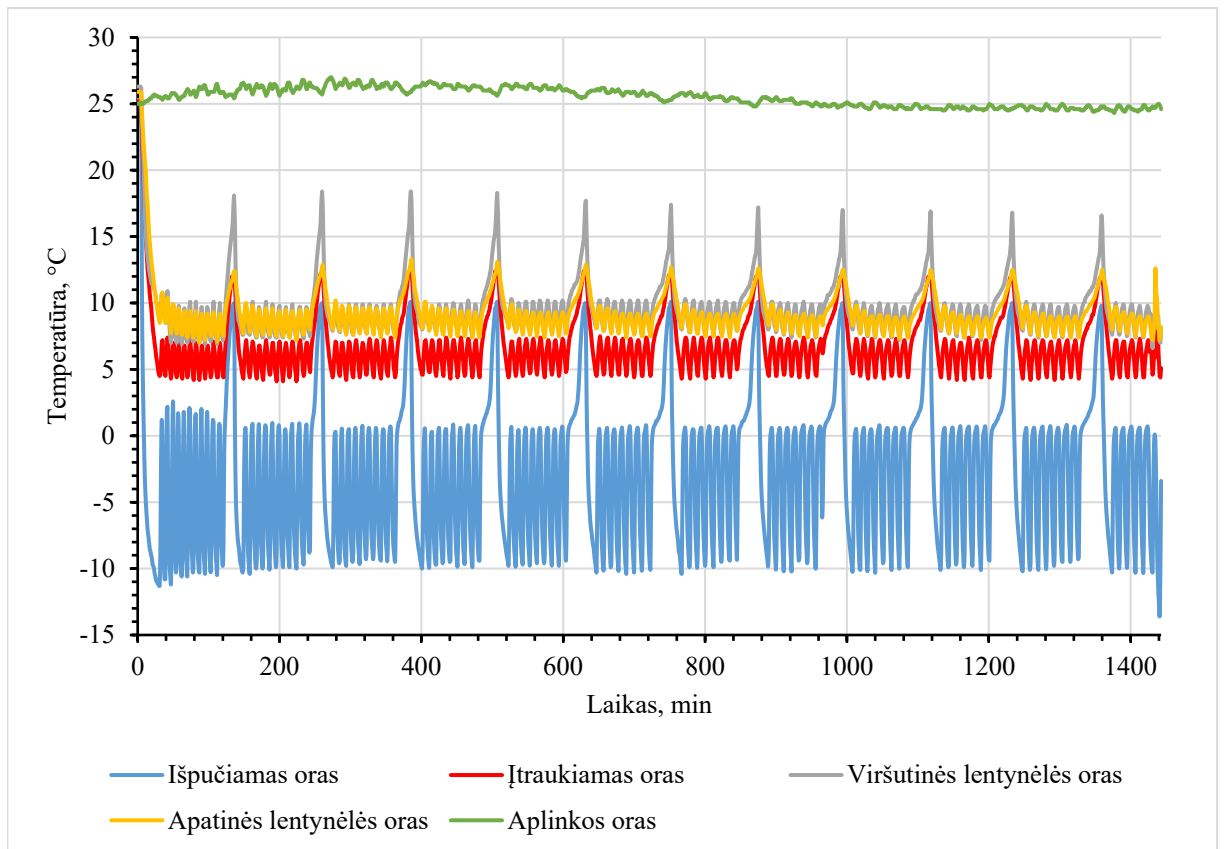
2.5 pav. Charakteringųjų matavimo taškų išdėstymo schema



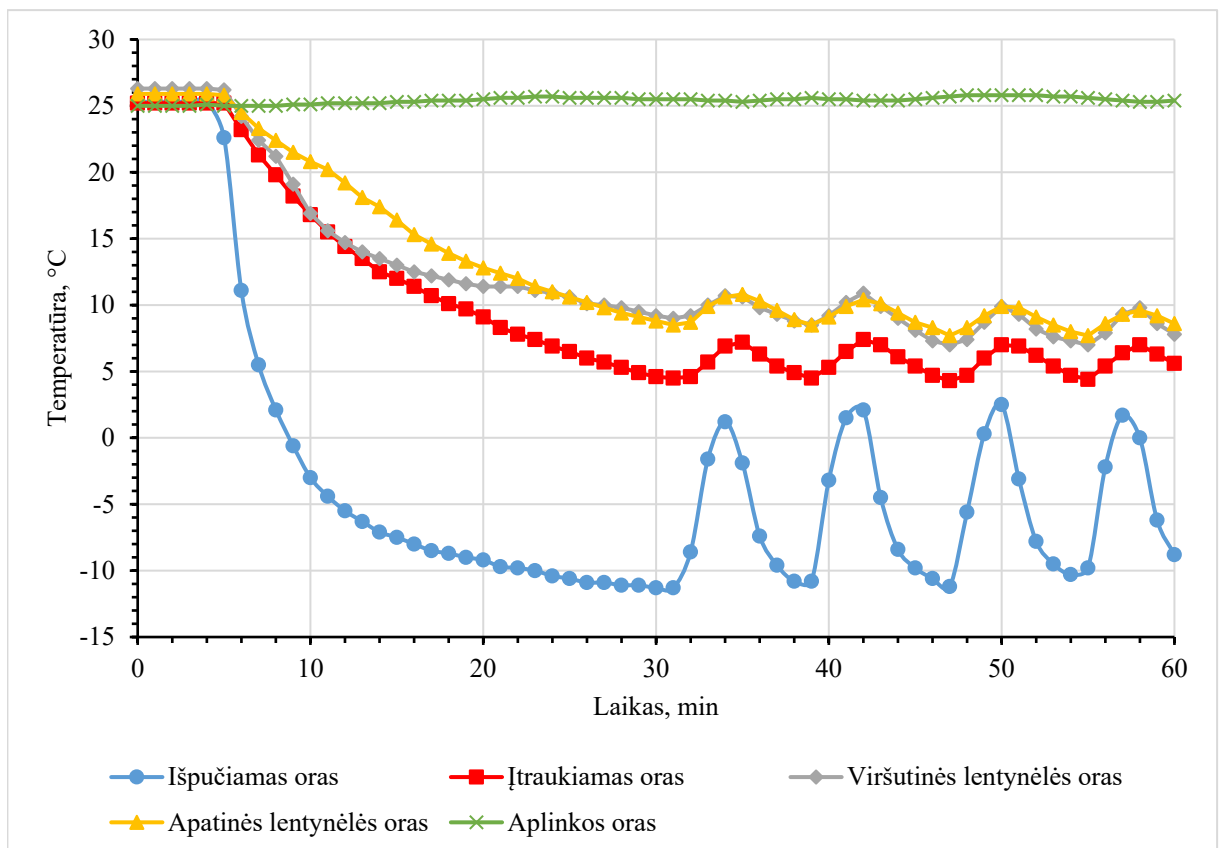
2.6 pav. Termistorių išdėstymas tiriamojoje šaldymo vitrinoje su šaldoma vonia

## 2.2. Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia eksperimentinio tyrimo rezultatai

Eksperimento metu pasirinkta temperatūrų reikšmės saugoti vienos minutės periodu. Tiriamoji šaldymo vitrina su šaldoma vonia pirmąsias keturias minutes po termistorių išdėliojimo nebuvo įjungta. Tokiu būdu siekiama pasiekti nusistovėjusias pradines temperatūrų reikšmes. Tiriamasis įrenginys buvo įjungtas visą parą. Paros trukmės išmatuoti rezultatai pateikti 2.7 pav. Taip pat, siekiant detaliau išanalizuoti tiriamojo įrenginio veikimą, sudarytas mažesnio mastelio, valandos trukmės, rezultatų grafikas (žr. 2.8 pav.).



2.7 pav. Visą parą matuojamų temperatūrų verčių rezultatai



2.8 pav. Valandos trukmės matuojamų temperatūrų verčių rezultatai

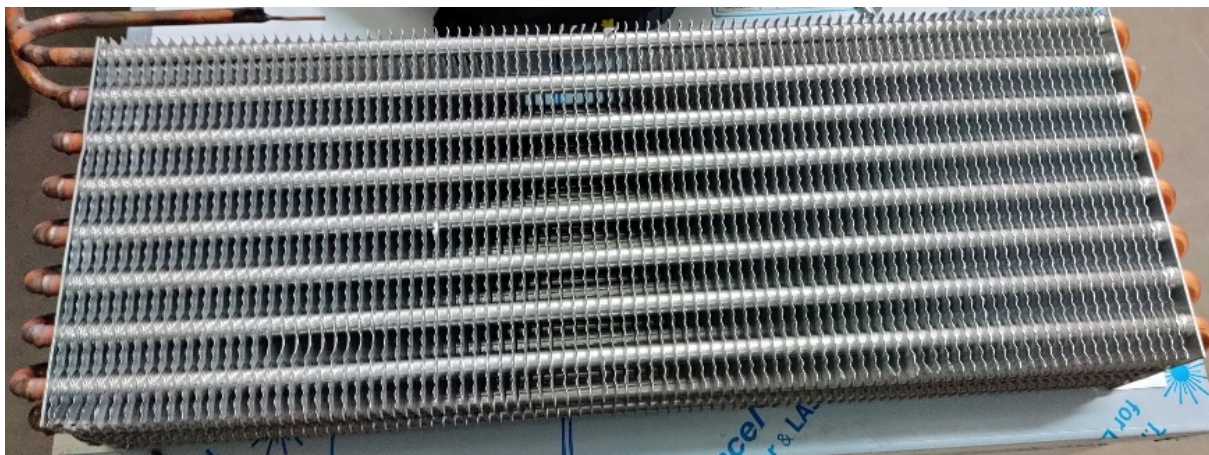
Iš visą parą išmatuotų temperatūrų rezultatų (žr. 2.7 pav.) galima pastebėti, kad šaldymo procesas yra pastovus. Šiuo atveju pastebimas sąlyginai nedidelis aplinkos temperatūros kritimas iš vidutiniškai +26,5 °C į +24,8 °C, temperatūra santykinai pažemėjo 6,85 %, o absoliutinis skirtumas yra 1,7 °C. Žvelgiant į išmatuotų temperatūrų reikšmių grafiką galima pastebėti, kad buvo būdingi temperatūrų šuoliai nuo 136 min. po paleidimo, vidutiniškai kas 125 minutes. Šie šuoliai būdingi dėl atitirpinimo funkcijos. Ši funkcija skirta atitirpinti šerkšną, susidariusį ant garintuvo lamelių. Atliekant atitirpinimo funkciją yra išlaikomas pastovus šilumos mainų intensyvumas tarp garintuvo ir pratekančio oro srauto. Taip pat, ši funkcija neleidžia susidarančiam šerkšniui per daug sumažinti tarpo tarp lamelių, kad oro srautas galėtų kuo mažiau trikdomas pratekėti. Apžvelgdami valandos trukmės rezultatus (žr. 2.8 pav.) galime pastebėti, kad kompresoriaus įjungimo periodas yra 8 minutės. Atsižvelgiant į įtraukiamo oro temperatūrą pastebime, kad darbinė įrenginio temperatūra svyruoja tarp +4,5 °C ir +7 °C. Per pirmąją įrenginio įjungimo valandą vidutinė aplinkos temperatūra buvo +25,4 °C. Žemiausia pasiekama išpučiamo oro temperatūra yra -11,3 °C, atitinkamai įtraukiamo oro +4,5 °C, apatinės lentynėlės oro +8,5 °C ir viršutinės lentynėlės oro +9 °C. Absoliutinis skirtumas tarp įtraukiamo oro ir apatinės lentynėlės oro yra 4 °C, o tarp viršutinės lentynėlės yra 4,5 °C. Santykinis skirtumas tarp įtraukiamo oro temperatūros ir oro temperatūrų lentynėlėse atitinkamai yra 88,9 % ir 100 %. Tai yra gana didelis santykinis skirtumas. Iš turimų eksperimentinių rezultatų sudėtinga nuspėti, dėl kokios priežasties susidaro toks didelis santykinis skirtumas. Dėl šios priežasties yra naudinga atlikti skaitinius skaičiavimus, siekiant numatyti kas įtakoja problemą ir kokiais būdais būtų galima ją sumažinti.

### 3. Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia skaitinis tyrimas

Atlikdami šaldymo vitrinos su šaldoma vonia skaitinį tyrimą, siekiame sudaryti kuo įmanoma tiksliau validuojantį skaičiuojamąjį modelį. Sukūrus priimtina skaičiuojamąjį modelį atlikti detalių ir jų išdėstymo modifikacijas. Atlikus modifikacijas yra siekiama nustatyti jų veikimą bendram temperatūros pasiskirstymui po šaldomąjį tūrį. Validuojančio modelio kūrimas yra paremtas iteracinio metodo taikymu, patikslinant atitinkamas reikšmes ir priklausomybes bei sekant jų įtaką bendram temperatūros pasiskirstymui po šaldomąjį tūrį.

#### 3.1. Garintuvo skaitinio modelio kūrimas

Labai svarbi ir viena pagrindinių šaldymo vitrinos su šaldoma vonia skaitinio modelio dalis yra garintuvo modelis. Šios dalies modelis aprašo šilumos mainų charakteristikas, kurios tiesiogiai įtakoja temperatūros pasiskirstymą šaldomajame tūryje. Garintuvo darbinis procesas yra sudėtingas, susidedantis iš daugelio kintamųjų, todėl atliekant šaldymo vitrinos su šaldoma vonia temperatūros pasiskirstymo tyrimą, siekiama supaprastinti garintuvo modelį. Tokiu būdu skaičiavimų kompiliacinis laikas sutrumpėja, tačiau atitinkamai sumažėja skaičiavimų tikslumas. Nepaisant to, temperatūros pasiskirstymo po šaldomąjį tūrį tendencija išlieka pakankamai tiksli, todėl mažesnis garintuvo poveikio tikslumas yra priimtinas. Kuriant šaldymo vitrinos su šaldoma vonia skaitinį skaičiuojamąjį modelį garintuvas modeliuojamas kaip monolitinis blokas su akytos medžiagos savybėmis. Aprašant akytos medžiagos savybes, svarbu nustatyti dvi pagrindines garintuvui būdingas charakteristikas: per garintuvą tekančio oro slėgio kritimą ir šilumos mainų dydį bei intensyvumą. Tiriamojoje šaldymo vitrinoje su šaldoma vonia naudojamas fizinis garintuvas pateiktas 3.1 pav. ir 3.2 pav.

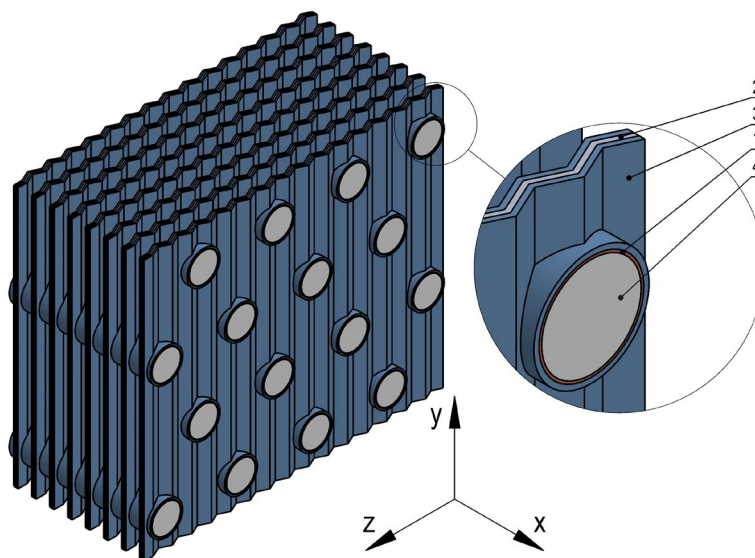


3.1 pav. Fizinis tiriamosios šaldymo vitrinos su šaldoma vonia garintuvas iš viršaus



3.2 pav. Fizinis tiriamosios šaldymo vitrinos su šaldoma vonia garintuvas iš priekio

Garintuvui dirbant ir nuolatos vėsinant pratekanti orą, ant lamelių formuojasi šerkšnas. Susidariusio šerkšno storis nuolatos kinta, priklausomai nuo oro drėgmės ir kiek laiko garintuvas įsidirbęs bei koks laiko tarpas yra nuo atitirpinimo proceso. Modeliuojant skaitinį garintuvo modelį priimta, kad ant lamelių susiformavusio šerkšno storis yra 1 mm. Garintuvo plokštelių geometrija yra sudėtingos formos, taip pat ir darbinių plokštelių kiekis yra santykinai didelis. Dėl šios priežasties, siekiant sumažinti skaičiavimų kompiliacinį laiką, tiriant garintuvo charakteristikas, panaudotas tik garintuvo segmentas. Segmentas sudarytas atsižvelgiant į fizinio garintuvo simetriškumą profilineje plokštumoje bei į pjūvio simetriškumą, lamelių išdėstymo žingsnio atžvilgiu. Garintuvo segmentą sudaro variniai vamzdeliai 1, lamelės 2, šerkšnas 3 ir šaltnešis 4, pateikta 3.3 pav.



3.3 pav. Sumodeliuoto garintuvo segmento eskizas

Akytos medžiagos charakteristikų aprašymas pradedamas nuo slėgio kritimo charakteristikų aprašymo. Remiantis [20] šaltiniu, akytos medžiagos pasipriešinimas fluido tekėjimui aprašomas:

$$k = - \frac{\nabla P}{\rho v} \quad (1)$$

čia  $k$  – fluido tekėjimo pasipriešinimo koeficientas;  $\nabla P$  – slėgio gradientas (Pa/m);  $\rho$  – fluido tankis ( $\text{kg/m}^3$ );  $v$  – fluido greitis (m/s).

Atsižvelgiant į [21] šaltinyje pateiktą metodiką, priimama kad slėgio gradientas, oro srautui tekant išilgai tiriamuoju objektu, kinta tiesiškai per visą pratekamo tiriamojo objekto skerspjūvį. Dėl šios priežasties slėgio gradientas aprašomas:

$$\nabla P = \frac{\Delta P}{L} \quad (2)$$

čia  $\Delta P$  – slėgio kritimo reikšmė (Pa);  $L$  – charakteringasis fluido pratekamo kūno ilgis (m).

Kuriamoje akytoje medžiagoje fluido tekėjimo pasipriešinimo koeficientas aprašomas taikant priklausomybę nuo pratekančio fluido greičio. Remiantis [20] šaltiniu, ši priklausomybė aprašoma:

$$k = \frac{Av + B}{\rho} \quad (3)$$

čia  $A$  ir  $B$  – nuo slėgio kritimo gradiento dėsningumo priklausančios konstantos.

Pagal [21] šaltinio metodiką, išvedama slėgio kritimo gradiento priklausomybė nuo greičio:

$$-\nabla P = Av^2 + Bv \quad (4)$$

Akytos medžiagos akytumą, remiantis [21] šaltiniu, galima apskaičiuoti:

$$\varepsilon = \frac{V_{ertmių}}{V_{pilnutinis}} \quad (5)$$

čia  $\varepsilon$  – akytumas;  $V_{ertmių}$  – tuščių ertmių užimamas tūris ( $m^3$ );  $V_{pilnutinis}$  – pilnutinis tiriamojo kūno tūris ( $m^3$ ).

Siekiant nustatyti modeliuojamos akytos medžiagos sugeriamą šilumą iš pro ją tekančio oro, naudojama [22] šaltinyje aprašyta formulė:

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (6)$$

čia  $q$  – šilumos perdavimas (W);  $U$  – šilumos perdavimo koeficientas ( $W/m^2 \cdot K$ );  $A$  – darbinis plotas ( $m^2$ );  $\Delta T$  – įtekančio ir ištekančio oro temperatūrų skirtumas (K).

Akytos medžiagos modelyje šilumos mainų intensyvumą apibūdina tūrinis šilumos perdavimo koeficientas. Šis koeficientas, pagal [23] šaltinį, apskaičiuojamas:

$$\alpha_V = \frac{q_V}{T_w - T_f} \quad (7)$$

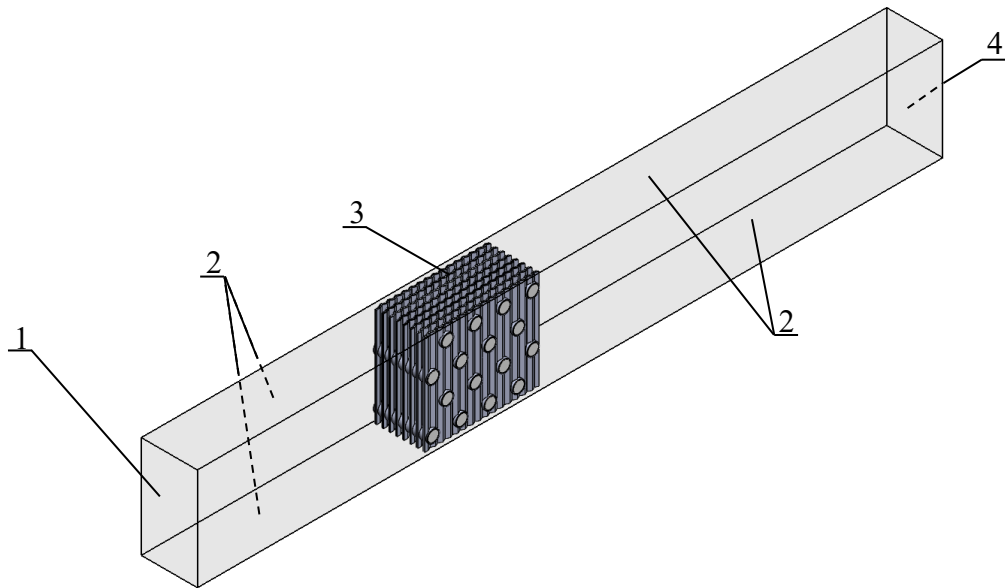
čia  $\alpha_V$  – tūrinis šilumos perdavimo koeficientas ( $W/m^3 \cdot K$ );  $q_V$  – tūrinis šilumos perdavimas ( $W/m^3$ );  $T_w$  – lokali akytos matricos temperatūra (K);  $T_f$  – lokali akytoje medžiagoje esančio fluideo temperatūra (K).

Akytos medžiagos modelyje, tūrinis šilumos perdavimas apskaičiuojamas:

$$q_V = \frac{q}{V_{pilnutinis}} \quad (8)$$

Žinodami akytos medžiagos charakteristikų priklausomybes, galime sudaryti skaičiuojamąjį modelį, skirtą akytos medžiagos parametrų nustatymui. Remiantis [21] šaltinio metodika, kuriamas skaičiuojamasis garintuvo segmento modelis, kuriuo yra imituojamos panašios į vėjo tunelio sąlygos. Kuriant skaičiuojamąjį domeną, jis yra apibrėžiamas taip, kad visas įtekantis oro srautas tekėtų tik pro garintuvo segmentą. Tokiu būdu tiksliausiai išryškėja oro srauto, tekančio garintuvo segmentu, slėgio kritimas ir šilumos mainai. Sukurtame skaičiuojamajame modelyje įvertinamas įtekantis oras 1, skaičiuojamąjį domeną apibrėžiančios sienelės 2, garintuvo segmentas 3 ir oro ištekėjimo potencialas 4, skaičiuojamasis modelis pateiktas 3.4 pav.





**3.4 pav.** Garintuvo skaičiuojamasis modelis

Atliekant skaitinius skaičiavimus, įtekančio oro srauto parametrai, tokie kaip greitis ir temperatūra, keičiami priklausomai nuo skaičiavimų iškeltų tikslų ir uždavinių. Skaičiuojamąjį domeną apibrėžiančios sienelės vertinamos kaip nesudarančios trinties (angl. *Ideal wall*). Įvertinus šią sąlygą, ties domeną apribojančiomis sienelėmis nesiformuoja pasienio sluoksnis. Dėl šios priežasties šios sienelės nesutrikdo oro srauto tekėjimo iki garintuvo segmento ir už jo. Šios sąlygos įvertinimas paverčia slėgio kitimą ir šilumos mainus priklausomus tik nuo garintuvo segmento. Garintuvo segmento sienelės vertinamos kaip trintį sudarančios sienelės (angl. *Real wall*). Tokiu būdu, ties sienelėmis bus linkęs formuotis pasienio sluoksnis. Ši sąlyga įtakoja didesnę pasipriešinimą oro srauto tekėjimui jam tekant pro garintuvo segmento tarpelius. Oro srauto ištekėjimo potencialui priskiriama 101325 Pa slėgio reikšmė. Šios vertės slėgis tolimesniuose skaičiavimuose vertinamas kaip atskaitinis. Vertinant bendrąsias skaičiavimų sąlygas yra nurodoma, kad atliekami vidinių srautų skaičiavimai. Taip pat, įvertinama kondukcija ir gravitacija. Gravitacijos įvertinimas įtakoja natūralios konvekcijos reiškinius. Kadangi procesas vertinamas kaip nusistovėjęs, o temperatūros yra žemos, siekiant sumažinti skaičiavimų trukmę, šiluminio spinduliavimo sąlygos nuspręsta nevertinti. Bendrieji garintuvo skaičiavimų nustatymai pateikti 3.5 pav.

Analysis type		Consider closed cavities	
<input checked="" type="radio"/> Internal		<input type="checkbox"/> Exclude cavities without flow conditions	
<input type="radio"/> External		<input type="checkbox"/> Exclude internal space	
Physical Features	Value		
<input checked="" type="checkbox"/> Heat conduction in solids	<input checked="" type="checkbox"/>		
Radiation	<input type="checkbox"/>		
Time-dependent	<input type="checkbox"/>		
<input checked="" type="checkbox"/> Gravity	<input checked="" type="checkbox"/>		
Rotation	<input type="checkbox"/>		
Free surface	<input type="checkbox"/>		

**3.5 pav.** Bendrieji garintuvo skaičiavimų nustatymai

Visais skaičiavimų atvejais pasirinktas tekantis fluidas yra oras. Pradinių sąlygų įvertinimas kiekvieno atskiro skaičiavimo atveju skiriasi. Iš eksperimentinių tyrimų yra žinoma, kad tiriamosios šaldymo vitrinos su šaldoma vonia viduje buvusi drėgmės vidutinė vertė yra apie 50 %. Taip pat, visų

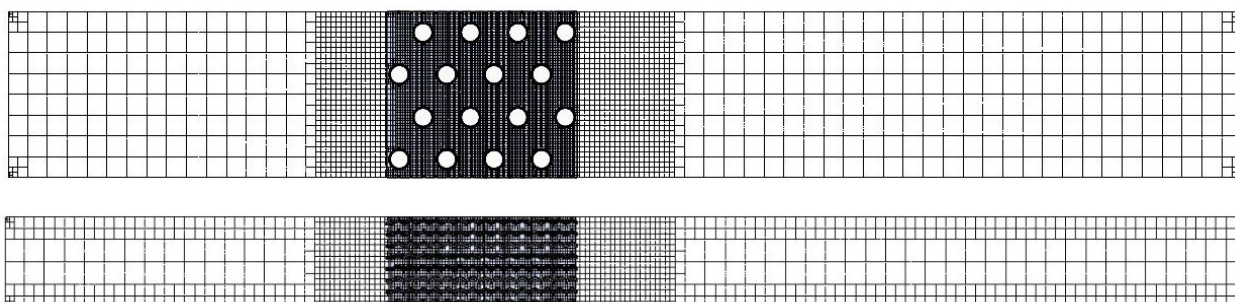
skaičiavimų atvejais nurodoma pradinė slėgio vertė yra 101325 Pa. Pradinės fluideo ir kietų kūnų temperatūros kiekvieno skaičiavimo atveju parenkamos pagal įtekančio oro srauto nurodomą temperatūrą. Pradinių sąlygų įvertinimas pateiktas 3.6 pav.

Parameter	Value
<b>Parameter Definition</b>	
	User Defined
<b>Thermodynamic Parameters</b>	
Parameters	Pressure, temperature
Pressure	101325 Pa
Pressure potential	<input checked="" type="checkbox"/>
Refer to the origin	<input type="checkbox"/>
Temperature	15 °C
<b>Velocity Parameters</b>	
Parameter	Velocity
Velocity in X direction	0 m/s
Velocity in Y direction	0 m/s
Velocity in Z direction	0 m/s
<b>Turbulence Parameters</b>	
<b>Solid Parameters</b>	
<b>Humidity</b>	
Relative humidity	50 %
Reference pressure	101325 Pa
Reference temperature	15 °C

3.6 pav. Garintuvo skaičiavimų pradinių sąlygų įvertinimas

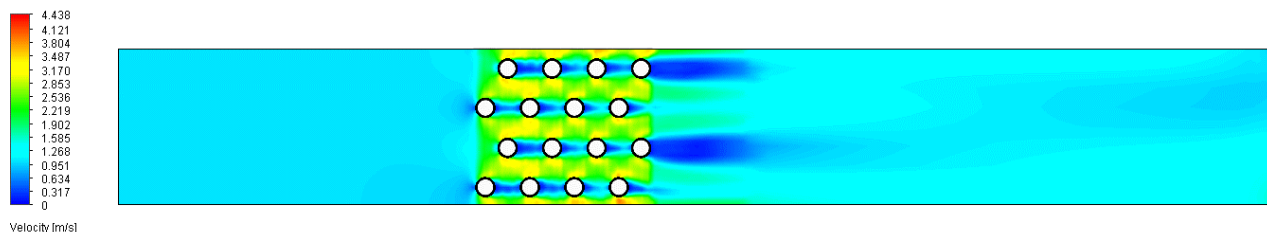
### 3.1.1. Garintuvu tekančio oro srauto slėgio kritimo tyrimas

Atliekant garintuvu tekančio oro srauto slėgio kritimo tyrimą bei siekiant pagreitinti skaičiavimus ir žinant, kad temperatūriniai parametrai didelės įtakos slėgio kritimui nesudaro, šilumos mainų sąlygos išjungiamos, tačiau paliekama įvertinta oro drėgmės sąlyga. Remiantis [21] šaltinio metodika, siekiant nustatyti (4) formulėje aprašytų A ir B konstantų reikšmes, reikia nustatyti antros eilės daugianarį, apibūdinantį priklausomybę tarp oro srauto greičio ir slėgio kritimo gradiento. Žvelgdami į garintuvo lamelių formą (žr. 3.3 pav.) galime numatyti, kad orui tekant pro garintuvą skirtingomis kryptimis, atitinkamai skirtingai kis ir slėgio kritimas. Dėl šios priežasties, tiriamas z ir y krypčių slėgio kritimas, o kadangi oro srautas x kryptimi pratekėti negali, priimama, kad šia kryptimi slėgio kritimas yra be galo didelis. Tokiu būdu oras, tekėdamas per akytą medžiagą, neturi galimybės pratekėti x ašies kryptimi. Tam, kad būtų galima aprašyti skirtingo dydžio slėgio kritimą, orui tekant skirtingomis kryptimis per sumodeliuotą akytą medžiagą, akytos medžiagos monolitui priskiriamas ortotropinis pralaidumo tipas. Siekiant sugeneruoti skaičiuojamojo modelio tinkliuką, kurio dydis neįtakotų rezultatų reikšmių, sutankinama sritis, ties garintuvo lamelėmis. Taip pat, papildomai tinkliukas sutankinamas prieš ir už garintuvo segmento, siekiant išskirti ryškesnius greičio ir slėgio gradientų kontūrus. Tankinant tinkliuką iš 322386 baigtinių tūrių į 576549 baigtinius tūrius, nustatytas 5,77 % santykinis skirtumas tarp slėgio kritimo gradiento reikšmių. Priimama, kad tokio dydžio santykinis skirtumas rezultatų tikslumui didelės įtakos nesudaro, todėl tolimesni slėgio kritimo skaičiavimai atliekami su 322386 baigtinių tūrių tinkliuku (žr. 3.7 pav.).

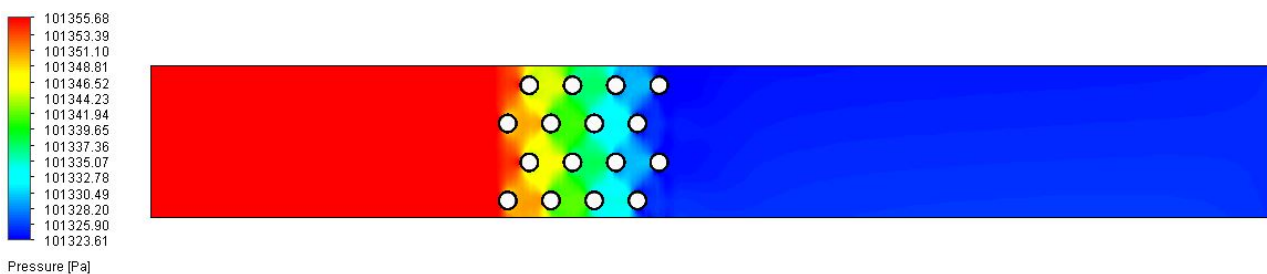


3.7 pav. Slėgio kritimo gradiento tyrimui naudojamas skaičiuojamojo modelio tinkliukas

Atlikus skaičiavimus išvedame rezultatus. Greičio pasiskirstymas pateiktas 3.8 pav., slėgio kitimas išilgai garintuvo pateiktas 3.9 pav., slėgio kritimo grafikas išilgai skaičiuojamojo domeno pateiktas 3.10 pav.

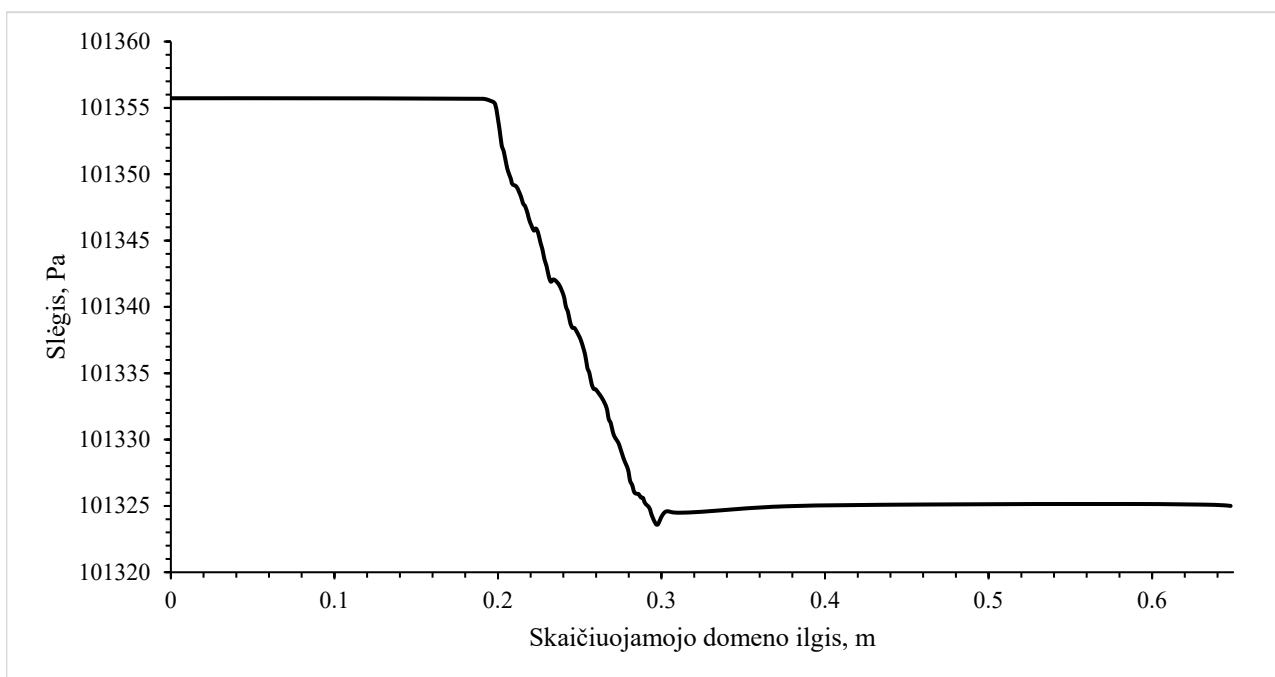


**3.8 pav.** Greičio pasiskirstymas išilgai garintuvo, kai įtekančio oro srauto greitis yra 1 m/s



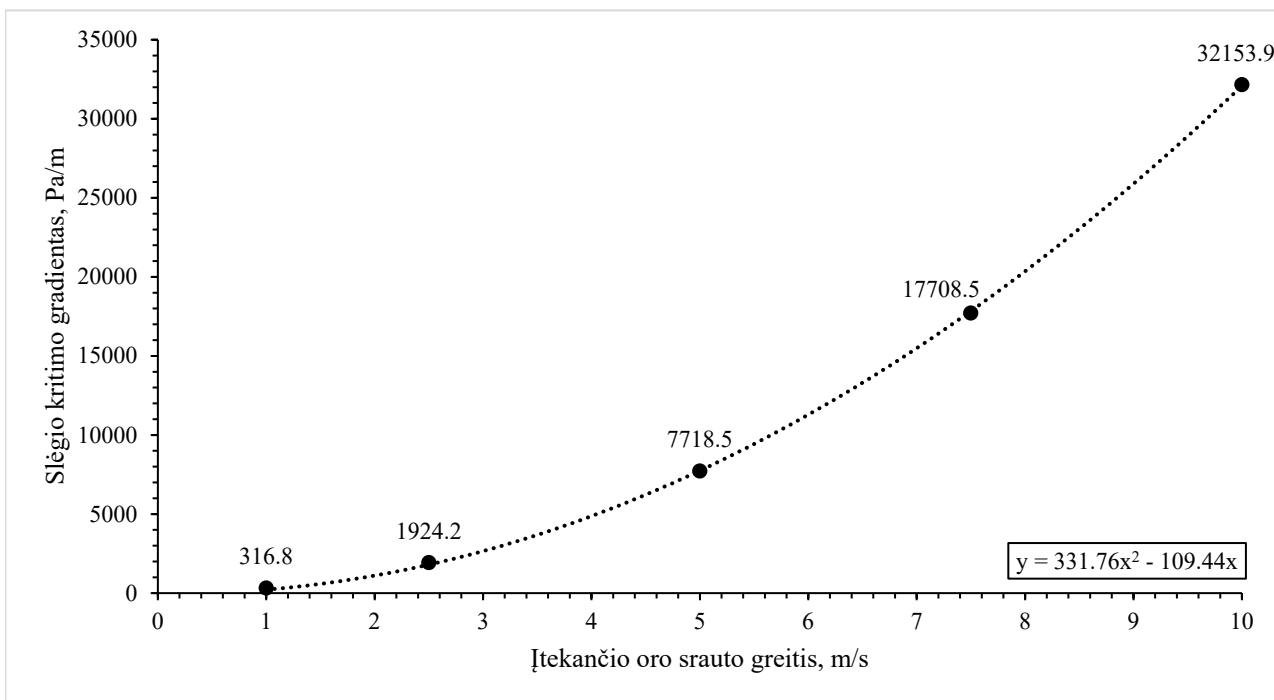
**3.9 pav.** Slėgio kitimas išilgai garintuvo, kai įtekančio oro srauto greitis yra 1 m/s

Iš greičio pasiskirstymo paveikslo (žr. 3.8 pav.) galime pastebėti, kad greičio gradientai turi ryškius kontūrus. Tai indikuoja, kad sugeneruotas skaičiuojamojo modelio tinkliukas yra pakankamai smulkus. Didžiausią pasipriešinimą oro srauto tekėjimui sudaro garintuvo vamzdeliai, kadangi už jų formuojasi mažiausio greičio oro srautas. Iš slėgio kitimo paveikslo (žr. 3.9 pav.) matome, kad slėgio kitimas vyksta tik ties tiriamojo garintuvo segmentu.

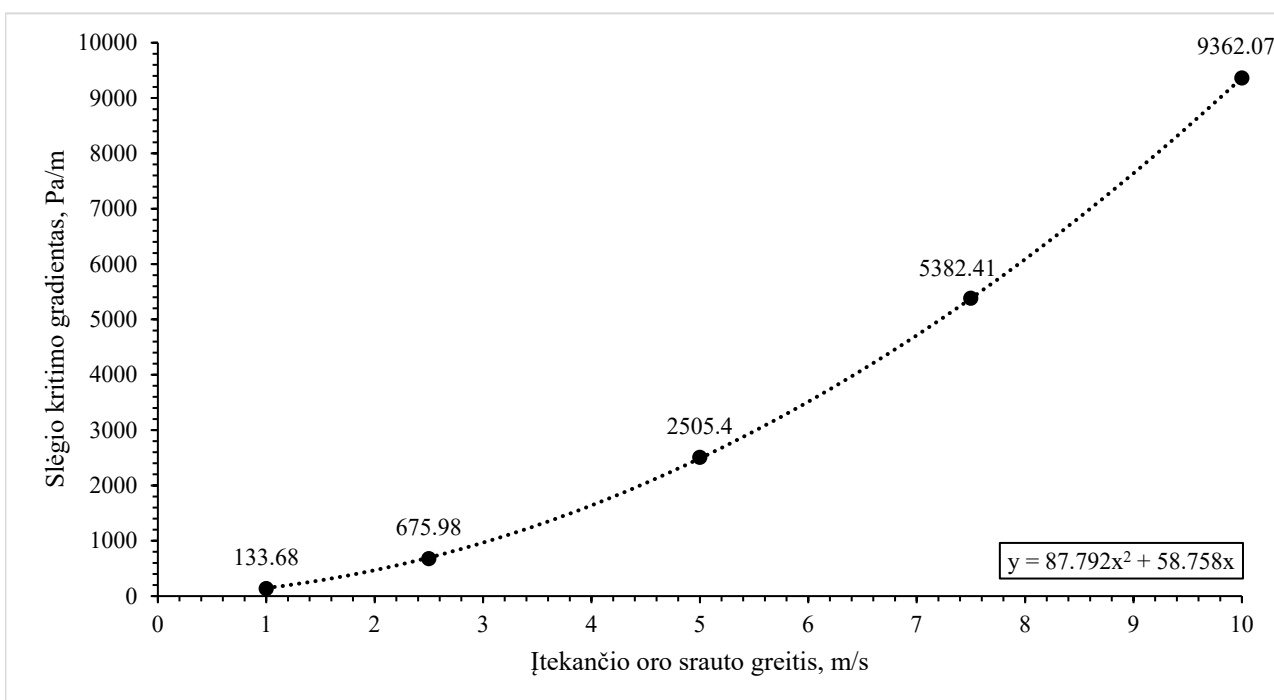


**3.10 pav.** Slėgio kitimas išilgai skaičiuojamojo domeno, kai įtekančio oro srauto greitis yra 1 m/s

Žvelgiant į slėgio kritimo grafiką išilgai skaičiuojamojo domeno (žr. 3.10 pav.) galima daryti išvadą, kad skaičiuojamojo domeno ilgis yra pakankamas, kadangi slėgio dydžio reikšmės, prieš oro srautui pratekant pro garintuvo segmentą ir po pratekėjimo, yra nusistovėjusios. Atliekant slėgio kritimo gradiento skaičiavimus yra žinoma, kad garintuvo ilgis  $z$  ašies kryptimi yra 100 mm, o  $y$  ašies kryptimi yra 83 mm. Pagal (2) formulę, šie ilgiai vertinami kaip charakteringieji ilgiai. Remiantis (4) formule apskaičiuojamos slėgio kritimo gradiento priklausomybės  $z$  ašies kryptimi (žr. 3.11 pav.) ir  $y$  ašies kryptimi (žr. 3.12 pav.).



3.11 pav. Slėgio kritimo gradiento priklausomybė nuo greičio  $z$  ašies kryptimi

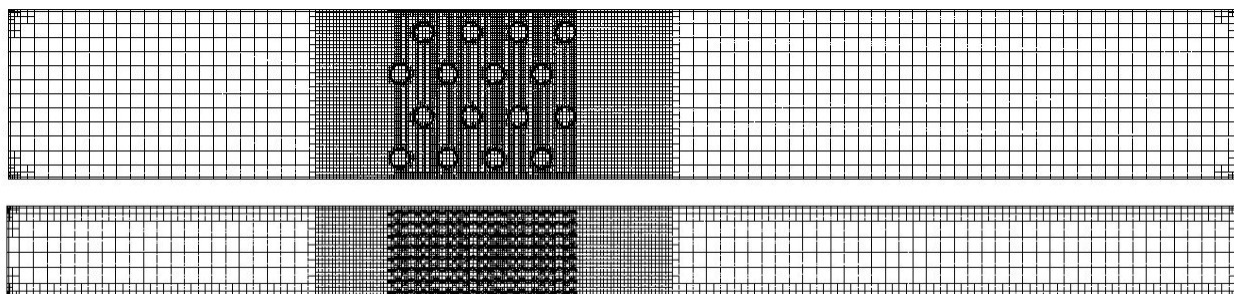


3.12 pav. Slėgio kritimo gradiento priklausomybė nuo greičio  $y$  ašies kryptimi

Iš gautų rezultatų matoma, kad  $z$  ašies kryptimi slėgio kritimo gradiento priklausomybę nuo įtekančio oro srauto greičio aprašo lygtis  $y=331,76x^2-109,44x$ , o  $y$  ašies kryptimi  $y=87,792x^2+58,758x$ . Dėl šios priežasties atitinkamai aprašant akytos medžiagos charakteristikas  $z$  ašies kryptimi A konstantos vertė yra 331,76, o B konstantos vertė yra -109,44. Analogiškai  $y$  ašies kryptimi A konstantos vertė yra 87,792, o B konstantos vertė yra 58,758. Taip pat, kaip ir buvo numatyta, galima pastebėti, kad tekančio garintuvo oro srauto slėgio kritimas  $z$  ir  $y$  kryptimis skiriasi. Skirtumas siekia apie 3 kartus. Galima daryti išvadą, kad slėgio kritimo priklausomybei turi įtakos ne tik įtekančio oro srauto greitis, bet ir lamelių geometrinė forma bei jų išdėstymas viena kitos atžvilgiu.

### 3.1.2. Garintuvu tekančio oro srauto šilumos mainų tyrimas

Modeliuojamos akytos medžiagos blokas atlieka šilumokaičio funkciją. Atsižvelgdami į tai, turime aprašyti modeliuojamo akytos medžiagos monolitinio bloko įtaką šilumos mainams, kai juo teka oro srautas. Pagal numatytą šaldymo vitrinės su šaldoma vonia skaitinį modelį žinoma, kad didžioji dalis tekančio oro tūrinio debito teka  $z$  ašies kryptimi. Dėl šios priežasties priimama, kad akytos medžiagos monolitui būdingi izotropinio tipo šilumos mainai. Šis šilumos mainų tipas įgalina visomis oro srauto tėkmės kryptimis vienodai veikti šilumos mainus, tarp akytos medžiagos ir ja tekančio oro srauto. Atsižvelgiant į tai, šilumos mainų parametrai yra tiriami ir aprašomi atliekant skaičiavimus  $z$  ašies atžvilgiu. Sudarant skaičiuojamąjį modelį yra įvertinamos šilumos mainų sąlygos, todėl skaičiuojamajame modelyje tinkliukas generuojamas ne tik fluidų srityje, bet ir kietų kūnų srityse. Generuojant tinkliuką, baigtinių tūrių skaičius buvo didinamas tol, kol tarpuose tarp lamelių, fluideo srityje, buvo sugeneruoti bent trys baigtiniai tūriai. Atitinkamai tankinant tinkliuką kietų kūnų srityse taip pat pasiekti bent trys baigtiniai tūriai, išsidėstę per kietos medžiagos storį. Iš viso sugeneruotą tinkliuką sudaro 1574879 baigtinis tūris (žr. 3.13 pav.).



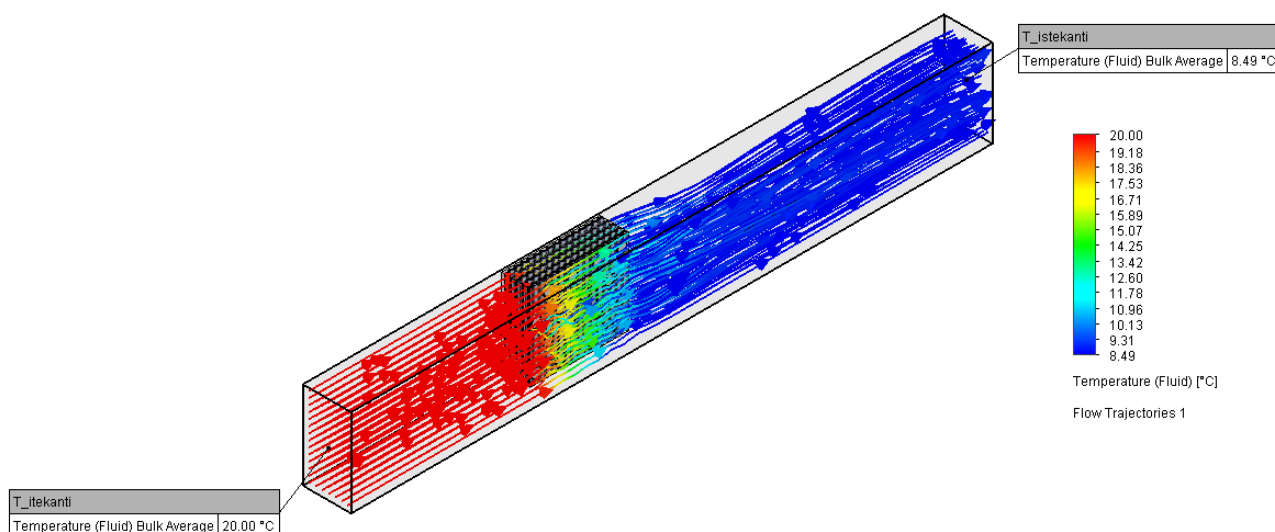
3.13 pav. Garintuvo šilumos mainų tyrimui naudojamas skaičiuojamojo modelio tinkliukas

Kadangi skaičiuojamajame modelyje įvertintos šilumos mainų sąlygos, reikia aprašyti garintuvo segmente naudojamų medžiagų šiluminės charakteristikas. Medžiagų šiluminės charakteristikos panaudotos remiantis „SolidWorks Flow Simulation“ medžiagų biblioteka. Naudojamoje medžiagų bibliotekoje nėra aprašytos šerkšno šiluminės charakteristikos. Dėl šios priežasties, remiantis [24] šaltiniu, priimtas šerkšno šiluminis laidumas yra  $0,16 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ . Taip pat, remiantis [24] šaltiniu, priimamas šerkšno tankis yra  $200 \text{ kg/m}^3$ . Remiantis [25] šaltiniu, šerkšnui priskiriama ledui būdinga savitoji šiluminė talpa, kurios reikšmė yra  $2050 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ . Visos skaičiuojamajame modelyje panaudotos medžiagų reikšmės pateikiamos 3.1 lentelėje.

**3.1 lentelė.** Garintuvo skaičiuojamajame modelyje naudojamų medžiagų šiluminės charakteristikos

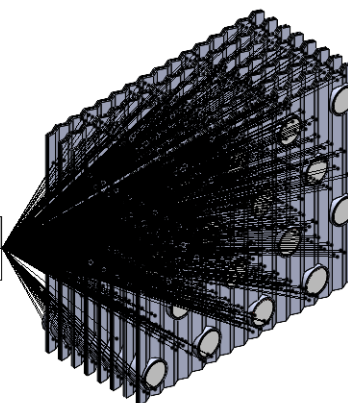
Medžiaga	Medžiagos pritaikymas skaičiuojamojo modelio elementui	Medžiagos šiluminis laidumas, W/m·K	Medžiagos tankis, kg/m <sup>3</sup>	Medžiagos savitoji šiluminė talpa, J/kg·K
Varis	Šaltnešio tekėjimo vamzdeliai	390	8900	390
Aliuminis	Lamelės	200	2700	900
Šerkšnas	Šerkšnas	0,16	200	2050

Atliekant eksperimentinį šaldymo vitrinos su šaldoma vonia tyrimą, naudojant anemometrą, buvo matuojamas į garintuvą įtekantis vidutinis oro srauto greitis. Matavimų metu nustatyta, kad vidutinis įtekančio oro srauto greitis siekia apie 1,2 m/s. Atliekant garintuvo sugeriamos šilumos tyrimą, nustatomas 1,2 m/s dydžio įtekančio oro srauto greitis. Taip pat žinoma, kad fizinio garintuvo darbinis paviršiaus plotas yra 3,5 m<sup>2</sup>. Iteraciniu būdu nustatyta, kad tiksliausiai garintuvo šilumos sugėrimo dydį atspindi -12 °C temperatūros šaltnešis. Dėl šios priežasties, visų garintuvo šiluminių charakteristikų skaičiavimų metu, ši temperatūros reikšmė priskiriama varinių vamzdelių vidinei daliai. Tokiu būdu, įvertintos kondukcijos principu, atitinkamai atvės visi garintuvo segmentą sudarantys kieti kūnai. Vertinant garintuvo sugeriamą šilumos kiekį, nustatoma priklausomybė tarp sugeriamo šilumos kiekio ir įtekančios oro srauto temperatūros. Šios priklausomybės nustatymui keičiama skaičiuojamajame modelyje įtekančio oro srauto temperatūra (žr. 3.4 pav.). Nustatant temperatūrų skirtumą yra naudojama įtekančio oro srauto temperatūra ir pro oro ištekėjimo potencialą ištekančio oro srauto temperatūra (žr. 3.14 pav.). Vertinant pilnutinį šilumos perdavimo koeficientą yra naudojamas visas garintuvo segmento paviršius, kuris kontaktuoja su pro jį tekančiu oru (žr. 3.15 pav.). Iteraciniu būdu pastebėta, kad tiksliausiai šaldymo vitrinos su šaldoma vonia skaičiuojamajame modelyje sugeriamą šilumos kiekį apibūdina aprašytos įtekančio oro temperatūros priklausomybės ribose tarp +25 °C ir +12,5 °C. Remiantis (6) formule, apskaičiuojamas sugeriamas šilumos kiekis, rezultatai pateikiami 3.2 lentelėje.



**3.14 pav.** Tekančio oro temperatūros pasiskirstymas skaičiuojamajame modelyje, kai įtekančio oro srauto temperatūra yra +20 °C

Pilnutinis šilumos perdavimo koef.	
Heat Transfer Coefficient Average	34.003 W/m <sup>2</sup> /K

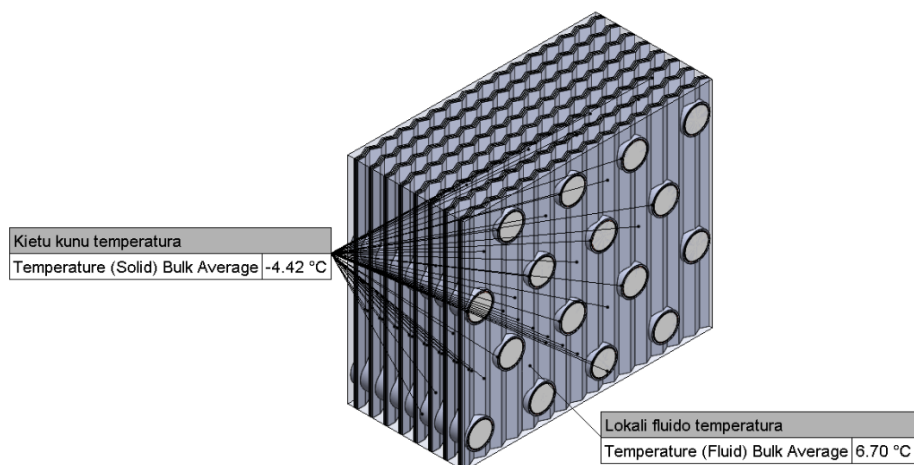


3.15 pav. Pilnutinio šilumos perdavimo koeficiento vertė, kai įtekančio oro srauto temperatūra yra +20 °C

3.2 lentelė. Garintuvo sugeriamo šilumos kiekio priklausomybė nuo įtekančio oro srauto temperatūros

Įtekančio oro srauto temperatūra, °C	Ištekančio oro srauto temperatūra, °C	Pilnutinis šilumos perdavimo koeficientas, W/m <sup>2</sup> ·K	Darbinis garintuvo plotas, m <sup>2</sup>	Sugeriamas šilumos kiekis, W
+25	+12,35	42,55	3,5	1881,75
+20	+8,49	34,00		1369,72
+15	+4,93	22,15		779,79
+12,5	+3,22	20,92		678,71

Iš gautų rezultatų galima pastebėti sugeriamos šilumos tendenciją. Ši tendencija rodo, kad kuo įtekančio oro srauto temperatūra yra artimesnė garintuvo segmento temperatūrai, tuo mažesnis šilumos kiekis yra sugeriamas. Tokią tendenciją galime pastebėti ir eksperimentiniuose rezultatuose (žr. 2.8 pav.). Temperatūros žemėjimo intensyvumas mažėjo, kuo temperatūros vertė labiau artėjo prie -11,3 °C reikšmės. Iteraciniu būdu nustatyta paskutinės sugeriamos šilumos reikšmės, įtekančio oro srauto temperatūra yra +12,5 °C. Ši reikšmė yra artima eksperimento metu, per pirmąsias 30 min. nuo tiriamojo įrenginio paleidimo, nustatytai vidutinei įtraukiamo oro temperatūrai, kurios reikšmė yra +12 °C. Absoliutinis skirtumas tarp šių reikšmių yra 0,5 °C. Aprašant akytos medžiagos šilumos sugėrimo intensyvumą, jam įtaką sudaro ne tik sugeriamos šilumos kiekis, bet ir tūrinis šilumos perdavimo koeficientas. Šis koeficientas aprašo, kokia dalis šilumos yra sugerama iš tekančio oro ir kiek šilumos yra sugerama iš akytos medžiagos monolitinio bloko. Tūrinis šilumos perdavimas apskaičiuojamas pagal (8) formulę, o tūrinio šilumos perdavimo koeficiento apskaičiavimui naudojama (7) formulė. Remiantis sugeriamos šilumos rezultatais ir eksperimentiniais rezultatais, visų skaičiavimų metu, priskiriama įtekančio oro srauto temperatūra yra +12,5 °C. Žinoma, kad akytos medžiagos pilnutinis tūris yra  $1,301 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$ . Šiuose skaičiavimuose ieškoma priklausomybė tarp tūrinio šilumos perdavimo koeficiento ir garintuvu tekančio oro srauto greičio. Dėl šios priežasties naudojamas įtekančio oro srauto kintamasis yra greitis. Kiekvieno skaičiavimo metu, analogiškai, kaip skaičiuojant 3.2 lentelės rezultatus, apskaičiuojamas sugeriamas šilumos kiekis. Siekiant nustatyti lokalią matricos temperatūrą  $T_w$ , kiekvieno skaičiavimo metu išvedama garintuvo segmento kietų kūnų temperatūra. Norint nustatyti lokaliąją fluido temperatūrą  $T_f$ , išvedama fluido temperatūros reikšmė iš skaičiuojamojo domeno dalies, kuri turi kontaktą su garintuvo segmento kietais kūnais (žr. 3.16 pav.). Skaičiavimų rezultatai pateikiami 3.3 lentelėje.



**3.16 pav.** Garintuvo segmento kietų kūnų ir oro temperatūros, kai įtekančio oro srauto greitis yra 1,5 m/s

**3.3 lentelė.** Garintuvo šilumos mainų intensyvumo priklausomybė nuo įtekančio oro srauto greičio

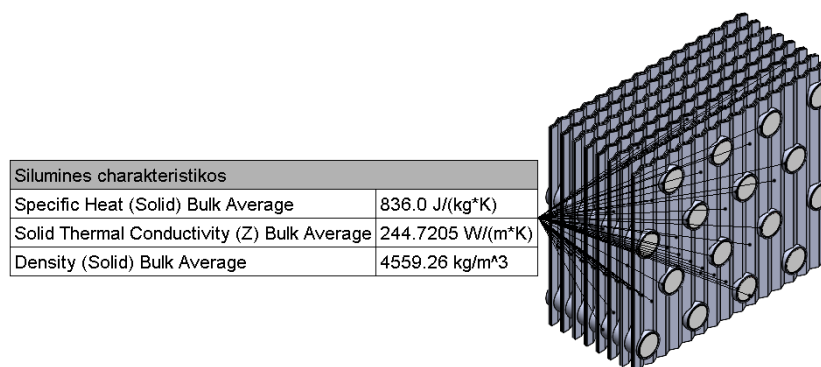
Įtekančio oro srauto greitis, m/s	Ištekančio oro srauto temperatūra, °C	Pilnutinis šilumos perdavimo koeficientas, W/m <sup>2</sup> ·K	Sugeriamas šilumos kiekis, W	Sugeriamas tūrinis šilumos kiekis, W/m <sup>3</sup>	Lokali garintuvo segmento temperatūra, °C	Lokali garintuve esančio oro temperatūra, °C	Tūrinis šilumos perdavimo koeficientas, W/m <sup>3</sup> ·K
1	+2,47	19,35	679,28	52198,4	-5,3	+5,15	4995,06
1,5	+4,05	22,9	677,27	52043,6	-4,42	+6,7	4680,18
2	+5,22	25,6	652,29	50124,1	-3,83	+7,67	4358,62
2,5	+6,44	27,02	573,09	44038,6	-3,5	+8,46	3682,15
3	+7,22	28,99	535,74	41167,8	-3,13	+8,96	3405,11

Iš gautų rezultatų galima pastebėti, kad, didėjant įtekančio oro srauto greičiui, padidėja pilnutinis šilumos perdavimo koeficientas. Tokį rezultatą įtakoja dėl didesnio oro srauto greičio, intensyviau vykstantys priverstinės konvekcijos tipo šilumos mainai. Žvelgiant į tūrinio šilumos perdavimo koeficientą galima pastebėti, kad, didėjant įtekančio oro srauto greičiui, šis koeficientas mažėja. Tokius rezultatus įtakoja sumažėjęs sugeriamas šilumos kiekis. Orui greičiau tekant pro garintuvo segmentą, jis spėja mažiau atvėsti, analogiškai ir kieti segmento kūnai nespėja taip intensyviai atvėsti nuo vamzdeliais tekančio šaltnešio. Dėl šių priežasčių, bendras šilumos sugerimo intensyvumas turi tendenciją mažėti, didėjant tekančio oro srauto greičiui. Siekiant pilnai aprašyti akytos medžiagos charakteristikas, reikia nurodyti medžiagos akytumą, savitąją šiluminę talpą, medžiagos tankį ir šilumos laidumo koeficientą. Iš sumodeliuoto akytos medžiagos bloko žinoma, kad pilnutinis akytos medžiagos tūris yra  $1,301 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$ . Iš sumodeliuoto pilno garintuvo modelio žinoma, kad garintuve oro ertmių tūris yra  $1,128 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$ . Pagal (5) formulę yra apskaičiuojamas medžiagos akytumas:

$$\varepsilon = \frac{V_{ertmių}}{V_{pilnutinis}} = \frac{1,128 \cdot 10^{-2}}{1,301 \cdot 10^{-2}} = 0,867$$



Siekiant aprašyti akytos medžiagos bendrąsias šilumines charakteristikas, naudojamas garintuvo segmento modelis, naudotas šilumos mainų uždaviniuose (žr. 3.17 pav.).

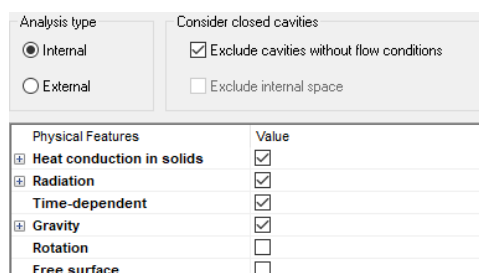


3.17 pav. Garintuvo segmento temperatūrinės charakteristikos

Iš 3.17 pav. matome, kad segmento savitoji šiluminė talpa yra 836 J/kg·K, o tankis 4559,26 kg/m<sup>3</sup>. Kadangi akytos medžiagos šilumos mainų tipas aprašomas kaip izotropinis, visomis koordinatinių sistemos ašių kryptimis šiluminis laidumas yra vienodas, kuris šiuo atveju yra 244,72 W/m·K.

### 3.2. Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia validuojančio modelio kūrimas

Modeliuojant šaldymo vitrinos su šaldoma vonia skaitinį skaičiuojamąjį modelį išsikeliamas pagrindinis tikslas – sukurti kuo tikslesnį modelį, atspindintį eksperimentinės šaldymo vitrinos su šaldoma vonia trūkumus. Eksperimento metu pastebėta, kad oro temperatūra tarp lentynėlių ir įtraukiamo oro srauto temperatūra santykinai skiriasi nuo 88,9 % iki 100 %. Dėl šios priežasties pagrindinis dėmesys skiriamas tarp charakteringųjų matavimo taškų susidarantiems temperatūrų skirtumui. Sudarant šaldymo vitrinos su šaldoma vonia skaitinį skaičiuojamąjį modelį, atliekami vidinių srautų skaičiavimai. Naudojant vidinių srautų skaičiavimų modelį, sumažinamas skaičiuojamojo domeno dydis. Dėl mažesnio domeno dydžio galima papildomai susmulkinti skaičiuojamojo modelio tinkliuką, santykinai nepailginant skaičiavimų laiko. Šių skaičiavimų metu įvertinami visi šilumos perdavimo būdai: kondukcija, konvekcija ir spinduliavimas. Kadangi atliekami skaičiavimai yra pereinamojo proceso, įvertinama ir laiko priklausomybės sąlyga (žr. 3.18 pav.).



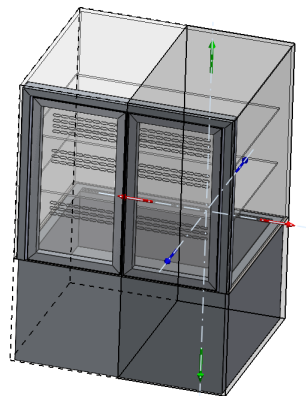
3.18 pav. Bendrieji šaldymo vitrinos su šaldoma vonia skaičiavimų nustatymai

Pasirenkamas tekantis fluidas – oras, kurio drėgmė yra 50 %. Iš eksperimentinių rezultatų žinoma, kad per pirmąsias 30 minučių vidutinė oro temperatūra buvo 25,42 °C. Vertinant pradines sąlygas nurodoma, kad pradinė kietų kūnų ir oro temperatūra yra 25,42 °C. Taip pat yra naudojama atskaitinė pradinė slėgio vertė, kuri yra 101325 Pa (žr. 3.19 pav.).

Parameter	Value
Parameter Definition	User Defined
<b>Thermodynamic Parameters</b>	
Parameters	Pressure, temperature
Pressure	101325 Pa
Pressure potential	<input type="checkbox"/>
Temperature	25.42 °C
<b>Velocity Parameters</b>	
<b>Turbulence Parameters</b>	
<b>Solid Parameters</b>	
Initial solid temperature	25.42 °C
<b>Humidity</b>	
Relative humidity	50 %
Reference pressure	101325 Pa
Reference temperature	25.42 °C

**3.19 pav.** Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia skaičiavimų pradinių sąlygų įvertinimas

Kadangi tiriamoji šaldymo vitrina su šaldoma vonia yra simetriška, siekiant naudoti smulkesnį tinklėlį nepadidinus skaičiavimų laiko trukmės, skaičiuojamajam domenui priskiriama simetriškumo sąlyga (žr. 3.20 pav.).



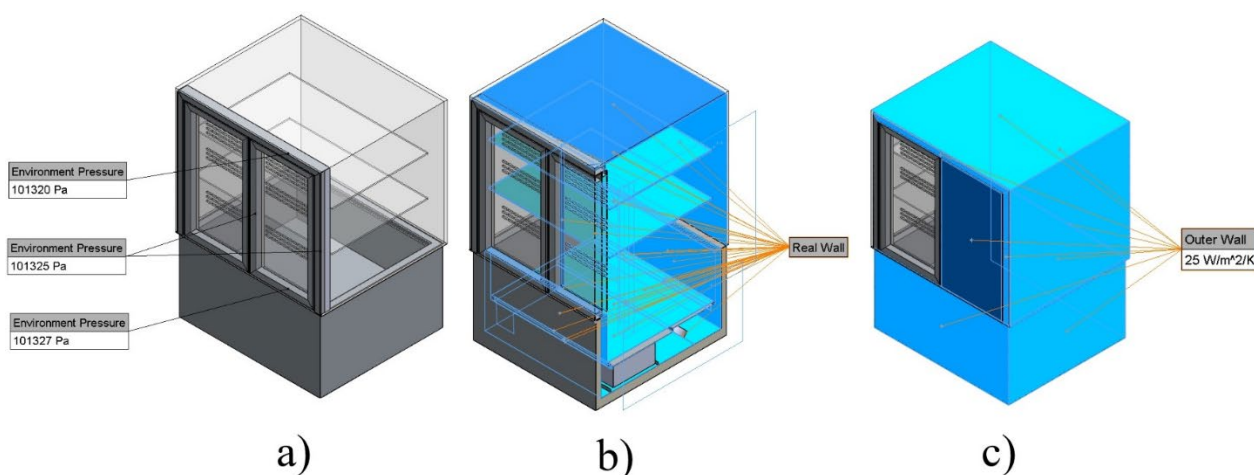
**3.20 pav.** Simetriško skaičiuojamojo domeno įvertinimas

Analogiškai kaip ir garintuvo segmento skaičiavimuose, taip ir čia, įvertinus kondukciją, aprašomos medžiagų šiluminės charakteristikos. Šiuo atveju medžiagų šiluminės charakteristikos taip pat naudojamos iš „SolidWorks Flow Simulation“ medžiagų bibliotekos. Nuo aplinkos temperatūros kintamų šiluminių parametrų reikšmės pateiktos intervale, kai aplinkos temperatūra yra tarp +25 °C ir +4 °C. Šiluminės charakteristikos pateikiamos 3.4 lentelėje.

**3.4 lentelė.** Šaldymo vitrinoje su šaldoma vonia skaičiuojamajame modelyje naudojamų medžiagų šiluminės charakteristikos

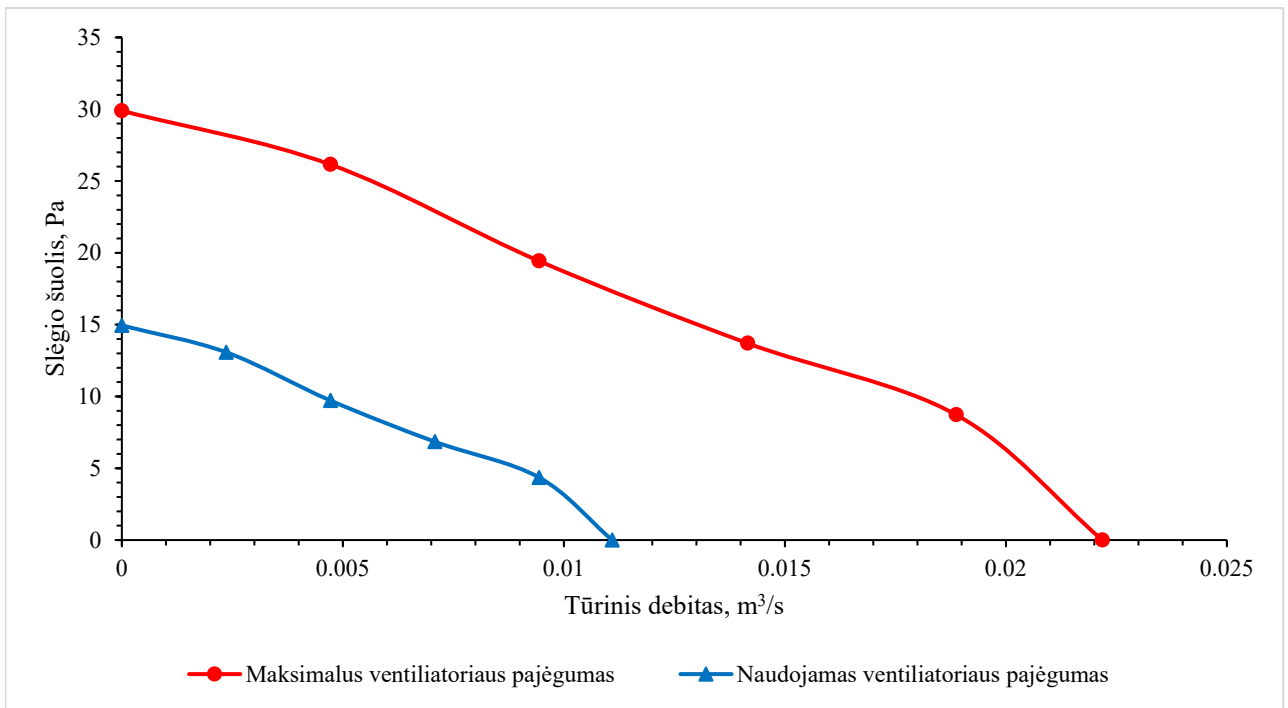
Medžiaga	Medžiagos pritaikymas skaičiuojamojo modelio elementui	Medžiagos šiluminis laidumas, W/m·K	Medžiagos tankis, kg/m <sup>3</sup>	Medžiagos savitoji šiluminė talpa, J/kg·K
Plienas „AISI 304“	Lakštinės detalės ir vamzdiniai rėmai	16	8000	500
Stiklas	Ekspozicinė vitrinos dalis ir durelių stiklas	0,75	2457,6	834,61
PMMA	Perforuotas durelių stiklas	0,21	1190	1250
Aliuminis	Ventiliatoriaus korpusas	200	2700	900
Poliuretanas	Termoizoliacinis sluoksnis	0,0346-0,0353	1045	1441-1529

Aprašant skaičiuojamojo modelio kraštines sąlygas nurodoma, kad įvertinama visų skaičiuojamojo modelio vidinių paviršių trintis. Atlikdami vidinių srautų skaičiavimus, įvertiname aplinkos šiluminį poveikį išorinėms skaičiuojamojo modelio sienelėms. Tai padarome išoriniams paviršiams priskirdami išorinių sienelių (angl. *Outer wall*) kraštines sąlygas. Kadangi eksperimento metu tiriamosios šaldymo vitrinos su šaldoma vonia kompresorinė buvo atvira aplinkos orui, priimama, kad šaldymo korpuso dugnas kontaktavo su bendru laboratorijos temperatūros oru. Vertindami išorinių sienelių šilumos perdavimo koeficientą, įvertinamas tik natūralios konvekcijos šilumos perdavimo koeficientas, kadangi skaičiuojamajame modelyje kondukcijos būdu perduodamą šilumos kiekį apskaičiuoja programa. Remiantis [26] šaltiniu, priimama, kad tarp aplinkos oro ir išorinių sienelių, natūralios konvekcijos šilumos perdavimo koeficientas yra  $25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . Tiriamojoje šaldymo vitrinoje su šaldoma vonia tarp durelių ir ekspozicinės dalies yra tarpai. Siekiant atlikti vidinių srautų skaičiavimus, šie tarpai yra užsandarinami. Tam, kad būtų imituojamas pro šiuos tarpus susidarantis aplinkos poveikis, ties užsandarinimais įvertinama aplinkos slėgio potencialo kraštinės sąlyga (angl. *Environment pressure*). Įvertinant šią sąlygą, nurodoma aplinkos oro temperatūra. Užsandarinimams slėgio priskyrimas suskirstytas trimis lygmenimis, pagal globalųjį skaitinio modelio pilnutinio slėgio pasiskirstymą. Skaičiuojamojo šaldymo vitrinos su šaldoma vonia modelio kraštinės sąlygos pateiktos 3.21 pav.



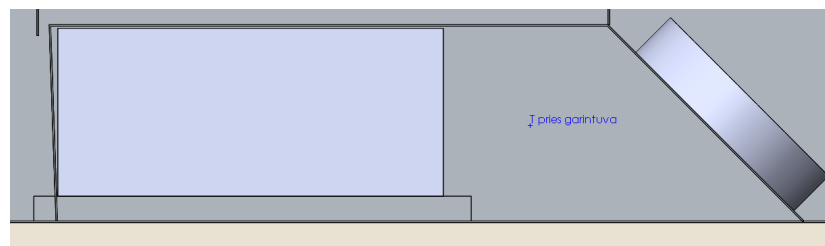
**3.21 pav.** a) Sandarinimų slėgio potencialo įvertinimas, b) vidinių sienelių sąlygos įvertinimas, c) išorinių sienelių sąlygos įvertinimas

Tiriamajoje šaldymo vitrinoje su šaldoma vonia naudojamas ašinis ventiliatorius. Vertinant ventiliatorių nurodoma, kad tai vidinis ventiliatorius (angl. *Internal fan*). Tokio tipo ventiliatoriaus parinkimas leidžia recirkuliuoti skaičiuojamojo modelio viduje esantį orą. Aprašant naudojamo ventiliatoriaus charakteristikas, naudojama priklausomybė tarp tūrinio debito ir slėgio šuolio. Tiriamojoje šaldymo vitrinoje su šaldoma vonia naudojamų ventiliatorių pajėgumas sumažintas du kartus. Dėl šios priežasties skaičiuojamajame modelyje taip pat naudojamas du kartus mažesnis galimas ventiliatoriaus pajėgumas (žr. 3.22 pav.). Kadangi skaičiuojamajame modelyje yra įvertintas šiluminis spinduliavimas, paviršiams, kurie gali būti veikiami šiluminio spinduliavimo, nurodomi absorbcijos koeficientai. Koeficientų reikšmės naudojamos iš „SolidWorks Flow Simulation“ bibliotekos. Nerūdijančio plieno lakštų paviršiams priskirta 85 % absorbcija. Šis absorbcijos koeficientas sąlyginai mažas, kadangi tiriamojoje šaldymo vitrinoje su šaldoma vonia naudojami šlifuoti lakštai. Stiklo paviršiams priskirta 94 % absorbcija.

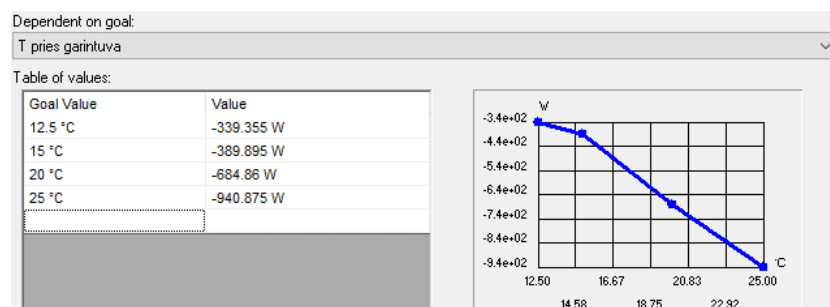


**3.22 pav.** Naudojamo ventiliatoriaus slėgio šuolio ir tūrinio debito priklausomybė

Modeliuojant šilumos sugėrimą, sukurtas charakteringasis taškas „T prieš garintuvą“ (žr. 3.23 pav.). Šio taško paskirtis yra nuolatos matuoti į garintuvą įtekančio oro srauto temperatūrą. Pagal išmatuotą temperatūros reikšmę, atitinkamai priskiriama šilumos sugėrimo reikšmė (žr. 3.24 pav.). Kadangi naudojama simetriškumo sąlyga ir skaičiuojamasis domenas padalintas pusiau, atitinkamai sumodeliuoto garintuvo dydis sumažėja du kartus. Dėl šios priežasties priskiriamos du kartus sumažintos šilumos sugėrimo reikšmės iš 3.2 lentelės. Taip pat, kadangi šiluma yra sugerama, o neatiduodama, reikšmės įvertinamos kaip neigiamos.



**3.23 pav.** Charakteringojo taško pozicija prieš garintuvą



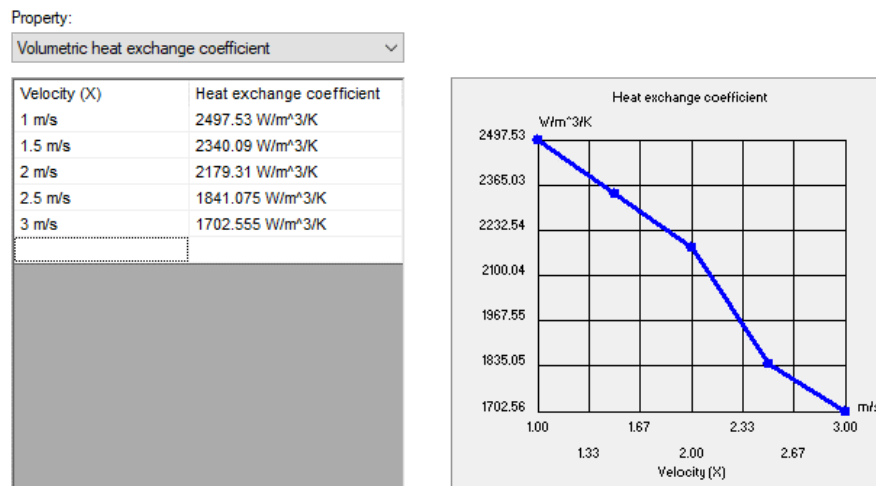
**3.24 pav.** Įtekančio oro srauto temperatūros ir sugeriamos galios priklausomybės įvertinimas

Remiantis 3.11 pav., 3.12 pav., 3.17 pav. rezultatais, aprašomas akytos medžiagos modelis (žr. 3.25 pav.). Kadangi atliekant garintuvo segmento slėgio kritimo ir šilumos sugėrimo tyrimus buvo naudojamas oras, kurio tankis yra  $1,225 \text{ kg/m}^3$ , aprašant akytos medžiagos parametrus taip pat nurodoma, kad kalibruojantis atskaitinis fluideo tankis yra  $1,225 \text{ kg/m}^3$ .

Property Name	Value
Name	Garintuvas
Comments	...
Model	Porous Media
Porosity	0.867
Permeability type	Orthotropic
Resistance calculation formula	Dependency on velocity
A in X	9999999 $\text{kg/m}^4$
A in Y	87.792 $\text{kg/m}^4$
A in Z	331.76 $\text{kg/m}^4$
B in X	9999999 $\text{kg/(s}^2\text{m}^3)$
B in Y	58.758 $\text{kg/(s}^2\text{m}^3)$
B in Z	-109.44 $\text{kg/(s}^2\text{m}^3)$
Use turbulent scale	<input type="checkbox"/>
Use calibration density	<input checked="" type="checkbox"/>
Calibration density	1.225 $\text{kg/m}^3$
Heat conductivity of porous matrix	<input checked="" type="checkbox"/>
Use effective density	<input type="checkbox"/>
Density of porous matrix	4559.26 $\text{kg/m}^3$
Specific heat capacity of porous matrix	836 $\text{J/(kg}^\circ\text{K)}$
Conductivity type	Isotropic
Thermal conductivity	244.72 $\text{W/(m}^\circ\text{K)}$
Melting temperature	1000 K
Matrix and fluid heat exchange defined by	Volumetric heat exchange coefficient
Volumetric heat exchange coefficient type	Isotropic
Volumetric heat exchange coefficient	(Table)

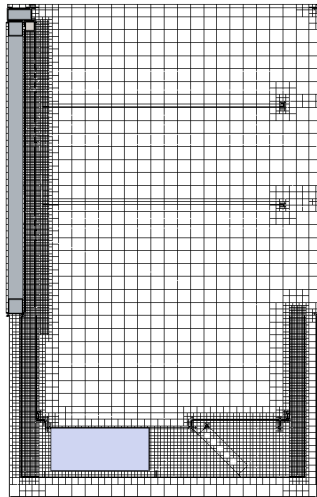
3.25 pav. Bendrieji akytos medžiagos parametrai

Vertinant tūrinį šilumos perdavimo koeficientą naudojami 3.3 lentelės rezultatai. Šiuo atveju reikšmės taip pat sumažinamos du kartus. Tūrinio šilumos perdavimo koeficiento įvertinimas pateiktas 3.26 pav.



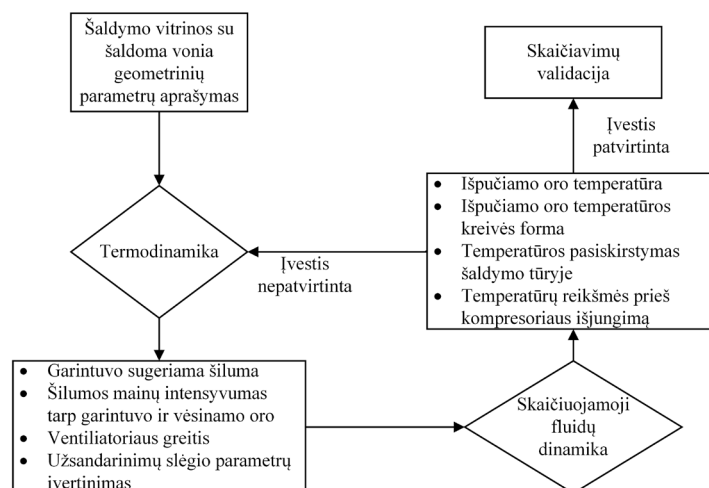
3.26 pav. Akytos medžiagos modelyje įvertinamas tūrinio šilumos perdavimo koeficientas

Generuojant skaičiuojamojo modelio tinkliuką pagrindinis dėmesys skirtas tinkliuko tankinimui srityse, kuriose susidaro didžiausi temperatūros ir oro srauto greičio gradientai. Tinkliukas sutankintas ties durelių oro išputimo ertme. Taip pat yra papildomai sutankinamos oro išputimo ir įtraukimo ertmės bei sritys ties garintuvo modeliu ir ventiliatoriais. Sugeneruotas skaičiuojamojo modelio tinkliukas pateikiamas 3.27 pav.



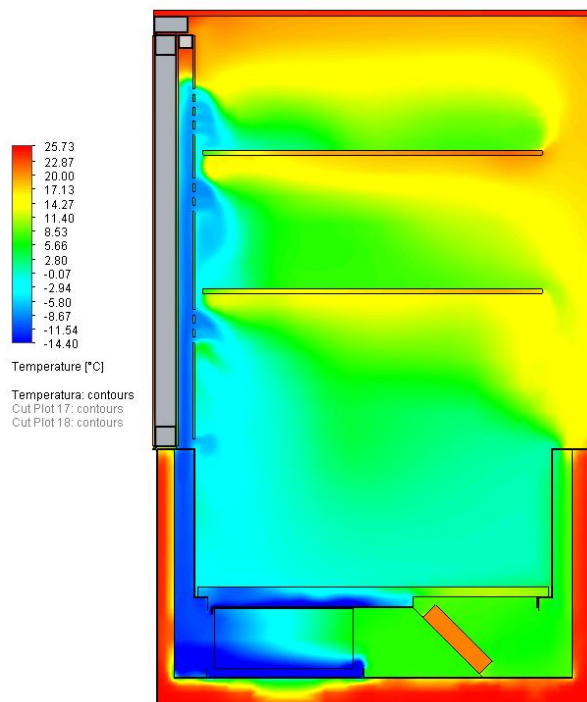
**3.27 pav.** Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia skaičiuojamajame modelyje sudarytas tinkliukas

Skaičiavimus nuspręsta atlikti iki kol pasiekiamas pirmasis kompresoriaus išsijungimas po tiriamojo įrenginio paleidimo. Tokia skaičiavimų trukmė yra pakankama siekiant nustatyti temperatūros pasiskirstymą po šaldomąjį tūrį. Matuojamųjų taškų pozicijos skaičiuojamajame modelyje išdėliotos pagal 2.5 pav., schemą. Atliekant skaičiavimus, temperatūrų reikšmės matuojamos iš karto įjungus įrenginį. Dėl šios priežasties, atliekant validacijos patikrinimą, naudojamos eksperimento temperatūrų reikšmės nuo ketvirtosios minutės. Iš eksperimentinių rezultatų žinoma, kad kompresorius po įrenginio įjungimo išsijungė 27-tąją minutę. Atsižvelgiant į šią sąlygą, skaičiavimai atliekami 1620 sekundes. Pradedant skaičiavimus, šilumos sugėrimas įjungiamas nuo pirmosios skaičiavimų sekundės. Ventilatoriaus kraštinėje sąlygoje nurodoma, kad ventilatorius įsijungtų, kai garintuvo bloko temperatūra pasiekia  $+22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  reikšmę. Kadangi atliekami skaičiavimai yra pereinamojo proceso, rezultatų konvergavimo metodų taikyti nepavyksta. Atsižvelgiant į tai, pagal [19] šaltinio pavyzdį, sudarytas iteracinio skaičiavimo algoritmas (žr. 3.28 pav.). Naudojant šį algoritmą, kiekvieno skaičiavimo rezultatai lyginami su eksperimentiniais rezultatais. Pastebėjus neatitikimus tarp gautų rezultatų, įvedamos atitinkamos skaičiavimų parametrų korekcijos. Skaičiavimų metu pasirinkta sekti išpučiamo oro temperatūros kreivę. Ši kreivė yra mažiausiai jautri kraštinių sąlygų įvertinimui, lyginant su kitų charakteringųjų taškų reikšmėmis.

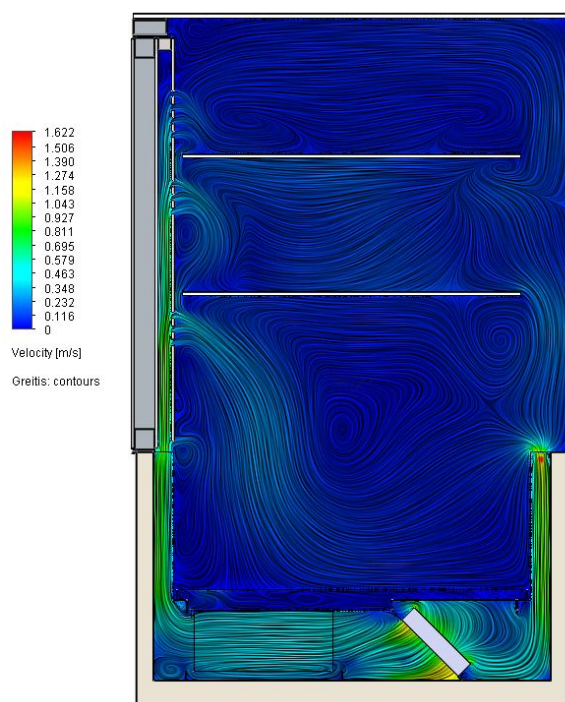


**3.28 pav.** Naudoto iteracinio skaičiavimo algoritmas

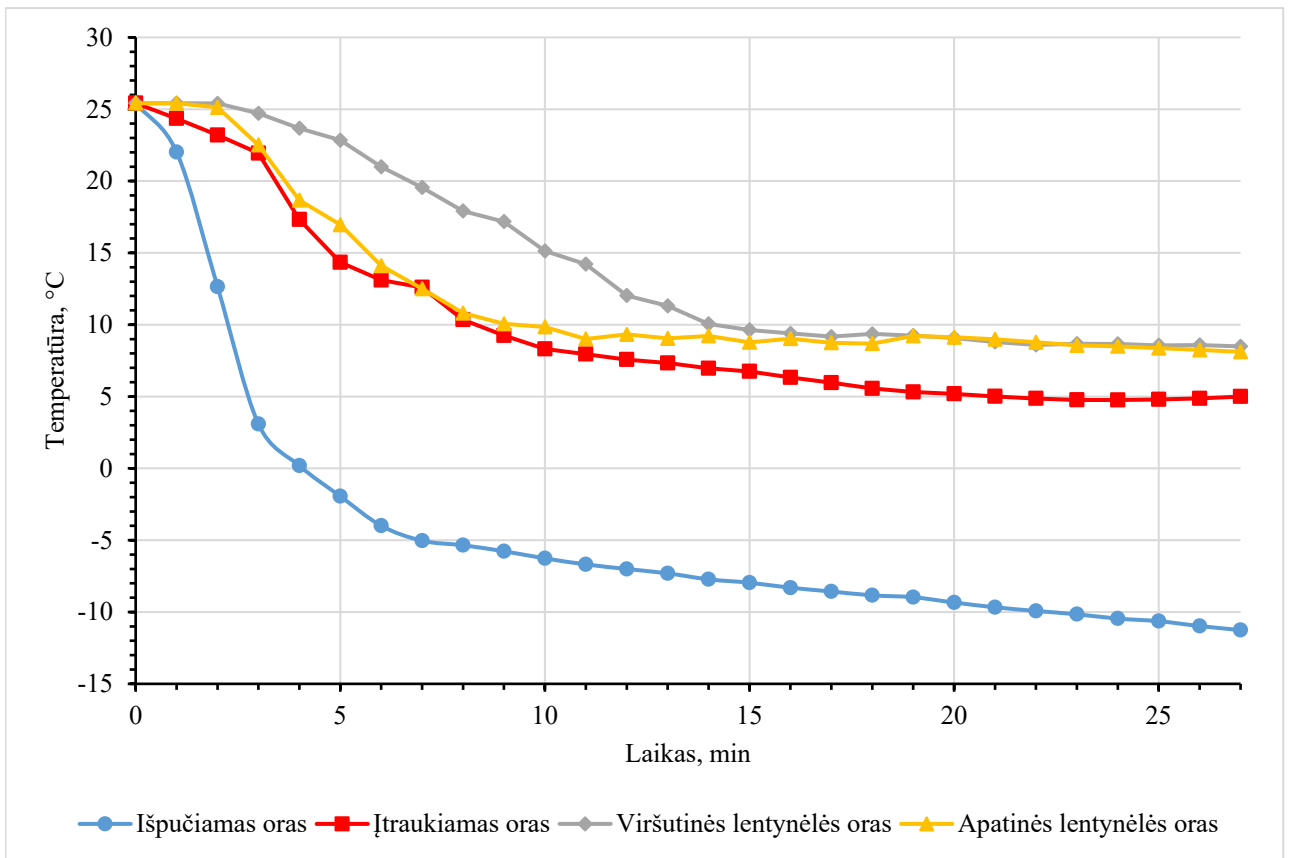
Atliekant skaičiavimus, kaip ir eksperimento metu, charakteringųjų taškų išmatuotos temperatūrų reikšmės yra išsaugomos vienos minutės intervalu. Temperatūros pasiskirstymo vaizdas pateikiamas 3.29 pav., greičio pasiskirstymas po vitrinos vidų pateikiamas 3.30 pav., o temperatūrų reikšmių kreivės pateikiamos 3.31 pav. Validacijos įvertinimui atliekamas išpučiamo oro (žr. 3.32 pav.), įtraukiamo oro (žr. 3.33 pav.), viršutinės lentynėlės oro (žr. 3.34 pav.), apatinės lentynėlės oro (žr. 3.35 pav.), temperatūrų kreivių ir reikšmių palyginimas.



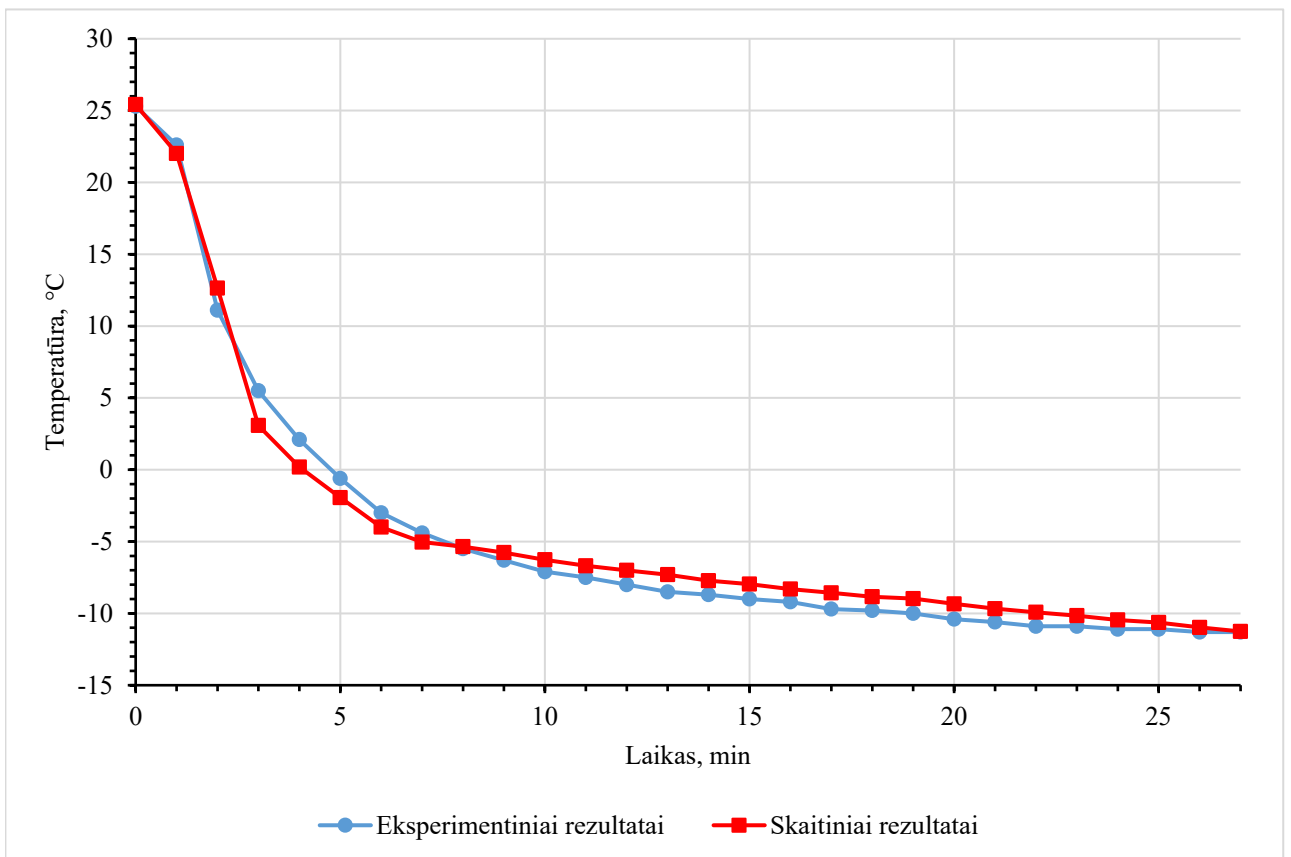
3.29 pav. Skaičiuojamajame modelyje pasiskirstančios temperatūros kontūrai



3.30 pav. Skaičiuojamajame modelyje pasiskirstančio oro srauto greitis ir kryptis

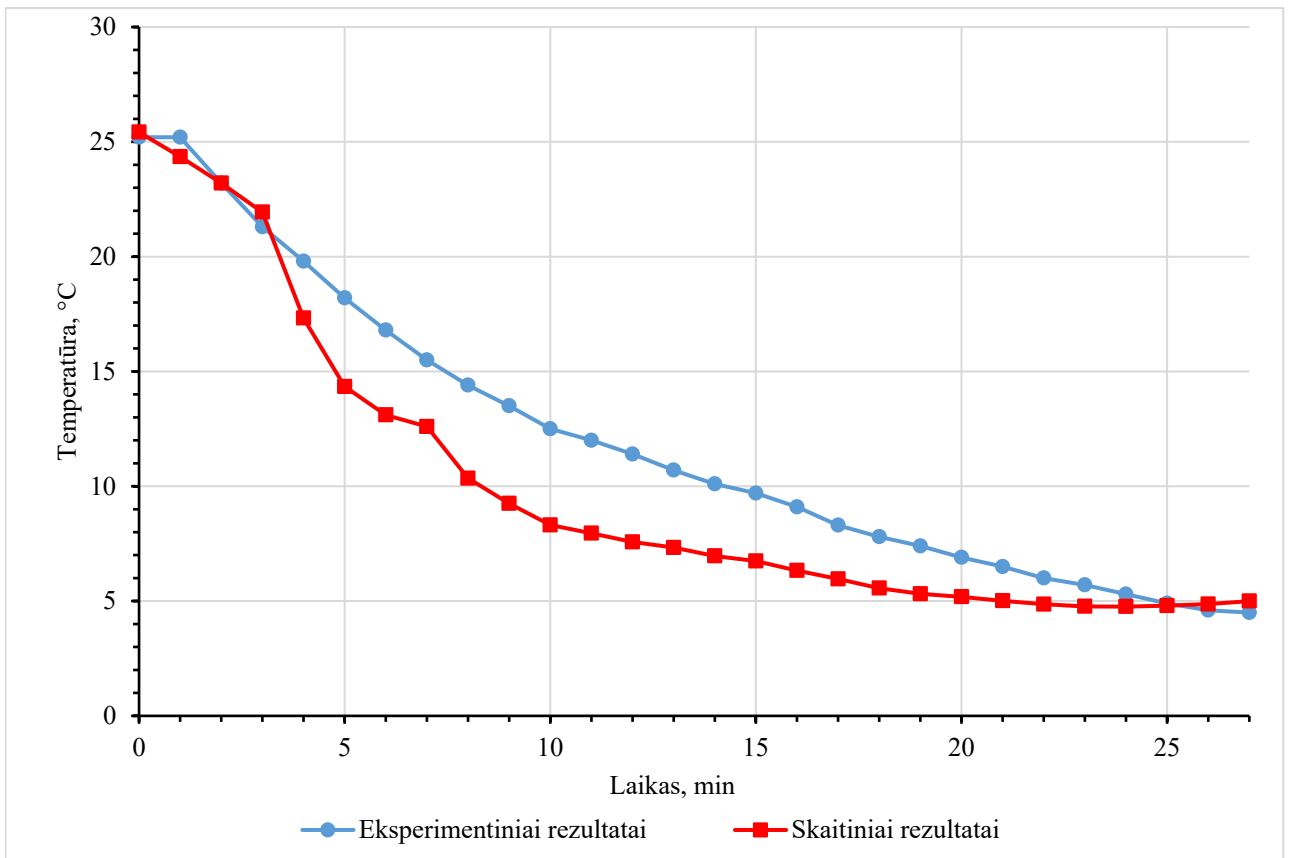


3.31 pav. Skaičiuojamojo modelio temperatūrų reikšmių priklausomybė nuo laiko

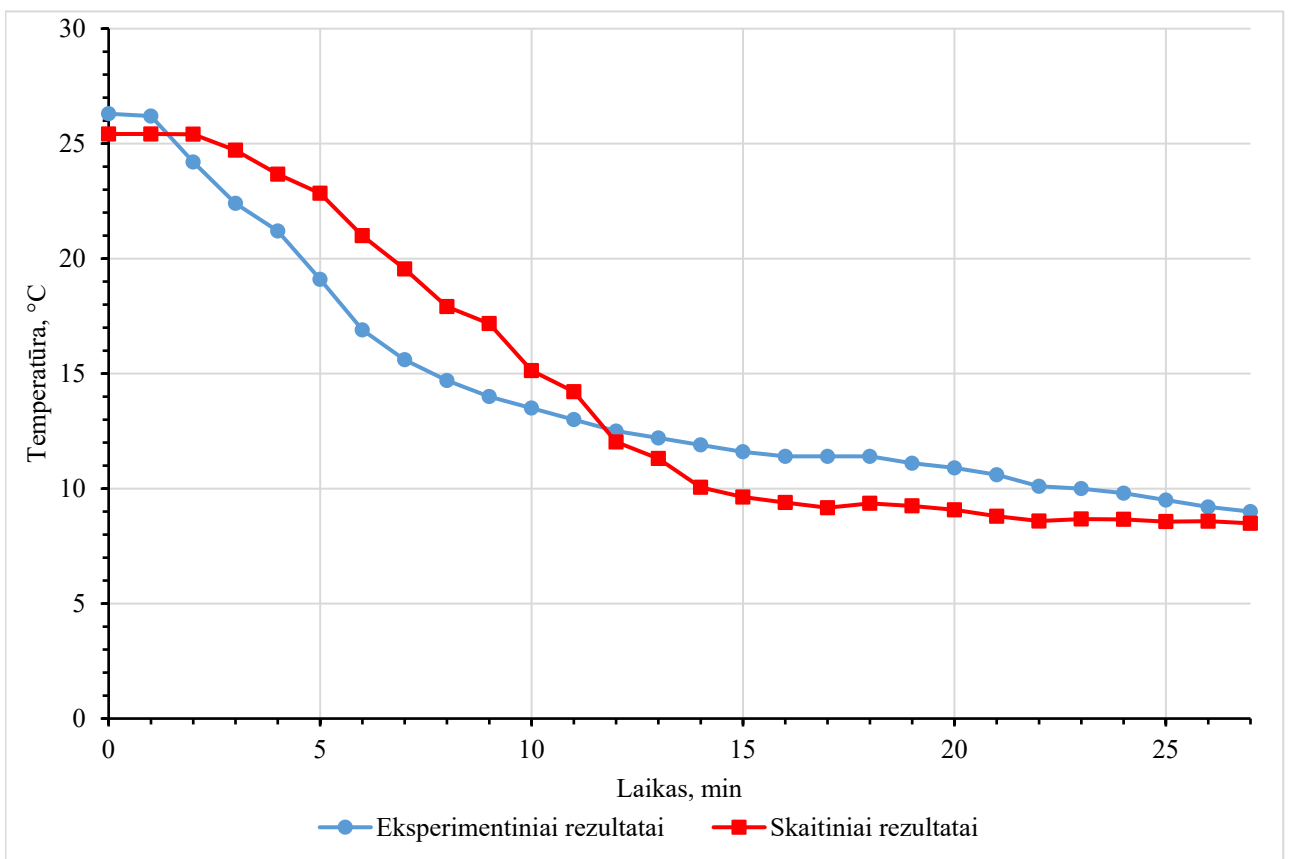


3.32 pav. Eksperimentinio ir skaitinio tyrimų išpučiamo oro temperatūrų reikšmės

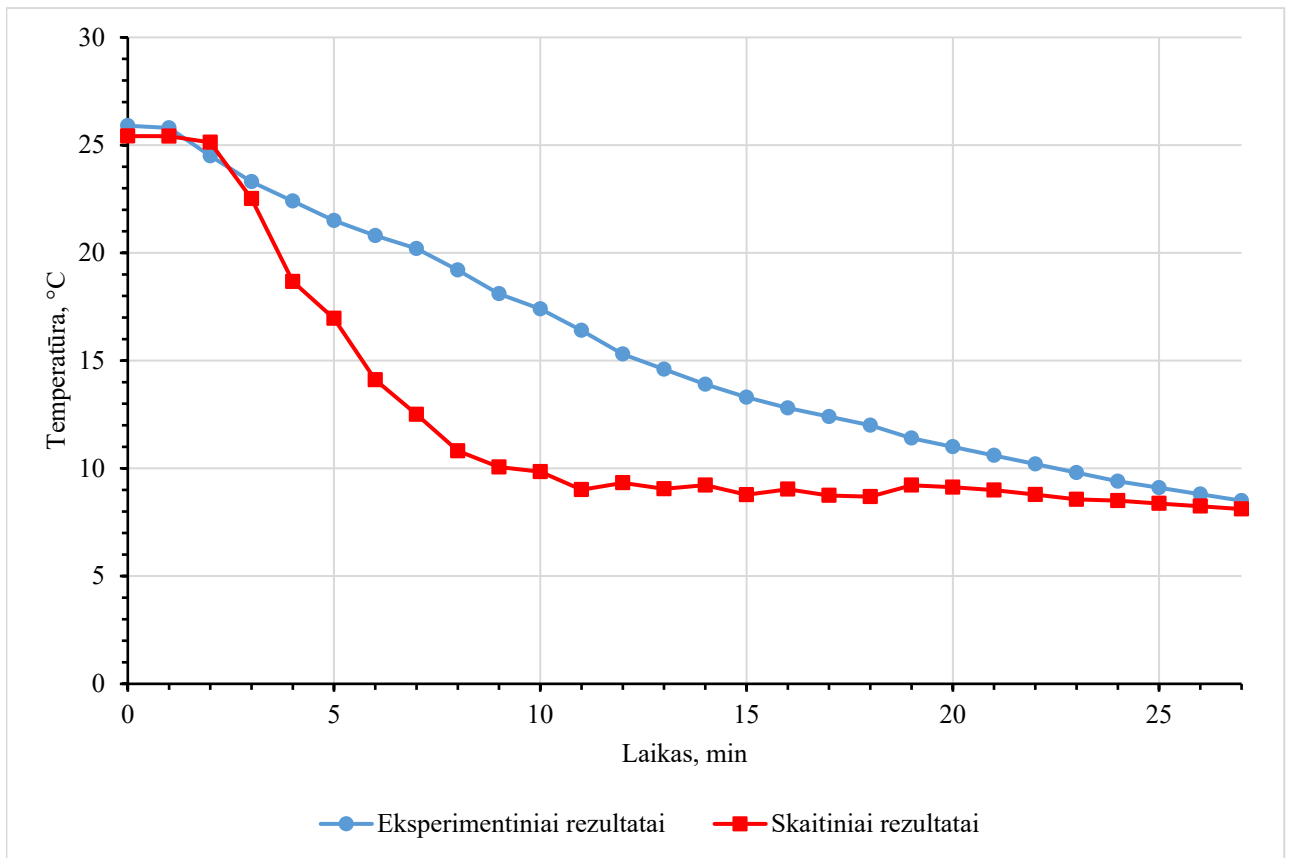




3.33 pav. Eksperimentinio ir skaitinio tyrimų įtraukiamo oro temperatūrų reikšmės



3.34 pav. Eksperimentinio ir skaitinio tyrimų viršutinės lentynėlės oro temperatūrų reikšmės



3.35 pav. Eksperimentinio ir skaitinio tyrimų apatinės lentynėlės oro temperatūrų reikšmės

Analizuodami temperatūros pasiskirstymo kontūrus (žr. 3.29 pav.), galima pastebėti, kad pro apatinį stiklo tarpą ir pirmąjį durelių stiklo perforacijų segmentą, didelis atvėsusio oro tūris nusileidžia į vonią. Susikaupęs atvėsęs oras ventiliatoriaus pagalba yra įtraukiamas į įtraukimo kanalą. Dėl šios priežasties atsiranda santykinis temperatūrų skirtumas tarp lentynėlių oro ir įtraukiamo oro. Žvelgiant į greičio pasiskirstymo ir krypties kontūrus (žr. 3.30 pav.) matoma, kad santykinai didelis oro srautas išeina per pirmąjį durelių stiklo perforacijų segmentą. Taip pat galima pastebėti, kad naudojama ventiliatoriaus pozicija neleidžia jo išnaudoti pilnu potencialu. Dėl ventiliatoriaus pasvirimo, srautas iš įtraukimo kanalo yra įtraukiamas kampu. Dėl šios priežasties yra prarandama dalis oro srauto kinetinės energijos. Peržiūrint skaičiuojamojo modelio temperatūrų reikšmių priklausomybę nuo laiko (žr. nuo 3.31 pav. iki 3.35 pav.) galima pastebėti, kad kreivių formos tik iš dalies atitinka eksperimentinių rezultatų kreivių formas. Nors kreivių formos ir ne visiškai atitinka eksperimentinių rezultatų kreives, galima pastebėti, kad kreivės turi tendenciją skaičiavimų pabaigoje nusistovėti. Nusistovėjusios reikšmės yra artimos eksperimentinių rezultatų reikšmėms. Skaičiavimų rezultatai pateikiami 3.5 lentelėje.

3.5 lentelė. Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia eksperimentinių ir skaitinio modelio rezultatų palyginimas

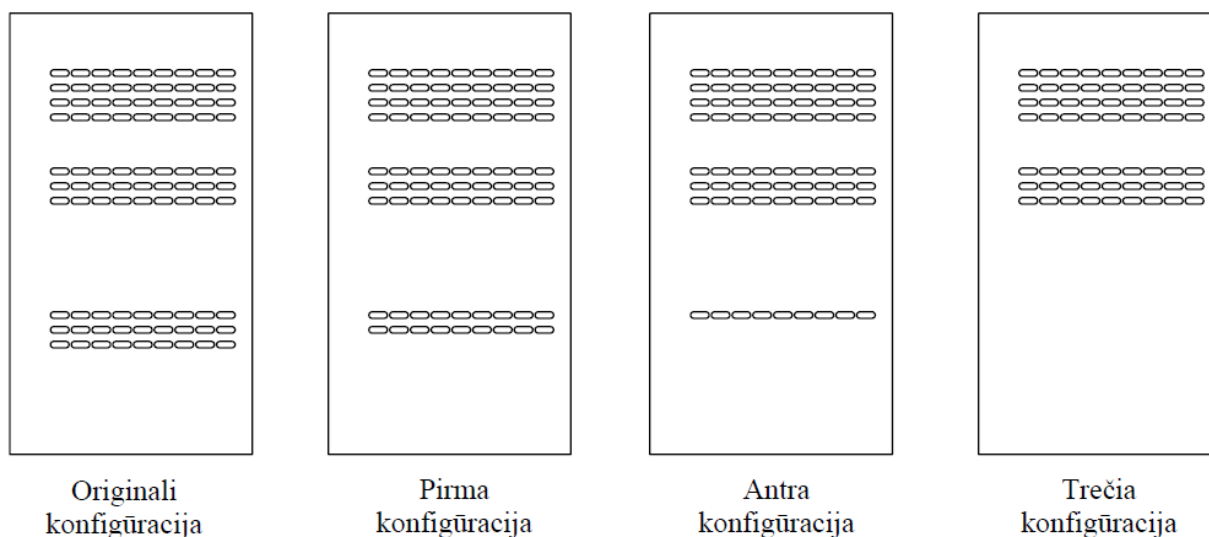
Temperatūros matavimo taško vieta	Eksperimentiškai išmatuota temperatūros reikšmė, °C	Skaitiniu būdu apskaičiuota temperatūros reikšmė, °C	Absoliutinis skirtumas, °C	Santykinė paklaida, %
Išpučiamas oras	-11,3	-11,05	0,25	2,21
Įtraukiamas oras	+4,5	+4,99	0,49	10,89

3.5 lentelė. (tęsinys)

Temperatūros matavimo taško vieta	Eksperimentiškai išmatuota temperatūros reikšmė, °C	Skaitiniu būdu apskaičiuota temperatūros reikšmė, °C	Absoliutinis skirtumas, °C	Santykinė paklaida, %
Viršutinės lentynėlės oras	+9	+8,49	0,51	5,67
Apatinės lentynėlės oras	+8,5	+8,11	0,39	4,59

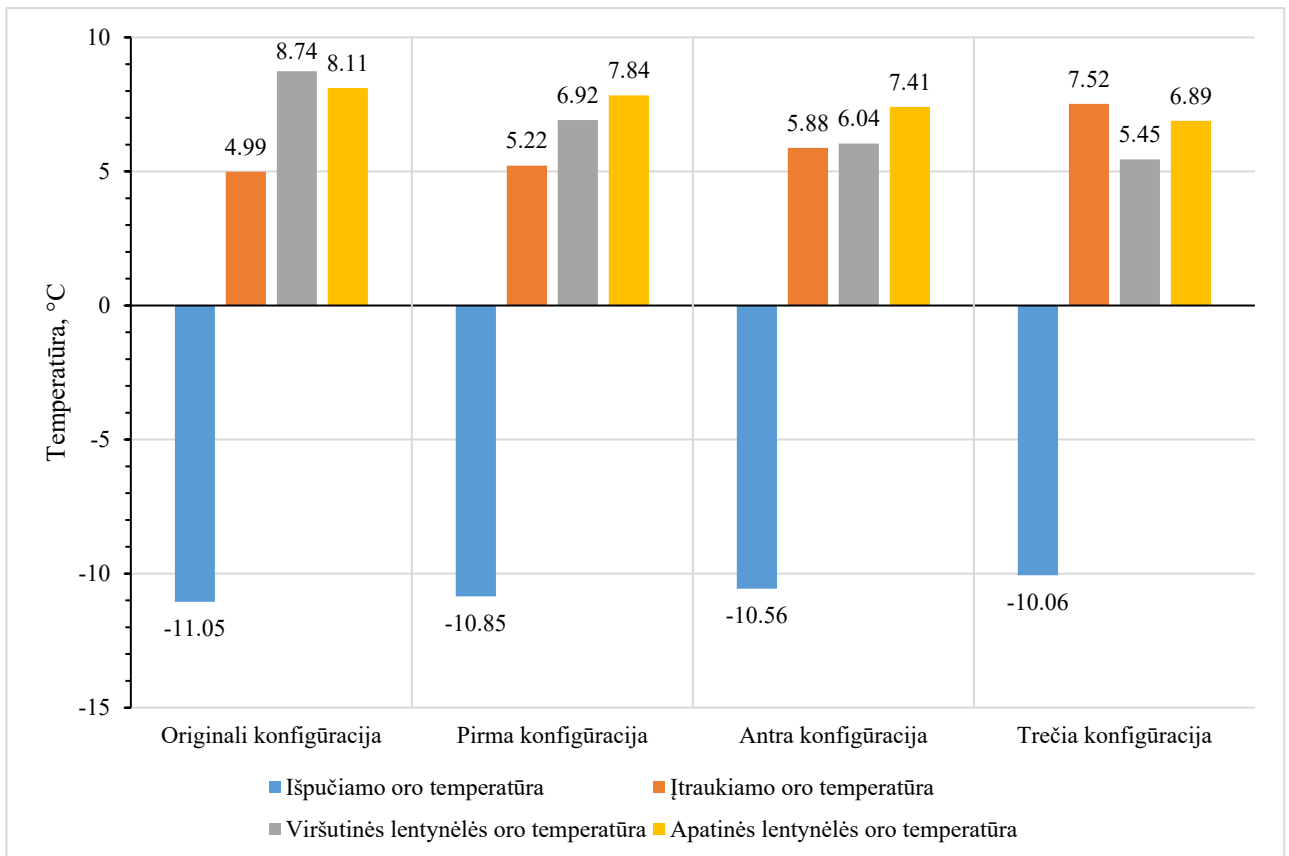
### 3.3. Skaitinis šaldymo vitrinos su šaldoma vonia patobulinimų tyrimas

Sukūrus validuojantį skaitinį šaldymo vitrinos su šaldoma vonia modelį ir atlikus skaitinius skaičiavimus, pastebėta, kad didelę įtaką nevienodai pasiskirstančiai oro temperatūrai turi apatinis durelių stiklo perforacijų segmentas. Siekiant sumažinti santykinį skirtumą tarp matuojamų taškų reikšmių, nuspręsta sumažinti apatinio segmento perforacijų skaičių. Skaičiavimams sukuriama papildomos trys skirtingos durelių perforuoto stiklo konfigūracijos. Atitinkamai kiekvienoje konfigūracijoje sumažinama po vieną eilę perforacijų iš apatinio perforacijų segmento (žr. 3.36 pav.). Šių skaičiavimų metu naudojamas originalus, tokio pačio pajėgumo ir posvyrio kampo ventiliatorius, kaip ir validuojančiame šaldymo vitrinos su šaldoma vonia skaičiuojamajame modelyje.



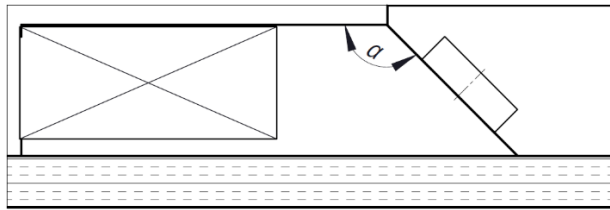
3.36 pav. Skaitiniame tyrime naudojamų durelių stiklų konfigūracijos

Kiekviename skaičiavime naudojamas skaitinis skaičiuojamasis modelis, kurio kraštinės bei pradinės sąlygos yra identiškios validuojančio modelio kraštinėms ir pradinėms sąlygoms. Kiekvieno skaičiavimo metu išvedami rezultatai iš tų pačių charakteringųjų taškų, kaip ir eksperimentinio tyrimo metu (žr. 2.5 pav.). Šių skaičiavimų metu rezultatų vertės yra išvedamos 27-tąją skaičiavimų minutę. Ši reikšmė validuojančiame skaičiuojamajame modelyje priimta kaip nusistovėjusių temperatūrų reikšmių akimirka prieš šaldymo agregato išjungimą. Skaičiavimų rezultatai pateikiami 3.37 pav. Kiekvienos skirtingos konfigūracijos skaičiavimų temperatūrų, greičio bei krypčių pasiskirstymo rezultatai pateikiami 1 priede.

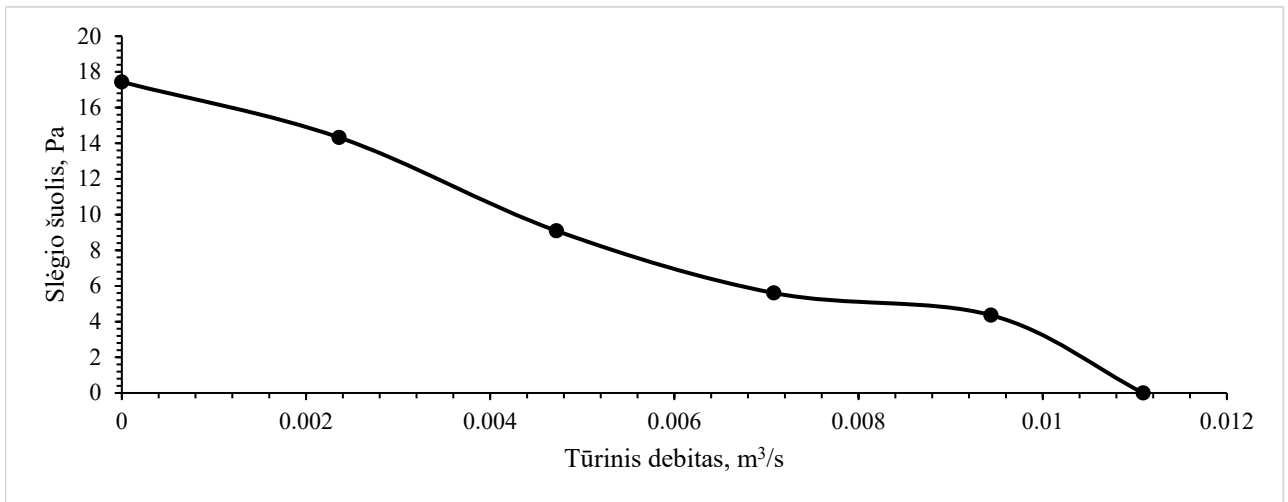


3.37 pav. Temperatūrų reikšmių priklausomybės nuo durelių stiklo konfigūracijų

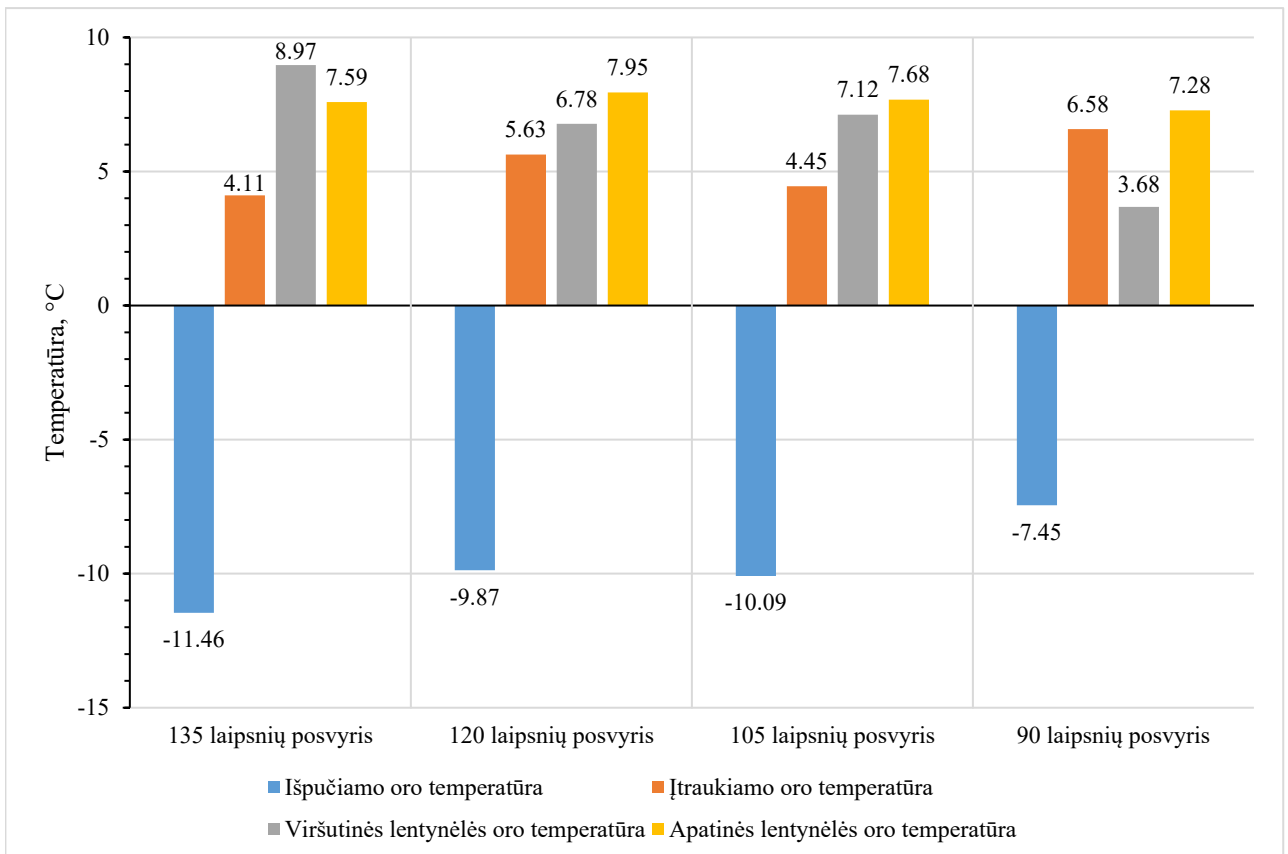
Iš gautų rezultatų pastebima, kad mažinant stiklo apatinio perforacijų segmento eilių skaičių, žemėja viršutinės lentynėlės oro temperatūra ir kyla įtraukiamo oro temperatūra. Tokį rezultatą įtakoja didesnis išpučiamas tūrinis oro debitas, tekantis pro viršutinį stiklo perforacijų segmentą. Taip pat pastebėta, kad apatinės lentynėlės oro temperatūrų reikšmės nėra tokios jautrios durelių stiklo perforacijų pakeitimams, lyginant su viršutinės lentynėlės ir įtraukiamo oro temperatūrų reikšmėmis. Apžvelgiant rezultatus (žr. 3.37 pav.), galima pastebėti, kad tolygiausiai temperatūra pasiskirsto naudojant antrą durelių stiklo konfigūraciją. Naudojant šią konfigūraciją, absoliutinis skirtumas tarp įtraukiamo oro temperatūros ir viršutinės lentynėlės oro temperatūros yra 0,16 °C, o santykinis skirtumas 2,72 %. Atitinkamai absoliutinis temperatūros skirtumas tarp įtraukiamo oro ir apatinės lentynėlės oro yra 1,53 °C, santykinis skirtumas siekia 26,02 %. Atliekant validuojančiojo modelio skaičiavimus, pastebėta, kad naudojama ventiliatoriaus padėtis galimai yra neefektyvi ir tokiu būdu neišnaudojamas visas galimas ventiliatoriaus potencialas. Taip pat žinoma, kad naudojamo ventiliatoriaus išnaudojamas pajėgumas yra du kartus mažesnis lyginant su galimu maksimaliu pajėgumu. Dėl šių priežasčių, naudojant originalią durelių stiklo konfigūraciją, siekiama iširti ventiliatoriaus posvyrio kampo įtaką temperatūros pasiskirstymui. Taip pat, atliekant šį tyrimą, siekiama išbandyti mažesnio dydžio ir mažesnio galingumo ventiliatorių, kuris veiktų maksimaliu galimu pajėgumu. Tokio modelio ventiliatorius yra pigesnis, lyginant su originaliai naudojamu ventiliatoriumi, o elektros energijos sąnaudos nepadidėtų. Tyrimo metu keičiamas ventiliatoriaus posvyrio kampas  $\alpha$  iš originalios pradinės reikšmės, kuri yra 135°, į 90° reikšmę, 15° žingsniu (žr. 3.38 pav.). Tyrime naudojamo ventiliatoriaus priklausomybė tarp tūrinio debito ir slėgio šuolio pateikiama 3.39 pav. Skaičiavimų rezultatai pateikiami 3.40 pav.



3.38 pav. Tyrime naudojamo ventiliatoriaus posvyrio kampo schema



3.39 pav. Tiriamojo ventiliatoriaus slėgio šuolio ir tūrinio debito priklausomybė



3.40 pav. Ventiliatoriaus posvyrio kampo įtaka temperatūros pasiskirstymui šaldomajame tūryje

Iš gautų skaičiavimų rezultatų (žr. 3.40 pav.) galima pastebėti, kad naudojant naują ventiliatorių, kurio posvyrio kampas nepakitęs, gauti temperatūros pasiskirstymo rezultatai yra artimi rezultatams, gautiems naudojant originalų ventiliatorių (žr. 3.31 pav.). Išpučiamo oro temperatūrų absoliutinis skirtumas yra 0,41 °C, santykinis skirtumas siekia 3,71 %. Įtraukiamo oro temperatūrų absoliutinis skirtumas lygus 0,88 °C, santykinis skirtumas yra 17,64 %. Viršutinės lentynėlės oro temperatūrų absoliutinis skirtumas lygus 0,23 °C, santykinis skirtumas lygus 2,63 %. Atitinkamai apatinės lentynėlės oro temperatūrų absoliutinis skirtumas lygus 0,52 °C, o santykinis skirtumas yra 6,41 %. Ventiliatoriaus posvyrio kampo keitimas nėra toks pat efektyvus, kaip durelių stiklo konfigūracijų keitimas, siekiant suvienodinti temperatūros pasiskirstymo reikšmes. Temperatūra tolygiausiai pasiskirstė naudojant 120 laipsnių posvyrio kampą. Naudojant šį posvyrio kampą tarp įtraukiamo oro temperatūros ir viršutinės lentynėlės, oro temperatūros absoliutinis skirtumas lygus 1,15 °C, o santykinis skirtumas lygus 20,43 %. Tarp įtraukiamo oro temperatūros ir apatinės lentynėlės oro temperatūros absoliutinis skirtumas lygus 2,32 °C, santykinis skirtumas lygus 41,21 %.

## Išvados

1. Atlikus šaldymo vitrinos su šaldoma vonia veikimo principo analizę, nustatyta, kad tiriamojoje šaldymo vitrinoje su šaldoma vonia taikomas dinaminis šaldymo būdas. Išanalizavus tiriamojo objekto konstrukciją, pastebėta, kad šaldymo ciklas vykdomas recirkuliuojant vėsinaimą orą. Taip pat nustatyta, kad šaldymo vitrinos su šaldoma vonia modifikacijas verta atlikti tik oro srauto pasiskirstymą įtakojantiems elementams, kadangi šaldomos vonios ir šaldymo agregato modifikacijos yra per brangios. Išanalizavus panašių šaldymo įrenginių mokslinius tyrimus, nustatyta, kad atliekant skaitinius skaičiavimus, dažniausiai garintuvo modelis supaprastinamas į akytos medžiagos modelį.
2. Šaldymo vitrinos su šaldoma vonia eksperimentinio tyrimo metu nustatyta, kad šaldymo procesas yra pastovus ir stabilus. Darbinės temperatūros palaikymui naudotas kompresoriaus įjungimo periodas yra 8 minutės. Nustatytos darbinės temperatūros reikšmė kinta 2,5 °C diapazone, nuo +4,5 °C iki +7 °C. Nustatyta, kad ties kompresoriaus išjungimu pasiekama žemiausia išpučiamo oro temperatūra yra -11,3 °C, įtraukiamo oro temperatūra yra +4,5 °C, viršutinės lentynėlės oro temperatūra siekia +9 °C, o apatinės lentynėlės +8,5 °C. Santykinis skirtumas tarp įtraukiamo oro temperatūros ir viršutinės lentynėlės oro temperatūros yra 100 %, o tarp įtraukiamo oro temperatūros ir apatinės lentynėlės oro temperatūros yra 88,9 %.
3. Atliekant garintuvo supaprastinimą į akytos medžiagos bloką nustatytos slėgio kritimo gradiento priklausomybės, oro srautui tekant per tiriamąjį garintuvo segmentą. Kadangi  $x$  ašies kryptimi oro srautas tekėti per garintuvą negali, šia kryptimi įvertinamas be galo didelis slėgio kritimas. Apskaičiuota, kad  $z$  ašies kryptimi slėgio kritimo gradiento priklausomybę nuo įtekančio oro srauto aprašo lygtis  $y=331,76x^2-109,44x$ , o  $y$  ašies kryptimi aprašo lygtis  $y=87,792x^2+58,758x$ . Atliekant garintuvo segmento sugeriamos šilumos skaičiavimus nustatyta, kad įtekančio oro srauto temperatūrai kintant nuo +25 °C iki +12,5 °C sugeriamos šilumos kiekis atitinkamai kinta nuo 1881,75 W iki 678,71 W. Apskaičiuojant tūrinio šilumos perdavimo koeficientus nustatyta, kad įtekančio oro srauto greičiui kintant nuo 1 m/s iki 3 m/s šilumos perdavimo koeficientas atitinkamai kinta nuo 4995,06 W/m<sup>3</sup>·K iki 3405,11 W/m<sup>3</sup>·K. Taip pat nustatyta, kad medžiagos akytumas yra 0,867, šiluminė talpa 836 J/kg·K, medžiagos tankis 4559,26 kg/m<sup>3</sup>, šiluminis laidumas 244,72 W/m·K.
4. Sukūrus validuojantį skaičiuojamąjį modelį pastebėta, kad matuojamųjų temperatūrų reikšmių kreivių formos skiriasi nuo eksperimento metu nustatytų kreivių, tačiau nusistovėjusios reikšmės yra artimos. Validuojančiame skaičiuojamajame modelyje nustatyta, kad nusistovėjusi išpučiamo oro temperatūra yra -11,05 °C. Lyginant su eksperimentiniais rezultatais, absoliutinis skirtumas yra 0,25 °C, santykinė paklaida 2,21 %. Įtraukiamo oro temperatūra yra +4,99 °C, lyginant su eksperimentiniais rezultatais absoliutinis skirtumas yra 0,49 °C, santykinė paklaida 10,89 %. Viršutinės lentynėlės oro temperatūra yra +8,49 °C, lyginant su eksperimentiniais rezultatais absoliutinis skirtumas yra 0,51 °C, santykinė paklaida 5,67 %. Apatinės lentynėlės oro temperatūra yra +8,11 °C, lyginant su eksperimentiniais rezultatais absoliutinis skirtumas lygus 0,39 °C, santykinė paklaida 4,59 %.
5. Atlikus durelių stiklo modifikacijas nustatyta, kad tolygiausiai temperatūra po šaldomąjį tūrį pasiskirsto naudojant antrą konfigūraciją. Naudojant šią konfigūraciją tarp įtraukiamo oro temperatūros ir viršutinės lentynėlės oro temperatūros nustatytas 0,16 °C dydžio absoliutinis skirtumas, santykinis skirtumas 2,72 %. Atitinkamai tarp įtraukiamo oro temperatūros ir viršutinės lentynėlės oro temperatūros nustatytas 1,53 °C dydžio absoliutinis skirtumas, santykinis skirtumas 26,02 %. Panaudojus naują ventiliatorių pastebėta, kad gaunamos

temperatūrų reikšmės yra artimos reikšmėms, kai naudojamas originalus ventiliatorius. Absoliutinis temperatūrų skirtumas tarp išpučiamo oro reikšmių yra 0,41 °C, santykinis skirtumas 3,71 %. Atitinkamai tarp įtraukiamų oro reikšmių 0,88 °C ir 17,64 %, tarp viršutinės lentynėlės oro reikšmių 0,23 °C ir 2,63 %, o tarp apatinės lentynėlės oro reikšmių 0,52 °C ir 6,41 %. Tolygiausiai temperatūra pasiskirstė ventiliatorių pakreipus 120 laipsnių kampu. Tarp įtraukiamo oro temperatūros ir viršutinės lentynėlės oro temperatūros absoliutinis skirtumas yra 1,15 °C, santykinis 20,43 %. O tarp įtraukiamo oro temperatūros ir apatinės lentynėlės oro temperatūros absoliutinis skirtumas yra 2,32 °C, santykinis 41,21 %.



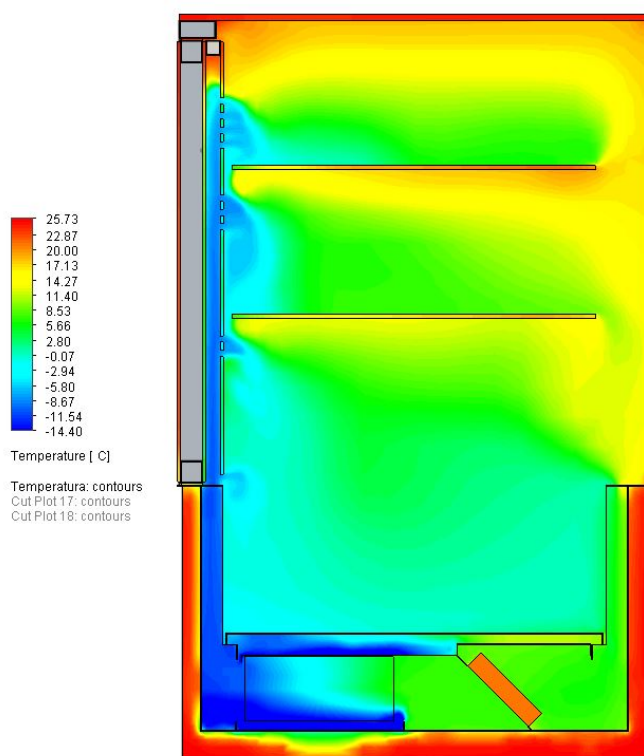
## Literatūra

1. CHU, Z. ir kt. Development of ZL400 Mine Cooling Unit using Semi-Hermetic Screw Compressor and its Application on Local Air Conditioning in Underground Long-Wall Face. *Archives of Mining Sciences* [interaktyvus]. 2016, **61**(4), 949-966 [žiūrėta 2021-04-04]. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.1515/amsc-2016-0063>.
2. J.P. Meyer. The performance of the refrigerants R-134a, R-290, R404A, R-407c and R-410A in air conditioners and refrigerators. *Journal of Mechanical Engineering* [interaktyvus]. 2001, **47**(8), 366-373 [žiūrėta 2021-02-02]. Prieiga per: <https://www.sv-jme.eu/article/the-performance-of-the-refrigerants-r-134a-r-290-r404a-r-407c-and-r-410a-in-air-conditioners-and-refrigerators/>
3. LAGUERRE, O. ir kt. Numerical Simulation of Air Flow and Heat Transfer in Domestic Refrigerators. *Journal of Food Engineering* [interaktyvus]. 2007, **81**(1), 144-156 [Žiūrėta 2021-02-02]. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.10.029>
4. Differences between Static Cooling, Fan Assisted Cooling, and Dynamic Cooling System? [interaktyvus]. [Žiūrėta 2021-02-02]. Prieiga per: <https://procoolmfg.com/cooling-system/>
5. Copper Tube Aluminium Finned Evaporator Coil for Display Freezer [interaktyvus]. [Žiūrėta 2021-02-02]. Prieiga per: <https://tommyji.en.made-in-china.com/product/woFJtBzvrOYT/China-Copper-Tube-Aluminium-Finned-Evaporator-Coil-for-Display-Freezer.html>
6. Glass properties | Saint-Gobain Sekurit [interaktyvus]. [Žiūrėta 2021-01-25]. Prieiga per: <https://www.saint-gobain-sekurit.com/glossary/glass-properties>
7. Thermal conductivity rigid polyurethane foam [interaktyvus]. [Žiūrėta 2021-01-25]. Prieiga per: [https://www.poliuretano.it/EN/thermal\\_conductivity\\_polyurethane.html](https://www.poliuretano.it/EN/thermal_conductivity_polyurethane.html)
8. Drop-in refrigerated well with refrigerated display, compact - 4GN [interaktyvus]. [Žiūrėta 2021-01-25]. Prieiga per: <https://www.electroluxprofessional.com/dk/pd/food-distribution/flexy-drop-in/drop-in-cold/drop-in-cold-display/drop-in-drop-in-refrigerated-well-with-refrigerated-display-compact-4gn-341078/>
9. WHITMAN, B., JOHNSON, B., TOMCZYK, J. ir SILBERSTEIN, E. *Refrigeration and Air Conditioning Technology*. 7-oji laida. Cengage Learning, 2012. ISBN 9781133712992.
10. WANG, R. M.; ZHENG, S. R. ir ZHENG, Y. G. *Polymer matrix composites and technology*. Beijing: Science Press, 2011. ISBN 9780857092229.
11. Delfield N8131-FA Two Pan Drop In Forced Air Refrigerated Cold Food Well [interaktyvus]. [Žiūrėta 2021-01-30]. Prieiga per: <https://www.webrestaurantstore.com/delfield-n8131-fa-two-pan-drop-in-forced-air-refrigerated-cold-food-well/305N8131FA.html>
12. HOPFGARTNER, J. ir kt. Numerical Simulation of the 3d Transient Temperature Evolution Inside a Domestic Single Zone Wine Storage Cabinet With Forced Air Circulation. Iš: *16th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue 2016*, July 11-14, 2016, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA. pp. 1645-1655. ISBN: 978-1-5108-2873-5. Prieiga per: <https://docs.lib.purdue.edu/iracc/1656/>
13. Using Simulation to Ensure the Cooling Efficiency of Refrigerated Trucks [interaktyvus]. [Žiūrėta 2021-02-06]. Prieiga per: <https://www.comsol.com/blogs/using-simulation-to-ensure-the-cooling-efficiency-of-refrigerated-trucks/>
14. JARFELT, U. ir RAMNÄS, O. Thermal conductivity of polyurethane foam – Best performance. Iš: *10th International Symposium on District Heating and Cooling*, September 3-5, 2006,

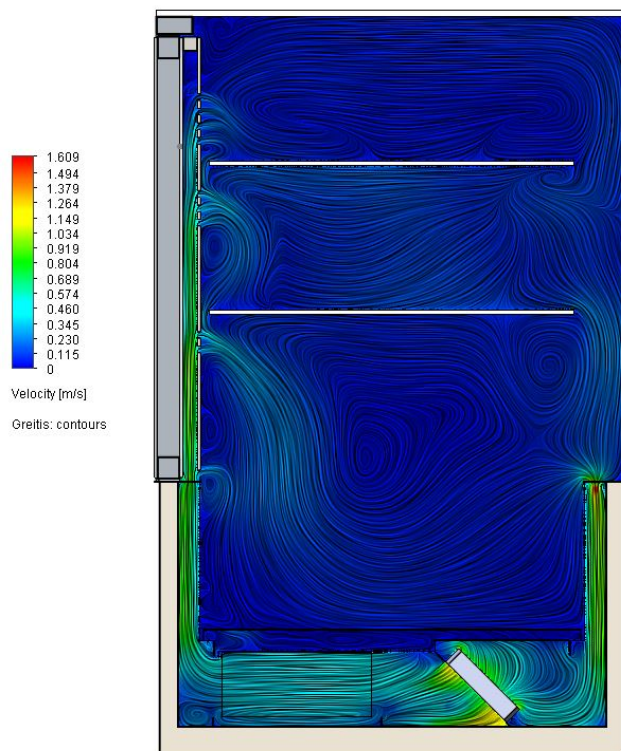
- Chalmers University of Technology Goteborg, Sweden. pp. 3-5. Prieiga per: [https://www.lsta.lt/files/events/28\\_jarfelt.pdf](https://www.lsta.lt/files/events/28_jarfelt.pdf)
15. GASPAR, P.D. ir kt. Detailed CFD Modelling of Open Refrigerated Display Cabinets. *Modelling and Simulation in Engineering* [interaktyvus]. 2012, **2012**, 1-17 [žiūrėta 2021-02-07]. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.1155/2012/973601>.
  16. SUN, J. ir kt. CFD Comparisons of Open-Type Refrigerated Display Cabinets with/without Air Guiding Strips. *Energy Procedia* [interaktyvus]. 2017, **123**, 54–61, [žiūrėta 2021-04-04]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.284>.
  17. HADAWAY, A.F. ir kt. Air Curtain Design Optimization of Refrigerated Vertical Display Cabinet using CFD. *International Journal of Scientific Engineering and Technology* [interaktyvus]. 2012, **1(4)**, 76-88, [žiūrėta 2021-04-04]. Prieiga per doi: 10.17950/ijset.
  18. ARTICO, G. ir kt. Performance Evaluation and Design Optimization of Refrigerated Display Cabinets Through Fluid Dynamic Analysis. Iš: *International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*, July 14-17, 2008, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA. Prieiga per: <https://docs.lib.purdue.edu/iracc/974/>.
  19. 073 - TEKMAR SLAB SENSOR, 10K OHM NTC THERMISTOR, 40FT (12M) HDPE JACKETED WIRE [interaktyvus]. [Žiūrėta 2021-04-06]. Prieiga per: <https://controlconsultantsinc.com/073-tekmar-slab-sensor-10k-ohm-ntc-thermistor-40ft-12m-hdpe-jacketed-wire.html>
  20. Flow Simulation – Technical Reference [interaktyvus]. [Žiūrėta 2021-04-08]. Prieiga per: <https://www.solidworks.co.uk/solidworks-videos/flow-simulation-technical-reference.aspx>
  21. SOLIDWORKS FLOW SIMULATION – SIMPLIFY USING POROUS MEDIA [interaktyvus]. [Žiūrėta 2021-04-09]. Prieiga per: <https://www.goengineer.com/videos/solidworks-flow-simulation-simplify-using-porous-media>
  22. Overall Heat Transfer Coefficient [interaktyvus]. [Žiūrėta 2021-04-09]. Prieiga per: [https://www.engineeringtoolbox.com/overall-heat-transfer-coefficient-d\\_434.html](https://www.engineeringtoolbox.com/overall-heat-transfer-coefficient-d_434.html)
  23. Kurganov, V.A. Heat Transfer Coefficient [interaktyvus]. [Žiūrėta 2021-04-09]. Prieiga per doi: [10.1615/AtoZ.h.heat\\_transfer\\_coefficient](https://doi.org/10.1615/AtoZ.h.heat_transfer_coefficient)
  24. ŞAHİN, A.Z. Effective Thermal Conductivity of Frost During the Crystal Growth Period. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [interaktyvus]. 2000, **43(4)**, 539-553, [Žiūrėta 2021-04-11]. Prieiga per doi: [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(99\)00162-3](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(99)00162-3).
  25. Ice – Thermal Properties [interaktyvus]. [Žiūrėta 2021-04-11]. Prieiga per: [https://www.engineeringtoolbox.com/ice-thermal-properties-d\\_576.html](https://www.engineeringtoolbox.com/ice-thermal-properties-d_576.html)
  26. 2014 SOLIDWORKS Help – Convection Heat Coefficient [interaktyvus]. [Žiūrėta 2021-04-12]. Prieiga per: [https://help.solidworks.com/2014/english/solidworks/cworks/c\\_convection\\_heat\\_coefficient.htm](https://help.solidworks.com/2014/english/solidworks/cworks/c_convection_heat_coefficient.htm)

## Priedai

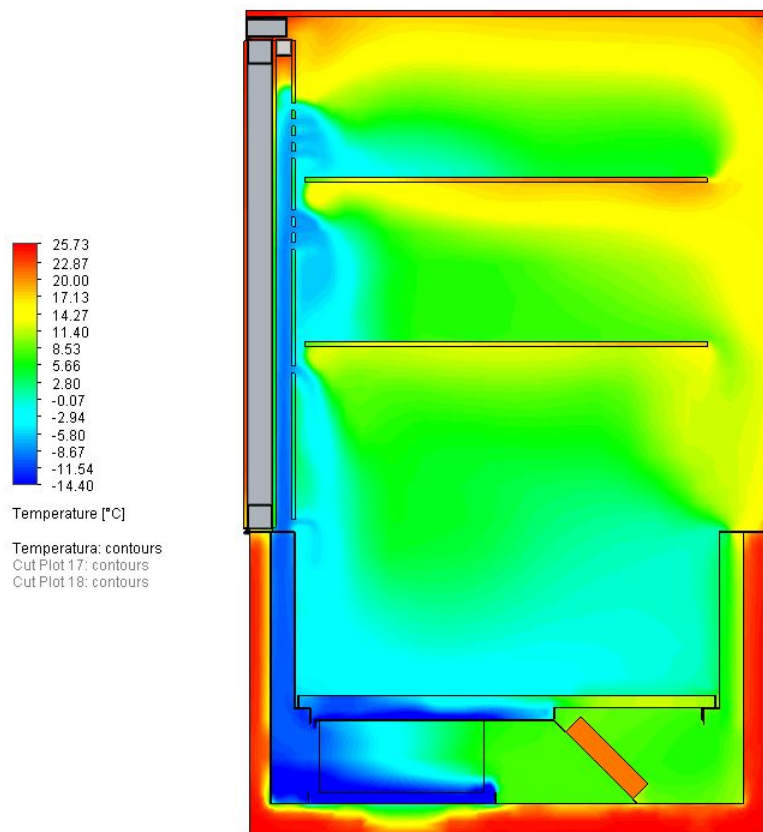
### 1 priedas. Šaldymo vitrinės su šaldoma vonia durelių stiklo konfigūracijų įtaka temperatūros ir greičio pasiskirstymui šaldomajame tūryje



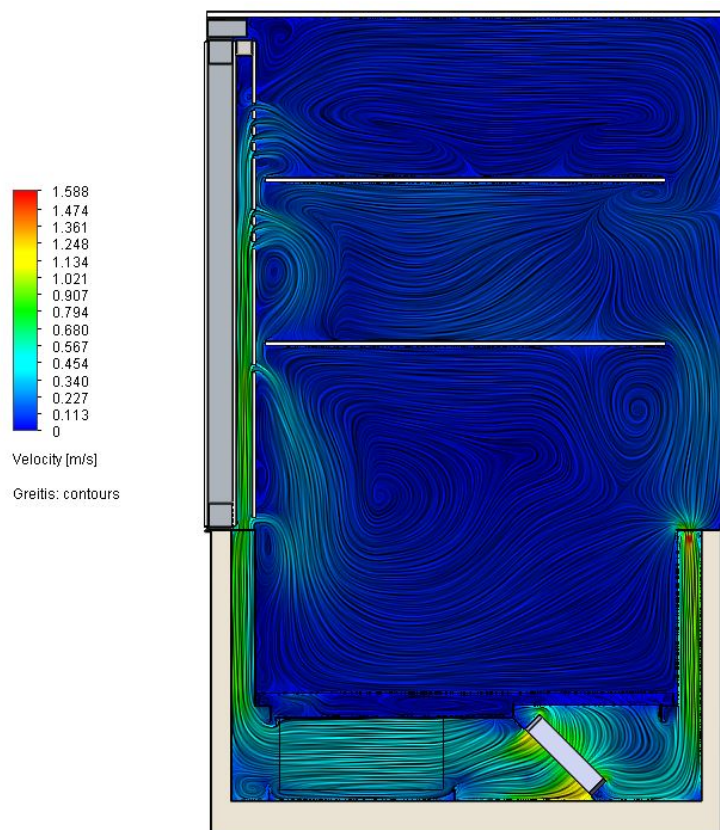
1 pav. Temperatūros pasiskirstymas šaldomajame tūryje naudojant pirmąją durelių stiklo konfigūraciją



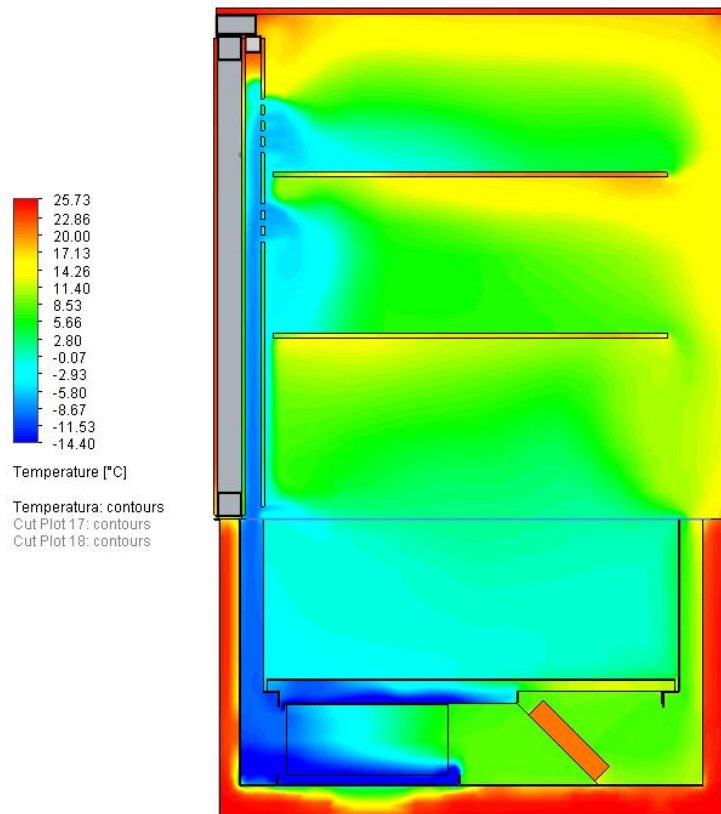
2 pav. Greičio pasiskirstymas šaldomajame tūryje naudojant pirmąją durelių stiklo konfigūraciją



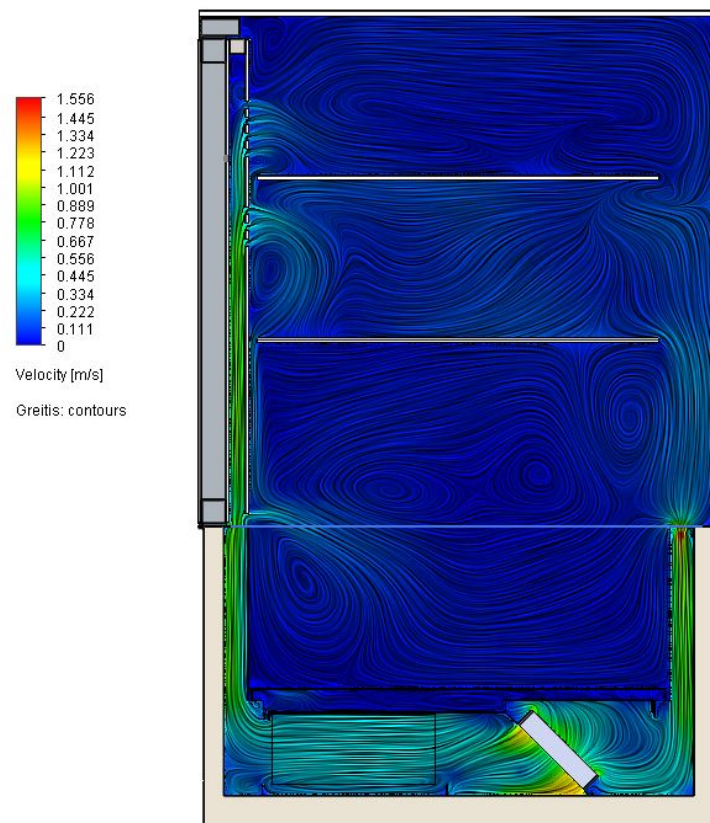
3 pav. Temperatūros pasiskirstymas šaldomajame tūryje naudojant antrąją durelių stiklo konfigūraciją



4 pav. Greičio pasiskirstymas šaldomajame tūryje naudojant antrąją durelių stiklo konfigūraciją

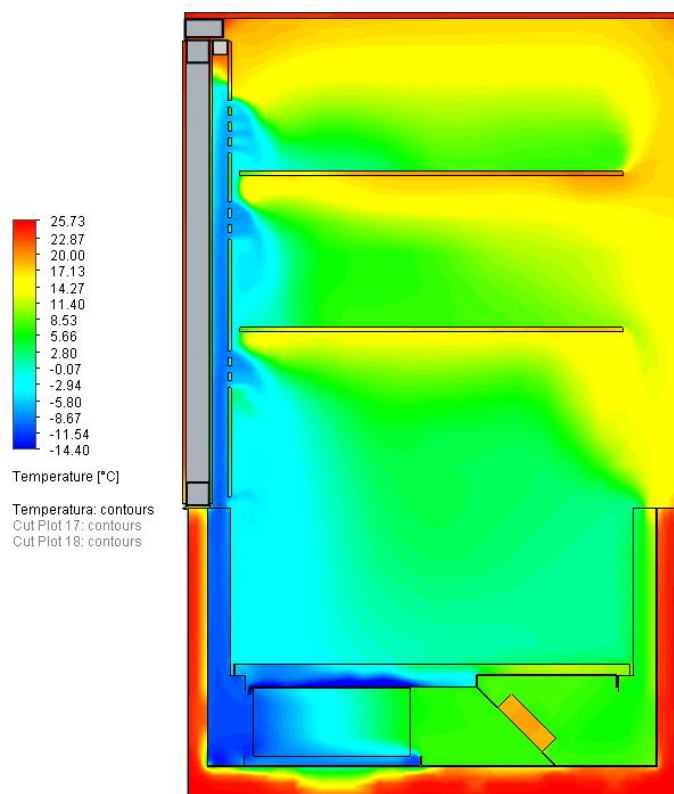


5 pav. Temperatūros pasiskirstymas šaldomajame tūryje naudojant trečiąją durelių stiklo konfigūraciją

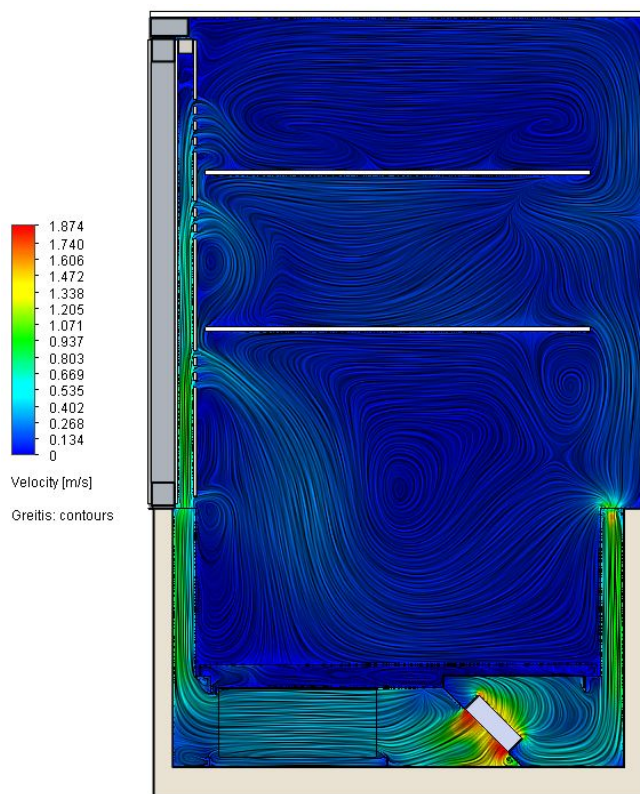


6 pav. Greičio pasiskirstymas šaldomajame tūryje naudojant trečiąją durelių stiklo konfigūraciją

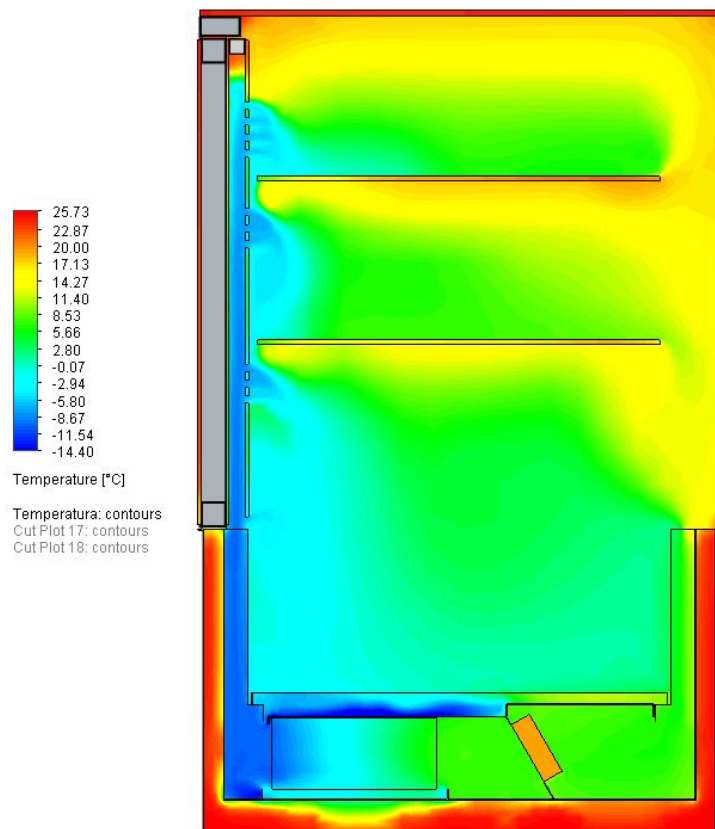
**2 priedas. Tiriamojo ventiliatoriaus ir jo posvyrio kampo įtaka temperatūros ir greičio pasiskirstymui šaldomajame tūryje**



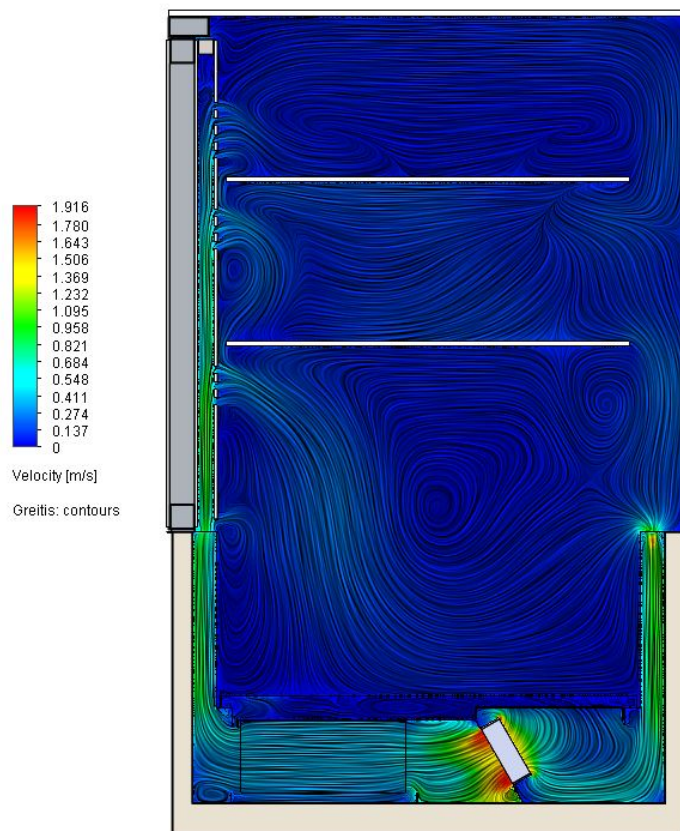
**7 pav.** Temperatūros pasiskirstymas šaldomajame tūryje, kai ventiliatorius pakreiptas 135 laipsnių kampu



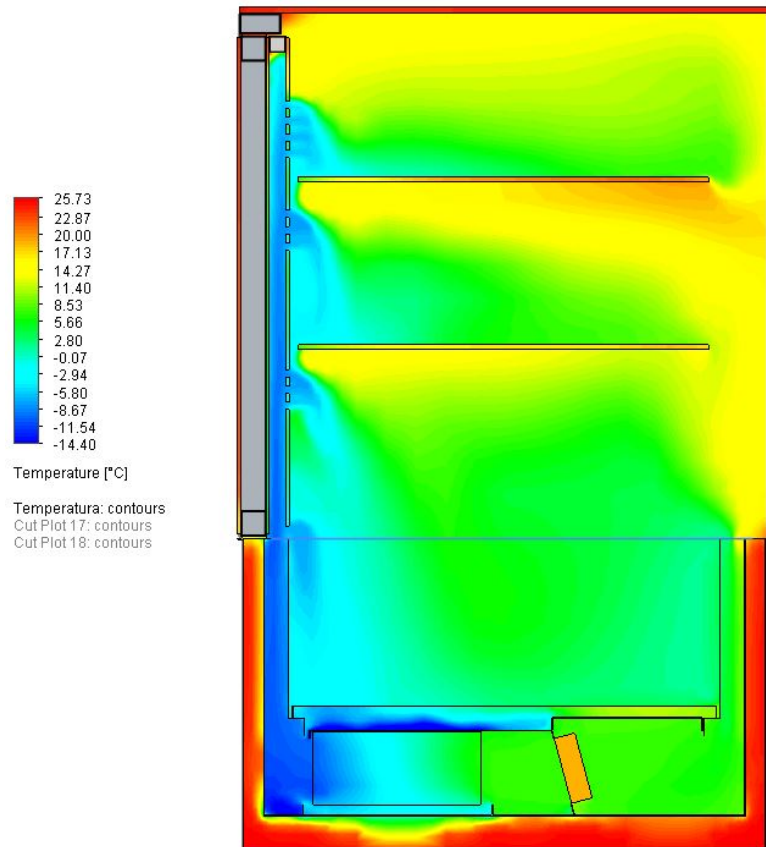
**8 pav.** Greičio pasiskirstymas šaldomajame tūryje, kai ventiliatorius pakreiptas 135 laipsnių kampu



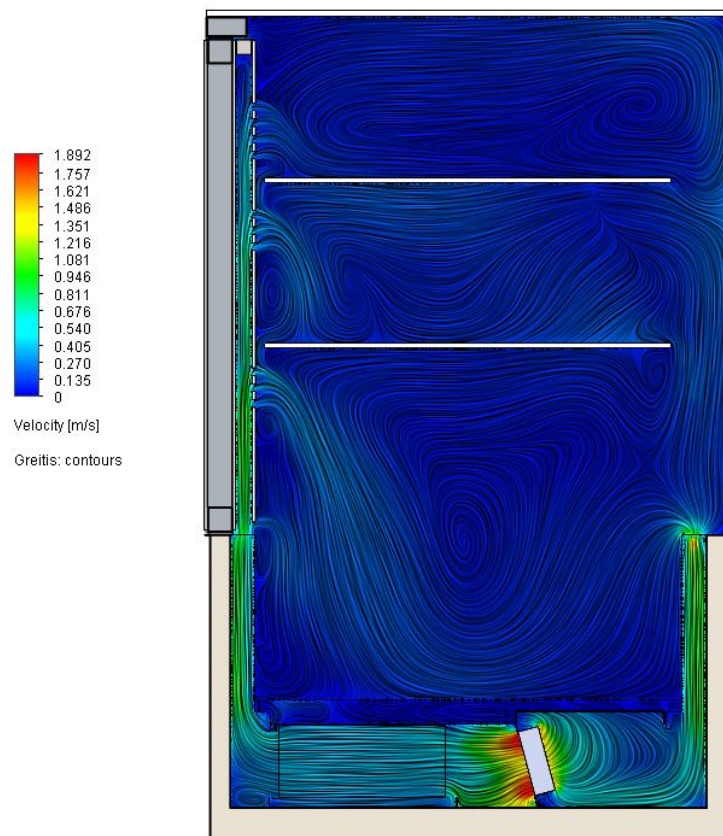
9 pav. Temperatūros pasiskirstymas šaldomajame tūryje, kai ventiliatorius pakreiptas 120 laipsnių kampu



10 pav. Greičio pasiskirstymas šaldomajame tūryje, kai ventiliatorius pakreiptas 120 laipsnių kampu

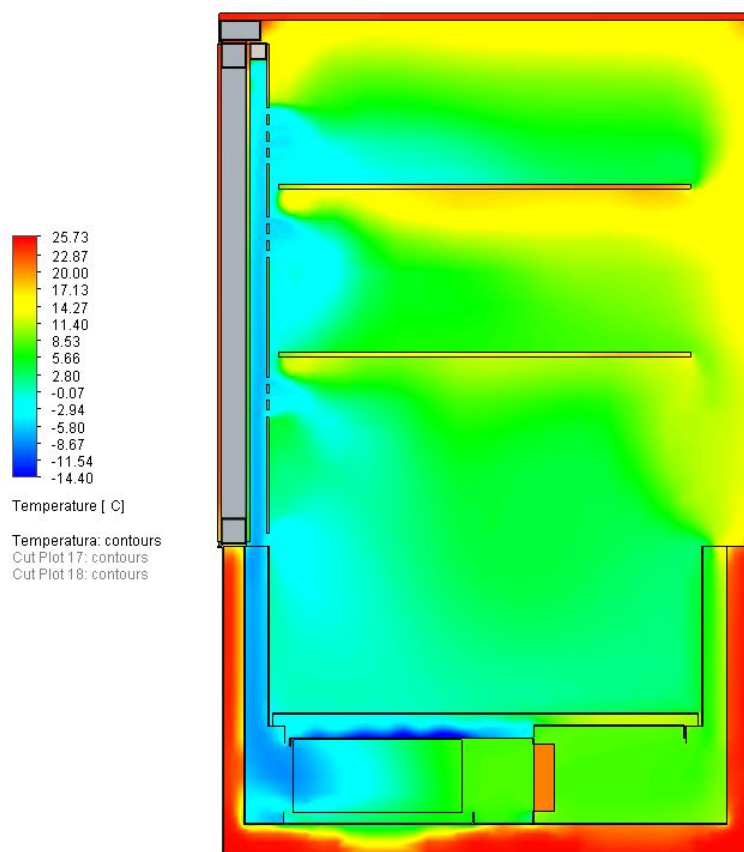


11 pav. Temperatūros pasiskirstymas šaldomajame tūryje, kai ventiliatorius pakreiptas 105 laipsnių kampu

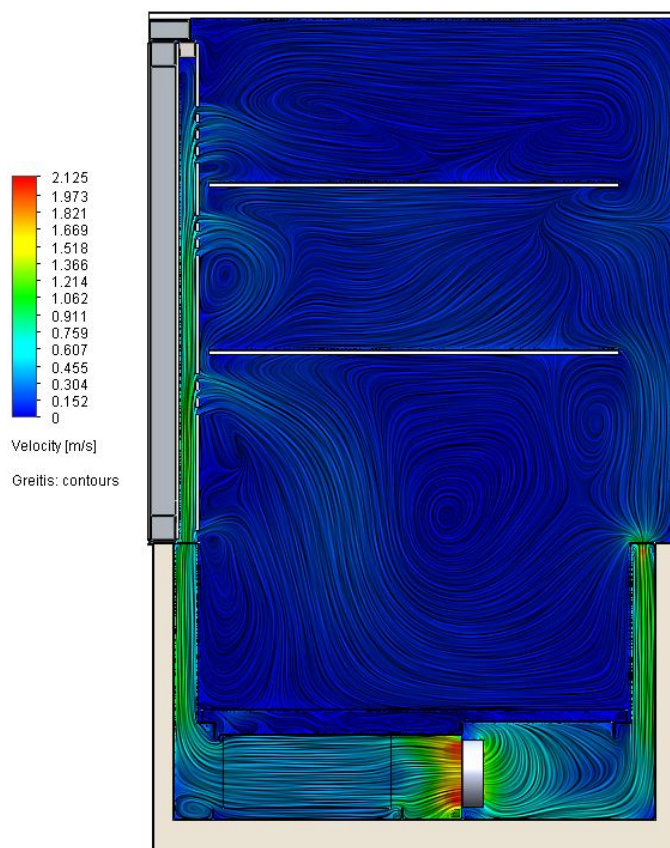


12 pav. Greičio pasiskirstymas šaldomajame tūryje, kai ventiliatorius pakreiptas 105 laipsnių kampu





13 pav. Temperatūros pasiskirstymas šaldomajame tūryje, kai ventiliatorius pakreiptas 90 laipsnių kampu



14 pav. Greičio pasiskirstymas šaldomajame tūryje, kai ventiliatorius pakreiptas 90 laipsnių kampu